



MT2026 MEKANİK TİTREŞİM ÇALIŞTAYI



MAKİNA TEORİSİ DERNEĞİ (MAKTED) katkılarıyla

Çalıştay Programı:

- Prof. Dr. H. Nevzat ÖZGÜVEN
1. Oturum: Deneysel Modal Analiz
2. Oturum: Doğrusal Olmayan Sistemlerin Modal Analizleri
- Prof. Dr. Nezih TOPALOĞLU
3. Oturum: Titreşimden Enerji Üretimi
4. Oturum: Titreşim Verisi Kullanarak Derin Öğrenme Tabanlı Arıza Tespiti
- Prof. Dr. Mehmet DÖRDÜNCÜ
5 & 6. Oturumlar: Kırılma ve Titreşim Analizi Arasındaki Etkileşimin Peridynamik Teorisi ile İncelenmesi
- Prof. Dr. Bahar UYMAZ
7. Oturum: Sürekli Ortamların Titreşimi: Plaklar
- Prof. Dr. Çetin YILMAZ
8. Oturumlar: Elastik Metamalzemeler

Saat	Pazartesi 2.2.2026	Salı 3.2.2026	Çarşamba 4.2.2026	Perşembe 5.2.2026	Cuma 6.2.2026
10:00- 12:30	1. Oturum	3. Oturum	EDİRNE ŞEHİR TURU	5. Oturum	7. Oturum
	Öğle Yemeği	Öğle Yemeği		Öğle Yemeği	Öğle Yemeği
14:00- 16:30	2. Oturum	4. Oturum		6. Oturum	8. Oturum

**Prof. Dr. H. Nevzat ÖZGÜVEN****Lisans :** 1973 – ODTÜ Makine Müh.**Yüksek Lisans :** 1975 - ODTÜ Makine Müh.**Doktora :** 1978 - The University of Manchester**Araştırma Alanları:** Makina Teorisi ve Dinamiği,
Mekanik Titreşimler, Mekanik, Mühendislik ve
Teknoloji**1. OTURUM: DENEYSEL MODAL ANALİZ**

Deneysel modal analiz; var olan bir sisteme modal testin uygulanması, elde edilen ölçümlerden yararlanarak sistemin modal modelinin elde edilmesi ve modal model kullanılarak, verilen bir kuvvete sistemin göstereceği titreşim yanıtının hesaplanması aşamalarını içerir. Bu eğitimde, temel bilgilerin özetlenmesi sonrasında, önce tek serbestlik dereceli bir sistemde modal test yardımıyla sistem tanılmasının (identification) nasıl yapılacağı incelenecek, daha sonra ise çok serbestlik dereceli bir sistemde modal tanılama yöntemlerinden en çok kullanılan iki yöntem verilecektir.

Temel bilgiler kapsamında; frekans tepki fonksiyonu, çok serbestlik dereceli sistemlerin modal analizi ve kutupsal (Nyquist) grafiğin özellikleri incelenecektir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin tanılanması için zirve seçimi ve kutupsal grafik ile modal tanılama yöntemleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Modal model kullanılarak, verilen bir kuvvete sistemin göstereceği titreşim yanıtının hesaplanmasında, tanılanan modlar dışında kalan modların etkisinin nasıl dikkate alınabileceği örneklerle gösterilecektir.

2. OTURUM: DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN MODAL ANALİZLERİ

İlk bölümde ele alınacak konulardan farklı olarak, bu kısımda, uzun bir döneme yayılan araştırmaların sonucu olan, bununla birlikte evrensel kabul gören uygulaması giderek yaygınlaşan Tepki Kontrollü Test yöntemiyle elde edilen doğrusal olmayan frekans tepki fonksiyonlarının ölçülmesi ve bunlardan yararlanarak doğrusal olmayan sistemlerin modal modellerinin elde edilmesi incelenecektir. Özellikle, civata ve benzeri elemanlarla birleştirilmiş yapıların teorik olarak modellenmesinde istenilen başarı çoğunlukla elde edilememektedir. Bu durumda en iyi yaklaşım, sistemin modelinin yapılan dinamik test sonuçlarından elde edilmesidir. Civata ve benzeri bağlantı elemanları, sürtünmenin neden olduğu doğrusal olmayan etkiler nedeniyle, bilinen modal tanılama yöntemleriyle modellenememektedir. Bu bölümde verilecek yöntem, bu ve benzeri yapı ve

