T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PİEZOELEKTRİK YAMALI AKILLI PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Hazırlayan
Vahdet Mesut ABACI

Danışman
Doç. Dr. Recep EKİCİ

Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2018
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PİEZOELEKTRİK YAMALI AKILLI PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Hazırlayan
Vahdet Mesut ABACI

Danışman
Doç. Dr. Recep EKİCİ

Yüksek Lisans Tezi

Ocak 2018
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Vahdet Mesut ABACI

İmza: 

YÖNERGEYE UYGUNLUK

"Piezoelektrik Yamalı Akıllı Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Serbest Titreşim Analizi ve Aktif Titreşim Kontrolü" adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Vahdet Mesut ABACI

Danışman

Doç. Dr. Recep EKİCİ

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

Doç. Dr. Recep EKİCİ danışmanlığında **Vahdet Mesut ABACI** tarafından hazırlanan **"Piezoelektrik Yamalı Akıllı Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi Ve Aktif Titreşim Kontrolü"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

19/01/2018

JÜRİ:

Danışman	: Doç.Dr. Recep EKİCİ
Üye	: Prof.Dr. Zeynep Gül APALAK
Üye	: Doç.Dr. Yusuf CÜNEDİOĞLU

ONAY:
Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13/02/2018 tarih ve 2018/08-09 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

13 / 02 / 2018

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın şekillenmesi ve tamamlanmasında büyük emeği ve desteği olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Recep EKİCİ' ye sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan ve desteklerini eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Vahdet Mesut ABACI

Kayseri, Ocak 2018

PİEZOELEKTRİK YAMALI AKILLI PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Vahdet Mesut ABACI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2018
Danışman: Doç. Dr. Recep EKİCİ

ÖZET

Bu çalışmada, Al 6061/SiC partikül takviyeli metal-matrisli kompozit (PTMMK) kirişlerin partikül hacmi oranı, boyutu ve rasgele dağılımı gibi mikro-yapısal parametrelerinin serbest titreşim tepkileri ve aktif titreşim kontrolü üzerindeki etkileri Sonlu elemanlar metodu (SEM) vasıtasıyla incelenmiştir. Bu amaçla, sayısal partikül takviyeli metal matris kompozit kiriş numuneleri üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar modeli kullanılarak modellenmiş ve kübik şekilli takviye üç boyutlu SiC partikülleri, gerçek bir mikroyapıya benzer şekilde Al 6061 metal matris içerisinde rasgele dağıtılmıştır. Mikro-yapısal özelliklerin mod şekilleri üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Partikül boyutu ve özellikle hacim oranı akıllı PRMMK' lerin doğal frekansları üzerinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, rastgele partikül dağılımı, akıllı PRMMK' lerin doğal frekansları üzerinde küçük etkilere sahiptir. Geri besleme kontrol kazancının artmasıyla hem titreşim genliği hem de sönümleme zamanı oldukça azalmıştır. Partikül hacim oranının arttırılması hem kontrollü hem de kontrolsüz sönümlenmiş titreşimlerin sönümleme zamanında ve titreşim genliğinde önemli bir düşüşe neden olmuştur. Bununla birlikte, partikül boyutunun arttırılması titreşim sönümleme kapasitesini düşürmüş ve titreşim genliğini ve süresini hafifçe arttırmıştır. Rasgele partikül dağılımı sadece kontrolsüz titreşimler üzerinde minimal bir etkiye sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Partikül takviyeli metal-matrisli kompozitler, Sonlu elemanlar analizi, Akıllı malzemeler, Titreşim kontrolü, Serbest titreşim analizi.

FREE VIBRATION ANALYSIS AND ACTIVE VIBRATION CONTROL OF PIEZOELECTRIC PATCHED SMART PARTICLE REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M. Sc. Thesis, January 2018
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep EKİCİ

ABSTRACT

In this study, the effects of micro-structural parameters such as particle volume fraction, size and random distribution of Al 6061/SiC particle reinforced metal matrix composite (PRMMC) beams on the free vibration responses and the active vibration control were investigated by using Finite element method (FEM). For this purpose, numerical particle reinforced metal-matrix composite beam specimens were modeled with 3D finite elements, and the cubic-shaped reinforcing SiC particles were randomly distributed in Al 6061 metal matrix similar to an actual microstructure. Micro-structural properties had no a certain effect on the mode shapes. The particle size and especially volume fraction play an important role on the natural frequencies of the smart PRMMCs. However, the random particle distribution has minor effects on the natural frequencies of the smart PRMMCs. With the increase of the feedback control gain, both the vibration amplitude and the suppression time are reduced reasonably. Increasing the particle volume fraction induces an important reducing in the damping time and the vibration amplitude for both the controlled and uncontrolled damped vibrations. However, increasing the particle size decreases the vibration suppression capacity and increases the vibration amplitude and time slightly. Random particle distribution had a minimal effect only on the uncontrolled vibrations.

Keywords: Particle reinforced metal-matrix composites, Finite element analysis, Smart materials, Vibration control, Free vibration analysis.

İÇİNDEKİLER

PİEZOELEKTRİK YAMALI AKILLI PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
YÖNERGEYE UYGUNLUK ii
ONAY iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
TABLOLAR LİSTESİ ix
ŞEKİLLER LİSTESİ x
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Titreşimin Tanımı 4
1.2. Titreşim Kontrolü 6
1.3. Akıllı Malzemeler ve Yapılar 7
1.3.1. Piezoelektrik Malzemeler 9
1.3.2. Fiber Optik 10
1.3.3. Şekil Hafızalı Alaşımlar 10
1.3.4. Piroelektrik Malzemeler 11
1.3.4.1. En Yaygın Piroelektrik Malzemeler 11
1.3.5. Elektroreolojik ve Magnetoreolojik Sıvılar 12
1.3.5.1. Elektroreolojik Sıvılar 12
1.3.5.2. Magnetoreolojik Sıvılar 12
1.3.6. Elektrostriktif ve Magnetostriktif Malzemeler 12
1.3.6.1. Elektrostriktif Malzemeler 12
1.3.6.2. Magnetostriktif Malzemeler 12
1.3.7. Diğer Yapılar 13
1.4. Piezoelektrik Malzemelerin Pratik Uygulamaları 13

1.5. Metal Matrisli Kompozitler 14
1.6. Metal Matrisli Kompozitlerin Pasif Titreşim Kontrolünde Kullanımı 16
1.7. Literatür Araştırması 17

2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Piezoelektrik Konsepti 28
2.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Temel Davranışları ve Yapıları 29
2.1.1.1. Hareketin Dinamik Denklemleri 31
2.1.1.2. Sensör eşitlikleri 32
2.1.1.3. Aktif Titreşim Kontrolü 33
2.1.2. Piezoelektrik Sabitler 34

3. BÖLÜM

SERBEST TİTREŞİM ANALİZLERİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

3.1. Serbest Titreşim Analizleri 35
3.2. Aktif Titreşim Kontrol Analizleri 40

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Giriş 50
4.2. Sonuçlar 51
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 59

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. PZT-5H, Al 6061 ve SiC' ün özellikleri. 28
Tablo 3.1. Akıllı PTMMK' lerin SEM ile serbest titreşim analizinden elde edilen doğal frekansları. 39
Tablo 3.2. Takviyesiz kirişin G kazanç oranındaki değişime göre sönümlenme süreleri. 44
Tablo 3. 3. G kazanç oranı ve takviye oranına göre sönümleme sürelerindeki değişim. 48

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Adaptif optiklerde atmosferik türbülans düzeltimi işleminin prensibi..... 7
Şekil 1.2. Akıllı yapı' nın kavramsal tanım ve şeması..... 8
Şekil 1.3. Akıllı yapıların ve zeki yapıların diyagramı. 9
Şekil 1.4. MMK' lerde kullanılan değişik tipteki takviye malzemelerinin şematik gösterimi..... 16
Şekil 2.1. Yüzeyine piezoseramik sensör/aktüatör çifti monte edilmiş akıllı PTMMK kirişin geometrisi ve boyutları. 26
Şekil 2.2. Akıllı PTMMK kirişin mesh' lenmiş FEM modeli. 26
Şekil 2.3. V_f = %10 hacim oranına sahip Al 6061 metal matrisli kompozit kiriş içinde partiküllerin rasgele dağılımı. 27
Şekil 2.4. Aksiyel yapıda (piezoseramikler vb.) piezoelektrik etkinin gösterimi 29
Şekil 2.5. Tabakalı yapıda (polimerik piezoelekrik malzemeler vb.) piezoelektrik etkinin gösterimi..... 30
Şekil 2.6. Akıllı PTMMK kirişe bağlanmış piezoelektrik sensör / aktüatör çifti için geri besleme şemasının konfigürasyonu. 33
Şekil 2.7. Kristalografik eksenlerin şematik gösterimi ve deformasyon yönleri (1-3 normal..... 34
Şekil 3.1. Takviyesiz akıllı Al 6061 kirişinin ilk sekiz doğal frekansı ve mod şekli. 36
Şekil 3.2. PTMMK kirişlerin (a) P_s=250 μm ve V_f=%10 çözüm 1, (b) P_s=250 μm ve V_f=%10 çözüm 2, (c) P_s=250 μm ve V_f=%30, (d) P_s=500μm ve V_f= %30 için ilk 8 mod şekilleri. 38
Şekil 3.3. (a) ilk titreşim modu ve (b) son titreşim modu için akıllı PTMMK' lerin doğal frekansları üzerinde partikül boyutu ve hacim oranının birleşik etkisi. 40
Şekil 3.4. Akıllı PTMMK' lerin doğal frekansı üzerinde mod sayısının (a) hacim fraksiyonu (sabit P_s = 250 μm) ve (b) partikül boyutu (sabit V_f = 0.2) ile birleşik etkisi. 40
Şekil 3.5. PTMMK kirişlere uygulanan uyarım kuvvetinin (F_0) değişimi..... 42
Şekil 3.6. Uyarım kuvvetinin PTMMK kirişin serbest kenarındaki uygulanma yeri (Fp noktası). 42

Şekil 3.7. Farklı geribesleme kontrol kazançlarına (G) göre PTMMK yapının enine uç yer değiştirme ve aktüatör..... 44
Şekil 3.8. Kontrollü ve kontrolsüz durumlar için akıllı PTMMK kirişlerin enine uç yer değiştirmelerinin..... 46
Şekil 3.9. Kontrollü durumda P_s = 250 ve 500 μm partikül boyutlarına sahip akıllı PTMMK kirişlerin (a) V_f = %10 ve (b) V_f = %30 hacim oranları için enine uç yer değiştirmelerinin karşılaştırması..... 48
Şekil 3.10. Rasgele partikül dağılımının etkileri: dağılımının etkileri: (a) Kontrolsüz durum için ve (b) kontrollü durum için P_s = 250 μm partikül boyutu ve V_f = %10 hacim oranlı PTMMK kirişin enine uç yer değiştirmesi. 49

GİRİŞ

Son yıllarda, partikül takviyeli metal matrisli kompozitler (PTMMK) uzay, otomotiv ve askeri uygulamalar gibi önemli endüstriyel alanlar için popüler yapısal malzemeler olarak ortaya çıkmışlardır. PTMMK' ler, seramik takviye partiküllerinin yüksek sağlamlık ve mukavemeti ile metal matrisin tokluğu ve sünekliğine bağlı olarak üstün mekanik özellikler sergilerler [1-5]. Bu kombinasyon, PTMMK' lere çok iyi termal kararlılık, mükemmel aşınma direnci, ağırlık tasarrufu ve gelişmiş sönümleme kapasitesi gibi bazı benzersiz özellikler kazandırmaktadır.

Sönümleme kapasitesi; bir malzemenin istenmeyen gürültü ve mekanik titreşimleri pasif olarak absorbe etme ve azaltma kapasitesi olarak tanımlanır. Mekanik titreşim sönümlemede yapısal denge ve performans artırmak için yüksek sönümleme kapasitesine sahip mühendislik malzemeleri istenir. Yapısal metaller ve alaşımlar genellikle düşük sönümleme kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla mekanik yapılardaki uygulamaları ve performansları sınırlıdır. Birçok deneysel çalışmada, partikül takviyesinin metal matrise eklenmesinin sönümleme kapasitesini arttırdığı bildirilmiştir [6-17]. Bununla birlikte, malzeme sönümlemesi, kontrol edilemeyen mekanik titreşimlerden kaynaklanan rezonans hasarlarına karşı PTMMK uygulamalarında yapıyı belli bir seviyeye kadar koruyabilir. Bu nedenle, genellikle, diğer yapısal malzemelerden gelen titreşimleri absorbe etmek ve dağıtmak için harici cihazlar (sensörler, aktuatörler, vb.) kullanan aktif kontrol yöntemleri ile oldukça verimli bir titreşim sönümleme işlemi yapılabilir.

Yüzeylerinde yapıştırılmış halde ya da içlerinde gömülmüş halde sensör ve aktuatörler ihtiva eden, algılama ve düzeltici eylem yapma yeteneğine sahip yapılara akıllı yapılar denir [18-20]. Akıllı yapıların titreşim ve gürültü kontrolü, aero-elastik kararlılık, sönümleme gibi geniş bir uygulama alanı vardır. Akıllı yapılar, entegre aktüatör ve sensör elemanları sayesinde konvansiyonel yapılardan ayırt edilirler. Akıllı bir

sistemdeki pasif yapı yük taşıyan kısımdır, aktif malzeme kısmı ise algılama ve çalıştırma işlemlerini gerçekleştirmektir. Sensörler ve aktüatörler esnek pasif yapı üzerine monte edilebilir ya da içine gömülü olarak yerleştirilebilir. Sensörler; yer değiştirmeler, gerginlikler veya ivmelenmelerdeki değişiklikler yoluyla yapının mekanik tepkisini izlemek için kullanılır. Aktüatörler bu değişikliklere tepki verir ve buna göre yapının kabul edilebilir bir duruma gelmesi için mekanik bir tepki üretir [20-23]. Akıllı yapılarda kullanılabilen bir dizi farklı malzeme arasında yalnızca piezoelektrik malzemeler, sensör veya aktüatör veya hem aktüatör ve hem de sensör olarak etkili bir şekilde kullanılabilecek eşsiz özelliğe sahiptir. Piezoelektrik malzemeler doğrudan piezoelektrik etki (mekanik gerilmelere yanıt olarak elektrik alanı oluşturma) ve tersine piezoelektrik etki (mekanik gerilme, bir elektrik alanının sonucu olarak üretilir) gösterir [18,23,24].

Piezoelektrik seramikler, bazı çalışmalarda polimer kompozitlere takviye olarak kullanılmıştır [25-27]. Bu tip imalatın en önemli amacı özellikle titreşim kontrolü uygulamaları için kontrollü piezoelektrik özelliklere sahip malzemeler elde etmektir. Ferroelektrik seramik partikülleri metalik matriste dağıldığında, metalik matris sistemleri ferroelektrik seramik partiküllerin polarize edilememesine neden olur [28]. Bu nedenle, bazı kritik uygulamalarda kullanılan partikül takviyeli metal matris kompozitlerinin titreşimlerinin kontrolü amacıyla aktif titreşim kontrolünün gerçekleştirilmesi önem kazanmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunun (SEM) birçok kompleks yapının modellenmesi ve analizinde etkili bir teknik olduğu yıllarca kanıtlanmıştır. Ayrıca, çeşitli akıllı malzemelerin birleştirilmiş elektro-mekanik tepkisi ile ilgili çalışmalarda SEM kullanılabilir ve uygulamadaki akıllı yapıların sensör ve aktüatör işlevleri SEM tekniği ile simüle edilebilir [29]. Bununla birlikte, PTMMK' lerin mümkün olduğunca gerçek bir mikro yapı ile modellenmesi, titreşim ve gürültü gibi mekanik ve dinamik davranışların analizi ve karakterizasyonu için çok önemlidir. Çünkü, PTMMK' lerin mekanik ve dinamik davranışlarının hacim oranı, boyut, geometri, dağılım ve takviye partiküllerin matris içindeki yönelimi gibi mikro yapısal parametrelerden etkilendiği iyi bilinmektedir [30].

Teorik malzeme modellerine dayanan sonlu elemanlar simülasyonları, analizleri minimum hesaplama maliyetiyle birçok kez tekrarlamayı ve incelenen materyalle ilgili parametreleri analizlerde test etmeyi mümkün kılar. Literatür araştırmasında, PTMMK' lerin titreşim karakterlerinin modellenmesi ve aktif titreşim kontrolü ile ilgili teorik bir çalışma bulunamamıştır. Bununla birlikte, PTMMK' ler kısmen veya tamamen birçok mühendislik yapısının imalatında kullanılır ve PTMMK' lerin titreşim özellikleri bu yapıların ürün kalitesinde ve dinamik kararlılığında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, Alüminyum 6061 esaslı SiC (Silicone Carbide) partikül takviyeli metal matris kompozitlerin (PTMMK) partikül hacim oranının, boyutunun ve rastgele dağılımının titreşim tepkileri üzerindeki etkilerini SEM analizleri yoluyla araştırmaktadır. PTMMK' ler gerçek mikro-yapılarına uygun şekilde üç boyutlu (3D) olarak modellendi ve 3D takviyeli partikülleri 3D metal matrisi içerisinde rasgele dağıtıldı. İlk olarak, takviye partiküllerinin boyutu, hacim oranı ve rastgele dağılımının mod şekilleri ve doğal frekanslar üzerindeki etkisini belirlemek için serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Ardından, kapalı döngü geri bildirim kontrol yasası SEM modellerine dahil edilerek akıllı PTMMK kirişlerde sönümlü serbest titreşimin aktif kontrolü, arttırılmış sensör çıkış gerilim geri beslemeleri kullanılarak sağlanmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Titreşimin Tanımı

Titreşimin tanımı Britannica Ansiklopedisi' nde: " Partiküllerin, elastik bir yapı ya da ortamda periyodik olarak yaptıkları ileri ve geri hareketlerdir [31]" olarak, Wikipedia' da ise: "Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır [32]" olarak tanımlanmıştır.

Titreşim çoğu zaman istenmeyen bir şey olsa da kimi makine ya da yapılar için çalışma şartı da olabilmektedir. Bir müzik aletinde, kulak zarı gibi bir organda, bir zilde, titreşim motoru vasıtasıyla çalışan endüstriyel bir elekte ve daha birçok yerde titreşim bir girdi ya da bir çıktı olarak olumlu bir şekilde kullanılır. Ancak bir fan yatağında, otomobil veya benzeri bir araçta, bir uçak ya da helikopterin pervanesinde, bir binada, bir köprüde yani akla gelecek birçok yerde titreşim makine, yapı ve insan sağlığı için ciddi bir sorun oluşturmaktadır.

Titreşim tüm sistemlerin ve yapıların en büyük sorunlarından biridir. Bu sorunu aşmak için yaylar, kauçuk takozlar, hava yastıkları gibi çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemler pasif titreşim kontrolü yöntemleridir ve halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise araştırmalar titreşim sorununu daha etkin bir şekilde çözüme kavuşturmayı amaçlayan aktif titreşim kontrolü yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Makineler; evde kullanılan elektrikli süpürgelerden tutun da endüstride kullanılan imalat makinelerine kadar hayatın her alanında yer almaktadır. Bir makine arızalandığında ya da bir makine parçası kırıldığında bunun sonucu maddi hasardan yaralanmalı ya da ölümlü kazalara kadar birçok şey olabilir.

Titreşime neden olabilecek durumlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

1. Hareket yönündeki değişim ve düzensizlikler; örneğin balanssız dönen cisimlerin neden olduğu titreşimler.

2. Genlik ya da yoğunluğun zaman içindeki değişiminden kaynaklanan titreşimler; örneğin indüksiyon motorunun içindeki motor armatürü ve stator arasındaki hava boşluğunun çevresel olarak eşit olmamasından kaynaklanan dengesiz manyetik güç.

3. Biri hareketli biri sabit sistemler arasında veya ikisi de hareketli olan sistemler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan titreşimler; örneğin reçine sürülmüş bir keman yayının kemanın teline sürüldüğü zaman oluşan titreşim.

4. Darbeler; örneğin dişlilerin dönerken birbirlerine temas anı ya da rulman bilyelerindeki hasarların dönme sırasında oluşturduğu darbelerden kaynaklanan titreşimler.

5. Rastgele üretilen kuvvetlerin neden olduğu titreşimler; örneğin akışkan kullanılan sistemler (fanlar, kompresörler, pompalar...).