sistemlerinin modellenmesinde uygulanabilir. Doğrusal olmayan sistemin verilen bir kuvvete göstereceği titreşim yanıtının, elde edilen modal modelden yararlanarak hesaplanması ve bunun ölçülen değerlerle karşılaştırılarak yöntemin doğrulanması, çok sayıdaki laboratuvar test yapısı ve karmaşık mühendislik yapısı üzerindeki uygulama ile gösterilecektir. İncelenen sistemler, gerçek bir güdümlü roketten, minyatür piezoelektrik eyleyiciye kadar çeşitlilik göstermektedir.



Prof. Dr. Nezh TOPALOĞLU

Lisans: 2004 – Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.

Yüksek Lisans - Doktora: 2009 - University of Waterloo Makine Müh.

Araştırma Alanları: Mekanik Titreşimler ve Gürültü, Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS), Mekatronik

3. OTURUM: TİTREŞİMDEN ENERJİ ÜRETİMİ

Günümüzde artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik kaygıları, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi her zamankinden daha fazla artırmıştır. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi klasik yenilenebilir enerji kaynakları yaygın olarak kullanılmakla birlikte, bu kaynakların her ortamda ve her koşulda erişilebilir olmaması, alternatif ve tamamlayıcı enerji üretim yöntemlerinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle düşük güç gereksinimine sahip sistemlerde, çevrede zaten var olan enerjinin toplanması (energy harvesting) yaklaşımı, bakım maliyetlerini azaltması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Hareket ve titreşim, birçok ortamda sürekli olarak mevcut olan ve çoğu zaman boşa harcanan bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisinin yetersiz kaldığı kapalı alanlar, yer altı yapıları veya uzun süreli karanlık ortamlarda çalışan sistemler için titreşimden enerji üretimi önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Endüstriyel makineler, taşıtlar, köprüler, raylı sistemler, insan hareketi ve hatta bina içi mekanik titreşimler enerji hasadı için potansiyel kaynaklar arasındadır. Günümüzde titreşimden enerji üretimi; kablosuz sensör ağları, yapısal sağlık izleme sistemleri, düşük güçlü elektronikler, biyomedikal implantlar ve erişimi zor ortamlardaki otonom sensör düğümleri gibi alanlarda halihazırda araştırma ve uygulama konusu olmaya başlamıştır.

Titreşimden enerji üretimi için literatürde öne çıkan başlıca yöntemler piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik enerji dönüştürme yaklaşımlarıdır. Piezoelektrik yöntem, mekanik gerilme altında elektrik yükü üreten malzemelere dayanır ve özellikle küçük ölçekli, yüksek frekanslı titreşimler için uygundur. Elektrostatik enerji hasadı, değişken kapasitans prensibiyle çalışır ve genellikle mikro-elektromekanik sistemler (MEMS) ile birlikte kullanılır; ancak harici bir ön yüklemeye gereksinimi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Elektromanyetik yöntemler ise mıknatıs-bobin etkileşimine dayanır ve daha düşük frekanslı, daha büyük genlikli titreşimlerde avantaj sağlar. Her yöntemin güç yoğunluğu, frekans uyumu,

ölçeklenebilirlik ve uygulama alanı açısından kendine özgü avantaj ve sınırlamaları bulunmaktadır.

Bu sunumda, titreşimden enerji üretiminin temel fiziksel prensiplerine ve matematiksel modellemesine genel bir giriş yapılacaktır. Rezonans takibi, bant genişliği sınırlamaları ve doğrusal olmayan sistemlerin kullanımı gibi problemler ve yaklaşımlar ele alınacaktır. Ayrıca, literatürde farklı yaklaşımlar sunan seçilmiş akademik çalışmalardan örnekler verilerek, kullanılan modeller, deneysel düzenekler ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Amaç, titreşimden enerji üretimi alanındaki güncel eğilimleri ve açık araştırma problemlerini ortaya koyarak, bu alandaki potansiyel uygulamalar ve gelecekteki araştırma yönleri hakkında katılımcılara bütüncül bir perspektif sunmaktır.

4. OTURUM: TİTREŞİM VERİSİ KULLANARAK DERİN ÖĞRENME TABANLI ARIZA TESPİTİ

Mühendislik yapılarının ve mekanik sistemlerin güvenli, verimli ve kesintisiz çalışması, günümüzde giderek artan bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda yapı sağlığı izleme (YSİ), sistemlerin zaman içindeki durumunu izleyerek hasar veya arızaların erken aşamada tespit edilmesini amaçlayan disiplinler arası bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. YSİ uygulamaları; köprüler, binalar, türbinler, uçak ve uzay yapıları, raylı sistemler ve endüstriyel makineler gibi kritik altyapılarda güvenliği artırmak, bakım maliyetlerini azaltmak ve aksamaların önüne geçmek açısından büyük bir öneme sahiptir.

Yapısal sağlık izleme sistemleri, kullanılan sensör tiplerine ve ölçülen fiziksel büyüklüklere göre farklı sınıflara ayrılabilir. Titreşim tabanlı YSİ yaklaşımları en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer alırken; ivmeölçerler, hız sensörleri ve yer değiştirme sensörlerinden elde edilen veriler sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra gerinim ölçerler (strain gauge), akustik emisyon sensörleri, sıcaklık sensörleri ve ultrasonik ölçümler de YSİ uygulamalarında önemli rol oynamaktadır. Özellikle titreşim verisi, sistemin dinamik karakteristiklerini doğrudan yansıtması ve arızalara karşı hassas olması nedeniyle arıza tespitinde güçlü bir bilgi kaynağı sunmaktadır.

Klasik YSİ ve arıza tespit yaklaşımları genellikle sinyal işleme ve istatistiksel analiz yöntemlerine dayanmaktadır. Zaman ve frekans alanı analizleri, öznelik (feature) çıkarımı, eşik tabanlı karar mekanizmaları ve fiziksel modele dayalı yöntemler bu kapsama girmektedir. Ancak bu yöntemler; karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde performans kaybı yaşanması, gürültüye duyarlılık, öznelik tasarımı gereksinimi ve değişken çalışma koşullarına adaptasyon zorluğu gibi önemli dezavantajlar barındırmaktadır. Bu noktada makine öğrenmesi (ML) ve derin

öğrenme (DL) yaklaşımları, yüksek doğruluk ve farklı çalışma koşullarına daha iyi genelleme yeteneği gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda arıza tespitinin en kritik alt başlıklarından biri rulman arıza tespiti (bearing fault diagnosis) problemidir. Rulman arızalarının erken ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesi, kestirimci bakım (predictive maintenance) stratejilerinin temel taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Titreşim verisi, rulman arızalarının karakteristik imzalarını taşıması nedeniyle bu alanda bu alanda en yaygın kullanılan veri türlerinden biridir. Bu konuşmada, öncelikle yapısal sağlık izleme kavramına ve titreşim tabanlı arıza tespitinin temel prensiplerine genel bir giriş yapılacaktır. Ardından, rulman arıza tespiti problemi özelinde derin öğrenme tabanlı güncel yaklaşımlar ele alınacaktır. Özellikle Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) gibi mimarilerin ham titreşim sinyalleri veya zaman-frekans temsilleri üzerinde nasıl kullanıldığı, literatürdeki başarılı örnekler üzerinden tartışılacaktır. Sunumun amacı, klasik yöntemlerden derin öğrenme tabanlı yaklaşımlara geçişin motivasyonunu ortaya koymak ve rulman arıza tespiti alanındaki güncel araştırma eğilimleri hakkında katılımcılara bütüncül bir bakış açısı sunmaktır.