Titreşimin sistemlerde yaygın olarak neden olduğu bazı sorunlar;

1. Kaplin, rulman ve dişlilerde oluşabilecek eksenel kaçıklıklar.

2. Dönen sistemlerde oluşabilecek balanssızlıklar.

3. Sistem bileşenlerinde (civata, vida...) oluşabilecek gevşemeler.

4. Dönen parçaların yataklarında oluşabilecek hasarlar.

5. Dişlilerde oluşabilecek aşınmalar.

6. Sürtünmeler.

7. Fanlar, kompresörler ve pompalarda oluşabilecek aerodinamik veya hidrolik sorunlar.

8. Motorlarda oluşabilecek elektriksel sorunlar (balanssız manyetik kuvvetler).

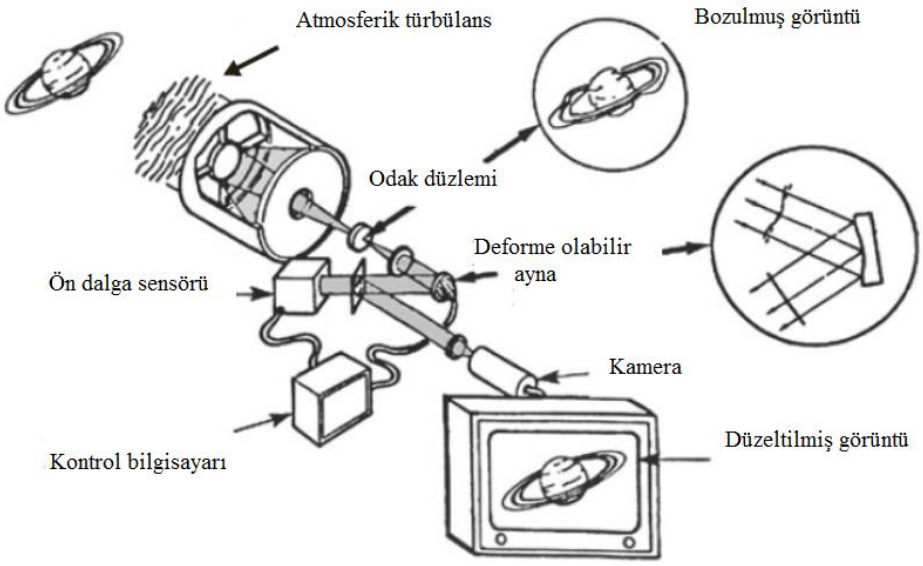
9. Rezonans.

10. Karşılıklı dönen parçalarda eksantriklik oluşması; örneğin kayış kasnakları veya dişliler. [33]

1.2. Titreşim Kontrolü

Titreşimi tamamen yok etmek imkansız olsa da sistemleri etkilemeyecek seviyeye indirmek için bir çok yöntem geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bu yöntemler iki ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bunlardan biri pasif titreşim kontrolü, diğeri ise aktif titreşim kontrolüdür. Pasif titreşim kontrolü yaylar, lastik takozlar gibi basit yapıların kullanıldığı sistemler iken aktif titreşim kontrolü akıllı malzemelerin kullanıldığı sistemler ile yapılır.

Hassas bir yapının değişken termal koşullara maruz kaldığını farz edelim; eğer ki dikkatli bir şekilde tasarlanmamışsa, termal geçişler sonucunda çarpılacaktır. Bu durumu önlemenin bir yolu yapıyı termal açıdan stabil olan kompozit bir malzemeden yapmaktır; bu pasif yaklaşımdır. Alternatif bir yol ise geri besleme döngüsüne bağlı bir dizi aktüatör ve sensör kullanmaktır; bu da aktif yaklaşımdır. Koşullara bağlı olarak aktif yapılar pasif yapılara göre eşit performans sergileme durumlarında daha ucuz ya da daha hafif olabilirler; ya da hiçbir pasif yapının sergileyemeyeceği kadar üstün performans sunabilirler. Bir süre öncesine kadar atmosferik türbülans' ın dünya üzerindeki teleskopların çözünürlüğü ile ilgili ciddi bir sınırlama oluşturduğuna dair genel bir inanç vardı. Bu durum Hubble Uzay Teleskopu' nun geliştirilmesinin ana nedenlerinden biriydi. Günümüzde, atmosferik türbülansların gökcisimlerinden gelen optik dalga cephesinde oluşturduğu bozuklukları gerçek zamanlı olarak düzeltmek mümkündür. Bu durum bize teleskopların nihai çözünürlüklerini geliştirebilme imkanı verir. Bu düzeltme, deforme olabilen bir aynaya akuple edilmiş bir aktuatör sayesinde olur (Şekil 1.1). Bir ön dalga sensörü, türbülans ön dalgasındaki faz farkını algılar ve kontrol bilgisayarı aracılığıyla hatayı düzeltmek için gerekli olan deformasyon ayna üzerinde sağlanır. Günümüzde uyarlanabilir optik teknolojisi yeryüzünde yapılan astronomi faaliyetleri için standart bir özellik haline gelmiştir.



Şekil 1.1. Adaptif optiklerde atmosferik türbülans düzeltimi işleminin prensibi [34].

Mekanik titreşimler metre (inşaat mühendisliğinde) ile nanometre (hassas mühendislik) arasında bir genliğe sahiptir. Sistemler üzerindeki zarar verici etki farklı şekillerde olabilir:

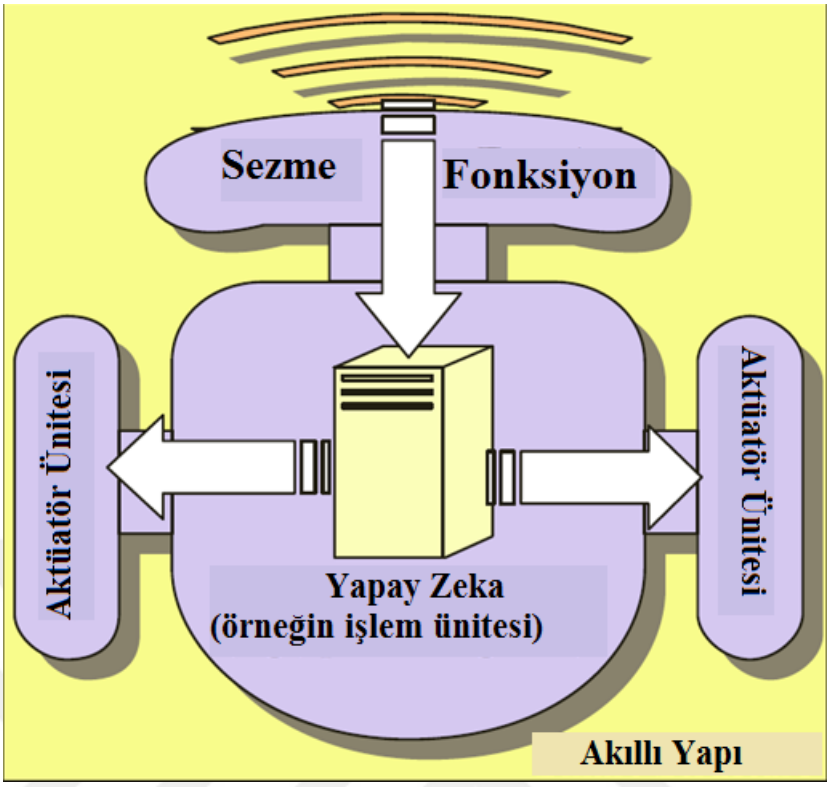
Hata: titreşim kaynaklı hatalar geçici oluşan aşırı yüklemeler sırasında oluşabilir (depremlerin binalara verdiği zararlar gibi), değişken durumlardan kaynaklanabilir (rüzgar etkisi altında köprüler gibi) ya da basitçe yorulma kaynaklı olabilir (makine parçaları gibi).

Konfor: titreşimin konfor üzerindeki zararlı etkilerine verilebilecek çok sayıda örnek vardır: helikopterlerdeki gürültü ve titreşim, araba süspansiyonu, binalardaki rüzgar kaynaklı sallanmalar.

Hassas cihazlara etkileri: mekanik titreşimler hassas sistemler üzerinde (özellikler optik sistemler) çok ciddi kısıtlamalara neden olmaktadır [34].

1.3. Akıllı Malzemeler ve Yapılar

Akıllı yapılar teriminin nerdeyse tüm mühendislik ya da bilim disiplinlerinde farklı tanımı vardır. Birçok tanım olmasına karşın en çok kabul gören tanıma göre akıllı yapı; hem yaşamsal özellikleri hem de yapay zekayı bir arada barındıran yapılardır.



Şekil 1.2. Akıllı yapı' nın kavramsal tanım ve şeması [35].

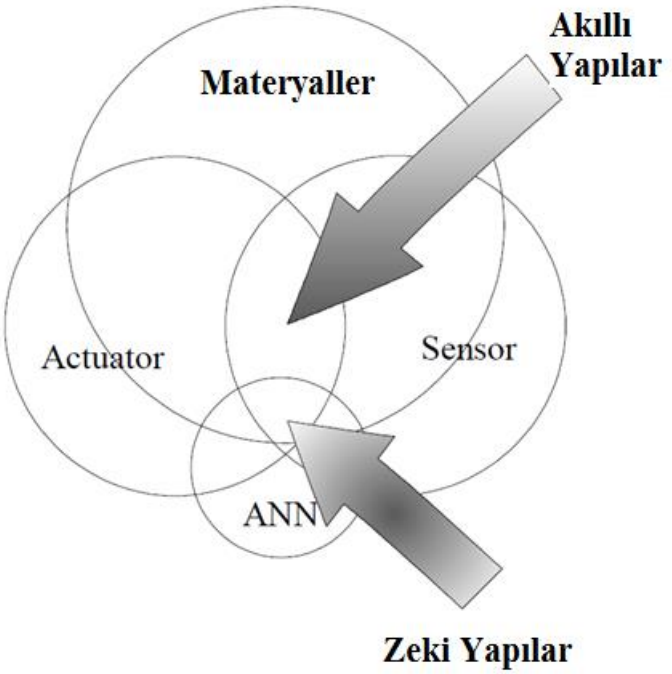
Yaşamsal özellikler yapının sezme ve aktüatör fonksiyonlarına sahip olması kavramları ile ilgilidir. Öyle ki bu özellikler yaşayan tüm varlıklarda mevcuttur. Bu iki özellik yapının doğasında (malzeme özelliğinden dolayı) ya da sonradan kazandırılmış olabilir [35].

Akıllı bir yapı ya da sistem sensörler ve aktuatörler içerir. Bu akıllı yapının bir şekilde çevresini sezmesini ve uygun bir şekilde tepki vermesini sağlar. Tipik akıllı yapılar ya da akıllı malzeme sistemleri bir gereklilik olmamasına rağmen kompozittir [36].

Tipik bir akıllı yapı, bir ya da daha fazla aktif (ya da fonksiyonel) materyal içerir. Bu sayede; mekanik, elektrik, optik, manyetik, termal, kimyasal gibi alanlarda işlevsellik sağlanır. Bu malzemeler; şekil değiştirme, dış uyaranlara yanıt verme ve fiziksel, geometrik ve reolojik (cisimlerin yük, şekil değiştirme ve zaman faktörleri altındaki davranışlarını inceleyen özel bir bilim dalı) özelliklerini değiştirme yeteneğine sahiptir [35].

Akıllı yapıların (smart structures) benzeri bir başka sistem ise zeki yapılar (intelligent structures) olarak tanımlanan yapılardır. Bu yapılar akıllı yapıların sahip olduğu

önceden programlanmış yanıtlara ek olarak öğrenme ve uyarlama yeteneğine de sahiptir. Bu öğrenme ve uyarlama yeteneği akıllı yapının içine bir yapay sinir ağı (artificial neural network (ANN)) eklenmesi ile sağlanır [36].



Şekil 1.3. Akıllı yapıların ve zeki yapıların diyagramı [36].

Akıllı yapılar sensör ya da aktüatörün tipine göre kategorize edilebilir. En çok kullanılan akıllı malzemeler; piezoelektrik, fiberoptik, şekil hafızalı alaşımlar, elektro reolojik akışkanlar ve elektrostriktif malzemeler, magnetostriktif malzemeler ve diğer elektrik yönelimli malzemelerdir [36].

1.3.1. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler seramik ya da polimerik esaslı malzemelerdir. Bu yapılar elektrik sinyallerini mekanik harekete çevirirler. Aynı zamanda bunun tam tersini, yani mekanik hareketi elektrik sinyallerine çevirme özelliğine de sahiptirler. Eğer piezoelektrik cihaza bir elektrik sinyali uygulanırsa, malzemenin şekli değişir (genellikle uzunluğu). Aynı şekilde cihazdaki mekanik deformasyon, elektrik sinyali üretmesine neden olacaktır. Bundan dolayı, piezoelektrik cihaz bulunduğu yapıdaki değişiklikleri sezebilir ve buna bağlı olarak elektrik sinyali üreterek yapının karakteristiğini değiştirebilir.

- Avantajları: Seramik cihazlar; hem sensör hem de aktüatör olarak kullanılabilir. Ayrıca hızlı bir tepki süreleri vardır.

- Dezavantajları: Seramik cihazlar kırılgandır. Ayrıca deforme aralıkları çok küçüktür, bu da büyük şekil değiştirmelerde sezme ya da kontrol kabiliyetlerini sınırlar. Ayrıca bazı yapılarda elektrikli cihazlar kullanılamaz, bu da piezoelektrik donanım kullanımını engeller. Başka bir sorun ise; bazı yapılar üzerinde istenen sonucu alabilmek için çok fazla piezoelektrik cihaz yerleştirme ihtiyacı olması.

1.3.2. Fiber Optik

Bunlar telekomünikasyonda kullanılan fiber optik kablolara benzerdir. Kompozit bir yapıya entegre edildiklerinde, bu cihazların çıkış optik sinyalleri çevre koşullarına bağlı olarak değişir. Örneğin yapı hareket ederse fiber optiğin çapı değişir, böylece frekans, faz, genlik, polarizasyon gibi özelliklerin değişimiyle optik sinyal değişir. Bu yapılarla tespit edilebilecek diğer çevresel değişimler; sıcaklık, basınç, ivme, akustik, kimyasal bileşim, radyasyon, akış ve sıvı seviyesidir.

- Avantajları: Fiber optik cihazlar pek çok farklı etkiyi sezebilir. Kompozitlerle çok uyumludurlar, çünkü her ikisi de fiberdir. Bu cihazlar hem genel, hem de lokal değişimleri sezebilir. Ayrıca elektro manyetik parazitlere karşı çok dayanımlıdır.

- Dezavantajları: Fiberler çok kırılgandır (buna karşın bazı polimerik optik fiberler bu sorunu çözmüştür). Ayrıca bu cihazlar sadece sensör olarak kullanılabilir [36].

1.3.3. Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil hafızalı alaşım terimi, uygun ısıl ve mekanik prosedürlere maruz kaldığında önceden tanımlı şekil veya boyutuna geri dönebilme yeteneği gösteren metalik malzeme grupları için kullanılır. Şekil hafızalı alasımlar kararlı iki faza sahiptir. Bu fazlar ostenit olarak isimlendirilen yüksek sıcaklık fazı ve martenzit olarak isimlendirilen düşük sıcaklık fazıdır. Sekil hafızalı alasımlar; birkaç yüzde değerinde tersinebilir gerilme,

yüksek toparlanma gerilmesi üretimi ve yüksek güç/ağırlık oranı gibi çekici potansiyel özellikler sunar[37].

Bu malzemeler akıllı yapılarda aktüatör olarak kullanılır.

- Avantajları: Şekil hafızalı alaşımlar yüksek kuvvet uygulayabilir ve yüksek gerilimler üretebilir. Ayrıca şekil hafızalı alaşımlar sünektir, bu yüzden darbelere karşı dirençlidir.

- Dezavantajları: Şekil hafızalı alaşımlar değişiklikleri algılama konusunda iyi değildirler. Bu malzemeler sadece sıcaklık değişimlerine karşı hassastır, bu yüzden sıcaklığın yavaş değiştiği durumlarda hızlı bir tepki vermesi olanaksızdır. Ayrıca bu malzemeler çabuk yorulurlar ve düşük verimliliğe sahiptirler [36].

1.3.4. Piroelektrik Malzemeler

Piezoelektrik materyallerde sıcaklık değişimi elektriksel polarizasyona neden olabilir, bu nedenle elektrik ve mekanik özellikler akuple olabilir. Bu durum "piroelektrik" olarak adlandırılır ve sıcaklık değişimine tepki olarak kristallerin anlık bir polarizasyonu olarak tanımlanır. Aynı zamanda bu malzemeler "termopiezoelektrik" malzemeler olarak adlandırılır. Bu nedenle tüm piroelektrik malzemeleri piezoelektrik malzemelerin bir alt grubu olarak tanımlamak uygun olur.

1.3.4.1. En Yaygın Piroelektrik Malzemeler

Yaygın olan piroelektrik malzemeler; triglisin sülfat, stronsiyum baryum niobat, lityum tantalat, PVDF ve kurşun zirkonat tabanlı seramik malzemeler içerir. Piezoelektrik malzemelere benzer olarak, ters piroelektrik özellik elektrik alan kullanarak sıcaklık farkının oluşturulmasıdır. Bu özellik "Elektrokalorik" etki olarak adlandırılır. Bu değişim çoğu piroelektrik malzeme için çok küçük olsa da Rochelle tuzu gibi bazı malzemeler için dikkate değerdir. Piroelektrik tabanlı yapılar ve cihazlara sıcaklık ölçümü ve kızılötesi algılama uygulamalarında rastlanılabilir.

1.3.5. Elektroreolojik ve Magnetoreolojik Sıvılar

1.3.5.1. Elektroreolojik Sıvılar

Elektroreolojik (ER) sıvılar elektrik potansiyele maruz bırakıldığında malzeme özelliklerinde geri dönüşlü anlık değişim olan malzemelerdir. En önemli değişiklik, malzemenin karmaşık kesme modülleri ile ilişkilidir ve dolayısıyla, ER akışkanlar değişken sönüm oranlı birçok yarı aktif titreşim kontrol sisteminde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, elektrik alanı uygulanmasıyla polarize olabilen ve kendilerini hizalayabilir mikron boyutlu parçacık ihtiva eden süspansiyonlar içerir.

1.3.5.2. Magnetoreolojik Sıvılar

Magnetoreolojik (MR) sıvılar ER akışkanların manyetik analoglarıdır ve tipik olarak mineral ya da silikon yağ gibi taşıyıcı ortamlarda manyetik olarak polarize olabilen mikron boyutlu parçacıklar ihtiva ederler.

1.3.6. Elektrostriktif ve Magnetostriktif Malzemeler

1.3.6.1. Elektrostriktif Malzemeler

Elektrostriktiflik, elektrik alanı vasıtasıyla oluşturulan mekanik zorlanmalardan kaynaklanır. Aslında hem elektrostriktiflik hem de piezoelektrik olaylı ferroelektrik malzemelerle ilgilidir. Elektrostriktiflik tipik olarak dielektrik materyallerde güçlü piezoelektrik etkiden dolayı mevcuttur, bununla birlikte gerilmenin boyutu çok küçüktür ve kullanışlı değildir. Bu nedenle birincil etki olan piezoeletrik etki, ikincil etki olan elektrostriktif etkiyi maskeler.

1.3.6.2. Magnetostriktif Malzemeler

Magnetostriktif malzemeler, elektrostriktif malzemelerin manyetik analoglarıdır. Manyetostriktif özellik (manyetik olarak uyarılmış gerilim) ve onun tersinir etkisi gerilim ile uyarılmış manyetiklik; atomlar arası aralık ve manyetik moment yönelimi arasındaki bağlantıdan kaynaklanmaktadır. Manyetostriktif maddeler atom yapısında manyetik anizotropiye sahiptir [35].

1.3.7. Diğer Yapılar

Akıllı yapılarda kullanılmak üzere bulunmuş ve geliştirilmiş başka malzemelerde vardır. Bunlardan bazıları elektroreolojik akışkanlar (değişen elektrik alanına bağlı olarak viskozitesi değişen akışkanlar, genellikle sönümlemede kullanılır) ve geleneksel sensör ve aktüatörlerin çeşitli kombinasyonlarıdır [36].

1.4. Piezoelektrik Malzemelerin Pratik Uygulamaları

Piezoelektrik özellik malzemede doğal ya da sonradan kazandırılmış bir özellik olarak bulunabilir. Kuartz, rochelle tuzu, amonyum fosfat, kemik ve hatta ahşap doğal piezoelektrik malzemelerin bazılarıdır. Yapay piezoelektrik malzemelere örnek ise: kurşun zirkonat titanat ($PbZrTiO_3$–$PbTiO_3$, PZT olarak da bilinir), baryum titanat, baryum stronsiyum titanat, (BaSTO), kurşun lantan zirkonat titanat (PLZT),lityum sülfat, polivinilidin florid (PVDF) ve PVDF kopolimerleridir (Tzou et al. 2004). Ham sentetik piezoelektrik malzemelerin çoğu doğal izotropiktir ve piezoelektrik özelliği kazandıracak dipol etkiye sahip değildirler. Dolayısıyla, malzemeye bu etkiyi kazandırmak için "Polling" adı verilen, malzemenin moleküler dipollerini hizalayacak güçlü bir elektrik alana maruz bırakılır.

Yapısal olarak piezoelektrik malzemeler seramik ve polimerik olarak ikiye ayrılabilir. En popüler piezoelektrik seramikler; özel uygulamalar için zirkonat-titanat oranının değiştirilerek optimize edilebilme özelliğinden dolayı PZT' nin bileşikleridir. Mekanik özellikleri sayesinde bu malzemeler elektromekanik uygulamalar için ideal hale gelmiştir. Örneğin; jeneratörler (bujiler, katı piller...), sensörler (ivme ölçerler, basınç dönüştürücüler...), aktüatörler (hidrolik ve pnömatik valfler...). Günümüzde PZT seramikler mükemmel özelliklerinden dolayı en çok kullanılan piezoelektrik seramiklerdir (Berlincourt 1981). 1960' lardan günümüze kadar yapılan araştırmaların çoğu PZT malzemeler üzerineydi. Araştırma faaliyetleri yeni malzemeler bulmak için de devam etmekte, örneğin çok düşük sıcaklıklarda stronyum titanatın (SrTiO3) gösterdiği büyük piezoelektrik özellik (Damjanovic 1998) ya da boron nitrit nanotüplerin piezoelektrik özelliği gibi (Mele and Kral 2002; Jalili 2003; Salehi-Khojin and Jalili 2008a,b; Salehi-Khojin et al. 2009a) [35].

1.5. Metal Matrisli Kompozitler

Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerinde sıcaklıklarda kullanılabilecek ve daha yüksek spesifik mukavemet özelliğine sahip malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle 1960'lı yılların başında metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler geliştirilmiştir. MMK' ler sermet, metalik köpük, partikül veya fiber takviyeli metaller gibi geniş bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. MMK' ler yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer yekpare malzemelere oranla önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar;

- Düşük yoğunluk,
- Tekrar üretilebilir içyapı ve özellikler,
- Yüksek mukavemet ve esneklik modülü,
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet,
- Sıcaklık değişikliklerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek elektriksel ve ısıl iletkenlik.

Genel olarak bakıldığında metal matrisli kompozitlerin metallere göre üstün olan temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Daha yüksek aşınma direnci,
- Daha iyi yorulma direnci,
- Düşük ısıl genleşme katsayısı,
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri,
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (spesifik mukavemet),
- Yüksek esneklik modülü/yoğunluk oranı (spesifik modül).

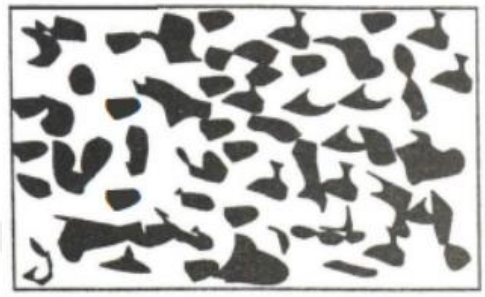
Metal matrisli kompozit malzemelerin üstün özelliklerinin yanı sıra çeşitli sınırlayıcı özellikleri de bulunmaktadır. MMK' lerin ana sınırlayıcı özellikleri ise aşağıda sıralanmaktadır:

- Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda kompozit üretimi için genellikle zor ve karmaşık üretim süreçlerinin kullanılması gerekmektedir.
- Metallere göre kompozitlerin sünekliği daha düşüktür.
- Kompozit üretiminde metallere oranla daha yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizata ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kompozitler yeni gelişen bir malzeme ailesi olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin bu alanda bilgi birikimi metallere oranla daha zayıftır.

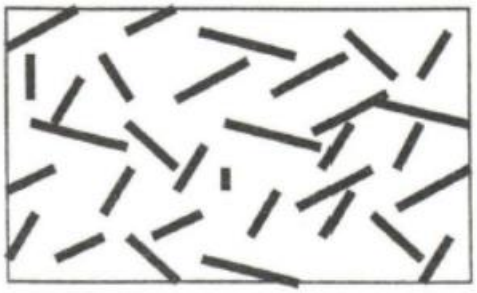
Kompozit malzemelerde matristen beklenen özellikler başta hafiflik olmak üzere korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye elemanı ile uyumluluk olarak sıralanabilir. Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparken aynı zamanda da takviye elemanlarını aşınma ve korozyona karşı korur. Takviye elemanlarından kırılgan çatlakların yayılmasını engeller. Matris malzemeleri kompozit yapının kayma, basma, akma, sürünme, dielektrik ve termo mekanik özelliklerini belirleyici bir rol oynamaktadır [38].

Metal içerisindeki kompozit, süreksiz, daha sert ve daha yüksek dayanım gösteren faz, takviye elemanı olarak adlandırılmaktadır. Genelde takviye malzemesi olarak kullanılan seramik malzemeler; oksitler (Al203-Alümina, $Si0_2$- Silikon dioksit), nitritler (ShN_4 Silika Nitrit, AlN-Alüminyum Nitrit) ve Karbürler (SiC (Silisyum Karbür), TiC (Titanyum Karbür)) dir. Bunun yanı sıra karbon (C) ve Silisyum (Si) gibi elementsel malzemeler de, takviye malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Kompozit içerisinde yer alacak takviye elemanı, sürekli lif, kırık lif, kedi bıyığı (whiskers), plaka veya düzensiz şekilli olabilir. Takviye elemanın, yapı içerisindeki dağılımı sistemin homojenliğini tayin eder. Bu homojenlik, malzemenin mekaniksel ve fiziksel özelliklerini belirlemede önemli bir faktördür.

Diğer faz ise temel malzeme olup, daha düşük rijitlik ve dayanım özellikleri gösterir ve matris olarak tanımlanır. Alüminyum, Titanyum, Magnezyum, Bakır, Nikel, süper alaşımlar (Ni ve Fe esaslı) uzun zamandır metal matris kompozitler için matris fazı olarak kullanılmaktadır. Ağırlığın önemli bir faktör olduğu; taşıma, savunma ve uzay sanayisinde alüminyum en çok tercih edilen matris malzemesi olmaktadır [39].



a) Partikül (parçacık) takviye



b)Kısa fiber veya whisker takviye



c) Sürekli fiber takviye

Şekil 1.4. MMK' lerde kullanılan değişik tipteki takviye malzemelerinin şematik gösterimi [39].

1.6. Metal Matrisli Kompozitlerin Pasif Titreşim Kontrolünde Kullanımı

Yüksek sönümleme kapasiteli malzemeler istenmeyen mekanik titreşimleri ve ses dalgalarının yayılmasını sönümleyerek önlerler. Bu yüzden metalurjistler yüksek sönümleme kapasitesine sahip metal matrisli kompozitler üzerinde yoğun olarak çalışmaktadır. Matris ve takviye elemanları kombine edilerek yüksek sönümleme ve düşük yoğunluk özellikli malzemeler elde edilmeye çalışılır. Bu yüzden metal matrisli kompozitler özellikle bu tip uygulamalarda cazip hale gelmektedir.

Yapılan araştırmanın sonucunda metal matrisli kompozit malzemelerin sönümleme kapasitelerinin matris malzemelerinin sönümleme kapasitelerinden çok daha üstün olduğu görülmüştür. Buna rağmen en yüksek sönümleme kapasitesine sahip metal matrisli kompozitin sönümleme kapasitesi HIDAMET (Hi Damping Metals) olarak adlandırılan malzemelerin bazılarının altında kalmaktadır. Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerin sönümleme kapasiteleri matris malzemesinin sönümleme kapasitesi ile ya aynı seviyede ya da çok az üzerindedir. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin sönümleme kapasitesi ise matrisin sönümleme kapasitesinin çok daha üzerindedir. Ancak şu açıktır ki; bu malzemelerin ticari değerlerini ölçebilmek için sönümleme davranışını yöneten mekanizmanın iyice anlaşılması gerekmektedir [6].

1.7. Literatür Araştırması

Chen ve diğerleri [40], çalışmalarında yüksek mertebeden sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Kompozit plaka ve piezoelektrik cihazların sonlu eleman çözümlerinde Reddy' nin enine kayma deformasyonu için basitleştirdiği teori kullanılmıştır. Bunun nedeni hem ince hem de kalın kompozit plakalarda diğer teorilere göre daha kesin ve doğru sonuç elde edilmesidir. Minimum sayıda piezoelektrik sensör ve aktüatörün optimum yerini bulabilmek için 10 farklı çözüm yapmışlardır. Denemeler sonucu piezoelektrik aktuatörler için en iyi konumun yüksek gerilim olan yerler olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca küçük parçalar halinde kullanılan piezoelektrik aktüatörlerin, büyük ve tek parça olanlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Waghulde ve Kumar [41], 0.6×0.05×0.003 metre boyutlarında, bir ucu ankastre kiriş ile yaptıkları çalışmalarda aktüatörü farklı yerlere yerleştirerek denemelerde bulunmuşlardır. Aktüatörü ankastre noktadan sırasıyla 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 metre uzaklığa yerleştirmiş ve titreşen kirişin davranışı grafiğe aktarılmıştır. Sonuç olarak aktüatör, ankastre noktaya 0,3 metre uzakta yani tam kirişin ortasında olduğu zaman en iyi sonuç elde edilmiştir. Bu da Chen ve diğerleri' nin bulduğu sonuçları destekler niteliktedir. Kiriş üzerindeki sensör-aktüatör 0.1 ve 0.5 metreye yerleştirildiğinde 5.9 saniye, aktüatör 0.2 metreye yerleştirildiğinde 3.8 saniye, aktuatör 0.4 metreye yerleştirildiğinde 3.7 saniye, aktüatör 0.3 metreye yerleştirildiğinde ise 2.1 saniye boyunca titreşim algılamıştır.

Rafi ve Sami [42]' de aktif titreşim kontrolü konusunda benzer bir çalışma yapmıştır. Deneyde iki ucu da ankastre olan ve alt ile üst yüzeyine piezoelektrik seramikler bağlanmış kiriş kullanılmıştır. Çalışma için geliştirdikleri sonlu elemanlar modeli, Reddy' nin üçüncü dereceden lamina teorisine dayanmaktadır. Çalışmalarının sonucu sensör-aktüatör çiftlerinin sayısındaki artışın kirişteki titreşim kontrolünü arttırdığını göstermektedir. Bununla birlikte sensör-aktüatör çiftinin yerinin aktif titreşim kontrolünde sensör-aktüatör adedinden daha önemli olduğu görüldü. Gerilimin yüksek olduğu bölgelerde sensör-aktüatör çiftleri iyi sonuç verirken, düşük gerilim bölgelerinde etkileri azalmıştır.

Spier ve diğerleri [43], PZT yamalı kirişlerde, deplasman geri beslemeli aktif titreşim kontrolü için analitik ve sonlu elemanlar metodu çözümlerine dayanan bir çalışma yapmışlardır. Hesaplamalar ilk üç frekans için yapılmıştır. Doğal frekans sonuçları, hem analitik hesaplama hem de sonlu eleman hesaplamalarında birbirlerine çok yakın çıkmışlardır.

Duan ve diğerleri [44], Kirchhoff ve Mindlin plaka modellerini kullanarak piezoelektrik akupleli halka şeklindeki plakaların serbest titreşim analizi yapmışlardır. Kirchhoff ve Mindlin plaka teorilerine dayalı üç katmanlı piezoelektrik lamine halka şeklindeki plakanın serbest titreşimi, piezoelektrik katmanlar üzerinde elektrotların bağlantılı olduğu durum için incelenmiştir. Piezoelektrik tabakanın kalınlığı boyunca elektrik potansiyel dağılımı sinüzoidal fonksiyon ile modellenmiş ve Maxwell denklemi uygulanmıştır. Farklı sınır koşulları altında, farklı yarıçap-kalınlık oranı ile halka şeklindeki plakalar için sayısal çözümlemelerin sonuçları sonlu elemanlar çözümlerinin sonuçları ile karşılaştırıldı. Sonuçlara göre kalın piezoelektrik katmanlı yapılarda sistemin rezonans frekansı artar, fakat bu durumun etkisi yüksek frekanslarda ve düşük yarıçap-kalınlık oranına sahip plakalarda daha az önemlidir.

El-Badawy [45], yaptığı çalışmada takım tezgahlarında kullanılan kesici takımlara piezoelektrik malzeme ile aktif titreşim kontrolü uygulanıp uygulanamayacağını araştırdı. Sonuç olarak PZT ile aktif titreşim kontrolünün kesici takımlarda da çalışma sırasında titreşimi azalttığı sonucuna ulaştı.

Chhabra ve diğerleri [46], alt ve üst yüzeyine piezoelektrik aktüatör ve sensör yapıştırılmış ankastre kirişi Matlab' de simüle ettikleri bir çalışma yapmışlardır. Piezoelektrik yamaların kirişin serbest ucunda, ortasında ve sabit ucunda olduğu konumlar için üç ayrı deneme yapmışlardır. Yapı modellenirken piezoelektrik teori, Euler-Bernoulli kiriş denklemi, sonlu elemanlar metodu, durum uzay teknikleri kullanılmıştır. Üç pozisyon için durum simüle edildiğinde sensör-aktüator çifti için en iyi konumun sabit uç olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda çoğunlukla Euler Bernoulli Kiriş Teorisi' ni kullanılmıştır. Ancak Rathi ve Khan [47], yaptıkları çalışmada farklı olarak Timoshenko Kiriş Teorisi' ni kullanmışlardır. Bu teoriyle yüzeyine sensör/aktüatör monte edilmiş bir kiriş modellemişlerdir. Periyodik çıktı geri besleme kontrolörü dizayn edilmiş ve akıllı kirişin ilk üç titreşim modu içinde uygulanmıştır. Yüzeye monte edilmiş piezoelektrik sensör/aktüatörlerle ilgili pratik uygulamalarda karşılaşılan olumsuzluklar, gömülü bir kesme gerilimi sensör/aktüatörü kullanılarak giderilebilir. Gömülü kesme gerilimi sensör/aktüatörü içeren bir akıllı kirişin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Periyodik çıktı geri besleme kontrolörü dizayn edilmiş ve akıllı kirişin kontrolü için kullanılmıştır. Ayrıca, aktüatörün yerinin kontrolörün performansına olan etkisi incelenmiştir. Çoklu giriş ve çıkış sisteminin kontrolü ve matematiksel modellemesinde iki sensör ve iki aktüatör kullanımı öngörülmüştür. Sonuç olarak, Timoshenko kiriş teorisinde, periyodik çıktı geri besleme kontrolörü kullanılarak ilk üç mod içinde titreşimin sönümlenebildiği görülmüştür.

Rathi ve Khan [47], ilk olarak yüzeyine sensör ve aktüatör monte edilmiş kirişi modelleyerek bunun üzerinde çalıştılar. Sensör ve aktüatör ankastre noktaya yakın yerleştirilmiştir. Durum uzay modellemesine göre AR 8 ve 15 alınarak iki farklı durum analiz edilmiştir. Her iki durum için açık döngü tepkisi ve kapalı döngü tepkisi incelenmiştir.

Rathi ve Khan [47], ikinci çalışmasını ise gömülü sensör ve aktüatörleri simüle ederek yapmışlardır. Bu çalışmada tek giriş-tek çıkış ve çoklu giriş-çoklu çıkış sistemleri denenmiştir. Her bir sistemde sensörün konumu sabit kalırken aktüatör için 3 farklı konumun etkinliği araştırılmıştır. Çoklu giriş-çoklu çıkış sistemlerde tek giriş-tek çıkış sistemlere göre daha kısa yanıt süresi ve sönümleme gözlenmiştir.

Manjunath ve Bandyopadhyay [48], timoshenko kiriş teorisini kullanarak, tek giriş-tek çıkış sistem üzerinde araştırma yapmışlardır. Kiriş üzerinde 4 farklı noktaya sensör-aktüatör çifti monte edilerek bu yerlerden hangisinde en iyi sonuç alınabileceği belirlenmiştir. Sensör çıkış voltajının en yüksek olduğu yer ankastre uç iken en düşük olduğu yerin serbest uç olduğu görülmüştür. Sensör-aktüatör çifti ankastre uçtayken en iyi sonuç elde edilmiştir.

Sohn ve diğerleri [49], iki ucu kapalı silindirik bir yapı yüzeyine bağlanmış piezoelektrik aktüatörlerle istenmeyen titreşimlerin sönümlenmesi üzerine çalışmışlardır. Hareket ve sınır koşullarının tanımlanması için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Gövde yapısının dinamik özelliklerini incelemek için modal analiz kullanılmıştır. Piezoelektrik aktüatörler maksimum performansın elde edileceği yerlere yerleştirilmiştir. Titreşimi sönümlemek için lineer kuadratik Gauss teorisi temeline dayanan aktif kontrolörler tasarlanmıştır. Yüzeyine piezoeletrik sonör-aktüatörler bağlanmış kapalı uçlu silindirik yapının dinamik karakteristiği analiz edilmiştir. Çalışmalar ANSYS ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda piezoelektrik sensör-aktüatörler bağlanmış kapalı uçlu silindirde titreşim kontrolü yapılabildiği görülmüştür. Ayrıca piezoelektrik yamaların konumlarının titreşim kontrolünde önemli etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır.

Zhang ve Schmidt [50], çalışmalarında piezoelektrik entegre edilmiş akıllı kirişin dinamik denklemlerini, birinci dereceden kayma deformasyonu temeline dayanan Hamilton metodu ve sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturmuşlardır. Titreşimi sönümleme amacıyla, dinamik eşitliklerde türetilmiş durum uzay modeli tabanlı lineer kuadratik regülatör algoritması tasarlanmıştır. Sonuçlara göre; yer değiştirme geri beslemesine dayalı lineer kuadratik regülatörün titreşim sönümlemede önemli bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ancak, lineer kuadratik regülatörün sistem giriş sinyalini hesaplayabilmesi için tüm durum değişkenlerine ihtiyacı vardır.

Takács ve Rohal'Ilkiv [51], ANSYS üzerinde bir ucu sabitlenmiş ve üzerinde piezoelektrik aktüatör olan bir kirişin analizini yaptılar. ANSYS APDL makro dilinde doğrusal kuadratik kontrolör için bir metod oluşturuldu. Bu kontrolör aktif titreşim kontrolüne sahip bir akıllı yapının tepkilerini simule etmede kullanıldı. Çalışmada hem

sonlu elemanlar metodu ile teorik hem de pratik çalışma yapılmıştır ve çıkan sonuçlar birbirine çok yakındır.

Prasad ve diğerleri [13], yaptıkları çalışmada pirinç kabuğu külü (RHA), uçucu kül (FA), silikon karbür (SiC) ve grafit (Gr) tozlarının katkı elemanı olarak kullanıldıkları kompozitlerin sönümleme davranışları üzerine çalışma yapmışlardır. Sönümleme ölçümlerini, 0.1, 1 ve 10 Hz' lik farklı frekanslarda, oda sıcaklığından 150 ° C' ye kadar sürekli bir ısıtma ortamında dinamik mekanik analiz cihazı (DMA) üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Buna göre, FA için: sönümleme kapasitesinin 0.1 ve 1 Hz' de azaldığı ve 10 Hz' de sıcaklık artışıyla yükseldiği tespit etmişlerdir. Oda sıcaklığında sırasıyla 0.1, 1 ve 10 Hz' de 0.07, 0.065 ve 0.022 sönümleme kapasitelerini gözlemlemiş ve oda sıcaklığında 10 Hz' de 2.1E + 08 MPa olarak maksimum depolama modülü tespit etmişlerdir. RHA' nın bu çalışmada ele alınan tüm tozlar arasında düşük sönümleme değerlerini sergilediğini tespit etmişlerdir. RHA' nın sönüm davranışının 0.1 ve 1 Hz' de sabit olduğunu, bununla birlikte 10 Hz' de marjinal bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Sönüm kapasiteleri oda sıcaklığında sırasıyla 0.1, 1 ve 10 Hz' de 0.026, 0.025 ve 0.011 olarak gözlemlenmiş ve depolama modülünün en yüksek frekansta maksimum değer aldığını ve sıcaklık ile düşüş gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Zhang ve diğerleri [17], yaptıkları çalışmada SiC ve grafit (Gr) partiküllerinin, 6061 Al metal matris kompozitlerinin (MMC) nihai sönüm davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada kullandıkları metal matrisli kompozitleri sprey atomizasyon ve biriktirme tekniği ile üretilmiş ve sönümleme karakteristiği dinamik bir mekanik termal analizör vasıtasıyla ölçülmüşlerdir. Sönümleme kapasitesi ve dinamik modülü 30 °C - 250 °C sıcaklık aralığında 0.1, 1, 10 ve 30 Hz frekanslarında ölçülmüşlerdir. Mikro yapısal analizi ise taramalı elektron mikroskopisi, optik mikroskopi ve görüntü analizi kullanarak yapmışlardır. 6061 Al / SiC ve 6061 Al / Gr metal matrisli kompozitlerin sönümleme kapasitelerini, iki farklı hacim oranında takviye ile, işlem görmemiş 6061-T6 Al ve püskürtme yöntemiyle kaplanmış 6061 Al ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak 6061 Al üzerine SiC veya grafit partiküllerinin püskürtme yöntemiyle kaplanması ile elde edilen malzemenin sönümleme kapasitesinin, Al 6061' nin sönümleme kapasitesine göre önemli ölçüde iyileştirilmiş olduğunu göstermişlerdir.

Rohatgi ve diğerleri [8], grafit ve SiC partikülleri içeren karıştırmalı döküm yöntemi ile imal edilmiş alüminyum-matris kompozitlerin sönümleme kapasitesini, konsol kiriş ve bir "HP 5423A Yapısal Dinamik Analiz Cihazı" kullanılarak incelendiler. Grafit partiküllerinin silikon karbid partiküllerine kıyasla kompozitlerin sönümleme kapasitesini arttırmada daha etkili olduğu bulmuşlardır. Kompozitlerin sönümleme kapasitesinin incelenen aralıktaki (%5-%10) grafit hacim yüzdesiyle arttığını görmüşlerdir. Bununla birlikte, silikon karbürün alüminyum alaşımında dağılmasıyla sönümleme kapasitesinde dikkate değer bir gelişme gözlemlememişlerdir.