Prof. Dr. Mehmet DÖRDÜNCÜ

Lisans: 2011 – Erciyes Üniversitesi Makine Müh.

Yüksek Lisans: 2013 - Erciyes Üniversitesi Makine Müh.

Doktora: 2018 - University of Arizona Mechanical Engineering

Araştırma Alanları: Malzemelerin Mekanik Davranışları, Hesaplamalı Mekanik, Peridinamik,

Kırılma Mekanikliği, Kompozit Malzemeler

5 & 6. OTURUMLAR: KIRILMA VE TİTREŞİM ANALİZİ ARASINDAKİ ETKİLEŞİMİN PERİDİNAMİK TEORİSİ İLE İNCELENMESİ

Klasik titreşim analizleri, yapıların sürekliliğini ve küçük deformasyon varsayımlarını temel alırken, kırılma ve hasar süreçleri bu varsayımların geçerliliğini ortadan kaldırmaktadır. Özellikle çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve hasar evrimi gibi olgular, sistemin dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar, mod şekilleri, deformasyon) doğrusal olmayan ve zamanla değişen bir yapıya dönüştürmektedir. Bu nedenle, kırılma ile titreşim davranışı arasındaki etkileşimin doğru bir biçimde modellenmesi, klasik yerel teoriler açısından ciddi zorluklar içermektedir.

Bu çalışmada, peridinamik teorisi kullanılarak kırılma ve titreşim analizi arasındaki etkileşim bütüncül bir çerçevede ele alınmaktadır. Peridinamik teorisi, denge denklemlerini integral formda tanımlaması sayesinde süreksizlikleri, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini ek kriterlere ihtiyaç duymadan doğal olarak modelleyebilmektedir. Bu özellik, kırılma sürecinin dinamik davranış üzerindeki etkilerinin ve dinamik yüklerin kırılma mekanizmalarını nasıl tetiklediğinin aynı hesaplama çerçevesi içinde incelenmesine olanak tanımaktadır.

Çalışma kapsamında, öncelikle peridinamik teorinin dinamik problemler için temel formülasyonu ele alınacak; serbest ve zorlanmış titreşim problemleri bağlamında peridinamik hareket denklemleri ayrıntılı biçimde tartışılacaktır. Ardından, çatlak oluşumu ve hasar gelişimi sayısal örnekler üzerinden gösterilecektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, Peridinamik Türev Operatör (PDDO) yaklaşımı tanıtılarak, peridinamik modelleme ile klasik diferansiyel tabanlı analizler arasındaki ilişki ele alınacaktır. PDDO'nun, peridinamik alan değişkenlerinden yerel türev bilgisi üretme kapasitesi sayesinde, titreşim analizinde ihtiyaç duyulan gerinim, eğrilik ve ivme gibi büyüklüklerin kararlı ve gürlüğe dayanıklı biçimde

elde edilmesi gösterilecektir. Bu bağlamda, PDDO tabanlı yaklaşımların hem peridinamik kırılma analizleriyle uyumlu çalışması hem de sensör-tabanlı ters problemler ve titreşim temelli hasar tespiti uygulamaları için sunduğu avantajlar tartışılacaktır.

Sonuç olarak bu sunum, kırılma ve titreşim analizlerini birbirinden bağımsız süreçler olarak ele almak yerine, peridinamik teori ve PDDO çerçevesinde birbirini besleyen fiziksel mekanizmalar olarak değerlendiren bütünlük bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.



Prof. Dr. Bahar UYMAZ

Lisans: 2000 – Trakya Üniversitesi Makine Müh.

Yüksek Lisans: 2003 - Trakya Üniversitesi Makine Müh.