El-Kady ve diğerleri [12], nanokompozit materyalin dinamik davranışlarını belirlemek için deneysel çalışma yapmıştır. A356/Al_2O_3 takviyeli nanokompozit için hacim fraksiyonunun ve belirli boyuttaki nano katkıların doğal frekans, sönümleme faktörü, depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü üzerindeki etkisini analiz ettiler. Al_2O_3 nanopartikül boyut ve hacim fraksiyonunun doğal frekans, sönüm faktörü, depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörü üzerindeki etkisi deneysel olarak bulunmuştur. Takviye hacim oranının arttırılmasıyla doğal frekans, sönüm faktörü, depolama modülü, kayıp modülü ve kayıp faktörünü arttığı buldular. Elde edilen sonuçlar Al_2O_3 nanopartikül boyutunun azaltılmasının nanokompozitlerin doğal frekansını, sönümleme faktörünü, depolama modülünü, kayıp modülünü ve kayıp faktörünü arttırdığını da göstermektedir.

Srikanth ve diğerleri [52], tel örgüyle güçlendirilmiş AA1050 alüminyum kirişin darbe sönümleme özelliği üzerine çalışma yapmışlardır. Bunun sonucunda; alüminyum tabanlı kompozitlerin sönümleme özelliklerini ölçmek için dairesel yaklaşımla serbest-serbest tip kirişte eğme rezonansı metodunun başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca, %5 oranında eklenmiş olan birbirine bağlanmış galvanizli demir fiberlerle takviye edilmesinden dolayı sönümleme kapasitesi saf alüminyuma göre %17 oranında artmıştır. Son olarak, takviyeden dolayı oluşan sönümleme kapasitesindeki artış takviye telin etrafındaki plastik bölgenin varlığına bağlanabilir.

Zhang ve diğerleri [6], metal, seramik ve metal matrisli kompozitlerin sönümleme davranışları üzerine çalışma yapmışlardır. Bunun sonucunda sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler matristen daha az sönümleme kapasitesine sahipken, partikül

takviyeli metal matrisli kompozitlerin çok daha iyi bir sönümleme davranışı sergilediği görülmüştür.

Srikanth ve diğerleri [53], yaptıkları çalışmada magnezyum tabanlı kompozitlerin sönümleme davranışları üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda; takviyeli ve takviyesiz magnezyum matrisli kompozitlerin sönümleme özelliklerini ölçmek için dairesel yaklaşımla serbest-serbest tip kirişte eğme rezonans metodunun başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür. Saf magnezyum matrisinin sönümlenmesi SiC partiküllerinin varlığı sonucunda artmıştır. SiC partiküllerinin ağırlık / hacim yüzdesinde bir artış ile sönümlenmede bir artış, enerji dağılımında aşamalı bir artışa bağlanabilir. Bu çalışmaya göre enerji dağılımı öncelikle plastik bölge hacim yüzdesindeki artışın ve dislokasyon yoğunluğunun artmasının eş zamanlı etkisine atfedilebilir.

Prasad ve Shoba' nın [14], metal matrisli kompozitler üzerine yaptıkları çalışmada ana sönümleme mekanizmasının gözlendiği noktalar; metal matris kompozitlerindeki iç sönümlenme, plastik bölge yarıçapı, termoelastik sönümlenme, gözeneklilik, nokta kusurları, tane sınır sönümlemesi ve dislokasyon sönümlemesidir. Metal matrisli kompozitler, yeni bir malzeme sınıfı olarak, düşük sönümleme kapasitesine sahip mevcut malzemelerin yerini almaktadır. Son teknoloji ve teknikler kullanarak yüksek sönümleme performanslı malzemeler işlenebilmektedir.

Wang ve Zhu [54], yaptıkları çalışmada püskürtme yöntemiyle dökülmüş olan Al 6061/SiCp metal matrisli kompozitin, 6061 Al alaşımı ile karşılaştırıldığında, özellikle yüksek sıcaklıklarda, önemli sönüm kazanımları sergilediği bulmuşlardır. Al 6061/SiCp metal matrisli kompozit ile bağlantılı olan sönümleme mekanizmaları öncelikle dislokasyon sönümlemesi olduğu ve arayüz sönümlemesidir ve arayüz sönümlemesinin yüksek sıcaklıkta baskın bir rol oynayacağını görmüşlerdir.

Wei ve diğerleri [10], makroskobik grafit partiküllerin saf alüminyumun sönümleme davranışına etkisini araştırmışlardır. Makroskobik grafit partiküllerinin Al/Gr MMK' lerin sönümleme davranışı üzerindeki etkisi karmaşıktır; bu sadece kusurların kendileri tarafından belirlenmekle kalmaz, aynı zamanda matris malzemesinin yapısıyla da yakından ilişkilidir. Çalışma sonucunda ticari olarak saf alüminyuma makroskobik

grafit partiküllerinin eklenmesinin, 0.5-3.0 Hz frekans aralığında arttırılmış sönümleme kapasitesi sağladığı gösterildi. Dinamik modülde bir azalma eşlik etse de, sönümleme kapasitesinin artan grafit partikül hacim oranı ile arttığını bulmuşlardır. Ticari olarak saf alüminyum için sönümleme kapasitesinin makroskobik grafit partiküllerin girişiyle birlikte oldukça geliştiği belirlenmiştir.

Srikanth ve diğerleri [11]' nin Al-SiC kompozitlerin sonlu elemanlara dayalı enerji dağılımı çalışmaları neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Bu çalışmada kullanılan FEM tabanlı hücre modeli, ekstrüzyon sıcaklığından oda sıcaklığına soğuma sırasında termik uyumsuzluk nedeniyle indüklenen plastik bölgelerinin varlığına bağlı olarak kompozitlerin sönüm kayıp faktörünün belirlenmesini mümkün kılar.

- Sonuçlar, düşük gerinim amplitüd durumuna karşılık gelen darbeye maruz kalan asılı kiriş denemelerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile iyi uyuşmaktadır.

- Sayısal değerler, metal matrisdeki SiC ağırlık yüzdesinden kaynaklanan sönüm kayıp faktöründeki artış trendinin asılı kiriş deneylerinin deneysel gözlemleriyle uyumlu olarak göstermektedir.

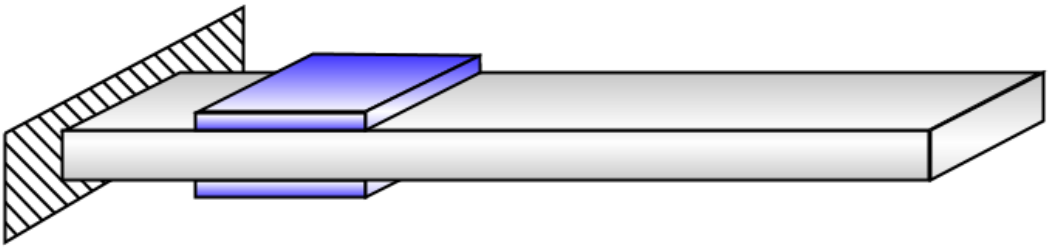
- Keskin yüzeyli partiküllerden kaynaklanan gerilme yoğunluğunun etkisi, plastik bölgenin varlığının artması nedeniyle metal matristeki enerji dağılım kabiliyetini arttırır.

- Mevcut model ile metal matrisli kompozitte; partikül kırılması, metal matristeki boşluk varlığı ve metal- partikül arayüzünde elyaf ayrışması gibi hataların toplam enerji kayıp kapasitesi üzerindeki etkisini incelemek mümkün olur.

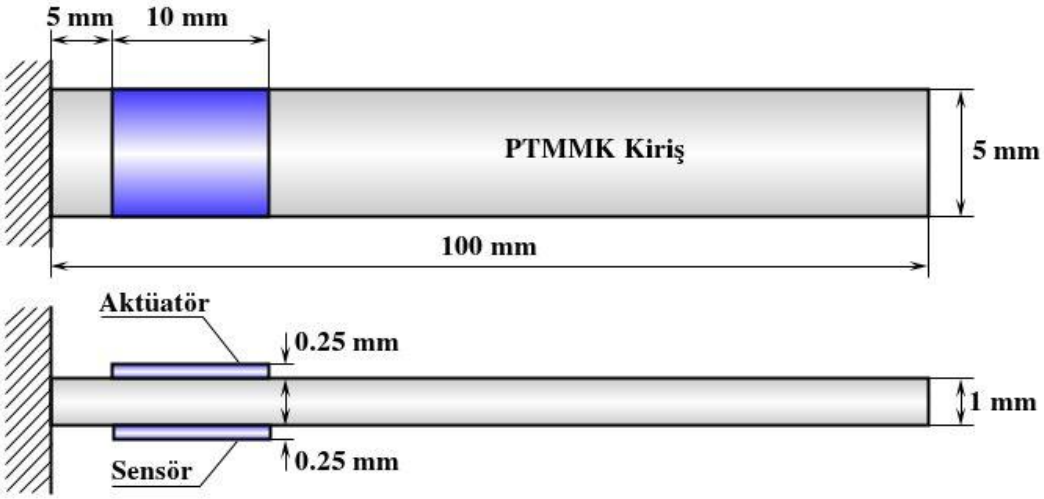
2. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

SiC partikül takviyeli Al 6061 metal matris kompozitlerin sayısal modelleme, serbest titreşim analizleri ve sönümlü serbest titreşim analizlerinin aktif kontrolü, sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1. kiriş yüzeyine bağlı piezoelektrik sensör / aktüatör çifti ile akıllı PTMMK kirişin geometrisini ve boyutlarını göstermektedir. PTMMK kiriş, 100 mm uzunluk, 5 mm genişlik ve 1 mm kalınlığa sahiptir; buna karşılık piezoelektrik sensör ve aktüatör, 10 mm uzunluk, 5 mm genişlik ve 0.25 mm kalınlıktadır. Ticari ABAQUS/Standard [55], sonlu elemanlar yazılımı modelleme ve analizleri gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Akıllı PTMMK kiriş 8-nodlu doğrusal bir brick yapı eleman kullanılarak ve indirgenmiş integrasyon ile hourglass kontrollü (C3D8R) katı elemanla modellenmiştir. Piezoseramik yamalar (sensör ve aktüatör) ise 8-nodlu lineer piezoelektrik brick yapı (C3D8E) eleman kullanılarak modellendi. PTMMK kirişin SEM modeli, tüm yönlerde 250 μm 'lik bir minimum eleman boyutuyla mesh’ lendi ve daha büyük partikül boyutları bu minimum boyutun katlarını alarak türetildi. Böylece, PTMMK kiriş 32000 eleman ve 42105 düğümden, piezo-seramik yamalar ise 1600 element ve 3444 düğümden oluşturulmuş oldu. Akıllı PTMMK' nin mesh’ lenmiş bir FEM modeli Şekil 2.2' de verilmiştir.

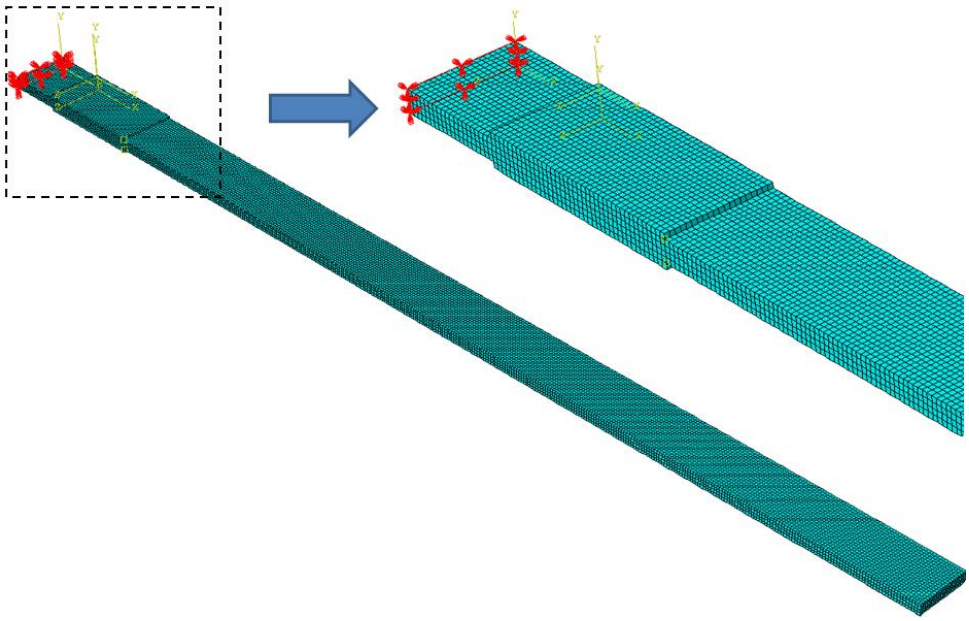


a) 3D geometri



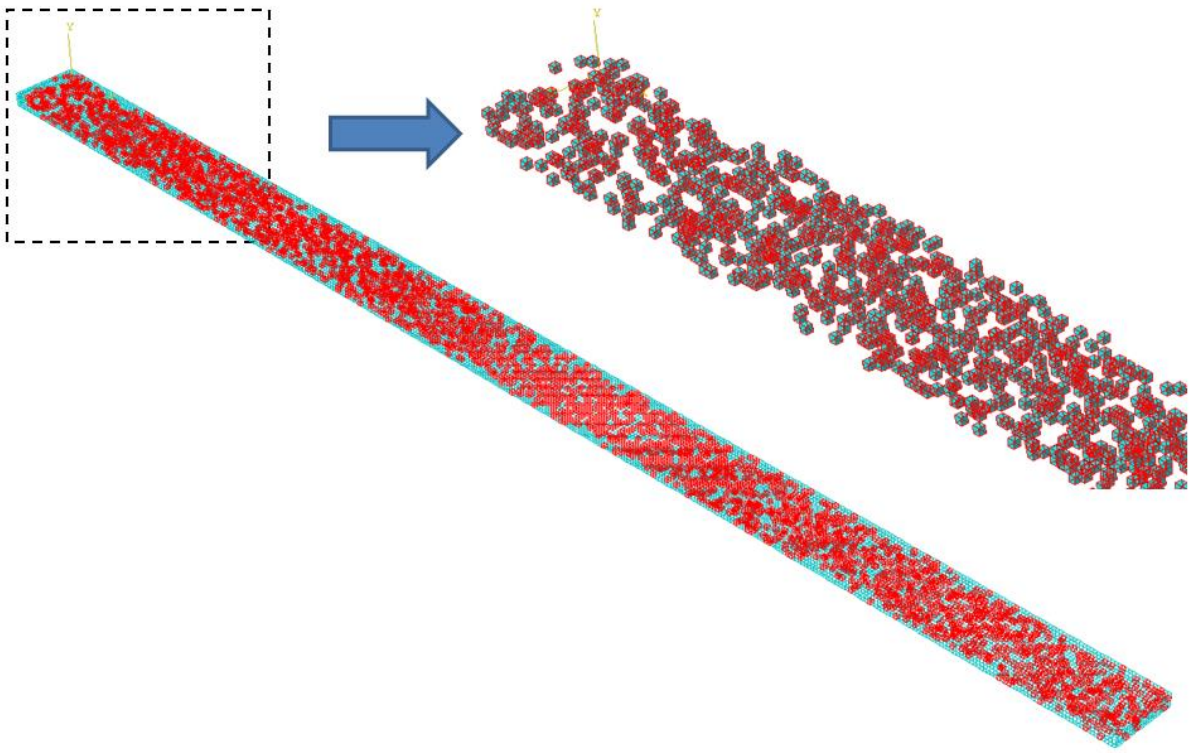
b) Boyutlar

Şekil 2.1. Yüzeyine piezoseramik sensör/aktüatör çifti monte edilmiş akıllı PTMMK kirişin geometrisi ve boyutları.



Şekil 2.2. Akıllı PTMMK kirişin mesh' lenmiş FEM modeli.

PTMMK kiriş modellenirken, gerçek bir PTMMK mikroyapısı elde etmek için kübik geometrili SiC seramik partikülleri, Al 6061 alaşımlı metal matris içine gömülmüş ve rasgele dağıtılmış olarak Şekil 2.3’ de görüldüğü gibi modellendi. SiC partiküllerinin hacim oranı sabit bir sonlu eleman sayısının (32000) yüzdelik oranı olarak ayarlandı. Böylece, matristeki partikül hacim oranları % 10, % 20 ve % 30 olduğu zaman, SiC partikülleri için sonlu eleman adedi sırasıyla 3200, 6400 ve 9600 olmaktadır. İstenilen hacim oranına göre rastgele seçilen SiC partikülleri, her yeni analiz için ayrıntılı olarak değiştirilen bir eleman kümesi olarak kaydedilmektedir. Sayısal analizler üç farklı partikül hacmi oranı (V_f = %10,% 20 ve % 30) ve iki farklı partikül boyutu (P_s = 250 ve 500 μm) için yapılmıştır. Al 6061 matris ve SiC partiküller elastik bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Piezo-seramik yamalar için (sensör ve aktüatör) PZT-5H malzeme seçilmiştir. Al 6061 alaşımının, seramik SiC' nin ve PZT-5H' nin özellikleri Tablo 2.1' de görülmektedir.



Şekil 2.3. V_f = %10 hacim oranına sahip Al 6061 metal matrisli kompozit kiriş içinde partiküllerin rasgele dağılımı.

Tablo 2.1. PZT-5H, Al 6061 ve SiC' ün özellikleri.

Özellik	PZT-5H [32]	Al 6061 [33]	SiC [33]
Yoğunluk (ρ), (kg/m^3)	7350	2700	3100
Elastik modül (GPa)	-	70	420
Poisson oranı (ν)	-	0.33	0.17
Rijitlik katsayısı c_{11} (GPa)	126		
Rijitlik katsayısı c_{12} (GPa)	79.5		
Rijitlik katsayısı c_{13} (GPa)	84.1		
Rijitlik katsayısı c_{22} (GPa)	126		
Rijitlik katsayısı c_{23} (GPa)	84.1		
Rijitlik katsayısı c_{33} (GPa)	117		
Rijitlik katsayısı c_{44} (GPa)	23.3		
Rijitlik katsayısı c_{55} (GPa)	23.3		
Rijitlik katsayısı c_{66} (GPa)	23.25		
Piezoelectrik sabit e_{31} ($C\ m^{-2}$)	-6.5		
Piezoelectrik sabit e_{33} ($C\ m^{-2}$)	23.3		
Piezoelectrik sabit e_{15} ($C\ m^{-2}$)	17		
Dielectric geçirgenlik katsayısı ϵ_{11} ($farad/m^2$)	15.03×10^{-9}		
Dielectric geçirgenlik katsayısı ϵ_{22} ($farad/m^2$)	13×10^{-9}		
Dielectric geçirgenlik katsayısı ϵ_{33} ($farad/m^2$)	15.03×10^{-9}		
Rayleigh sönüm katsayısı (β)	4.9×10^{-8}	7.5×10^{-5}	5×10^{-8}
Rayleigh sönüm katsayısı (α)	-	15×10^{-5}	-

Akıllı PTMMK kirişin serbest titreşim analizi ve aktif titreşim sönümleme analizi için kapalı (implicit) dinamik analizler yapılmıştır. Akıllı PTMMK kiriş' in geometrik ve malzeme özelliklerini temsil eden tüm değişkenleri uygulamak için Python [56], programlama dilinde bir kod yazılmıştır. Bu nedenle, üretilen girdi dosyası analizleri yapmak için ABAQUS/Standard sonlu elemanlar yazılımında çalıştırılmıştır.

2.1. Piezoelektrik Konsepti

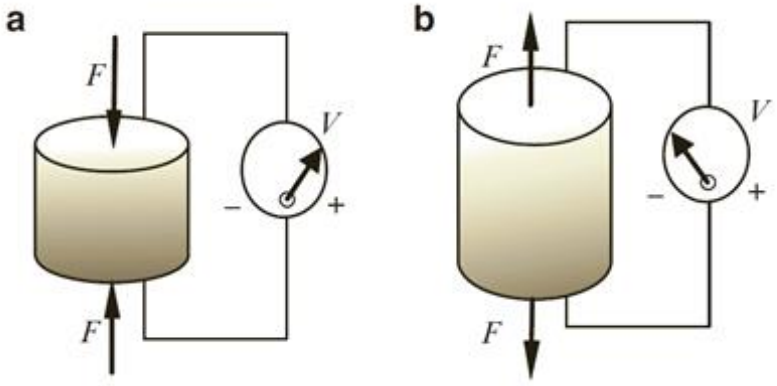
Piezoelektrik; özellikle katı durumdaki materyallerde dielektrik kristallere mekanik gerilimlerin uygulanması sonucu oluşan elektrik, mekanik ve termal durumlar arasındaki bağlantıyı ifade eden bir elektromekanik fenomendir (Cady 1964). "Piezo" kelimesi Yunanca kökenli olup basınç anlamına gelmektedir. Makroskobik piezoelektrik fenomen ve kristalografik yapı arasındaki ilk deneysel gösterim 1880 yılında Curie kardeşler tarafından raporlanmıştır (Curie and Curie 1880). Bu gösterim; bu materyallerin mekanik deformasyon (gerilim / yük) altında elektriksel bir yük üretebileceği idi (doğrudan etki). Tam tersi şekilde; bu materyallere bir elektrik yük uygulandığında mekanik yük veya gerilim oluşmaktadır (ters etki). Bu iki yönlü durum

bu materyallerin hem sensör (doğrudan etki) hem de aktüatör (ters etki) olarak kullanılmalarına imkan tanır [35].

2.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Temel Davranışları ve Yapıları

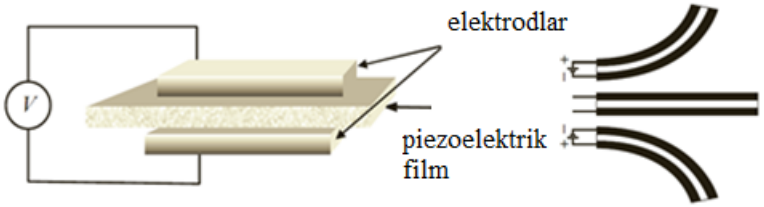
Sensörler ve aktüatörler akıllı yapıların iki temel öğesidir ve esnek yapılara ayrık olarak yerleştirilmiştir. Sensörler, yer değiştirme, gerilme veya ivmelenmedeki değişiklikler yoluyla yapının mekanik tepkisini izlemek için kullanılır. Aktüatörler bir kumandanın yardımıyla; sensörlerden elde edilen bilgilere dayanarak, yapının mekanik tepkisine karşılık gelen bir yanıt üretirler. Akıllı yapılarda kullanılabilen farklı malzemeler arasında, piezo kurşun zirkonat titanat (PZT), hem sensör hem de aktüatör olarak hizmet edebilecek eşsiz özelliklere sahip birkaç malzemeden biridir [20,22,57,58].

Piezoelektrik malzemelerin temel davranışlarını daha iyi gösterebilmek adına, 2.4 ve 2.5 şekillerinde eksenel (örneğin piezoseramikler) ve laminer (örneğin polimerik piezoelektrik malzemeler) yapılarda piezoelektrik etki betimlenmiştir. Daha net anlaşılabilmesi için her iki şekilde (şekil 2.4, şekil 2.5) de deformasyon miktarları abartılı gösterilmiştir. Şekil 2.4' de (a) örneğinde; piezoelektrik bir malzemeyi sıkıştıracak şekilde yük uygulandığında ortaya çıkan durumu göstermektedir. Mekanik ve elektriksel özellikler arasındaki bağlantıdan dolayı baskı uygulandıktan sonra pozitif voltaj oluşur. Benzer şekilde şema 2.4' de (b) örneğinde; malzemeye çekme yükü uygulandığında ters kutuplu bir elektrik yükü oluşur [35].



Şekil 2.4. Aksiyel yapıda (piezoseramikler vb.) piezoelektrik etkinin gösterimi [35].

Aktüatör olarak ise Şekil 2.5' de pozitif voltaj uygulanan bir piezoelektrik aktüatörde elektrik ve mekanik özelliklerin bağlantısından dolayı yukarı yönlü bir eğilme olmaktadır. Aynı şekilde ters kutuplu voltaj uygulanıldığında ise eğilme yönü aşağı olmaktadır [35] .



Şekil 2.5. Tabakalı yapıda (polimerik piezoelekrik malzemeler vb.) piezoelektrik etkinin gösterimi [35].

Tiersten [59], tarafından yapılan temel çalışmalar, tek katmanlı bir piezoelektrik plakanın statik ve dinamik davranışı için önemli bir teorik gelişme sağlamıştır. Mekanik ve elektrik alanları arasındaki bağlantı için lineer bir piezoelektrik malzemenin temel bağıntıları şu şekilde verilir:

$$\{\sigma\} = [c]\{\varepsilon\} - [e]^T\{E\} \tag{1}$$

$$\{D\} = [e]\{\varepsilon\} + [\epsilon]\{E\} \tag{2}$$

{σ}, {ε} ve {D} sırasıyla gerilme, kuvvet vektörleri ve elektriksel yer değiştirme vektörünü temsil etmektedir. Ayrıca, [c] elastik sabitler matrisi, [e] piezoelektrik sabit matrisi, [ε] dielektrik geçirgenlik katsayısı matrisidir. Elektrik alanı vektörü {E}, elektriksel potansiyel φ ile bağlantılı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$\{E\} = -\nabla\varphi \tag{3}$$

Burada ∇ gradyant operatörüdür. Eşitlik (1) tersine piezoelektrik etki ve eşitlik (2) ise doğrudan piezoelektrik etki denklemini göstermektedir. Denklem (1) ve denklem (2) sırasıyla (4) ve (5) denklemleri gibi matris formunda yazılabilir [22, 59-61].

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{12}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0\\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0\\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ 2\varepsilon_{23}\\ 2\varepsilon_{13}\\ 2\varepsilon_{12}\end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31}\\ 0 & 0 & e_{31}\\ 0 & 0 & e_{33}\\ 0 & e_{15} & 0\\ e_{15} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \begin{Bmatrix}E_1\\ E_2\\ E_3\end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{Bmatrix} D_{11} \\ D_{22} \\ D_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

burada $c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12})$ dir.

2.1.1.1. Hareketin Dinamik Denklemleri

Akıllı PTMMK kirişin dinamik hareket denklemleri Hamilton ilkesi [62] ile türetilebilir.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} [T - U + W]\, dt = 0 \quad (6)$$

Burada T kinetik enerjidir, U yük enerjisidir ve W uygulanan kuvvetler tarafından yapılan iştir. Akıllı PTMMK kirişin ana diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir:

$$[M^e]\{\ddot{u}^e\} + [K^e]\{u^e\} = \{F^e\} + [K^e_{av}]V^e \quad (7)$$

Burada;

$$[M^e] = \sum_{e=1}^{E} \iiint_{V_e} \rho [N]^T [N] dV \quad (8)$$

$$[K^e] = \sum_{e=1}^{E} \iiint_{V_e} [B]^T [Q] [B] dV \quad (9)$$

$$[K^e_{av}] = \sum_{e=1}^{E} \iiint_{V_e} [B]^T [e]^T [B_v] dV \quad (10)$$

$$\{F^e\} = \sum_{e=1}^{E} \iiint_{V_e} [N]^T \{f_b\} dV + \iint_{S_1} [N]^T \{f_s\} dS + [N]^T \{f_c\} \quad (11)$$

Burada $[M^e]$kütle matrisi, $[K^e]$ eleman rijitlik matrisidir, ρ yoğunluktur, [N] şekil fonksiyonlarının matrisidir, [B] şekil fonksiyonlarının koordinat türevlerinin matrisidir, [Q] elastik sabitler matrisidir, $\{f_s\}$ yüzey kuvveti vektörü, $\{f_b\}$gövde kuvveti vektörü, $\{f_c\}$ konsantre yüktür, $\{F^e\}$ harici mekanik kuvvet vektörüdür. Bununla birlikte, titreşimsel modal analizde, sönümsüz bir sistem için hareket denklemi,

$$[M^e]\{\ddot{u}^e\} + [K^e]\{u^e\} = 0 \quad (12)$$

Bu özdeğer probleminin çözümü şu şekildedir:

$$\det([K^e] - w^2[M^e]) = 0 \quad (13)$$

Sönümsüz doğal frekansları ve mod şekillerini bulmak için Block Lanczos özdeğer ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır. Sönümleme etkilerini de içerecek şekilde, Rayleigh sönümlemesi kullanılmıştır. Dolayısıyla (7) denklemi aşağıdaki hali alır:

$$[M^e]\{\ddot{u}^e\} + [C^e]\{\dot{u}^e\} + [K^e]\{u^e\} = \{F^e\} + [K^e_{av}]V^e \quad (14)$$

Burada $[C^e]$ sönümleme matrisidir;

$$[C^e] = \alpha[M^e] + \beta[K^e] \quad (15)$$

Burada α ve β sırasıyla Rayleigh kütlesi ve rijitlik malzeme katsayılarıdır. Küresel dinamik denklem, tüm eleman denklemlerini birleştirerek elde edilir.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} + \{F^v\} \quad (16)$$

Burada $\{F^v\}$ elektriksel kuvvet vektörüdür ve şu şekilde verilir:

$$\{F^v\} = [K_{av}]\{V\} \quad (17)$$

2.1.1.2. Sensör eşitlikleri

Sensör tabakasına uygulanan elektrik alanı sıfır olduğu için sensör yüzeyinde oluşan elektriksel yer değiştirme, sensör üzerinde etki eden gerilimle doğrudan orantılıdır. Sensörün kutup yönü elektrotlar üst ve alt yüzeylerde eksen-3 boyunca bulunuyorsa, elektriksel yer değiştirme denklem (2 veya 5) 'den hesaplanır [62,63].

$$D_{33} = e_{31}\varepsilon_{11} \quad (18)$$

Piezoelektrik sensör yüzeyinde üretilen toplam yük,

$$q(t) = \int_S D_{33}\, dS \quad (19)$$

Burada, dS 1-2 düzlemindeki diferansiyel elektrot alanıdır. Piezoelektrik sensör yüzeyinde üretilen akım şu şekilde yazılabilir:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (20)$$

Sensör tarafından üretilen bu akım açık devre sensörü gerilim çıkışına $V_s(t)$ dönüştürülebilir

$$V_s(t) = G_s i(t) \quad (21)$$

Burada G_s sinyal düzenleyici cihazın (akım amplifikatörü) kazancıdır.

2.1.1.3. Aktif Titreşim Kontrolü

Şekil 1.6, akıllı bir PTMMK kiriş için geri bildirim kontrol sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Dağıtılmış sensör, PTMMK kiriş titreşirken bir voltaj üretir ve bu voltaj sinyali, bir kontrol algoritması kullanılarak dağıtılan aktüatöre geri beslenir. Doğru orantılı geri bildirim kontrol stratejisi titreşimli PTMMK kirişine uygulanmıştır. Sabit bir kazanç kontrol algoritması altında çalıştırma voltajı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V(t) = GV_s(t) \tag{22}$$

Burada $V(t)$, G ve $V_s(t)$ harekete geçirici sinyali belirtir, geri besleme kontrol kazancı ve algılanan sinyal sırasıyla PTMMK kiriş salınımından kaynaklanan gerilimle orantılıdır. Böylece, sistem çalıştırma voltajları,

$$\{V\} = [G]\{K_{sv}\}\dot{\underset{\sim}{u}} \tag{23}$$

Geri besleme kontrolünde, elektrik kuvvet vektörü $\{\underset{\sim}{F^v}\}$ bir geri besleme kuvveti olarak kabul edilebilir. Eşitlik (22), denklem (17) 'ye dönüştürülürken,

$$\{\underset{\sim}{F^v}\} = [K_{av}][G]\{K_{sv}\}\dot{\underset{\sim}{u}} \tag{24}$$

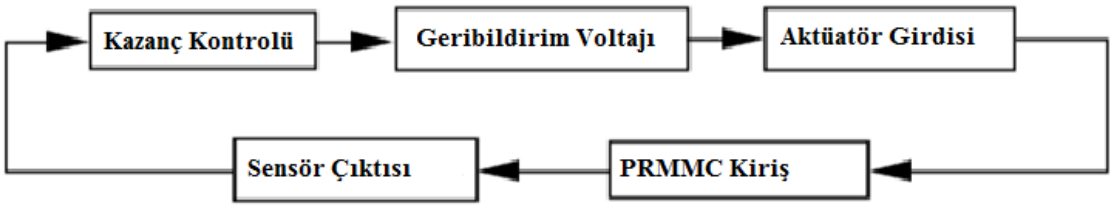
olarak kabul edilirse;

$$[C^*] = -[K_{av}][G]\{K_{sv}\} \tag{25}$$

Akıllı kirişin hareket denklemi (16) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$[M]\{\ddot{\underset{\sim}{u}}\} + ([C] + [C^*])\{\dot{\underset{\sim}{u}}\} + [K]\{\underset{\sim}{u}\} = \{\underset{\sim}{F}\} \tag{26}$$

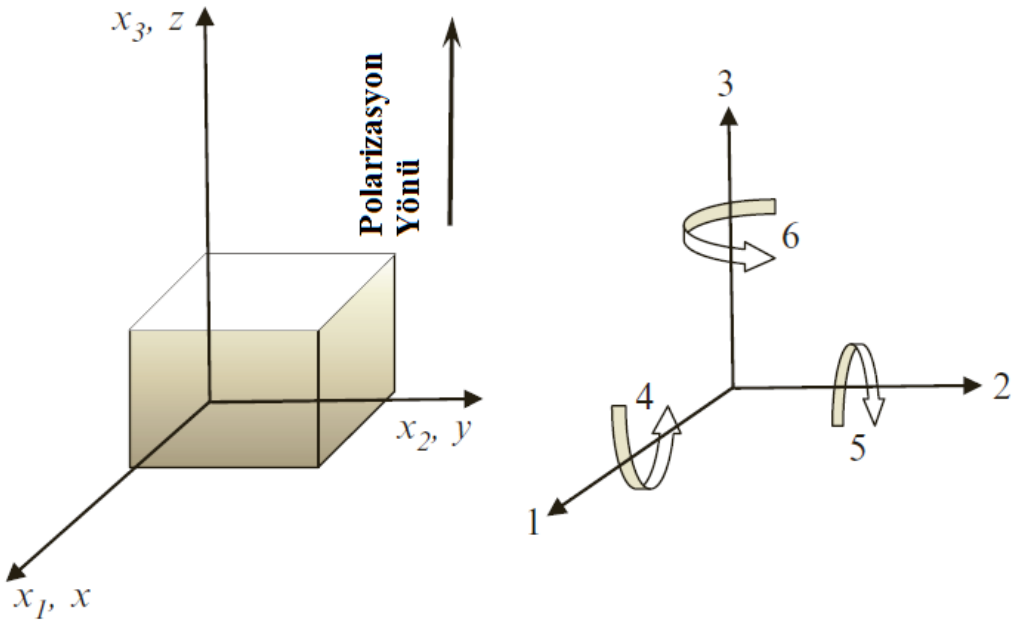
Eşitlik (6) 'da gösterildiği gibi, geri besleme voltajı tarafından uyarılan geri besleme kontrol kuvvetleri sistemin sönümlenmesine etkili bir şekilde katkıda bulunabilir ve bu nedenle PTMMK yapısının salınımını sönümleyebilir.



Şekil 2.6. Akıllı PTMMK kirişe bağlanmış piezoelektrik sensör / aktüatör çifti için geri besleme şemasının konfigürasyonu.

2.1.2. Piezoelektrik Sabitler

Piezoelektrik malzemeler genellikle anizotropiktir ve dolayısıyla fiziksel sabitleri (örneğin piezoelektrik sabitleri, elastikiyet, geçirgenlik) tatbik edilen gerilimin veya gerilimin yönüne ve uygulanan alanın bağımlılığına bağlıdır. Bu nedenle, bu sabitler, gerilme ya da şekil değiştirme (esneklik için) ve dielektrik yer değiştirme ya da elektrik alanı (geçirgenlik için) için bir endeks olan iki alt simge kullanılarak tanımlanırken, aynı zamanda sabit tutulacak miktarı (sabit elektrik alanı veya sabit stres) belirtmek için üst simge kullanılmıştır [35].



Şekil 2.7. Kristalografik eksenlerin şematik gösterimi ve deformasyon yönleri (1-3 normal

gerinim/gerilmesi, 4-6 ise kayma gerinim/gerilmesi) [35].

3. BÖLÜM

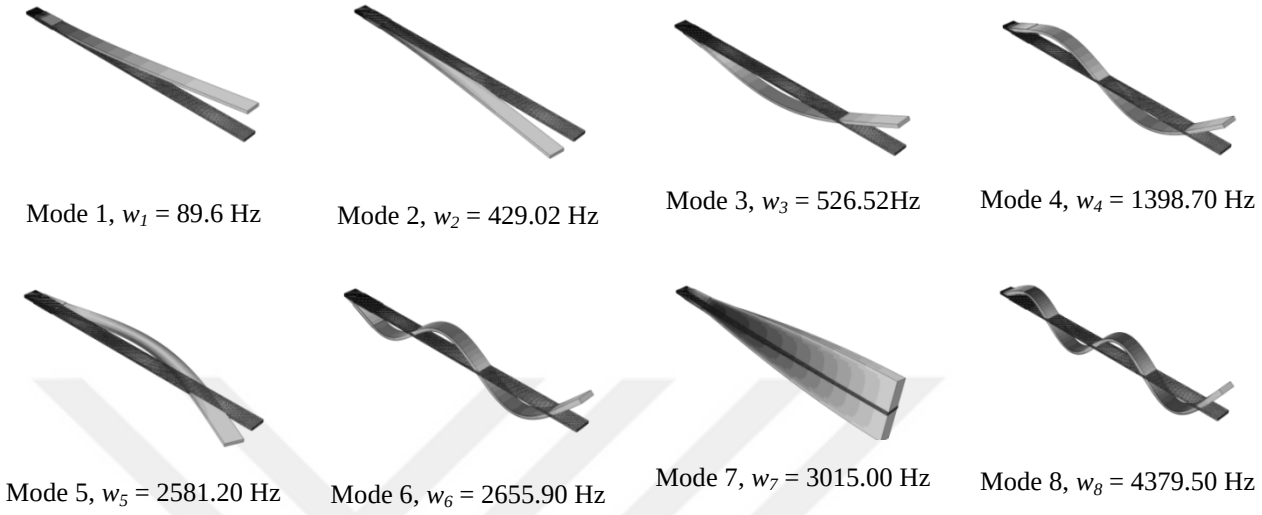
SERBEST TİTREŞİM ANALİZLERİ VE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

3.1. Serbest Titreşim Analizleri

Dinamik yükler altında (impulsif ve periyodik yükler) çalışan bir yapının doğal frekansları ve mod şekilleri, dinamik tepkilere ilişkin çok önemli tasarım parametreleridir. PTMMK' ler birçok uygulamada titreşim yüküne maruz kalabilirler. Bu nedenle, aşırı deformasyonlar, yorulma çatlakları, rahatsız edici çalışma koşulları ve benzeri yapısal titreşimlerden kaynaklanan sorunları göz önüne alarak güvenli ve kararlı bir tasarım elde etmek için akıllı PTMMK' lerin doğal frekanslarını ve karşılık gelen mod şekillerini bilmek önemlidir. Partikül boyutu, hacim oranı ve rasgele partikül dağılımı gibi mikro-yapısal parametrelerin serbest titreşim tepkileri üzerindeki etkileri bu duruma örnektir.

Akıllı PTMMK kirişlerinin SEM modelleri, Al 6061 matrisinde, 250 ve 500 μm partikül boyutlarında ve % 10, % 20 ve % 30 hacim oranlarında rastgele dağıtılmış SiC takviyeleri ile üretilmiştir. Akıllı PTMMK ve takviyesiz Al 6061 alaşım kirişlerinin serbest titreşim analizleri, ilk sekiz mod için gerçekleştirilmiştir. Rastgele partikül dağılımının mod şekil ve doğal frekans üzerindeki etkisini belirlemek için, kompozit kirişin her araştırılan parametresi için serbest titreşim analizleri üç kez tekrarlanmıştır. Şekil 3.1 takviyesiz akıllı kirişin mod şekilleri ve doğal frekanslarını göstermektedir. Takviyesiz Akıllı kirişin mod şekilleri, şekil 3.1' de görülebileceği gibi ilk sekiz mod için enine eğilme, yanal eğilme ve burulma modları olarak sınıflandırılabilir. Akıllı takviyesiz kiriş sırasıyla w_1 = 89.60, w_3 = 526.52, w_4 = 1398.70, w_7 = 2655.90 ve w_8 = 4379.50 Hz' lik doğal frekanslarda eğilme modlarına maruz kalmıştır. Yanal eğilme modları sırasıyla w_2 = 429.02 ve w_5 = 2581.20 Hz doğal frekanslarında elde edilir.

Akıllı takviyesiz kirişte burulma modu sadece w_6 = 3015.00 Hz' de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, akıllı takviye edilmemiş kirişin baskın mod şekli, enine eğilmedir.