Doktora: 2008 - Trakya Üniversitesi Makine Müh.

Araştırma Alanları: Katı Cisimler Mekaniği, Akustik ve Titreşimler

7. OTURUM: SÜREKLİ ORTAMLARIN TİTREŞİMİ – PLAKLAR

Plak kategorisinde yer alan sürekli ortamların titreşimleri; FGM plakların serbest titreşim davranışının klasik elastisite teorisi çerçevesinde farklı plak teorileri ve Ritz yöntemi ile incelenmesi sürecinde ele alınmaktadır.

Titreşim problemleri, mühendislik yapılarının dinamik davranışını belirleyen en temel konulardan biridir. Ayrık sistemlerin aksine plaklar, yer değiştirmelerin uzayda sürekli olarak tanımlandığı sürekli ortam sistemleridir. Bu nedenle plak titreşim problemleri, kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlanır ve çözümünde ileri düzey teorik ve sayısal yöntemler gerektirir. Plakların serbest titreşim analizi; rezonans riskinin belirlenmesi, dinamik stabilitenin değerlendirilmesi ve mod şekillerinin elde edilmesi açısından büyük önem taşır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FGM) gibi özelliklerinin konuma bağlı olarak sürekli değiştiği malzemeler kullanılarak üretilen plaklarda problemin karmaşıklığı daha da artmaktadır.

FGM’ler, seramik-metal gibi en az iki farklı fazdan oluşan ve hacim oranları bir veya daha fazla doğrultuda sürekli veya kademeli olarak değişen gelişmiş kompozit malzemelerdir. Klasik katmanlı kompozitlerden farklı olarak, FGM yapılarda malzeme özellikleri sürekli; bu sayede ara yüzey gerilmeleri azalır ve termomekanik performans iyileşir.

FGM plakların titreşim analizi yer değiştirme alanlarının tanımlanışı ve kinematik kabuller açısından birbirinden ayrılan ve titreşim frekanslarını doğrudan etkileyen plak teorileri çerçevesinde ele alınır.

FGM plaklar için genelleştirilmiş Hooke kanunu tanımlanır. Elastik sabitlerin kalınlık ve/veya düzlem içi doğrultuda değişimi güç kanunu, eksponansiyel dağılım veya benzeri fonksiyonlarla ifade edilir. Mühendislik sabitleri (E , ν , G , ρ) mikromekanik yaklaşımlar kullanılarak faz malzemelerinden türetilir. Bu adım,

titreşim denklemlerinde rijitlik ve kütle matrislerinin doğru tanımlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Plakların serbest titreşim problemi genellikle Hamilton prensibi veya toplam potansiyel enerjinin varyasyonu yardımıyla elde edilir. Bu yaklaşım, sürekli ortamın her noktasındaki dinamik davranışı tek bir fonksiyonel ifade altında toplar. Varyasyonel formülasyon sonucunda, uygun sınır koşulları ile birlikte hareket denklemleri elde edilir. Bu aşamada analitik çözümler yalnızca sınırlı geometriler ve sınır koşulları için mümkündür.

Varyasyonel çözüm yöntemlerinden biri olan Ritz yöntemi, sürekli ortamların titreşim problemlerinde, sınır koşullarını sağlayan uygun deneme fonksiyonları kullanılarak sistemin toplam potansiyel enerjisinin minimize edilmesine dayanır. Bu yöntem, özellikle plak titreşim analizlerinde karmaşık geometri, malzeme heterojenliği ve farklı plak teorilerinin ele alınmasında yarı-analitik ve esnek bir çözüm çerçevesi sunmaktadır.

Sayısal analizler sonucunda doğal frekanslar, boyutsuz frekans parametreleri ve mod şekilleri elde edilir. FGM parametreleri, plak kalınlığı ve sınır koşullarının titreşim davranışı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenir. Mod şekilleri, sistemin hangi bölgelerinde maksimum yer değiştirmelerini olduğunu göstererek mühendislik tasarımına doğrudan katkı sağlar.