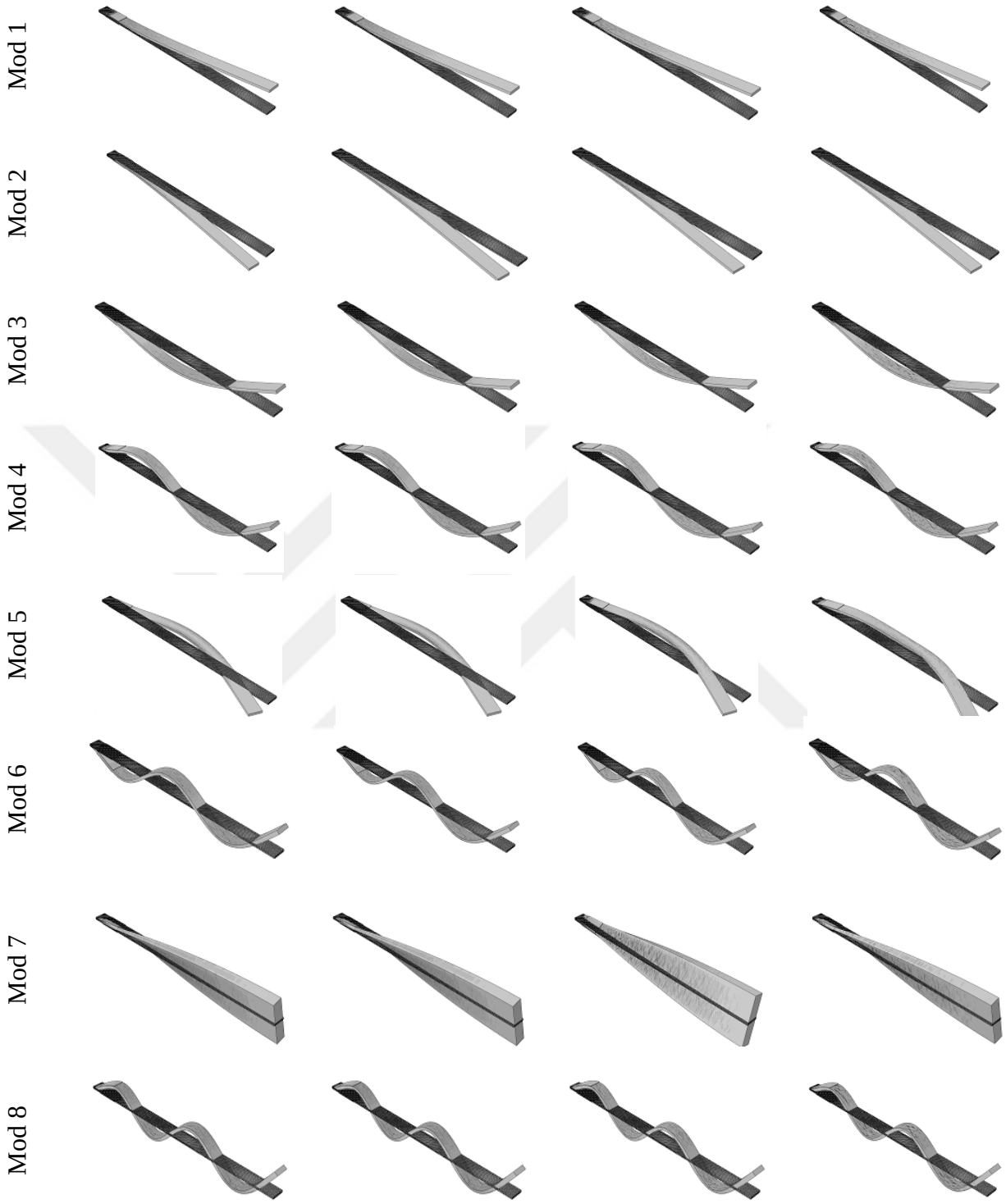


Şekil 3.1. Takviyesiz akıllı Al 6061 kirişinin ilk sekiz doğal frekansı ve mod şekli.

Aynı parametreler (P_s = 250 μm ve V_f =% 10) ve rasgele SiC partikül dağılımı ile tekrarlanan iki analiz için akıllı PTMMK kirişinin ilk sekiz mod şekillerini karşılaştırılması Şekil 3.2 (a) ve (b)' de verilmiştir. Şekil 3.2 (b) ve (c) ve Şekil 3.2 (c) ve (d) sırasıyla partikül hacim oranının ve partikül boyutunun PTMMK kirişrin ilk sekiz mod şekilleri üzerindeki etkisini göstermek için verilmiştir. Akıllı PTMMK kirişlerin mod şekillerinin SiC partiküllerinin metal matristeki rastgele dağılımdan, partikül hacim oranından ve partikül boyutundan etkilenmediği kolayca gözlemlenebilir. Buna ek olarak, tüm modlar için akıllı PTMMK kirişlerin mod şekilleri, akıllı takviyesiz kirişlerin mod şekilleri ile neredeyse aynıdır. Böylece, serbest titreşim analizi akıllı PTMMK kirişlerin çoğunlukla eğilme modlarına eğilim gösterdiğini göstermektedir. SiC partiküllerinin rastgele dağılımı, partikül hacim oranı ve boyutu, akıllı PTMMK' lerin mod şekilleri üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Buna rağmen, akıllı PTMMK' lerin doğal frekans değerleri, Tablo 3.1' de gösterildiği gibi bu parametrelere bağlı olarak değişir. Akıllı PTMMK kirişlerin doğal frekans değerleri; rasgele partikül dağılımı (analizler üç kez tekrarlanmıştır), farklı partikül hacim oranları ve boyutları açısından, ilk sekiz mod için Tablo 3.1' de verilmiştir. Tablo 3.1' de akıllı PTMMK' lerin doğal frekans değerlerinin; rasgele partikül dağılımının etkisi nedeniyle aynı malzeme özellikleri (partikül boyutu ve hacim fraksiyonu) ve mod sayıları için

gerçekleştirilen analizlerde genellikle küçük farklar sergilediği görülmektedir. Doğal frekans, artan hacim oranıyla birlikte artarken, partikül boyutunun arttırılması, doğal frekansta bir miktar azalmaya neden olur. Şekil 3.3, birinci titreşim modu ve son (8.) titreşim modu için akıllı PTMMK' lerin doğal frekansları üzerinde hem partikül boyutu hem de hacim oranının etkisini göstermektedir. İlk titreşim modu ve son titreşim modu, doğal frekans değerleri haricinde benzer eğilimler gösterir. Partikül boyutu (P_s = 250 μm) sabit tutulduğunda, partikül hacim oranının % 10' dan % 30' a artması, akıllı PTMMK' lerin ortalama doğal frekanslarının neredeyse doğrusal olarak artmasına neden olurken, bu artış eğilme modları (w_1, w_3, w_4, w_6, w_8) için %15.28, %16.11, %16.94, %16.80 ve %16.76, yanal eğilme modları (w_2 ve w_5) için %16.38 ve %16.81 ve burulma modu (w_7) için % 14.02' dir. Partikül boyutu, % 30' luk bir hacim oranı için 250 μm' den 500 μm' ye arttırıldığında akıllı PTMMK' lerin ortalama doğal frekans değerleri azalmaktadır. Bu azalma eğilme modları (w_1, w_3, w_4, w_6, w_8) için % 4.64, % 5.11, % 5.25, % 4.70 ve % 5.24, yanal eğilme modları (w_2 ve w_5) için % 2.58 ve % 2.80 ve burulma modu için (w_7) % 0.955' dir. Görüleceği üzere partikül hacim oranı, akıllı PTMMK' lerin doğal frekansları üzerinde, partikül boyutu ve rastgele partikül dağılımına oranla daha belirgin bir etkiye sahiptir. Ayrıca, şekil 3.4, hacim oranının ve partikül boyutunun doğal frekans üzerindeki kombine etkilerini göstermektedir. Mod sayısı ve hacim oranı arttıkça doğal frekans artar (Şekil 3.4 (a)). Bununla birlikte, doğal frekans mod numarası artarken artar; ancak partikül boyutu arttıkça azalır (Şekil 3.4 (b)).

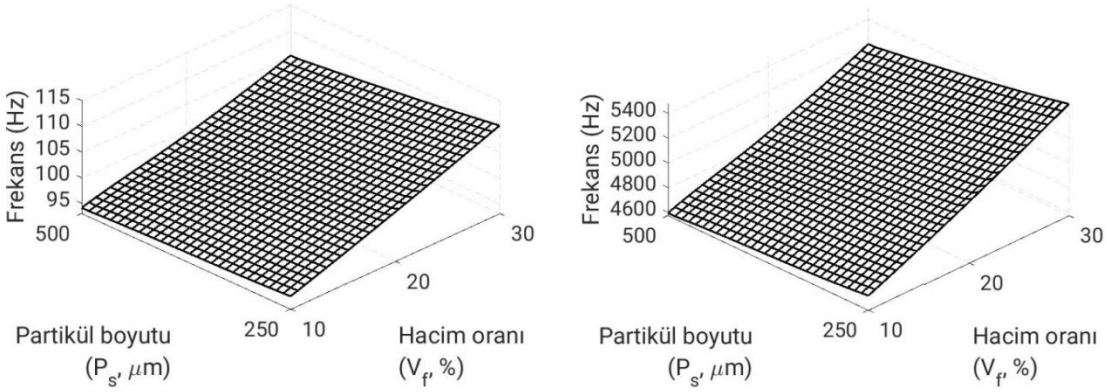
Akıllı PTMMK' lerin ve takviyesiz kirişlerin serbest titreşim analizleri hem akıllı PTMMK' lerin hem de takviyesiz kirişlerin aynı mod şekillerine sahip olduklarını ve çoğunlukla enine eğilme modlarına, nadiren yanal eğilme ve burulma modlarına maruz kaldıklarını gösterir. Ayrıca, bu yapıların mod şekilleri mikro yapı özelliklerine bağlı değildir, halbuki mikro yapısal özellikler (partikül hacim oranı, partikül boyutu ve dağılım) doğal frekans üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Bununla birlikte rastgele partikül dağılımı; partikül hacmi oranı ve boyutu ile karşılaştırıldığında doğal frekanslar üzerinde küçük bir etki oluşturmaktadır. Buna ek olarak partikül hacim oranı; doğal frekans üzerinde partikül boyutuna göre daha önemli bir etkiye sahiptir. Doğal frekans, artan partikül hacim oranıyla hemen hemen doğrusal olarak artar ancak, azalan partikül boyutuyla birlikte az miktarda azalır. Çünkü, hacim oranının artması ve partikül boyutunun azalması akıllı kompozit kirişin rijitleşmesine neden olur.



Şekil 3.2. PTMMK kirişlerin (a) P_s=250 µm ve V_f=%10 çözüm 1, (b) P_s=250 µm ve V_f=%10 çözüm 2, (c) P_s=250 µm ve V_f=%30, (d) P_s=500µm ve V_f= %30 için ilk 8 mod şekilleri.

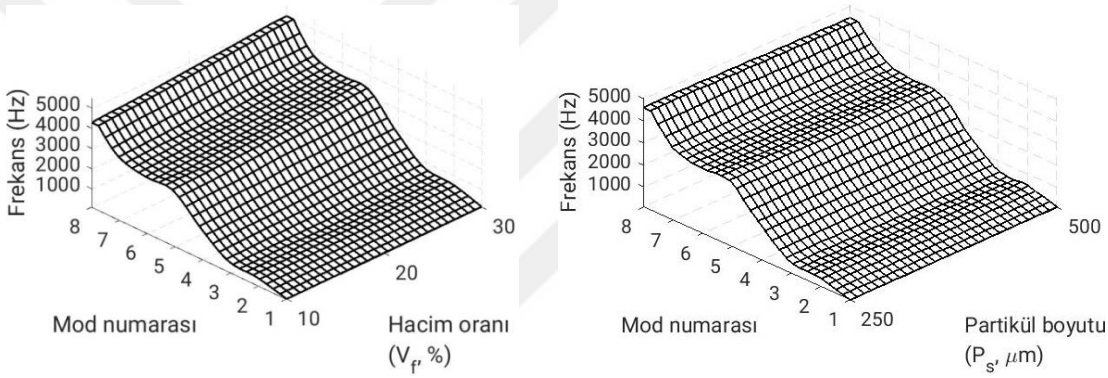
Tablo 3.1. Akıllı PTMMK' lerin SEM ile serbest titreşim analizinden elde edilen doğal frekansları.

Partikül boyutu (μm)		250				500			
Hacim oranı (%)	Mod sayısı	Farklı analizler için doğal frekanslar (Hz)				Farklı analizler için doğal frekanslar (Hz)			
		1	2	3	Ortalama	1	2	3	Ortalama
10	1	95.39	95.61	95.63	95.54	93.80	94.26	94.13	94.06
	2	456.68	458.47	459.23	458.13	452.66	453.82	454.71	453.73
	3	563.68	563.12	563.58	563.46	553.01	554.33	552.41	553.25
	4	1500.40	1498.30	1499.30	1499.33	1470.40	1473.40	1470.60	1471.47
	5	2762.80	2766.80	2767.70	2765.77	2732.10	2727.30	2736.30	2731.90
	6	2848.00	2844.30	2850.40	2847.57	2782.10	2798.80	2799.60	2793.50
	7	3177.50	3183.30	3184.70	3181.83	3170.70	3188.10	3183.80	3180.87
	8	4690.80	4690.70	4688.70	4690.07	4586.00	4594.00	4589.00	4589.67
20	1	102.20	102.11	102.80	102.37	98.44	98.82	99.45	98.90
	2	494.90	493.88	492.80	493.86	481.96	483.18	486.19	483.78
	3	604.68	606.33	606.99	606.00	577.18	581.50	582.41	580.36
	4	1613.00	1607.90	1611.30	1610.73	1545.10	1545.10	1551.60	1547.27
	5	2988.30	2975.20	2973.30	2978.93	2909.80	2915.50	2923.10	2916.13
	6	3072.40	3077.80	3075.20	3075.13	2948.60	2956.70	2959.10	2954.80
	7	3383.70	3389.60	3401.10	3391.47	3362.60	3353.40	3376.10	3364.03
	8	5037.00	5039.20	5059.80	5045.33	4854.10	4862.60	4847.10	4854.60
30	1	109.93	110.11	110.37	110.14	105.67	104.45	104.97	105.03
	2	533.91	531.73	533.89	533.18	519.40	518.77	520.09	519.42
	3	651.96	656.53	654.16	654.22	622.86	620.89	618.66	620.80
	4	1749.2	1759.2	1751.50	1753.30	1667.90	1656.6	1659.3	1661.27
	5	3225.6	3237.3	3229.50	3230.80	3147.80	3128.1	3145.4	3140.43
	6	3322.7	3330	3325.40	3326.03	3181.70	3174.3	3153.1	3169.70
	7	3629.2	3616.6	3638.20	3628.00	3617.80	3577.8	3584.5	3593.37
	8	5468.4	5487.8	5471.60	5475.93	5221.10	5160.4	5186.1	5189.20



a) Mod 1 b) Mod 8

Şekil 3.3. (a) ilk titreşim modu ve (b) son titreşim modu için akıllı PTMMK' lerin doğal frekansları üzerinde partikül boyutu ve hacim oranının birleşik etkisi.



a) P_s = 250 μm b) V_f = 0.2

Şekil 3.4. Akıllı PTMMK' lerin doğal frekansı üzerinde mod sayısının (a) hacim fraksiyonu (sabit P_s = 250 μm) ve (b) partikül boyutu (sabit V_f = 0.2) ile birleşik etkisi.

3.2. Aktif Titreşim Kontrol Analizleri

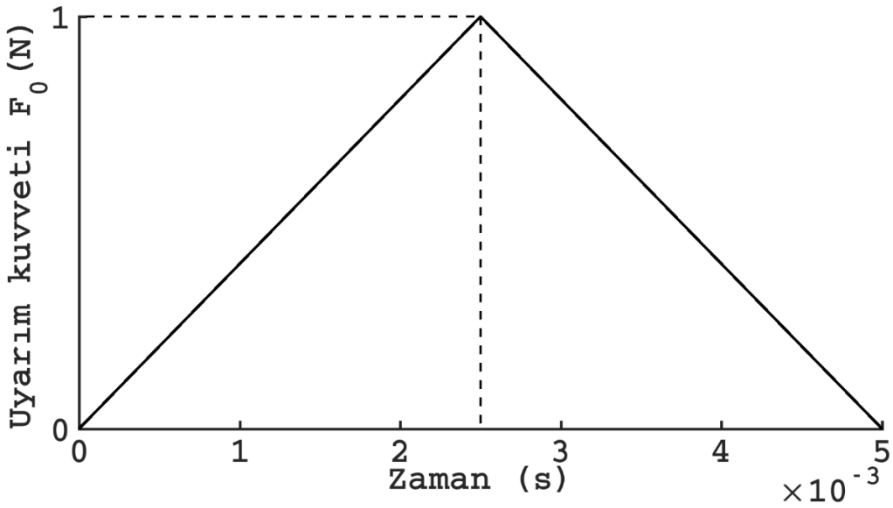
PTMMK' ler mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı durumlarda, bir PTMMK kirişe, kısa bir süre için uyarıcı bir kuvvet uygulanırsa titreşime başlayabilir. Bu nedenle, titreşim tepkisi ve seviyesi PTMMK kirişin uygulama alanı dikkate alındığında oldukça önem kazanmaktadır. PTMMK kirişe uyarıcı kuvvet uygulanması ile başlayan serbest titreşim, PTMMK kirişin yapısal sönümleme özelliğine bağlı olarak belirli bir süre sonra azalır. Yapısal sönümlemeyi simüle etmek için, PTMMK kirişinin geçici sönümlü titreşim tepkisi modele Rayleigh sönümlemesi dahil edilerek analiz edildi. Rayleigh sönüm katsayıları Tablo 2.1' de

verilmiştir. Ancak, PTMMK kirişinin titreşim yanıtını kontrol etmek ve titreşimi belirli bir zamanda ve minimum çabayla bastırmak yapısal güvenlik nedeniyle gereklidir.

Bu çalışma, kolayca uyarılabildiğinden dolayı sadece ilk titreşim modunu kontrol modu olarak almayı amaçlamıştır. Ayrıca, ilk doğal frekans diğer özdeğerler arasındaki en düşük frekanstır ve akıllı PTMMK, birinci doğal frekansına yakın bir frekansta harici bir uyarılmaya bağlı olarak bir rezonansa uğrayabilir. Bu nedenle, kontrolün kalitesini belirlemek ve mikro yapısal özelliklerin (partikül hacim oranı, boyutu, dağılımı) akıllı PTMMK' nin titreşim kontrolü üzerindeki etkisini ilk eğilme modunu göz önüne alarak incelemek çok önemlidir.

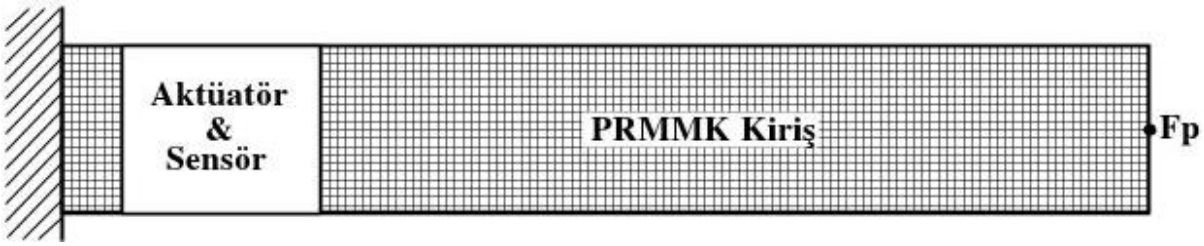
Aktif titreşim kontrolü analizleri, şekil 2.1 ve 2.2' de gösterildiği gibi PTMMK kirişlerin alt ve üst yüzeylerine entegre edilmiş piezoelektrik (PZT-5H) aktüatör ve sensör tabakaları ile gerçekleştirilmiştir. Akıllı kiriş yapılar bir uçta ankastre tip sınır koşulları oluşturmak için sabitlenmiş, diğer uç serbest bırakılarak tüm rotasyonlar ve yer değiştirmeler ankastre uçta sıfır kabul edilmiştir. PZT-5H aktüatör / sensör çiftleri, titreşim kontrolünde maksimum etkinlik sağlamak amacıyla yüksek gerilme bölgelerine yakın yerleştirilmeleri gerektiği için PTMMK kirişin ankastre ucuna yakın yerleştirilmiştir [42, 47, 64, 65].

Kirişte titreşimi başlatmak için 5×10^{-3} saniye boyunca $F_0 = 1$ N' luk uyarım kuvveti kirişin serbest ucuna uygulanmıştır (Şekil 3.5) ve geçici analizleri, t = 0.0005 saniyelik sabit bir zaman artışı ile toplam t = 0.5 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir. Aktif titreşim kontrolü, sistemde gelişen istenmeyen titreşimleri etkili bir şekilde sönümlemek için doğrudan orantılı bir geri bildirim kontrol stratejisi (bölüm 2.1.1.3' de sunulmuştur) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu arada, uygulanan kontrol voltajı, piezoelektrik yamaların sınır elektrik alan gücünü dikkate alarak yaklaşık olarak 2000 V' u aşmamalıdır. Piezoelektrik malzeme depolarize olabilir ve piezoelektrik malzeme özellikleri bu voltaj aşıldığında kısmen veya tamamen kaybolur [66].



Şekil 3.5. PTMMK kirişlere uygulanan uyarım kuvvetinin (F_0) değişimi.

PTMMK kirişin süreksiz titreşim analizi, uyarıcı kuvvetin (F_0), Fp noktasındaki nod' a uygulanmasından sonra yapılmaya başlanmıştır. Fp noktası Şekil 3.6 görüldüğü gibi PTMMK kirişin serbest uçtaki kenarının merkezidir.

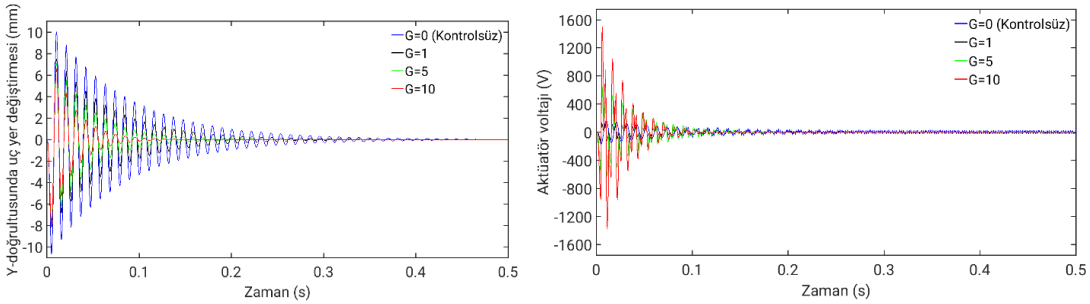


Şekil 3.6. Uyarım kuvvetinin PTMMK kirişin serbest kenarındaki uygulanma yeri (Fp noktası).

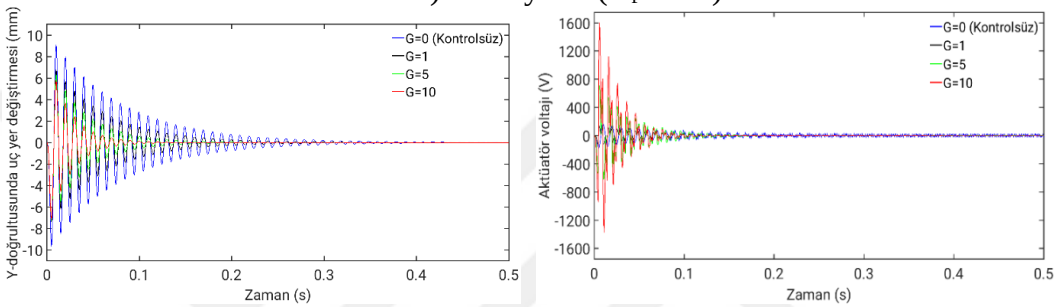
Şekil 3.7 (i), geri besleme kontrol kazanç oranının (G), PZT-5H piezoelektrik malzeme entegre edilmiş PTMMK yapıların (takviyesiz (V_f = %0), P_s = 250 μm (V_f = %10) ve P_s = 500 μm (V_f = %10)) uç noktalarındaki sapmaya etkisini göstermektedir. Geri besleme kontrol kazanç oranının (G) titreşim kontrolü üzerindeki etkisini göstermek için G, sırasıyla 1, 5 ve 10 değerlerinde seçilmiştir. G = 0, Şekil 3.7 (i) ve (ii) 'nin her birinde kontrol edilemeyen duruma karşılık gelmektedir. Takviyesiz ve takviyeli PTMMK kirişin titreşim genliği, yapısal sönümleme nedeniyle zamanla azalarak biter. Bununla birlikte, geri besleme kontrol kazancı G arttıkça, titreşim genliğinin önemli ölçüde azaldığı ve daha hızlı sönümlendiği kolayca gözlemlenebilir. Bu, beklenen bir sonuçtur çünkü, G yapıların sönümleme kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunur. G = 0, 1, 5

ve 10 olduğunda, takviyesiz kirişin titreşim genliği Şekil 3.7 (i) - (a) 'da ve Tablo 3.2' de gösterildiği gibi sırayla 0.5, 0.42, 0.26 ve 0.165 saniye içinde sıfırlanır. Ayrıca, şekil 3.7 (i) - (b) ve (i) - (c) 'de gösterildiği gibi geri besleme kontrol kazancı G' nin 0' dan 10' a artmasıyla, PTMMK kirişlerinin titreşim sönümleme süreleri sırasıyla, P_s = 250 μm (V_f =% 10) için 0,48 saniye' den 0,145 saniye' ye ve P_s = 500 μm (V_f =% 10) için 0.495 saniye' den 0.16 saniye' ye iner. Dolayısıyla, G=0'dan 10'a yükseldiğinde, titreşim genliği sönümleme süresi; takviyesiz yapı, Ps = 250 μm (V_f =% 10) PTMMK takviyeli yapı ve P_s = 500 μm (V_f =% 10) takviyeli PTMMK yapı için sırasıyla yaklaşık % 67, % 70 ve % 68 daha hızlı olur. Sonuç olarak, kullanılan kontrol algoritmasına göre, geri besleme kontrol kazancı G' nin 0'dan 10'a yükselmesi ile hem titreşim genliği hem de sönümleme zamanı önemli ölçüde azaltılmıştır.

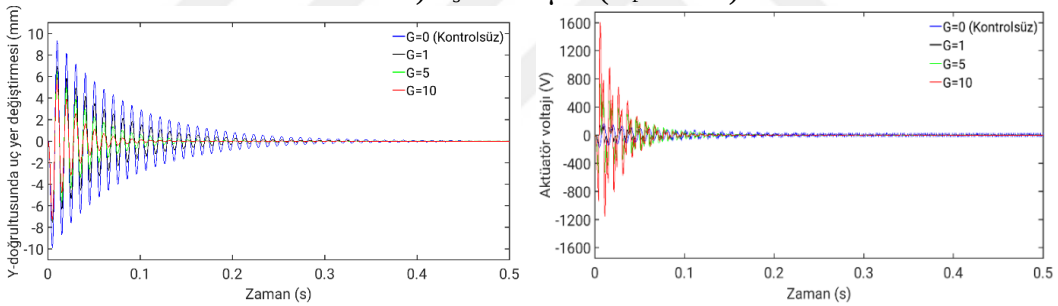
i) Enine uç yer değiştirmeleri *ii*) Aktüatör voltajları



a) Takviyesiz (V_f = %0)



b) P_s = 250 µm (V_f = %10)



c) P_s = 500 µm (V_f = %10)

Şekil 3.7. Farklı geribesleme kontrol kazançlarına (G) göre PTMMK yapının enine uç yer değiştirme ve aktüatör voltaj değişimleri: (a) takviyesiz (V_f = %0), (b) P_s = 250 µm (V_f = %10), ve (c) P_s = 500 µm (V_f = %10).

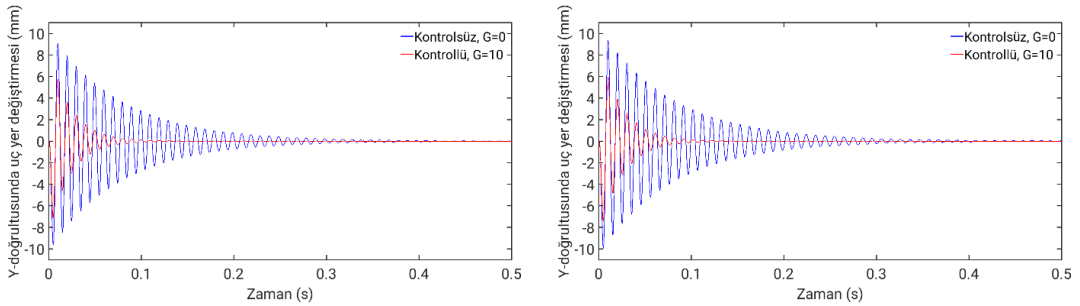
*Tablo 3.2.*Takviyesiz kirişin G kazanç oranındaki değişime göre sönümlenme süreleri.

		Sönümlenme Süresi
		Saniye
G (Kazanç Oranı)	0	0.5
	1	0.42
	5	0.26
	10	0.165

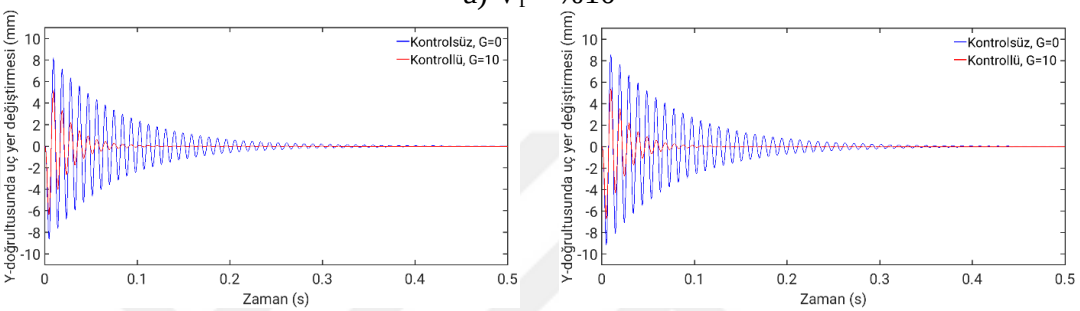
Şekil 3.7 (ii), PZT aktüatörüne uygulanan kontrol voltajının geçmişini göstermektedir. Aktüatör voltajları PTMMK kirişin salınımıyla uyumlu olarak değişir ve titreşim periyotları neredeyse benzerdir. Kontrol kazancı G' nin artan değerleri genellikle aktüatöre uygulanan kontrol gerilimlerini arttırır. Özellikle, titreşim sönümlemenin başlangıcında G = 10 iken aktüatör voltajı zirve değerine ulaşır. Ardından gerilim değerleri uygulanan kontrol algoritması altında dengelenir. Bununla birlikte, aktüatör voltajları piezoelektrik seramik malzemenin maksimum elektrik alan sınırları içindedir.

Şekil 3.8 (i) ve (ii), P_s = 250 ve 500 μm partikül boyutları için V_f = %10, % 20 ve % 30 hacim oranlarında PTMMK kirişlerinin kontrolsüz ve kontrollü versiyonlarının kiriş uç noktalarındaki sapmaları göstermektedir. Kontrolsüz analiz sonuçlarına göre, partikül boyutu P_s = 250 μm olan PTMMK' lerin V_f = %10, %20 ve %30 için enine uç yer değiştirmeleri sırasıyla 9.65, 8.62 ve 7.71 mm olduğu görülürken, P_s = 500 μm boyutunda partikül ile V_f = %10, %20 ve %30 oranında güçlendirilmiş PTMMK' lerin en büyük uç yer değiştirmeleri sırasıyla 9.97, 9.16 ve 8.19 mm' dir. Bu arada, takviyesiz yapının en büyük uç yer değiştirme değerleri kontrolsüz ve kontrollü durumlar için sırasıyla 10.64 mm ve 7.99 mm' dir (Şekil 3.7 (i) - (a)' ya bakınız). Aktif titreşim kontrolü ile P_s = 250 μm partiküllerle takviyeli PTMMK' lerin enine uç yer değiştirmeleri sırasıyla V_f = %10, %20 ve %30 için 7.17, 6.36 ve 5.66 mm' ye düşerken, P_s = 500 μm için en büyük uç yer değiştirmeler V_f = %10, %20 ve %30 için sırasıyla 7.45, 6.77 ve 6.07 mm' ye düşer. PTMMK’ ler için titreşimin genliği genel olarak hacim oranı arttıkça azalmaktadır, bununla birlikte partikül boyutu arttıkça genliğin de arttığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, takviyesiz kirişin en büyük titreşim genliğine sahip olduğuna dikkat edilmelidir. Bunun nedeni partikül hacim oranlarının artmasının PTMMK' lerin rijitliğinde bir artışa neden olmasıdır. Buna ek olarak, partikül boyutundaki artış ise rijitlikte bir azalmaya neden olmaktadır.

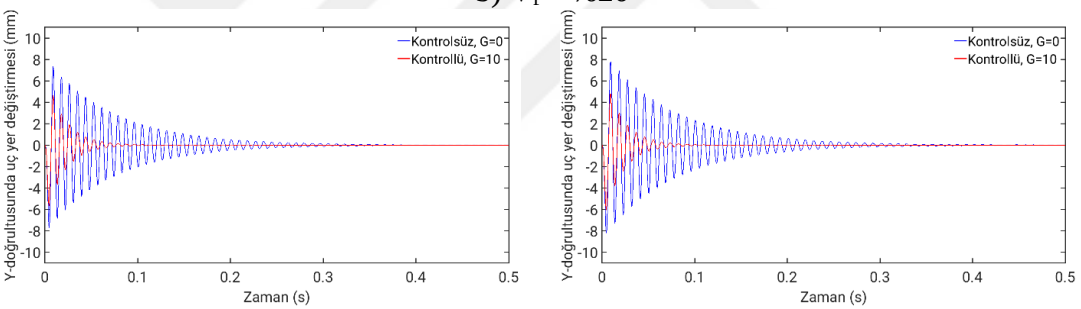
i) P_s = 250 µmW *ii*) P_s = 500 µm



a) V_f = %10



b) V_f = %20



c) V_f = %30

Şekil 3.8. Kontrollü ve kontrolsüz durumlar için akıllı PTMMK kirişlerin enine uç yer değiştirmelerinin

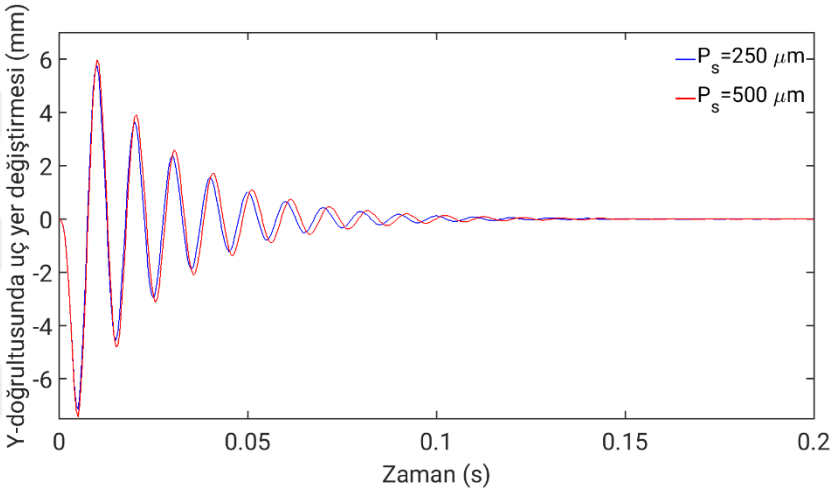
partikül boyutlarına göre değişimi: (a) V_f = %10, (b) V_f = %20, ve (c) V_f = %30.

Aktif kontrolün olmadığı durumda, takviyesiz yapı 0.5 sn' de sönümlenmekte, bununla birlikte P_s = 250 µm partikül boyutuna sahip PTMMK' ler, sırasıyla V_f = %10, % 20 ve % 30 hacim oranları için 0.48 sn, 0.47 sn ve 0.45 sn' de sönümlenmekte, P_s = 500 µm partikül boyutundaki PTMMK' ler sırasıyla V_f = %10, % 20 ve % 30 hacim oranları için 0.495 sn, 0.475 sn ve 0.468 sn' de sönümlenmektedir. SiC partikül takviyelerinin partikül hacim oranına bağlı olarak PTMMK' lerin yapısal sönümlenmesini (kontrolsüz durum için) değiştirdiği gözlemlenebilir. Buna paralel olarak, hacim oranındaki artış ile titreşimin genliği, uygulanan aktif kontrol algoritması ile daha hızlı sönümlenir. Takviyesiz yapının titreşim genliği, aktif kontrolü G = 10 ile uygulayarak, yaklaşık 0.165 saniyede sıfıra indirilir. İlaveten, P_s = 250 µm partikül boyutlu V_f = %10, %20 ve

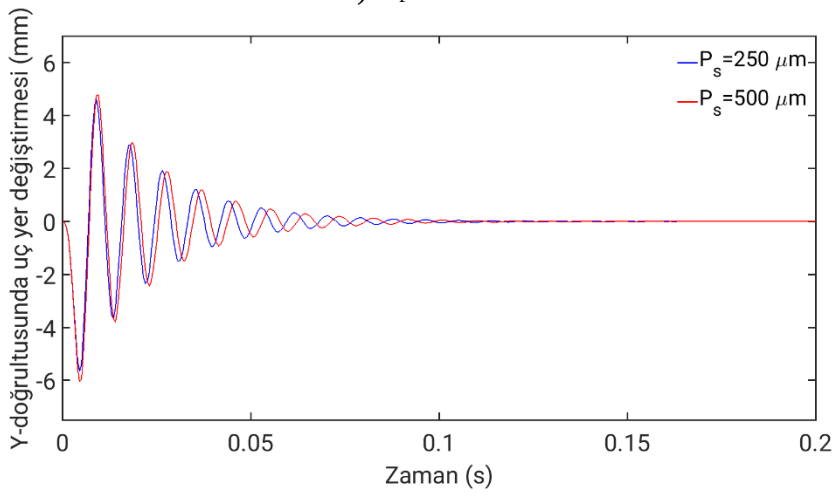
%30 hacim oranında PTMMK' lerin titreşim genliği sırasıyla 0.145 sn, 0.133 sn ve 0.125 sn' de (G = 10 için) sönümlenirken, P_s = 500 μm partikül boyutlu V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranlı PTMMK' lerin titreşim genlikleri, sırasıyla 0.16 sn, 0.156 sn ve 0.142 sn' de (G = 10 için) sönümlenmiştir (Tablo 3.3). P_s = 250 μm partikül boyutlu PTMMK' ler için kontollü durum kontrolsüz durumla karşılaştırıldığında, titreşim genlikleri %10, %20 ve %30' luk hacim oranlarında sırasıyla % 70, % 72 ve %72 oranında daha hızlı sönümlenir. Ayrıca, P_s = 500 μm partikül boyutuna sahip PTMMK' lerin titreşim genlikleri, V_f = %10, %20 ve %30 hacim oranları için sırasıyla %68, %67 ve %70 oranında daha hızlı sönümlenmiştir. Görüldüğü gibi, PTMMK' lerin titreşim genlikleri, her bir partikül boyutu için her bir hacim oranındaki aktif kontrol kuvvetleri ile hemen hemen sabit yüzdelerde (≈% 70) sönümlenir. Kontrolsüz durumda, partikül hacim oranının %10 dan %30' a olan bir artış P_s = 250 μm ve P_s = 500 μm için sönümleme süresini sırasıyla %6.25 ve %5.45 oranında azaltmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 3.9 sabit hacim oranları V_f = %10 ve %30 için P_s = 250 μm ve P_s = 500 μm partikül boyutlarıyla takviye edilmiş PTMMK kirişlerin kontrollü durumdaki yer değiştirme miktarlarının karşılaştırmasını göstermektedir. Kontrollü durumda, sönümleme süresi, Ps = 250 μm ve Ps = 500 μm için hacim oranları % 10' dan % 30' a artarken sırasıyla % 13.8 ve % 11.25 oranında azalmaktadır. Bu aynı zamanda, sabit partikül hacim oranı değişiminde (% 10’ dan % 30’ a) partikül boyutunun P_s = 250 μm ‘ den P_s = 500 μm’ a artmasının kontrolsüz durumda sönümleme süresini % 0.8 arttırdığını göstermektedir. Benzer şekilde, partikül boyutu P_s = 250 μm' den 500 μm' ye yükseltildiğinde, kontrollü durumda titreşim sönümleme süreleri % 2.55 oranında artmaktadır. Bu nedenle, Al 6061 matrisine SiC partikül eklenmesi, PTMMK' lerin yapısal sönümleme özelliğinde bir artış sağlar ve bu katkı partikül hacim oranının arttırılmasıyla sönümleme süresinde önemli bir azalmaya neden olur. Ancak, partikül boyutunun arttırılması titreşim sönümleme genliğinin ve zamanının minimal seviyede de olsa kötüleşmesine neden olur.

Tablo 3. 3. G kazanç oranı ve takviye oranına göre sönümleme sürelerindeki değişim.