Bu çalışma kapsamında, FGM plakların serbest titreşim davranışı farklı plak teorileri ve Ritz yöntemi kullanılarak sistematik biçimde ele alınmaktadır. Elde edilen sonuçlar, plak teorilerinin geçerlilik sınırlarını ortaya koymakta ve FGM yapıların dinamik tasarımı için önemli bir referans sunmaktadır.



Prof. Dr. Çetin YILMAZ

Lisans: 2000 – Boğaziçi Üniversitesi Makine Müh.

Yüksek Lisans: 2001 - University of Michigan, Ann Arbor Makine Müh.

Yüksek Lisans: 2001 - University of Michigan, Ann Arbor Matematik

Doktora: 2005 - University of Michigan, Ann

Arbor Makine Müh.

Araştırma Alanları: Çoklu Parça Dinamiği, Titreşim ve akustik, titreşim yalıtım sistemleri, Fonon kuşak aralığı gösteren yapılar, elastik metamalzemeler, Pasif antirezonsans üretim metodları, Genlik artırıcı ve hareket dönüştürücü sistem tasarımı

8. OTURUM: ELASTİK METAMALZEMELER

Mekanik metamalzemeler, doğal malzemelerin sergilediği özelliklerin ötesinde mekanik özellikler sergileyen yapay malzemelerdir. Genelde birim hücrelerin periyodik olarak dizilimiyle meydana gelirler. Birim hücrenin bileşiminde metal veya polimer gibi geleneksel malzemeler bulunmakla beraber, geometrik tasarımından ötürü bileşenlerinin sergileyebileceğinden çok farklı özellikler gösterebilirler. Birim hücreleri mikro veya makro boyutta olabilen mekanik metamalzemeler, negatif Poisson oranına veya negatif ısıl genleşme katsayısına sahip olabilmektedir.

Mekanik metamalzemelerin bir alt kümesi olarak değerlendirilen elastik metamalzemeler, elastik dalga yayılımını engelleme, yönlendirme veya kontrol etmede kullanılabilirler. Literatürde elastik dalga yayılımını engellemek için genellikle periyodik yapılar kullanılmakta olup, ilk çalışmalar Bragg saçılması prensibini temel almaktadır. Elastik modülü ve/veya yoğunluğu farklı iki malzemeyi birleştirerek belli frekans bant aralığında elastik dalgaların iletimi durdurulabilmektedir. Bragg saçılması yöntemiyle elastik dalga iletimini engelleyen periyodik yapılar fononik kristal olarak adlandırılmaktadır. Fononik kristallerde düşük frekanslarda bant aralığı elde etmek için, malzeme içindeki dalga iletim hızının düşük olması ve/veya büyük birim hücre boyutu gerekmektedir. Bu durumda yüksek yoğunluklu ve düşük elastik modüllü malzemelere veya büyük hacimli periyodik yapılara ihtiyaç duyulmaktadır. Yerel rezonans yöntemi ile Bragg saçılmasıyla elde edilebilecek frekanslardan çok daha düşük frekanslarda bant aralığı elde edilebildiği için, yerel rezonans yöntemini kullanan periyodik yapılara

elastik metamalzeme adı verilmektedir. Ancak yerel rezonans yöntemiyle düşük frekanslarda bant aralığı elde etmek için ağır rezonatörlere ihtiyaç vardır. Yerel rezonans yöntemine alternatif olarak geliştirilen atalet artırımı yöntemiyle, düşük bir kütlenin efektif ataleti titreşime maruz kaldığında artırılarak Bragg saçılmasından çok daha düşük frekanslarda bant aralığı elde edilebilmiştir. Bu sebeple atalet artırımı yöntemini kullanan periyodik yapılar da elastik metamalzeme olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada elastik metamalzemelerin gelişiminden ve bu konudaki güncel çalışmalardan bahsedilecektir.