		Sönümleme Süresi (saniye)						
		Takviyesiz (V_f =0)	250 µm			500 µm		
			%10	%20	%30	%10	%20	%30
G (Kazanç Oranı)	0	0.5	0.48	0.47	0.45	0.495	0.475	0.468
	10	0.165	0.145	0.133	0.125	0.16	0.156	0.142



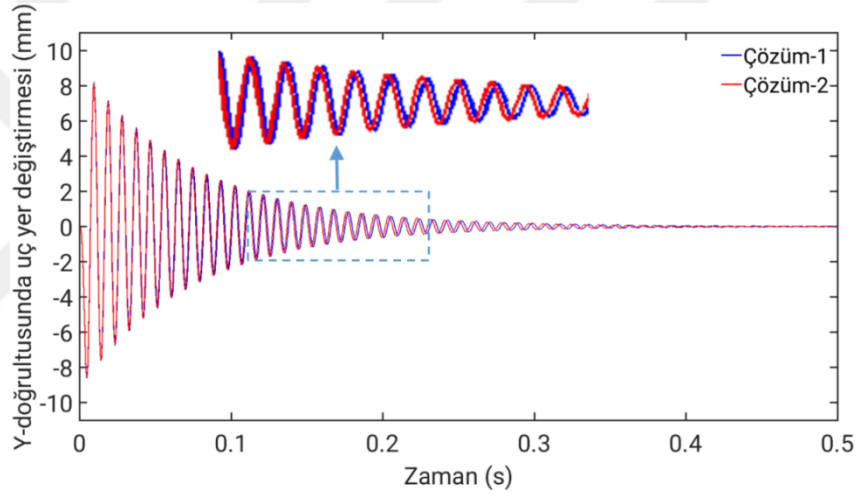
a) V_f = %10



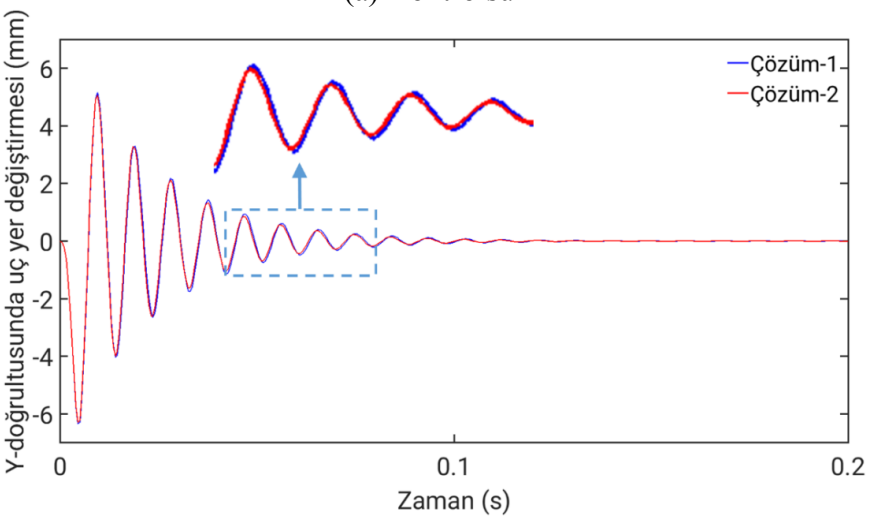
b) V_f = %30

Şekil 3.9. Kontrollü durumda P_s = 250 ve 500 µm partikül boyutlarına sahip akıllı PTMMK kirişlerin (a) V_f = %10 ve (b) V_f = %30 hacim oranları için enine uç yer değiştirmelerinin karşılaştırması.

Şekil 3.10, P_s = 250 μm partikül boyutuna ve V_f = %10 hacim oranına sahip olan PTMMK' lerin kontrolsüz (a) ve kontrollü (b) enine uç yer değiştirmelerine rastgele partikül dağılımının etkisini göstermektedir. Rasgele partikül dağılımının enine uç yer değiştirmeleri üzerinde baskın bir etkisi hem kontrollü hem de kontrolsüz sönümlenmiş titreşimler için analiz sonuçlarına göre gözlenmemektedir. Bununla birlikte, rastgele partikül dağılımı, sönümlü titreşim süresi üzerinde minimum etkiye sahiptir. Bu minimum etki, Şekil 3.10 (a) 'da gösterildiği gibi kontrolsüz titreşimler için daha belirgindir. Ancak, kontrollü titreşimler için belirgin bir etki neredeyse yoktur. Bu çoğunlukla kontrollü koşullar için titreşim genliği ve zamanının azalmasından kaynaklanmaktadır.



(a) Kontrolsüz



(b) Kontrollü

Şekil 3.10. Rasgele partikül dağılımının etkileri: dağılımının etkileri: (a) Kontrolsüz durum için ve (b) kontrollü durum için P_s = 250 μm partikül boyutu ve V_f = %10 hacim oranlı PTMMK kirişin enine uç yer değiştirmesi.

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Giriş

Bu çalışma, akıllı Al 6061 / SiC partikül takviyeli metal matris kompozitlerin partikül hacim oranının, partikül boyutunun ve rasgele partikül dağılımının serbest titreşim davranışları üzerindeki etkileri incelenmiş ve aktif titreşim kontrolleri nümerik (sayısal) olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma Üç Boyutlu (3D) Sonlu Elemanlar Metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, P_s = 250 ve 500 μm partikül boyutlarına ve V_f = %10, %20 ve %30 partikül hacim oranlarına sahip olan PTMMK' lerin ve karşılaştırma amaçlı kullanılan takviyesiz alaşımların sayısal 3D SEM modelleri oluşturulmuştur. PTMMK' lerin gerçek mikro-yapılarının simüle edilmesi amacıyla, takviye partiküller 3D kübik geometrili olarak tanımlanmış ve matris içerisinde 3D olarak rasgele dağıtılmıştır. Sayısal modelleme ve analiz çalışmalarının tamamı ABAQUS sonlu elemanlar programında Python programlama dili yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Partikül hacim oranı, partikül boyutu ve dağılımının PTMMK' lerin serbest titreşim davranışları üzerine etkileri mod şekilleri ve doğal frekans değerlerinin kıyaslanmasıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, Akıllı PTMMK kirişlerdeki sönümlü serbest titreşimin etkin kontrolü kapalı döngü geri besleme kontrol yasası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aktif titreşim kontrolleri yine farklı mikro-yapısal (partikül hacim oranı, boyutu ve rasgele dağılımı) değişkenler esas alınarak yapılmıştır. Aktif titreşim kontrolü akıllı kirişin enine uç yer değiştirmeleri ve aktüatör voltaj değerleri açısından farklı geri besleme kontrol kazançlarına (G) göre de değerlendirilmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında yapılabilecek öneriler genel hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

4.2. Sonuçlar

Gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda, özellikle partikül hacim oranının ve partikül boyutunun PTMMK' lerin serbest titreşim davranışları ve aktif titreşim kontrolü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Buna göre;

1) Akıllı PTMMK' ler için mod şekilleri, mikro-yapısal özelliklerden (partikül hacmi oranı, boyutu ve dağılımı) etkilenmezken, mikro-yapısal özelliklerin doğal frekans değerleri üzerinde daha belirgin etkileri gözlenmiştir. Partikül hacim oranının doğal frekans üzerinde partikül boyutuna göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Doğal frekans, artan partikül hacim oranıyla hemen hemen doğrusal olarak artar ancak, azalan partikül boyutuyla birlikte az miktarda artar. Çünkü, hacim oranının artması ve partikül boyutunun azalması akıllı kompozit kirişin rijitleşmesine neden olur.

2) Rasgele partikül dağılımının partikül hacim oranı ve boyutu ile karşılaştırıldığında doğal frekanslar üzerinde küçük bir etki oluşturduğu görülmüştür.

3) Akıllı PTMMK' lerin ve takviyesiz kirişlerin serbest titreşim analizleri hem akıllı PTMMK' lerin hem de takviyesiz kirişlerin aynı mod şekillerine sahip olduklarını ve çoğunlukla enine eğilme modlarına, nadiren yanal eğilme ve burulma modlarına maruz kaldıklarını gösterir. Ayrıca, bu yapıların mod şekillerinin mikro yapı özelliklerine bağlı olmadığı gözlenmiştir.

4) Geri besleme kontrol kazancı (G) arttıkça, titreşim genliği önemli ölçüde azalmıştır ve titreşim daha hızlı sönümlenebilmiştir. Al 6061 metal matrisindeki SiC partikül takviyeleri, PTMMK' lerin yapısal sönümlenmesine katkıda bulunduğu ve bu katkının sönümleme süresinde önemli bir kısalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

5) Kullanılan kontrol algoritması ile akıllı PTMMK' lerin titreşim genlikleri, her bir partikül boyutu için her bir hacim oranındaki aktif kontrol kuvvetleri ile hemen hemen sabit yüzdelerde (≈% 70) sönümlenebilmiştir.

6) Hem kontrollü ve hem de kontrolsüz sönümlenmiş titreşimler için partikül hacim oranının arttırılması titreşim genliğinin azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, partikül boyutunun arttırılmasının PTMMK yapının titreşim sönümleme kapasitesini düşürdüğü, titreşim genliğini ve süresini az miktarda

arttırdığı gözlenmiştir. Rasgele partikül dağılımının, yalnızca kontrolsüz titreşimler üzerinde küçük etkileri olduğu belirlenmiştir.

4.3. Öneriler

Gerçekleştirilen sayısal çalışmada, serbest titreşim ve aktif titreşim kontrolü açısından elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla desteklenmesi çalışmaya önemli bir katkı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan kontrol algoritmasının daha da geliştirilmesi ve farklı mühendislik yapılarında da kullanılarak yeni çalışmalara önayak olması düşüncesi değerlendirilmelidir. Ayrıca, yapılan çalışmada özellikle aktif kontrol analizlerinin sadece Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak yapılması konu ile ilgilenen araştırmacılara önemli kolaylıklar sağlayabilir. Çünkü, aktif titreşim kontrol çalışmaları çoğunlukla ikinci bir paket program vasıtasıyla yürütülmektedir. Araştırmacılar açısından çalışmanın tek bir platformda yürütülebilmesi, ikinci bir programın gerekliliğini ortadan kaldıracağı için zaman tasarrufu sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Chawla, K.K. (1998). Composite Materials-Science and Engineering, 2nd ed., Springer, New York.
2. Chawla, N., Chawla, K.K. (2006). Microstructure-based Modeling of the Deformation Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites, **Journal of Materials Science, 41**: 913-925.
3. Chawla, N., Chawla, K.K. (2006). Metal matrix composites, Springer, New York.
4. Christman, T., Needleman, A., Suresh, S., 1989. An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites. cta metall. 37, 3029–3050.
5. Tvergaard, V., Analysis of tensile properties for whisker-reinforced metal-matrix composite. **Acta Metall. Mater. 38**, 185-194, 1990.
6. Zhang, J., Perez, R.J., Lavernia, E.J., Documentation of damping capacity of metallic ceramic and metal-matrix composite materials, **Journal of Materials Science, 28**, 2395-2404, 1993.
7. Zhang, J., Perez, R.J., Gupta, M., Lavernia, E.J., Damping behavior of particulate reinforced 2519 Al metal matrix composites, **Scripta Metallurgica et Materialia, 28** (1), 91-96 1993.
8. Rohatgi, P.K., Nath, D., Singh, S. S., Keshavaram, B.N., Factors affecting the damping capacity of cast aluminium-matrix composites, **Journal of Materials Science, 29** (22), 5975-5984, 1994.
9. Srikanth, N., Gupta M., Determination of energy dissipation in Mg/SiC formulations using a new method of suspended beam coupled with circle fit approach, **Scripta Materialia, 45**(9), 1031-1037, 2001.
10. Wei, J.N., Cheng, H.F., Zhang, Y.F., Han, F.S., Zhou, Z.C., Shui, J.P., Effects of macroscopic graphite particulates on the damping behavior of commercially pure aluminum, **Materials Science and Engineering A,325,** 444-453, 2002.
11. Srikanth, N., Tun, K.K., Gupta M., Finite Element Based Energy Dissipation Studies of Al-SiC Composites, **Journal of Composite Materials, 35**(15), 1385-1410, 2003.
12. El-Kady, E.-S. Y.,Mahmoud, T.S., El-Betar, A. A.-F., Sayed, M. A.-A., DynamicBehaviour of Cast A356/Al_2O_3Aluminum Metal Matrix Nanocomposites, **Materials Sciences and Applications, 3**, 815-820, 2012.

13. Prasad, D.S., Shoba, C., Varma, K. R., Damping behavior of commonly used reinforcement powders-An experimentalapproach, Engineering Science and Technology, **An International Journal, 18**, 674-679, 2015.
14. Prasad, D.S., Shoba, C., Damping Behavior of Metal Matrix Composites, **Transactions of the Indian Institute of Metals, 68**(2), 161-167, 2015.
15. Bauri R., and Surappa M.K., Damping behavior of Al-Li-SiC_p composites processed by stir casting technique, **Metallurgical and Materials Transactions A, 36** (3) 667-673, 2005.
16. Perez R.J.,Zhang J., Gungor M.N., andLavernia E.J., Damping behavior of 6061Al/Gr metal matrixcomposites, **MetallurgicalTransactions A, 24** (3), 701-712, (1993.
17. Zhang J., Perez R.J., and Lavernia E.J., Effect of SiC and graphite particulates on the damping behavior of metal matrix composites, **ActaMetallurgica et Materialia, 42** (2), 395-409, 1994.
18. Newnham R. E., Ferroelectric Sensors and Actuators: Smart Ceramics. In: Setter, N. and Colla, E. L. (eds.), Ferroelectric Ceramics, 363-380, 1993.
19. Reddy J. N. and Cheng Z. Q., Three-Dimensional Solutions of Smart Functionally Graded Plates, **ASME J. Applied Mechanics, 68**, 234-241, 2001.
20. Reddy J. N., Nonlinear Analysis of Smart Composite Plates, IUTAM Symposium on Duality-Complementarity-Symmetry in Nonlinear Mechanics, August 14-17, Shanghai, China, 2002.
21. Aliaga J. W.,Analysis of Smart Functionally Graded Materials Using an Improved Third Order Shear Deformation Theory, Phd Thesis, Texas A&M University, 2006.
22. Kargarnovin M. H., Najafizadeh M. M.and Viliani N. S.,Vibration Control of a Functionally Graded Material Plate Patched with Piezoelectric Actuators and Sensors Under a Constant Electric Charge, **Smart Materials and Structures, 16,** 1252-1259, 2007.
23. Bidokhti A. A., Vanini A. S., Eslami M. R., Active Control of Piezo-FGM Beams, MATERIAUX 2006, 13-17 November, Dijon, France, 2006.
24. Mackerle J., Smart Materials and Structures-A Finite-Element Approach: A Bibliography (1986-1997), **Modelling Simulation in Materials Science and Engineering, 6**, 293-334, 1998.

25. Nakaya, C., Takeuchi H., Katakura, K., Sakamoto, A., Ultrasonic probe using composite piezoelectric materials, Proceedings of the 1985 IEEE Ultrasonics Symposium, 634-636, 1985.
26. Hori, M., Aoki, T., Ohira, Y., Yano, S., New type of mechanical damping composites composed of piezoelectric ceramics, carbon black and epoxy resin,. **Composites Part A-Applied Science and Manufacturing, 32**(2), 287-290, 2001.
27. Baz, A. and A. Tempia, Active piezoelectric damping composites, **Sensors and Actuators a-Physical, 112** (2-3), 340-350, 2004.
28. Asare T.A., Fabrication and damping behavior of particulate $BaTiO_3$ ceramic reinforced copper matrix composites, MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
29. Karagulle H.,Malgaca, L., Oktem, H.F., Analysis of active vibration control in smart structures by ANSYS, **Smart Materials and Structures, 13**, 661-667, 2004.
30. Shoukry, S.N., Prucz, J.C., Shankaranarayana, P.G., William, G.W., Microstructure Modeling of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites, Mechanics of **Advanced Materials and Structures, 14** (6): 499-510, 2007.
31. **http://www.britannica.com/science/vibration** (Erişim Tarihi: Ocak 2016)
32. **https://tr.wikipedia.org/wiki/Titreşim** (Erişim Tarihi: Ocak 2016)
33. Shereve, D. H., Introduction To Vibration Technology, Presentation of IRD Mechanalysis, Inc., 1994.
34. Preumont, A., 2011, Introduction, pp. 1-4. In: Vibration Control of Active Structures (Eds: G.M.L. GLADWELL). Springer, Berlin.
35. Jalili, N., 2010. Piezoelectrik-Based Vibration Control: From Macro to Micro/Nano Scale Systems. Springer, New York, 517 pp.
36. Strong, A. B., Jensen, D. W., Smart Structures-Impractical or Inevitable? Presentation of Brigham Young University, 1999
37. Akdoğan, A., Nurveren, K., 2003. Şekil hafızalı alaşımlar. **Mühendis ve Makine, 44** (521): 35-44.
38. Kalemtaş, A., 2014, Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. Putech and Composites, Ekim-Kasım-Aralık 2014: 18-30

39. Uygur İ., Saruhan H., 2004, Aluminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8** (1): 167-174

40. Chen, X.**,** Hua, H., Liu, Y., 2000. A higher-order FEM for vibration control of composite plates with distributed piezoelectric sensors and actuators, pp. 1506-1511. Advances in Computational Engineering & Sciences, 2000, Los Angeles, Tech Science Press, 2100 s/pp.

41. Waghulde, K., B., Kumar, B., 2014. Finite element and experimental investigation and control of vibration of piezoelectric smart beam. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3** (12) : 17882-17889.

42. Rafi, S.M.S., Sami, A., 2011. Finite element analysis of a beam with piezoelectrics using third order theory-part II dynamic analysis-active vibration control. **International Journal on Emerging Technologies, 2** (1): 135-139.

43. Spier, C., Bruch, Jr, J., C., Sloss, J., M., Adalı, S., Sadek, I., S., 2010. Analytic and finite element solutions for active displacement feedback control using pzt patches. **Journal of Vibration and Control, 16** (3): 323-342.

44. Duan, W., H., Quek, S., T., Wang, Q., 2005. Free vibration analysis of piezoelectric coupled thin and thick annular plate. **Journal of Sound and Vibration, 281** (2005): 119–139.

45. El-Badawy, A.A., 2008. Active vibration suppression of a cutting tool utilizing the finite element method. **Journal of Al Azhar University Engineering Sector, 3** (9): 1034-1046.

46. Chabra, D., Narwal, K., Singh, P., 2012. Design and analysis of piezoelectric smart beam for active vibration control. **International Journal of Advancements in Research and Technology, 1** (1): 1-5.

47. Rathi, V., Khan, A., H., 2012. Vibration attenuation and shape control of surface mounted, embedded smart beam. **Latin American Journal of Solids and Structures, 1** (2012): 1-25.

48. Manjunath, T., C., Bandyopadhyay, B., 2006. Smart control of cantilever structures using output feedback. **International Journal of Simulation, 7** (4-5): 51-68.

49. Sohn, J.W., Kim, H..S., Choi, S.B., 2006. Active vibration control of smart hull structures using piezoelectric actuators. **Journal of Mechanical Engineering Science, 220** (9): 1329-1337.

50. Zhang, S., Q., Schmidt, R., 2012. LQR control for vibration suppression of piezoelectric integrated smart structures. **Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 12** (1): 695-696.

51. Takács, G., Rohal'Ilkiv, B., Direct closed-loop active vibration control system prototyping in ansys, pp. 1-12. Novem 2012, Noise and Vibration: Emerging Methods, April 1-4, Sorrento, 2012.

52. Srikanth, N., Ganesh, V., Gupta, M., 2002. Damping characterization of aluminium based composites containing interconnected-wires type reinforcement, pp. 241-246. IMAC-XX: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2002, Los Angeles, 1599.

53. Srikanth, N., Lim, S., C.,V., Gupta M., 2002. Damping characterization of magnesium based composites using a new circle-fit approach. **Journal of Composite Materials, 36** (20): 2339–2355.

54. Wang, C., Zhu, Z., 1998. Internal friction at medium temperature in an Al matrix composite reinforced by SiC particles.**Scripta Materialia, 38** (12): 1739-1745.

55. ABAQUS/Standard (Version 6.8). Finite Element, Software, **www.simulia.com** (accessed 2008).

56. Python Programming Language, **http://www.python.org.**

57. Carrera E., Brischetto S. and Nali P., Plates and shells for smart structures: classical and advanced theories for modeling and analysis, 1st ed. John Wiley & Sons, UK, 2011.

58. Reddy J. N., Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004.

59. Tiersten H. F., Linear Piezoelectric Plate Vibrations, Plenum Press, New York, 1969.

60. Xu K., Nooral A. K., Tang Y. Y., Three-dimensional solutions for coupled thermoelectroelastic response of multilayered plates, **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 126**, 355-371, 1995.

61. Liew K. M., Sivashanker S., He X, Q. and Ng T. Y., The modelling and design of smart structures using functionally graded materials and piezoelectrical sensor/actuator patches, **Smart Materials and Structures, 12**, 647-655, 2003.
62. X. Q. Peng, K. Y. Lam and G. R. Liu, Active vibration control of composite beams with piezoelectrics, **Journal of Sound and Vibration, 209**, 635-650, 1998.
63. Hwang, W.S. and Park, H.C., Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators, **AIAA Journal, 31** (5), 1993.
64. Chhabra, D., Chandna, P., Bhushan, G., Design and Analysis of Smart Structures for Active Vibration Control using Piezo-Crystals, **International Journal of Engineering and Technology, 1** (3), 153-163, 2011.
65. Gandhi, P. K., Mevada, J. R., A finite element model and active vibration control of composite beams with distributed piezoelectrics using third order theory, **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 3** (3), 940-945, 2013.
66. Vasques, C.M.A., Dias Rodrigues, J., Active vibration control of smart piezoelectric beams: Comparison of classical and optimal feedback control strategies, **Computers and Structures, 84**, 1402-1414, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Vahdet Mesut ABACI
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 25 Ocak 1984, İskenderun
Medeni Durumu: Bekâr
Tel: +90 535 239 46 19
E-mail: mesutabaci@gmail.com
Yazışma Adresi: Yenişehir Mahallesi, Şefika Sokak, No:10/2 – 82 (Dumankaya Flex Sitesi B Blok, D:82), Pendik, İstanbul

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2008
Lise	İ.D.Ç. Anadolu Lisesi, İskenderun	2002

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2017- Halen	Ülker Bisküvi	Endüstriyel Bakım Şefi
2013-2017	Anadolu Cam	Mekanik Bakım Mühendisi
2011-2013	Hok Kilit	Makine Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce