# T. C. İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

# FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ SANDVİÇ KİRİŞLERİN ZORLANMIŞ TİTREŞİM ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

**Ajmal CHOPAN** 

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2023



#### **TEZ TANITIM FORMU**

Yazar Adı Soyadı : Ajmal CHOPAN

Tezin Dili	: Türkçe
Tezin Adı	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Zorlanmış Titreşim Analizi
Enstitü	: İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	: İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Tezin Türü	: Yüksek Lisans
Tezin Tarihi	: 15/06/2023
Sayfa Sayısı	: 107
Tez Danışmanları	: Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori
Dizin Terimleri	: Sandviç kiriş, zorlanmış titreşim analizi, Gözenekli Malzeme, Viskoelastik davranış, Sonlu elemanlar yöntemi
Türkçe Özet	: Bu tezde fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik analizi yapılmıştır. Analizlerde birinci mertebeden kayma teorisine dayalı kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Gözenek dağılım katsayısının zorlanmış titreşim davranışı üzerinde etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Gözeneklik katsayısı değiştirildiğinde genlik ve periyotların da değiştiği görülmüştür.
Dağıtım Listesi	: 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne

2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası Ajmal Chopan

## T. C. İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

## FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ SANDVİÇ KİRİŞLERİN ZORLANMIŞ TİTREŞİM ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

**Ajmal CHOPAN** 

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2023

#### BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Ajmal Chopan

.../.../2023



## İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ajmal Chopan'ın Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Elastik, Viskoelastik ve Zorlanmış titreşim analizi adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Ali ETEMADİ

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

(Danışman)

Üye

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Aylin Ece KAYABEKİR

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 2023

İmzası

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

#### ÖZET

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmış sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı teorik olarak incelenmiştir. Üç tabakadan oluşan sandviç kirişin altı ve üst katmanı izotropik homojen ve çekirdek tabakası ise gözenekli malzemeli olarak modellenmiştir. Modellen kirişlerin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilebilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır. Ele alınan yapı elemanlarının sonlu eleman modellerinin kurulması için birinci mertebeden kayma deformasyon etkisine dayalı BEAM189 elemanı kullanılmıştır. Kirişin kesit özelliklerin üniform olduğu varsayılmıştır. Analizlerde simetrik, üniform ve monolitik olarak üç çeşit gözenek fonksiyonundan faydalanmıştır. Elastiste modülü ve yoğunluk kesit kalınlığı boyunca değişken olarak ve Poison oranı ise sabit olarak alınmıştır. Kirişler ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest olarak modellenmistir. Malzeme değisim katsayısının, malzeme değisim fonksiyonun, çeşitli sınır koşullarının ve sönüm katsayılarının dinamik analiz üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre malzeme gözenek fonksiyonu ve malzeme değişim katsayıları dinamik analizin sonuçlarından genlik ve periyot değerlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Viskoelastik durumunda sönüm oranı arttıkça genlikler değerlerinin daha hızlı bir şekilde küçüldüğü gözlemlenmiştir

Anahtar kelimeler: Sandviç kiriş, Zorlanmış Titreşim Analizi, Gözenekli Malzeme, Viskoelastik Davranış, Sonlu Elemanlar Yöntemi

#### **SUMMARY**

In this thesis, the elastic and viscoelastic forced vibration behavior of sandwich beams made of functionally graded porous material is investigated theoretically. The bottom and top layers of the sandwich beam consisting of three layers are modeled as isotropic homogeneous and the core layer is modeled as porous material. ANSYS software is used to analyze the modeled beams by finite element method. BEAM189 element based on the first order shear deformation effect is used to generate the finite element models of the considered structural elements. The cross-sectional properties of the beam are assumed to be uniform. Three types of porosity functions are used in the analysis: symmetric, uniform and monolithic. The modulus of elasticity and density are taken as variables along the section thickness and the poison ratio is taken as constant. The beams are modeled as clamped - clamped, clamped - pinned, pinned - pinned and clamped - free. The effects of material variation coefficient, material functions, various boundary conditions and damping coefficients on the dynamic analysis are investigated in detail. Based on the results obtained from this study, it has seen that the material function and material distribution coefficients significantly affect the amplitude and period values of the results of dynamic analysis. In the viscoelastic case, it is observed that as the damping ratio increases, the amplitude values decrease more rapidly.

**Keywords:** Sandwich Beam, Forced Vibration Analysis, Porous Material, Viscoelastic Behavior, Finite Element Method

## İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	ii
KISALTMALAR	v
TABLOLAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	XV
GİRİS	

### BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜRE TARAMASI İKİNCİ BÖLÜM MATERYAL VE METOT

2.1	Elastik Davranış	14
2.2.	Viskoelastik Malzeme Durumu	18
2.3.	Adım Adım Zaman Integrasyon Yöntemi	.19

### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Uygulama 1: İki ankastre mesenetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.2 Uygulama 2: Ankastre – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.3 Uygulama 3 Üniform malzemeli sandviç konsol kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.4 Uygulama 4 Sabit – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.5 Uygylama 5 Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.6 Uygulama 6 Ankastre – Sabit mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi

3.7 Uygulama 7 Ankastre – Serbest mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.8 Uygulama 8 Sabit – Sabit mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.9 Uygulama 9 Ankastre – Ankastre mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.10 Uygulama 10 Ankastre – Serbest mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.11 Uygulama 11 Ankastre – Serbest mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.12 Uygulama 12 Sabit - Sabit mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi
3.13 Uygulama 13 Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi
3.14 Uygulama 14 Ankastre – Sabit mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi
3.15 Uygulama 15 Sabit – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi
SONUÇLAR
KAYNAKLAR

#### KISALTMALAR

FD	:	Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş
L	:	Uzunluk
h	:	Kesit kalınlığı
b	:	Kesit genişliği
q	:	Yük
eo	:	Porosity katsayısı
<b>E</b> 1	:	Maksimum elastisite modülü
$\mathbf{A} - \mathbf{A}$	:	Ankastre – Ankastre
A - S	•	Ankastre – Sabit
S – S	:	Sabit- Sabit
A-SR	:	Ankastre – Serbest
G1	:	En büyük kayma modülü
<b>ρ</b> 1	:	En büyük kütlesel yoğunluk değeri
Em	:	Kütlesel yoğunluk için porozite katsayısı
V	:	Poison orani
Uz	:	Düşey deplasman
DMX	:	Maksimum yer değiştirme
SMN	:	Minimum gerilme
SMX	:	Maksimum gerilme
$S_1$	:	Birinci asal gerilme
ʻi'	:	Çubuğun sol ucu
ʻj'	:	Çubuğun sağ ucu
FDGM	:	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Malzemeler

## TABLOLAR LİSTESİ

<b>ablo 1.</b> Sınır Koşulları 15
-----------------------------------



# ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Gözenekli çekirdeğe sahip olan simetrik malzemeli FD sandviç kiriş için sor eleman modeli	1lu . 13
Şekil 2. Gözenekli çekirdeğe sahip üniform malzemeli FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli	. 13
Şekil 3 Kiriş analizi örnek sayısı	. 14
Şekil 4. dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme	. 22
Şekil 5. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0=0.1-0.5$ )	. 23
Şekil 6. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )	. 23
Şekil 7. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre eğilme moment değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )	. 24
Şekil 8. Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme	. 24
Şekil 9. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )	. 25
Şekil 10. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )	. 26
Şekil 11. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi.( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )	. 26
Şekil 12. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi. $(e_0=0.1-0.5)$	. 27
Şekil 13. Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.	. 27

Şekil 14. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına gre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )	28
Şekil 15. Üniform malzemeli A – S mesnetli kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )	29
Şekil 16. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )	e 29
Şekil 17. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi.( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )	30
Şekil 18. Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme	31
Şekil 19. Üniform malzemeli S – S mesnetli kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$	31
Şekil 20. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )	32
Şekil 21. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi.( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )	32
Şekil 22. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.	33
Şekil 23. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)	34
Şekil 24. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6- 0.9)	34
Şekil 25. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.6)	35
Şekil 26. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme	35
Şekil 27. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranınagöre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)	36

Şekil 28. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6- 0.9)
Şekil 29. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.6)
Şekil 30. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e <sub>0</sub> = 0.1– 0.5)
Şekil 31. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme
Şekil 32. Simetrik malzemeli A – Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)
Şekil 33. Simetrik malzemeli A – SR mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6- 0.9)
Şekil 34. Simetrik malzemeli A – SR mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.6)
Şekil 35. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi ( $e_0=0.5-0.9$ )
Şekil 36. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme
Şekil 37. Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)
Şekil 38. Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6- 0.9)
Şekil 39. Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e <sub>0</sub> = 0.5– 0.9)
Şekil 40. Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme
Şekil 41. Monolitik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)

Şekil 42. Monolitik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6 - 0.9)
Şekil 43. Monolitik malzemeli A– A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi (e <sub>0</sub> =0.1 - 0.6)
Şekil 44. Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme
Şekil 45. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)
Şekil 46. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6 - 0.9)
Şekil 47. Monolitik malzemeli A– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi (e <sub>0</sub> =0.1 - 0.5)
Şekil 48. Monolitik malzemeli A– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e <sub>0</sub> =0.1 - 0.5)
Şekil 49. Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme
Şekil 50. Monolitik malzemeli A – Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)
Şekil 51. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişininporozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6 - 0.9)
Şekil 52. Monolitik malzemeli A– Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi (e <sub>0</sub> =0.1 - 0.5)
Şekil 53. Monolitik malzemeli A– Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e <sub>0</sub> =05 - 0.9)
Şekil 54. Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme
Şekil 55. Monolitik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.1- 0.5)

Şekil 56. Monolitik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre	e
düşey deplasmannın değişimi (m) (e <sub>0</sub> =0.6 - 0.9)	. 52
Şekil 57. Monolitik malzemeli S– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e <sub>0</sub> =0.5 - 0.9)	. 52
Şekil 58. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.	. 53
Şekil 59. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)	. 54
Şekil 60. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin Sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)	. 54
Şekil 61. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)	. 55
Şekil 62. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)	. 55
Şekil 63. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)	. 56
Şekil 64. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)	. 56
Şekil 65. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)	. 57
Şekil 66. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)	. 57
Şekil 67. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.6)	. 58
Şekil 68. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e <sub>0</sub> =0.6)	. 58
Şekil 69. Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.	. 59

Şekil 70. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi $(e_0=0.1)$
Şekil 71. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)
Şekil 72. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)
Şekil 73. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 74. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 75. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 76. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)
Şekil 77. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)
Şekil 78. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)
Şekil 79. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)
Şekil 80. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)
Şekil 81. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)
Şekil 82. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)
Şekil 83. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)

Şekil 84. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)
Şekil 85. Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme
Şekil 86. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)
Şekil 87. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönme değişimi(e <sub>0</sub> =0.1)
Şekil 88. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 89. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 90. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönme değişimi(e <sub>0</sub> =0.2)
Şekil 91. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)71
Şekil 92. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.3)71
Şekil 93. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)72
Şekil 94. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.4)72
Şekil 95. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)73
Şekil 96. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e <sub>0</sub> =0.5)73
Şekil 97. Malzeme değişimine göre moment değişimi (e <sub>0</sub> =0.1)
Şekil 98. Malzeme değişimine göre moment değişimi ( $e_0=0.3$ )

#### ÖNSÖZ

Bu çalışmamın danışmanlığını yaparak beni sürekli destekleyen, yönlendiren, fedakârlıktan kaçınmayan ve yol gösteren saygıdeğer danışman hocam, *Dr. Öğr. Üyesí. Ahmad Reshad NOOR*iye en içten sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen ve yanımda olan sevgili *aíleme* de teşekkür etmek istiyorum.

Benim hayatımda hep var olan, desteği, sabrı ve sevgisiyle bu çalışmamda da yanımda olan eşim *Shabnam GHAFOR*iye minnettarım.



#### GİRİŞ

Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeler (FDGM), genellikle, içerdikleri gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve yoğunluğunun belirli bir yönde değiştiği malzemelerdir. Bu malzemelerin üretimi genellikle özel teknikler gerektirir ve bu malzemeler genellikle özelleştirilmiş uygulamalar için kullanılır.FDGM'lerin önemi, çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda bulunabilir. Birçok durumda, bu malzemelerin kullanımı, belirli bir uygulamanın performansını artırabilir veya belirli bir problemin çözümünü kolaylaştırabilir. İşte bazı örnek uygulama alanları:

Biyo-Medikal Uygulamalar: FDGM'ler, biyomedikal uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanılabilir. Örneğin, biyolojik dokuların yapısını taklit edebilen ve dokunun yeniden büyümesine yardımcı olabilen biyouyumlu gözenekli malzemelerin üretimi. Ayrıca, ilaç salımı için kullanılan gözenekli polimerlerin tasarımında da kullanılırlar.

Enerji Depolama ve Dönüşüm: FDGM'ler, enerji depolama ve dönüşüm sistemlerinde önemli bir rol oynayabilir. Örneğin, batarya teknolojilerinde, gözenekli elektrot malzemeleri, yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj kapasitesi sağlar.

Çevresel Teknolojiler: FDGM'ler, çevresel teknolojilerde de kullanılabilir. Örneğin, gözenekli malzemeler, hava ve su filtreleri olarak kullanılabilir, çünkü gözenekli yapıları, kirletici maddelerin tutulmasını ve çıkarılmasını sağlar.

Katalizörler: FDGM'ler, kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için katalizör olarak da kullanılır. Gözenekli yapıları, reaktif moleküllerin malzeme içinde kolayca difüzyon yapmasını ve böylece katalitik reaksiyonların hızını artırmasını sağlar.Bu nedenle, FDGM'lerin önemi, özellikle belirli uygulamalar için özelleştirilmiş malzemelerin üretimi ve kullanımı ile ilgilidir. Bu malzemeler, belirli uygulamalar için istenen performans özelliklerini sağlamak üzere tasarlanmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli kirişler, geleneksel yapı malzemelerinden farklı olarak, özelliklerinin belirli bir bölgesel düzenlemeye tabi tutulduğu yapısal bileşenlerdir. Bu tür kirişler, farklı bölgelerde farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin kombinasyonunu kullanarak istenen performansı elde etmek amacıyla tasarlanır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, geleneksel homojen malzemelerin kısıtlamalarını aşarak daha iyi mukavemet, rijitlik, dayanıklılık ve enerji emme gibi özellikler sunar. Bu kirişlerde, malzemenin bileşimi, mikroyapısı veya bileşenler arasındaki dağılımın değişiklikleri kullanılarak, farklı bölgelerde farklı mekanik özellikler sağlanır. Örneğin, bir fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin alt bölgesi, yüksek mukavemetli bir malzemeden yapılmış olabilirken, üst bölgesi daha hafif bir malzemeyle desteklenebilir. Bu tasarım, kirişin alt bölgesinin büyük yükleri taşıyabilmesini ve üst bölgenin ise daha hafif ve daha esnek olmasını sağlar.

Fonksiyonel derecelendirme, kirişin özelliklerinin belirli bir düzenlemeye göre değiştirilmesi anlamına gelir. Bu düzenlemeler, malzemenin kompozit yapısının kontrol edilmesi, mikro veya nano ölçekte özelliklerin optimize edilmesi veya malzemenin belirli bölgelerine ekstra katmanların eklenmesi gibi çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Bu sayede kirişin farklı kısımları, farklı yükler altında optimum performansı sergileyebilir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli kirişler, birçok uygulama alanında potansiyel sağlar. Örneğin, havacılık ve uzay endüstrisinde, hafiflik ve yüksek mukavemet gereksinimleri nedeniyle kullanılabilirler. Ayrıca, yapısal sağlamlık, enerji emme veya titreşim azaltma gibi özellikler gerektiren otomotiv, inşaat, spor ekipmanları gibi alanlarda da kullanılabilirler.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli kirişler, daha optimize edilmiş ve özelleştirilmiş yapısal bileşenlerin geliştirilmesine olanak tanıyan yenilikçi bir malzeme tasarım yaklaşımıdır. Bu tür kirişler, performansı artırmak, ağırlığı azaltmak ve malzemelerin verimliliğini optimize etmek

Zorlanmış titreşim, bir dış kuvvetin belirli bir frekansta sürekli olarak bir sistem üzerine uygulandığı bir tür titreşimdir. Bu dış kuvvet, sistemin doğal titreşim frekansını etkileyebilir ve genellikle sistemin belirli bir şekilde hareket etmesini "zorlar". Örneğin, bir salınım yapan sarkacı düşünün. Eğer sarkaca hiçbir dış kuvvet uygulanmazsa, sarkaç belirli bir frekansta, yani doğal frekansında salınır. Ancak eğer sarkaca düzenli aralıklarla bir dış kuvvet uygulanırsa, bu sarkacın salınım frekansını değiştirebilir. Bu, zorlanmış titreşim örneğidir. Zorlanmış titreşimler, birçok farklı fiziksel sistemde gözlemlenebilir, örneğin elektrik devrelerinde, mekanik sistemlerde ve hatta hava durumu modellerinde. Bu tür titreşimler aynı zamanda mühendislikte önemli bir rol oynar, çünkü yapıların ve malzemelerin belirli frekanslarda nasıl tepki vereceğini anlamak, tasarımların daha güvenli ve etkili olmasını sağlar.

Sönümlü titreşim, bir sistemdeki enerjinin zamanla azaldığı ve sonuç olarak sistemin genliğinin ve/veya hızının azaldığı bir tür titreşimdir. Bu enerji azalması genellikle sürtünme, hava direnci, ısıl yayılım veya başka bir enerji dağılım mekanizması yoluyla olur.Sönümlü titreşimler, çoğu fiziksel sistemde gözlemlenebilir. Örneğin, bir salınan sarkaç veya bir salıncak, sürtünme ve hava direnci nedeniyle enerjisini zamanla kaybeder ve dolayısıyla salınım genliği azalır. Bu, sönümlü bir titreşim örneğidir.

Sönümlü titreşimlerin üç ana türü vardır:

Aşırı Sönümlü: Sönümleme kuvveti çok yüksek olduğunda, sistem hiçbir zaman tam bir döngü (bir salınım) tamamlamadan durur.

Kritik Sönümlü: Bu, sistemin enerjisini en hızlı şekilde kaybettiği noktadır. Sistem, tam bir salınım yapmadan durur ve en kısa sürede durağan hale gelir.

Yetersiz Sönümlü: Sönümleme kuvveti düşük olduğunda, sistem birkaç salınım yapar ancak genliği zamanla azalır.

Sönümlü titreşimler, mühendislikte önemli bir rol oynar çünkü çeşitli yapıların ve malzemelerin sönümleme özelliklerini anlamak, bu yapıların ve malzemelerin güvenli ve etkili bir şekilde tasarlanmasını ve kullanılmasını sağlar.

Sönümsüz titreşim, enerji kaybının olmadığı ideal bir durumdur ve bu durumda sistem sürekli olarak belirli bir frekansta ve genlikte titreşir. Sönümsüz bir titreşim sistemi, enerji kaybının olmadığı, bu nedenle titreşimin genliğinin zamanla azalmadığı ideal bir durumu temsil eder.

Sönümsüz titreşimler, gerçek dünyada tam olarak gerçekleşmez, çünkü her tür hareketin bir tür enerji kaybı vardır, genellikle sürtünme veya hava direnci şeklinde. Ancak, bu enerji kaybı çok küçük olduğunda, sönümsüz titreşim yaklaşık bir model olarak kullanılabilir.

Bir örnek olarak, bir salıncakta olduğu gibi, bir nesnenin ileri geri salınım hareketini düşünebiliriz. Eğer hava direnci veya başka bir sürtünme kuvveti olmasaydı, salıncak sürekli olarak aynı genlikte ve frekansta salınmaya devam ederdi. Bu, sönümsüz bir titreşim olurdu.Sönümsüz titreşimlerin anlaşılması, mühendislik, fizik ve matematikte önemlidir. Özellikle harmonik hareket ve dalgalarla ilgili problemlerde bu kavram sıklıkla kullanılır.

Adım tipi yükleme (step loading), bir yapıya veya sistemlere belirli bir an itibarıyla aniden ve sabit bir yükün uygulandığı yükleme türüdür. Bu tür yüklemeler genellikle bir yapıyı veya malzemeyi aniden uygulanan bir kuvvet veya basınç altında test etmek için kullanılır.

Bu tip yükleme genellikle mühendislikte, özellikle de yapısal mühendislikte, malzemelerin veya yapıların dayanıklılığını ve dayanıklılığını test etmek için kullanılır. Adım tipi yükleme, genellikle bir yapıyı veya malzemeyi belirli bir yük altında nasıl tepki vereceğini anlamak için kullanılır.

Örneğin, bir köprüyü tasarladığınızı düşünün. Adım tipi yükleme kullanarak, köprünün belirli bir ağırlıkta bir yükü (örneğin, bir otomobil veya kamyonun ağırlığı) nasıl idare edeceğini anlayabilirsiniz. Adım tipi yükleme, bu tür bir yükün aniden uygulandığı durumları simüle eder, bu da köprü tasarımının güvenliğini ve etkinliğini değerlendirmenin önemli bir parçasıdır.

# BİRİNCİ BÖLÜM ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, sandviç yapılar çekici özellikleri nedeniyle birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Lamine sandviç yapılar yapıştırılmış yapılar olduğu için bu yapılar genellikle delaminasyon, matris çatlaklar, gerilme yoğunlaşması ve diğer hasar mekanizmalarına maruz kalabiliyorlar. Bu hasar mekanizmaları FD sandviç yapılar kullanılarak önlenebilir. FD malzeme kavramı ilk olarak Japon bilim adamları tarafından 1984 yılında bir uzay uçağı projesi sırasında Sendai bölgesinde geliştirilmiştir. Bir FD malzeme, mikroyapının bir malzemeden başka bir malzemeye belirli bir özellikte değiştirilmesiyle oluşturulur.

Günümüzde, FD sandviç kirişler ve plakalar mühendislik endüstrilerin birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapısal elemanlar enine kuvvetlere, düzlem içi kuvvetlere ve dinamik kuvvetlere karşı maruz kalır Bu nedenle, FG sandviç kirişlerin doğru yapısal analizi doğru bükülme, burkulma ve titreşim davranışlarını tahmin etmek için gereklidir. Bu bakış açısıyla, FG sandviç kiriş ve plakların analizi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Noori ve ark. (2020) FD malzemeli simetrik ve simetrik olmayan katmanlardan oluşan sandviç kirişlerin statik davranışını Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi(TFY) ile incelemiştir, çalışmalarında malzeme değişim katsayısı yükseldikçe yer değiştirmelerin de arttığını rapor etmiştir. Noori ve ark. (2019) dairesel plaklarin sonlu elemanlar yöntemi ile Laplace uzayında dinamik analizini araştırılmıştır. Plak malzemesi izotrop, lineer elastik veya viskoelastik kabul edilmiştir. Noori ve ark. (2020) FD kirişlerin (TFY)ile statik analizini araştırmıştır. Fortan dilinde kodlanmış bir bilgisayar program kullanmıştır, Programdan elde edilen sonuçlar, tablolar halinde mevcut literatür sonuçları ile karşılaştırmış ve mükemmel bir uyum gözlemlemiştir.

Ai ve Weaver (2016) değişken rijitlikli malzemelerin kullanıldığı, konik sandviç kirişler için basitleştirilmiş analitik model araştırdılar yaklaşık bir çözüm elde etmek için, Minimum toplam potansiyel enerji yöntemi ile Ritz tekniği birlikte kullanmıştır. Çekirdekteki eksenel rijitlik değişimi nedeniyle, kirişlerin yer değiştirmelerinin ve yüz tabakalarının ve çekirdeğin gerilmelerinin önemli ölçüde etkilendiği bulmuştur. Ait Atmane ve ark.(2017) Elastik temeller üzerine oturan fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin mekanik tepkisi üzerinde kalınlık gerilmesi ve gözenekliliğin etkisini

araştırmışlar. Bu makalede, iki parametreli elastik temele oturan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş mükemmel ve kusurlu kirişlerin eğilme; serbest titreşim ve burkulma analizi için etkili bir quasi-3D teorisi sunmuştur. Akbaş (2018) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli derin kirişlerin zorlanmış titreşim analizini harmonik dış yayılı yük altında gözeneklilik etkisi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemiştir. Gözeneklilik, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş derin kirişin dinamiği üzerinde çok önemli bir role sahiptir. Gözeneklilik parametresi arttıkça, gözeneklilik modelleri arasındaki fark önemli ölçüde artmaktadır.

Srikarun ve ark. (2021) farklı yayılı yükler altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli çekirdeğe sahip sandviç kirişlerin doğrusal ve doğrusal olmayan statik eğilmesini araştırmışlar. Kirişler iç gözenekler taşıdığında eğilme rijitliği azalır. Sonuç olarak, FD gözenekli çekirdeğe sahip kirişler, gözeneksiz kirişlere göre daha büyük sapmaya sahiptir. Amirani ve ark.(2009) FD çekirdekli sandviç kirişin Galerkin yöntemi ile serbest titreşim analizini incelemiştir. FD çekirdeği için sonuçlar, karışımlar kuralı ve mikromekanik teknikler kullanılarak çıkarılmış ve birlikte karşılaştırmıştır. Chen ve ark.(2016) kayma deformasyonlu fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşimlerini incelemişler. Kayma deformasyonlu FD gözenekli kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşimlerini Ritz yöntemi ve Newmark-β yöntemi kullanılarak incelmiştir. Sayısal sonuçlardan şu sonuca varılabilir: Her iki gözeneklilik dağılımı için, daha büyük gözeneklilik katsayısına sahip bir kiriş, daha küçük gözeneklilik katsayısına sahip muadilinden daha yüksek dinamik sapmalara sahiptir.

Chen ve ark.(2016) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli çekirdeğe sahip kayma deformasyonlu sandviç kirişin doğrusal olmayan serbest titreşimini ele aldılar ve bu neticeye vardılar,titreşim genliğindeki bir artış, sandviç gözenekli kirişlerin daha büyük bir doğrusal olmayan frekans oranına yol açar. Chen ve ark.(2015) Kayma deformasyonlu fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişin elastik burkulması ve statik eğilmesini araştırmıştır.Teorik formülasyonlar Timoshenko kiriş teorisi çerçevesinde olduğunu rapor etmiştir. Kritik burkulma yükünü, enine eğilme sapmasını ve normal eğilme gerilmesini elde etmek için Ritz yöntemi kullanmıştır. Das ve Sarangi(2016) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit kirişlerin statik analizini incelemişler. FD malzemesinin, farklı homojen malzeme katmanlarından oluştuğu

varsayılmıştır. Gerilmenin kalınlık boyunca dağılımı, geleneksel lamine kirişler durumunda elde edilenlere kıyasla aynı şekilde düzgün bir değişim gösterir.

Vo ve ark.(2014) Rafine kayma deformasyon teorisini kullanarak Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kirişlerin statik ve titreşim analizini incelemiştir. Kayma düzeltme faktörü gerektirmeyen geliştirilen bu teori statik tepkileri, doğal frekansları ve ilgili mod şekillerini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Zhao ve ark.(2019) Bu çalışmada, genel sınır koşullarına sahip orta kalınlıkta fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli derin kavisli ve düz kirişin titreşim davranışını incelemek için birleşik bir analitik model oluşturmak üzere modifiye edilmiş bir seri çözüm benimsemiştir. A-A sınır koşulu en yüksek doğal frekansa ve A-SR sınır koşulu minimum doğal frekansa sahip olmuşlar. Rezaiee-Pajand ve ark.(2018) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş prizmatik olmayan sandviç kirişlerin statik analizini araştırmışlar. iki farklı kiriş tipi kullanmıştır. Yer değiştirmrleri elde etmek için iyi bilinen Ritz yöntemi uygulamıştır.

Njim ve ark. (2022) Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli malzemelerle sandviç yapının deneysel ve sayısal eğilme özelliklerini araştırmışlar. Deneylerden elde edilen sonuçları doğrulamak için ANSYS yazılımı kullanılarak sayısal yaklaşım kullanmıştır. Deneysel araştırma sonuçlarına göre, FD kirişi eğilme yükü altında başarısız olur ve aniden gevrek kırılma meydana gelir. Daouadji ve ark.(2013) yarı-ters metodu kullanarak bir FD kiriş için düzlem elastisite çözümü geliştirmiştir. Doğrusal yayılı yüke maruz bir konsol FD kiriş için genel bir, iki boyutlu çözüm elde etmiştir. Sankar (2001) sinüzoidal enine yüklemeye maruz basit mesnetli FG kirişler için bir elastisite çözümü geliştirmiştir. FD kirisin daha yumuşak tarafı yüklendiğinde, gerilme konsantrasyonlarının homojen bir kirişten daha az olduğu ve daha sert taraf yüklendiğinde bunun tersinin doğru olduğu bulmuştur.

Ying ve ark. (2008) Winkler-Pasternak elastik temelleri üzerine oturan FD kirişlerin eğilme ve serbest titreşimi için 2 boyutlu elastisite teorisine dayalı kesin çözümler elde etmiştir. Kirişin malzeme özellikleri kalınlık yönü boyunca üstel olarak değişmektedir. Çözüm, durum uzayı yöntemi kullanılarak elde etmiştir. Gradyan indeksi, en-boy oranları ve temel parametreleri gibi çeşitli parametrelerin FD kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri incelemiştir. Chu ve ark. (2015) FD malzemelerden yapılmış kirişlerin çekme ve eğilme altında elastisite çözümünü elde etmiştir. İki boyutlu elastisite teorisine dayalı olarak, Airy gerilme fonksiyonu yöntemi ile birlikte şekil değiştirme uyumluluk denklemi kullanılarak bir yönetim denklemi türetmiştir. Xu ve ark. (2014), kalınlığı değişen FD kirişlerin iki boyutlu elastisite çözümlerini sunmuştur. Olayı idare eden diferansiyel denklemleri ve kirişin iki ucundaki basit mesnetli sınır koşullarını tam olarak sağlayan yer değiştirmeler ve gerilmeler için kesin ifadeler çıkarmıştır. Zhong ve Yu (2006) farklı yüklere maruz bir konsol FD kirişi analiz etmişlerdir. Yarı-ters yöntem kullanılarak FD kiriş için bir düzlem elastisite çözümü geliştirmiştir.

Ding ve ark. (2007), anizotropik FDM'lerin düzlem gerilme problemi için Airy gerilme fonksiyonunu kullanarak düzlem anizotropik FD kirişler için elastisite çözümleri elde etmiş ve gövde kuvvetinin etkisini dahil etmiştir. Ding ve arkadaşlarının (2007) çalışması, Huang ve ark. (2007) tarafından keyfi olarak dağıtılmış bir yüke maruz kalan anizotropik bir kirişin eğilme problemi dikkate alınarak genişletmiştir.Huang ve ark. (2009) de doğrusal dağılımlı yüke maruz kalan FD anizotropik konsol kirişin eğilmesini sunmuştur. Analiz, düzlem gerilme problemi için tam elastisite denklemlerine dayanmaktadır. Konsol kirişlerin eğilmesini çözmek için kullanılan gerilme fonksiyonunun diğer sınır koşulları için de kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Çelebi ve Tütüncü (2014) düzlem elastisite teorisini kullanarak FD kirişlerin tam doğal frekanslarını elde etmişlerdir. Venkataraman ve Sankar (2003) FD çekirdekli bir sandviç kirişteki gerilmeler için elastisite çözümünü analiz etmişlerdir; burada malzemelerin kalınlık boyunca elastik sertlik katsayılarının üstel bir değişim gösterdiği varsayılmıştır.

Aydoğdu ve Taşkın (2007), çeşitli kayma deformasyon teorilerini kullanarak basit mesnetli FD kirişlerin doğal frekanslarını elde etmek için Navier tipi çözüm yöntemini kullanmışlardır. Naderi ve Saidi (2013), rafine edilmiş birinci dereceden yer değiştirme alanı kullanarak çeşitli sınır koşullarına sahip orta kalınlıktaki FD anizotropik geniş kirişler üzerindeki eğilme ve gerilmenin etkilerini sunmuştur. Akbaş (2015), Timoshenko kiriş teorisini kullanarak Navier çözüm tekniğine dayalı elastik temele oturan FD kirişlerin statik ve serbest titreşim analizini sunmuştur. Aydogdu (2008) ve Aydogdu ve ark. (2013), Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanan yarı-ters yöntemi kullanarak eksenel FD basit mesnetli kirişlerin doğal frekanslarını ve kritik burkulma yüklerini elde etmişlerdir. Kiani ve Eslami (2010, 2013) Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak çeşitli sınır koşullarına sahip FD kirişlerin termal burkulması için kapalı formda çözüm elde etmiştir. Alshorbagy ve ark. (2011) sonlu elemanlar yöntemi kullanarak FD kirişlerin serbest titreşim özelliklerini incelemiştir. Hareket denklemleri Euler-Bernoulli kiriş teorisi ve virtüel iş prensibi kullanılarak türetmiştir. Kirişlerin malzeme bileşenlerinin basit bir güç yasasına göre kalınlık veya boylamsal yönler boyunca değiştiği varsayımıştır. Çeşitli sınır koşullarının, malzeme indeksinin ve narinlik oranının etkileri incelemiştir. Şimşek ve Al-Shujairi (2017), Timoshenko kiriş teorisini kullanarak sabit hızlarla hareket eden çift hareketli harmonik yüklerin etkisi altındaki FD sandviç kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşimini sunmuştur.

Bhangale ve Ganesan (2006) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak termal ortamda kısıtlı viskoelastik tabakaya sahip FD sandviç kenetli kirişin burkulma ve titreşim davranışını incelemişlerdir. Kim ve Lee (2016, 2017), Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı olarak tek ve çift hücreli kesitlere sahip ince duvarlı FG sandviç kirişlerin eğilme ve burulma analizleri için sonlu eleman formülasyonu sunmuştur. Wattanasakulpong ve Chaikittiratana (2015), FDM'lerden yapılmış gözenekli kirişlerin eğilme titreşim analizini çeşitli sınır koşulları ile gerçekleştirmiştir. Ebrahimi ve ark. (2016) sıcaklığa bağlı bileşimsel olarak derecelendirilmiş Euler gözenekli kirişlerin titreşim davranışı üzerindeki termal etkileri araştırmıştır. Al Rjoub ve Hamad (2017), farklı sınır koşullarına sahip fonksiyonel olarak kusurlu Euler-Bernoulli ve Timoshenko dereceli kirişlerin serbest titreşimini incelemek için analitik bir yöntem geliştirmiştir.

Gao ve ark. (2019), aralıklı malzeme özelliklerine sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin dinamik özelliklerini araştırmıştır. Turan ve Kahya (2021) fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizlerini Navier yöntemi ile sunmuşlardır. Liu ve ark. (2019) Euler-Bernoulli hipotezine dayalı olarak FDG-GPLRC dairesel sığ kemerlerin burkulma analizini sunmuş ve FDG-GPLRC kemerlerin ağırlık azaltmada iyi bir performansa ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olduğunu bulmuştur. Jabbari ve ark. (2014) ve Mojahedin ve ark. (2016) gözeneklilik dağılımının doymuş gözenekli ince dairesel plakların burkulma davranışı üzerindeki etkisini sırasıyla klasik plak teorisi ve yüksek dereceli kayma deformasyon teorisine (HSDT) dayanarak tartışmışlardır. Elde ettikleri

sonuçlar, monoton porozite dağılımına sahip plağın simetrik ve simetrik olmayanlara göre daha kararsız olduğunu göstermiştir.

Reddy'nin yüksek dereceli kiriş teorisine ve Young-Laplace denklemine göre, Su ve ark. (2019) konsantre bir enine yük altında FDG nano kirişlerin statik eğilme davranışını analitik olarak incelediler ve elde ettikleri sonuçlar, nano kirişlerin statik eğilmesinin artık yüzey geriliminden önemli ölçüde etkilendiğini ve bu etkinin daha büyük narinlik oranı ve dış yük değerlerinde daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur. Chen ve ark.(2019) bir FDG çekirdek ve iki izotropik homojen yüzey tabakasından oluşan yeni bir sandviç plaka önermiş ve burkulma analizi birinci mertebeden kayma teorisi ve Chebyshev-Ritz yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, tek tip gözenekli bir çekirdekle karşılaştırıldığında, FDG çekirdeğin gerilme uyumsuzluğunu ortadan kaldırabileceğini ve sandviç plakaların burkulma performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Daikh ve Zenkour (2019) izotropik çekirdek ve iki FDG yüz tabakasına sahip bir sandviç plak geliştirmiş ve burkulma davranışı HSDT ve Navier çözüm prosedürü kullanılarak değerlendirmiştir.

Jamshidi ve ark. (2019)Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak, uzunluk ve kalınlık yönleri boyunca değişen gözenekliliğe sahip FDG kirişlerin burkulma sonrası optimizasyon analizini sunmuştur. En arzu edilen dağılımın kiriş merkezinde daha yüksek gözeneklilik değerlerine ve yüzeylerde daha düşük değerlere sahip olduğunu öne sürmüşlerdir. Fouaidi ve ark.(2020) FGP kirişlerin doğrusal olmayan eğilme davranışını araştırmış ve çoklu karesel radyal temel fonksiyonları ve Taylor serisi tabanlı bir devam prosedürü kullanarak yük-sapma tepkisini belirlemiştir.

Yazarın bilgisine göre, literatör incelendiğinde FD gözenekli sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik davranışını ANSYS sonlu elemanlar metodu yapan her hangi bir çalışmaya raslanmamıştır. Bu çalışmada, BEAM189 (kuadratik çubuk) elemanı kullanılarak FD sandviç kirişlerin zorlanmış dinamik titreşim analizi teorik olarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Analizlerde simetrik, üniform ve monolitik olmak üzere üç adet farklı gözenek fonksiyonu dikkate alınmıştır. Elastik ve viskoelastik incelemesinde ankastre-ankastre, ankastre-sabit, sabit-sabit ve ankastre serbest sınır koşulları ele alınmıştır. Malzeme değişim katsayısının, sönüm oranının, mesnet koşullarının ve gözenek fonksiyonlarının, foksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin dinamik davranışı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu tez, şu şekilde düzenlenmiştir, ilk bölümde giriş ve literatür taraması sunulmuştur. İkinci bölümde malzeme fonksiyonları ve kullanılan metot anlatılmıştır.Üçüncü bölümde ise bu tez çalışmasının en önemli bulguları verilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölümde tezden elde edilen önemli sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.



# İKİNCİ BÖLÜM MATERYAL VE METOT

Tezin bu bölümünde, elastik ve viskoelastik gruplarından oluşan toplam 267 FD sandviç kirişlerin davranışı sunulmuştur. Bu kirişlerin elastik davranışı 192 örnekte ele alınmıştır. Ele alınan çubuklar viskoelastik davranışı ise toplamda 75 adet BEAM189 ile incelenmiştir. Her durum simetrik gözenekli, monolitik gözenekli ve üniform gözenekli çekirdeğe sahip olmak üzere üçer alt gruba ayrılmıştır. Alt gruplardaki yapı elemanlar ise çeşitli mesnetleme koşullarına ve gözenek indislerine sahiptir. Bu tezin temel amacı malzeme porozite katsayısının ve çeşitli sınır koşullarına sahip olan FD sandviç kirişlerinin sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışına etkisini araştırmaktır. Kullanılan metodu kabullar ve kısıtlar ile ilgili detaylı bilgi tezin bu bölümünde verilecektir.

Bu tez çalışmasında ANSYS programı ile fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerinin modellenmesi tüm 3 boyutlu kuadratik kiriş elemanı olan BEAM189 kullanılmıştır.

Sönümsüz titreşim davranışı incelenirken herhangi bir sönüm oranı girilmemiştir. Sönümlü titreşim davranışı araştırılırken ise beta değeri girilerek sadece rijitlik matrisin sönüm matrisine olan katkısı ele alınmıştır. Kütle matrisinin sönüm matrisine olan katkısı ise ihmal edilmiştir.

Kullanılan BEAM189 elemanı kuadratik üç düğümlü çubuk elemanı olup her düğüm noktasında .x,y,z yönlerinde ötelenme ve eksenler etrafında dönme olmak üzere toplam altı adet serbest derecesine sahiptir.Bu eleman Timoshenko kiriş teorisine dayalıdır. Kullanılan bu hazır sonlu elemanın kabulleri, teorisi ve kısıtları ile ilgili bilgileri Ansys eleman refranslarında yer almaktadır.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin FD sandviç çubuklarına atanabilmek için daha önce excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Noori ve ark. (2020) tarafından yapılan literatür çalışmasında, FD kirişlerinin analizi için ANSYS kullanılmıştır. Çalışmada, çubuk kalınlığı boyunca 36 katmana ayrılan Şekil 12 gibi, bu tezde de çubuk kalınlığı boyunca 36 katmana ayrılmış ve önceden hesaplanan malzeme özellikleri her katmana ayrı ayrı girilmiştir. Daha hassas gerilme değerleri elde edebilmek için, kiriş 100 adet sonlu elemana bölünmüştür. Yükleme, z eksenine doğru uygulanmıştır. Şekil 12 ve Şekil 13, simetrik ve üniform gözenekli malzeme durumlarını göstermektedir.



sahip olan simetrik malzemeli FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli



Şekil 2. Gözenekli çekirdeğe sahip üniform malzemeli FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli

Bu tezde ele alınan kirişlerin analizleri temel olarak elastik ve viskoelastik olmak üzere iki ayrı grupta incelenmiştir. Elastik analizinde 192 adet BEAM189 incelemiştir,Simetrik malzeme kesitine sahip 61 adet kiriş,Üniform malzeme kesitine sahip 66 ve monolitik malzeme kesitine sahip 65 kiriş incelenmiştir. Bu analizlerde gözeneklilik kat sayısın değişimine göre kirişlerde deplasmanlar, momentler ve dönmeler rapor edilmiştir. Her üç grup için de farklı sınır koşulları dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

Viskoelastik analizinde 75 adet BEAM189 üzerinde yapılmıştır, bu analizde de aynı şekilde 25 simetrik malzeme, 25 üniform malzeme ve 25 monolitik malzeme çeşidi kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan örnek sayısının dahah iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki şema Şekil 14 te sunulmuştur.



Şekil 3. Kiriş analizi örnek sayısı

#### 3.1 Elastik Davranış

L uzunluğunda, h kalınlığında ve b genişliğinde FD sandviç kirişi Şekil 3'te ele alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan çubuk, 3 farklı kalınlığa sahip katmanlardan oluşmaktadır. Alt ve üst katmanlar izotropik homojen malzemeden yapılmışken, çekirdek katmanı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmıştır. Çekirdek için kullanılan gözenekli malzemeler için üç farklı durum düşünülmüştür. Bu üç farklı malzeme durumu, simetrik porozite dağılımı (SMCR) "Monolitik gözenklik dağılımı ve üniform gözenklik dağılımı olarak Şekil 3'te ele alınmıştır. Poison oranı kalınlık boyunca sabittir. SMCR malzemeler Denklem (1-9) ile, üniform porozite durumu ise Denklem (10-) ile Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2022) tarafından ifade edilmiştir. Sınır koşulları ise Tablo (1)'de sunulmuştur.

Tablo	1.	Sınır	Koşu	lları
-------	----	-------	------	-------

Mesnet Durumu	Sınır	Sınır koşulları		
	i	j		
Sabit-Sabit (S-S)	Ux = Uy = Uz = 0	Uy= Ux = Uz = 0		
Ankastre – Serbest (A-SR)	Roty = Rotx = Rotz = Uy=Ux = Uz = 0			
Ankastre – Sabit (A-S)	Roty = Rotx = Rotz = Uy=Ux = Uz = 0	Uy= Ux = Uz = 0		
Ankastre– Ankastre (A-A)	Rotx = Rotz = Roty = Uy = Ux = Uz = 0	Rotz = Rotx = Roty $= Uz = Ux = Uy = 0$		

Bu çalışmada, Poison oranı sabit olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde kütlesel yoğunluğun ve elastisite modülünün dağılımı verilecektir. Malzeme dağılım fonksiyonları, simetrik porozite durumu için denklem (1-9) üniform porozite durumu için denklem (10-18) ve monolitik durumu için denklem (19-27) olarak Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2022) tarafından verilmiştir.
$$\begin{pmatrix} E(z) = E_1$$
(1)

$$\ddot{\text{Ust Katman}} \quad \left( +\frac{7h}{18} \le z \le +\frac{h}{2} \right) \begin{cases} G(z) = G_1 \\ \rho(z) = \rho_1 \end{cases}$$

$$(2)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \tag{3}$$

$$E(z) = E_1 \left[ 1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right]$$
(4)

Çekirdek 
$$\left(-\frac{7h}{18} \le z \le +\frac{7h}{18}\right)$$
  $G(z) = G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right)\right]$  (5)

$$\rho(z) = \rho_1 \left[ 1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \tag{6}$$

$$E(z) = E_2$$
 (7)

Alt katman 
$$\left(-\frac{h}{2} \le z \le -\frac{7h}{18}\right)$$
  $G(z) = G_2$  (8)

$$\rho(z) = \rho_2 \tag{9}$$

$$E(z) = E_1 \tag{10}$$

$$\ddot{U}st katman \qquad \left( +\frac{7h}{18} \le z \le +\frac{h}{2} \right) \begin{cases} E(z) = E_1 & (10) \\ G(z) = G_1 & (11) \\ \rho(z) = \rho_1 & (12) \end{cases}$$

$$( E(z) = E_1 [1 - e_o \varphi]$$
 (13)

Çekirdek 
$$\left(-\frac{7h}{18} \le z \le +\frac{7h}{18}\right)$$

$$\begin{cases}
G(z) = G_1 \left[1 - e_o \varphi\right] & (14) \\
\rho(z) = \rho_1 \sqrt{1 - e_o \varphi} & (15)
\end{cases}$$

$$\rho(z) = \rho_1 \sqrt{1 - e_o \varphi} \tag{15}$$

$$\int E(z) = E_2 \tag{16}$$

Alt katman 
$$\left(-\frac{h}{2} \le z \le -\frac{7h}{18}\right)$$
  $G(z) = G_2$  (17)  
 $o(z) = o_2$  (18)

$$E(z) = E_1 \tag{19}$$

(

$$\rho(z) = \rho_1 \tag{21}$$

$$E_1 \left[ 1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right]$$
(22)

Çekirdek 
$$\left(-\frac{7h}{18} \le z \le +\frac{7h}{18}\right)$$

$$G(z) = G_1 \left[1 - e_o \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right]$$

$$\rho(z) = \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right]$$
(24)

$$E(z) = E_2 \tag{25}$$

Alt 
$$\left(-\frac{h}{2} \le z \le -\frac{7h}{18}\right)$$
  $G(z) = G_2$  (26)  
katman

$$\rho(z) = \rho_2 \tag{27}$$

burada  $h_c$  çekirdek kalınlığı ve  $\varphi$  ise,

$$\varphi = \frac{1}{e_o} - \frac{1}{e_o} \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - e_o} - \frac{2}{\pi} + 1\right)^2$$
(28)

Yukarıdaki denklemlerde,  $e_o$  porozite katsayısı, kesit yüksekliği, h,  $E_l$ ,  $G_l$  ve  $\rho_1$ s sırasıyla maksimum elastisite modülünü, kayma modülünü ve kütlesel yoğunluğu temsil eder. Kütlesel yoğunluk için gözeneklilik katsayısı  $(e_m)$  aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$e_m = 1 - \sqrt{1 - e_0}$$
(29)

Kohnke (2022) tarafından Ansys Mechanical APDL'de FD gözenekli sandviç kirişlerin modelini oluşturmak için malzeme değişim fonksiyonlarına bağlı olarak kütlesel yoğunluk ve elastisite modülü gibi malzeme özellikleri önceden hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler \*.csv formatında bir veri dosyasına kaydedilmiştir ve kesit kalınlık doğrultusunda 36 katmana bölünmüştür. Kirişin kesiti 1296 sonlu elemandan oluşmaktadır ve ilk ve son dört katman izotropik homojen iken orta katmanlar fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemelerden yapılmıştır. Ansys Mechanical APDL'deki Custom Sections sekmesinde Edit/Built-up özelliği kullanılarak her katman için gerekli malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Kirişler, uzunlukları boyunca 100 adet sonlu elemana bölünmüştür.

#### 2.2. Viskoelastik Malzeme Durumu

Bu çalışmada viskoelastik analizin sönüm oranı aşağıda hesaplanmıştır. Sönümleme matrisi, [C], denklem [30]'de verilmektedir.

 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ 

[*C*] = Sönüm matrisi

 $\alpha$  = kütle matrisi çarpanı (ALPHAD'da girdi)

[M] = kütle matrisi

 $\beta$  = rijitlik matrisi çarpanı (BETAD'da girdi)

[K] = rijitlik matrisi

(30)

#### 2.3. Adım Adım Zaman Integrasyon Yöntemi

ANSYS'te dinamik problemler Newmark-beta yöntemi ile çözülmektedir. Newmark-beta yöntemi, belirli diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmek için kullanılan bir entegrasyon yöntemidir. Bu yöntem sonlu elemanlar analizi gibi dinamik sistemlerin sayısal değerlendirmesinde sıklıkla kullanılır. Yöntemin adı, Illinois Üniversitesi'nde İnşaat Mühendisliği eski profesörü Nathan M. Newmark tarafından yapısal dinamiklerde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Yöntem, yarı ayrıklaştırılmış bir yapısal denklemdir ve ikinci dereceden bir adi diferansiyel denklem sistemidir.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f^{int}(u) = f^{ext} \tag{31}$$

Burada M kütle matrisidir, C sönümleme matrisidir  $f^{int}$  ve  $f^{ext}$  sırasıyla birim yer değiştirme başına iç kuvvet ve dış kuvvetlerdir.

Genişletilmiş ortalama değer teoremini kullanarak, Newmark-beta yöntemi, birinci zaman türevinin (hareket denklemindeki hız) şu şekilde çözülebileceğini belirtir,

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t \ddot{u}_y \tag{32}$$

$$\ddot{u}_{\gamma=}(1-\gamma)\ddot{u}_n + \gamma\ddot{u}_{n+1} \quad 0 \le \gamma \le 1 \tag{33}$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{u}_n + \gamma \Delta t \ddot{u}_{n+1}$$
(34)

Ancak ivme de zamanla değiştiğinden, doğru yer değiştirmeyi elde etmek için genişletilmiş ortalama değer teoreminin ikinci zaman türevine de genişletilmesi gerekir. Böylece

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \, \dot{u}_n + 1/2\Delta t^2 \ddot{u}_{\tau} \tag{35}$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{u}_n + \gamma \Delta t \ddot{u}_{n+1}$$
(36)

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \Delta t^2 / 2((1 - 2\tau)\ddot{u}_n + 2\tau \ddot{u}_{n+1}$$
(37)

$$M\ddot{u}_{n+1} + C\dot{u}_{n+1} + f^{int}(u_{n+1}) = f^{ext}_{n+1}$$
(38)

Bu yöntem ile ilgili detaylı bilgi ANSYS programın kullanım klavuzundan bulunabilir.



#### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada FD sandviç kirişin elastik davranışlarını incelenirken 512 zaman adım, ve viskoelastikte ise 256 zaman adım dikkate alınmıştır, Al-itbi ve Noori (2022) gözenekliliğin fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişin sebest titreşim tepkisi üzerinde etkisini icelemişler, bu çalışmadan alınan frekans değerlerinden periyot hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında altı periyot için çözüm yapılmıştır.

Noori ve ark. (2018) Newmark metodu kullanarak fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin zorlanmış titreşimi araştırmışlar,hesaplamalarda kirişi 32,64,128,256 ve 512 zaman adım için çözmüşler, ve 256 ve 512 nin sonuçları birbirine yakın olduğunu ve 512 adımdan sonra sonuçların değişmediğini görmüşler. Bu sebepten dolayı tezde elastik için 512 adım ve viskoelastik için 256 adım kullanılmıştır. Viskoelastik için 256 adım kullanımanın sebebi ise çözümü daha kısa sürede elde edilmesidir.

Bu tezde toplam 267 adet problem analiz edilmiştir. Çalışmada simetrik. Uniform ve monolitik olmak üzere üç farklı malzeme çeşidi için analiz edilmiştir. Mesnet çeşitlerine bakacak olursak, A-A, A-S, A–Sb ve S – S sınır koşulları dikkate alınmıştır.

3.1 Uygulama 1: İki ucu ankastre mesenetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 4.** dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme

Bu uygulamada, şekil 4'te verilen iki ucu ankastre mesnetli ve çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. İki ucu ankastre mesentli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise  $E_1$ = 200\*10<sup>9</sup> pa ,  $G_1$ =76\*10<sup>9</sup> pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir. Kirişin üst ve alt katmanı izotropik homojen olup çelikten yapılmıştır. Newmark metodu ile çözüm yapılırken toplam süre 512 zaman adımına bölünmüştür.

Bu uygulamanın temel amacı üniform gözenekli sandviç kirişi durumunda gözenklik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bu uygulama için elde edilen en büyük düşey yer değiştirme ve mesent moment değerlerinin zaman ile değişimi şekil 5 - 7'de grafik formunda sunulmuştur.

Şekil 5 – 6 incelendiğinde üniform gözenekli malzeme durumu için porozite katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Şekil 4'te verilen eğilme momentlerinin zaman ile değişimi incelendiğinde ise porozite katsayısı moment değerlerinin periyodunu etkilediği görülmektedir. Genlik değerlerinde büyük bir değişiklik görülmemektedir ancak titreşim grafikleri statik momentten dolayı yukarıya doğru yer değiştirmektedir.



Şekil 5. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )



Şekil 6. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )



Şekil 7. Üniform malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre eğilme moment değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )

# 3.2 Uygulama 2: Ankastre – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 8.** Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, uniform poroziteli bir çekirdeğe sahip olan ve bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli olan sandviç kirişin şekil (8) elastik zorlanmış titreşim davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Kirişe  $q_0 = 10.000$  N/m düzgün yayılı dinamik yük uygulanmıştır ve adım fonksiyonu şeklinde bir dinamik yük dikkate alınmıştır. Ankastre mesnetli için Sınır şartları Roty = Rotx =Rotz = Uy= Ux = Uz = 0 sabit mesnet için ise Uy= Ux = Uz = 0 şeklinde verilmiştir ve malzeme özellikleri E<sub>1</sub>= 200109 pa , G<sub>1</sub>=76109 pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın esas amacı, üniform gözenekli bir sandviç kirişinin zorlanmış titreşim üzerindeki etkilerini incelemek için gözenklik katsayısını kullanmaktır. Bu uygulama kapsamında, şekil 9-12'da düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zamanla nasıl değiştiği grafiksel olarak gösterilmiştir.



**Şekil 9.** Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )



Şekil 10. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )



Şekil 11. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi. $(e_0=0.1-0.5)$ 



Şekil 12. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi.( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )

Şekil (9-12) den görüldüğü gibi porozite katsayısı FDG kirişlerin dinamik davranışını önemli bir şekilde etkilemektedir.Porozite katsayısı, genlik ve periyotların küçülmesine veya büuümesine sebep olmaktadır. Önceki uygulamada yapılan değerlendirme bu örnek için de yapılabilir.

## 3.3 Uygulama 3: Üniform malzemeli sandviç konsol kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 13.** Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, üniform gözenekli malzemeden yapılmış bir sandviç kirişinin elastik zorlanmış titreşim davranışı incelenmiştir. Kiriş, şekil 13'te verilen bir ucu ankastre diğer ucu serbest mesnetli şekilde tasarlanmıştır. Kirişe,  $q_0 = 10.000$  N/m düzgün yayılı dinamik yük uygulanmıştır ve dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu kullanılmıştır. Kirişin sınır şartları, bir ucu ankastre ve diğer ucu serbest mesnetli olarak Tablo 1'de gösterilmiştir. Kirişin malzeme ve geometrik özellikleri bir önceki örnek gibi alınmıştır.

Bu uygulamada temel amaç, üniform gözenekli sandviç kirişi durumunda gözenklik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkisini araştırmaktır. Elde edilen düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zamanla değişimi, şekil 14 -17'de grafiksel olarak verilmiştir.



**Şekil 14**. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )



Şekil 15. Üniform malzemeli A – S mesnetli kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )



Şekil 16. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi ( $e_0=0.1-0.5$ )



Şekil 17. Üniform malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi.( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )

Şekil (14 - 17) incelediğinde porozite katsayısı arttıkça düşey deplasman,eğilme momenti ve dönme genlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Düşük porozite katsayılar için periyotların daha küçük olduğu görülmüştür.

3.4 Uygulama 4 Sabit – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 18**. Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 18'de verilen iki ucu sabit mesnetli ve çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı incelemiştir. Önceki uygulamada olduğu gibi bu uygulamada da geometrik ve malzeme özellikler aynı alınmıştır. Bu uygulama için elde edilen düşey yer değiştirme ve dönme değerlerinin zaman ile değişimi şekil 19 - 21'de grafik formunda gösterilmiştir.



Şekil 19. Üniform malzemeli S – S mesnetli kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ 



Şekil 20. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi ( $e_0 = 0.6 - 0.9$ )



**Şekil 21.** Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi.( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )

Şekil 18 – 21 incelendiğinde üniform gözenekli malzeme durumu için porozite katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Şekil 4'te verilen eğilme momentlerinin zaman ile değişimi incelendiğinde ise porozite katsayısı moment değerlerinin periyodunu etkilediği görülmektedir. Genlik değerlerinde büyük bir değişiklik görülmemektedir ancak titreşim grafikleri statik momentten dolayı yukarıya doğru yer değiştirmektedir.

3.5 Uygylama 5: Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 22.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, çekirdeği simetrik gözenekli malzemeden yapılmış bir sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı araştırılmıştır. Kirişin iki ucu ankastre mesnetlidir ve üzerine q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etkisi uygulanmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m ve enkesit yüksekliği de 0.5 m olarak belirlenmiştir. Sınır şartları Tablo 1'de gösterilmiştir ve malzeme özellikleri E1 =  $200*10^9$  Pa, G1 =  $76*10^9$  Pa ve  $\rho 1 = 7850$  kg/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Temel amaç, simetrik gözenekli sandviç kirişi durumunda gözenklik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkisini incelemektir. Elde edilen düşey yer değiştirme ve moment değerlerinin zamanla değişimi Şekil 23 - 25'de grafik formunda sunulmuştur. Bu örnekte 512 zaman adımı kullanılmıştır.



Şekil 23. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) ( $e_0=0.1-0.5$ )



**Şekil 24.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.6- 0.9)



Şekil 25. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.6)

Şekil (23 - 25) ten de görüldüğü gibi gözeneklik katsayısı azaldıkça genlikler ve periyotlar da azalmaktadır.

# 3.6 Uygulama 6: Ankastre – Sabit mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 26.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, simetrik gözenekli malzemeden yapılmış bir sandviç kiriş, bir ucu ankastre diğer ucu sabit mesnetli olarak ele alınarak, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Kirişe, q0=10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük uygulanmış ve adım tipi fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Çalışmadan elde edilen düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zamanla değişimi, şekil 27 -30'de grafiksel olarak sunulmuştur.Çözümlerde toplam süre 512 zaman adımına bölünmüştür.



**Şekil 27.** Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.5)



**Şekil 28.** Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.6- 0.9)



Şekil 29. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) ( $e_0=0.1-0.6$ )



Şekil 30. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi ( $e_0 = 0.1 - 0.5$ )

Şekil (27 - 30)dan da görüldüğü gibi porozite katsayısı arttıkça deplasman,dönme, ve moment değerlerinin titreşim genlikleri de artmaktadır.

3.7 Uygulama 7: Ankastre – Serbest mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 31.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 31'de verilen bir ucu ankastre diğer ucu serbest mesnetli ve çekirdeği simetrik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest mesentli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ve geometrik özellikler önceki gibidir.

Bu uygulamanın temel amacı simetrik gözenekli sandviç kirişi durumunda gözenklik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bu uygulama için elde edilen en büyük düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zaman ile değişimi şekil 32 – 35'te verilmiştir.



**Şekil 32.** Simetrik malzemeli A – Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.5)



Şekil 33. Simetrik malzemeli A – SR mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.6- 0.9)



**Şekil 34.** Simetrik malzemeli A – SR mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre momentin değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.6)



Şekil 35. Simetrik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi ( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )

Şekil (32 - 35) den de görüldüğü gibi yer değiştirme, dönme ve moment değerleri genlik sayıları değişmektedir.

3.8 Uygulama 8: Sabit – Sabit mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 36.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 36'de verilen iki ucu sabit mesnetli ve çekirdeği simetrik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Bu uygulamada ele alınan kirişe düşey yer değiştirme ve dönme değerlerinin zaman ile değişimi şekil 37 – 39'da grafik formunda sunulmuştur. Malzeme ve geometrik özellikler önceki örneklerde olduğu gibi alınmıştır.



Şekil 37. Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) ( $e_0=0.1-0.5$ )



**Şekil 38.** Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.6- 0.9)



Şekil 39. Simetrik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi ( $e_0 = 0.5 - 0.9$ )

Şekil 37 – 39 incelendiğinde simetrik gözenekli malzeme durumu için porozite katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Şekillerde verilen eğilme momentlerinin zaman ile değişimi incelendiğinde ise porozite katsayısı moment değerlerinin periyodunu etkilediği

görülmektedir. Genlik değerlerinde büyük bir değişiklik görülmemektedir ancak titreşim grafikleri statik momentten dolayı yukarıya doğru yer değiştirmektedir.

### 3.9 Uygulama 9: Ankastre – Ankastre mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 40.** Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 37'de verilen iki ucu ankastre mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. İki ucu ankastre mesentli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise  $E_1$ = 200\*10<sup>9</sup> Pa ,  $G_1$ =76\*10<sup>9</sup> Pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir. Newmark yöntemi ile analiz için 512 zaman adımı kullanılmıştır.

Bu uygulamanın temel amacı monolitik gözenekli sandviç kirişi durumunda gözenklik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bu uygulama için elde edilen düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zaman ile değişimi şekil 41 – 43'te grafik formunda sunulmuştur.



**Şekil 41.** Monolitik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.5)



Şekil 42. Monolitik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi (m) ( $e_0=0.6 - 0.9$ )



**Şekil 43.** Monolitik malzemeli A– A mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi (e<sub>0</sub>=0.1 - 0.6)

3.10 Uygulama 10: Ankastre – Serbest mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 44.** Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 44'te verilen bir ucu ankastre ve diğer ucu sabit mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. Bir ucu ankastre ve diğer ucu sabit mesentli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise E<sub>1</sub>= 200\*10<sup>9</sup> Pa , G<sub>1</sub>=76\*10<sup>9</sup> Pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir.

Bu uygulama için elde edilen düşey yer değiştirme, dönme ve moment değerlerinin zaman ile değişimi şekil 45 – 48'de grafik formunda sunulmuştur.



Şekil 45. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.5)



**Şekil 46.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.6 - 0.9)



Şekil 47. Monolitik malzemeli A– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi ( $e_0=0.1 - 0.5$ )



**Şekil 48.** Monolitik malzemeli A– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e<sub>0</sub>=0.1 - 0.5)

3.11 Uygulama 11: Ankastre – Serbest mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 49**. Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 46'de verilen bir ucu ankastre ve diğer ucu serbest mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Yükleme, malzeme ve geometrik özellikleri önceki örnek gibi alınmıştır.

A – SR mesnet durumun elastik davranışına ait altı periyot için sonuçlar şekil (50 - 53) te verilmiştir.



**Şekil 50.** Monolitik malzemeli A – Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) (e<sub>0</sub>=0.1- 0.5)



Şekil 51. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmanın değişimi (m) ( $e_0=0.6 - 0.9$ )



**Şekil 52.** Monolitik malzemeli A– Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre moment değişimi (e<sub>0</sub>=0.1 - 0.5)



Şekil 53. Monolitik malzemeli A– Sr mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e<sub>0</sub>=05 - 0.9)

## 3.12 Uygulama 12: Sabit - Sabit mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümsüz zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 54.** Dinamik yük etkisinde monolitik malzemeli FD sandviç kiriş ve Adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 51'de verilen iki ucu sabit mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır.Bu örnekte de en büyük yer değiştirmeleri ve en büyük dönme değerlerinin zamanla değişimi farklı gözeneklik katsayılar için elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil (55 - 57) de çizilmiştir.



**Şekil 55.** Monolitik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) ( $e_0=0.1-0.5$ )


Şekil 56. Monolitik malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre düşey deplasmannın değişimi (m) ( $e_0=0.6 - 0.9$ )



**Şekil 57.** Monolitik malzemeli S– S mesnetli sandviç kirişinin porozite oranına göre dönme değişimi (e<sub>0</sub>=0.5 - 0.9)

Şekil 51 – 57 incelendiğinde monolitik gözenekli malzeme durumu için porozite katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Şekillerde verilen eğilme momentlerinin zaman ile değişimi incelendiğinde ise porozite katsayısı moment değerlerinin periyodunu etkilediği

görülmektedir. Genlik değerlerinde büyük bir değişiklik görülmemektedir ancak titreşim grafikleri statik momentten dolayı yukarıya doğru yer değiştirmektedir.

## 3.13 Uygulama 13: Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 58.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme

Bu uygulamada, şekil 58'de verilen iki ucu ankastre mesnetli ve çekirdeği simetrik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. İki ucu ankastre mesentli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise  $E_1$ = 200\*10<sup>9</sup> Pa ,  $G_1$ =76\*10<sup>9</sup> Pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir. Çözümlerde 256 zaman adımı kullanılmıştır.

Elastik çözüm ve farklı sönüm oranları için viskoelastik çözümler, Şekil 59 - 68'de birlikte gösterilmiştir. Elastik durumda, dinamik davranışa ait düşey yer değiştirme değerleri, statik değerlerin etrafında salınım yapmaya devam ederken, viskoelastik durumda bu salınım genlikleri zamanla statik değere yaklaşarak kaybolmaktadır. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, sönüm oranının artması, titreşim genliklerinin daha hızlı bir şekilde statik değere yaklaşmasına neden olmaktadır. Viskoelastik durumda, yer değiştirme salınım genlikleri sönüm oranı arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır.

Bu çalışmada kelvin tipi sönüm modeli kullanılmıştır. Kelvin tipi sönüm modelindeki g değeri  $\beta$  değerine eşit olduğundan grafikler üzerinde sönüm oranı  $\beta$  yerine g ile ifade edilmiştir.



**Şekil 59.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.1$ )



**Şekil 60.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin Sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.1)



**Şekil 61.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.3)



**Şekil 62.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e<sub>0</sub>=0.3)



Şekil 63. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.4$ )



**Şekil 64.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e<sub>0</sub>=0.4)



Şekil 65. Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.5$ )



**Şekil 66.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e<sub>0</sub>=0.5)



**Şekil 67.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.6)



**Şekil 68.** Simetrik malzemeli A – A mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e<sub>0</sub>=0.6)

## 3.14 Uygulama 14: Ankastre – Sabit mesnetli monolitik malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 69.** Dinamik yük etkisinde simetrik malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 69'da verilen bir ucu ankastre ve diğer ucu sabit mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. bir ucu ankastre ve diğer ucu sabit kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise E<sub>1</sub>= 200\*10<sup>9</sup> Pa , G<sub>1</sub>=76\*10<sup>9</sup> Pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir.

Elastik çözüm ve farklı sönüm oranları için viskoelastik çözümler, Şekil 67 - 81'de birlikte gösterilmiştir. Elastik durumda, dinamik davranışa ait moment değerleri, statik değerlerin etrafında salınım yapmaya devam ederken, viskoelastik durumda bu salınım genlikleri zamanla statik değere yaklaşarak kaybolmaktadır. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, sönüm oranının artması, titreşim genliklerinin daha hızlı bir şekilde statik değere yaklaşmasına neden olmaktadır. Viskoelastik durumda, yer değiştirme salınım genlikleri sönüm oranı arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır.

Viskoelastik çözümlerde her periyot 43 zaman adımına bölünerek sonuçlar elde edilmiştir, ve elde edilen bu değerler grafikler yardımıyla karşılaştırılmıştır.



**Şekil 70.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.1)



**Şekil 71.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.1)



**Şekil 72.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.1)



Şekil 73. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.2$ )



**Şekil 74.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.2)



**Şekil 75.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.2)



**Şekil 76.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.3)



**Şekil 77.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.3)



**Şekil 78.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.3)



**Şekil 79.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.4)



**Şekil 80.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.4)



Şekil 81. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.4)



**Şekil 82.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi(e<sub>0</sub>=0.5)



Şekil 83. Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre momentin değişimi(e<sub>0</sub>=0.5)



**Şekil 84.** Monolitik malzemeli A – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.5)

3.15 Uygulama 15: Sabit – Sabit mesnetli üniform malzemeli sandviç kirişin sönümlü zorlanmış titreşim analizi



**Şekil 85.** Dinamik yük etkisinde üniform malzemeli FD sandviç kiriş ve adım tipi yükleme.

Bu uygulamada, şekil 85'te verilen iki ucu sabit mesnetli ve çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe q0 = 10.000 N /m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. iki ucu sabit mesnetli kirişin sınır şartları tablo 1'de verilmiştir. Malzeme özellikleri ise E= 200\*10<sup>9</sup> Pa , G<sub>1</sub>=76\*10<sup>9</sup> Pa ve  $\rho_1$ =7850 kg/cm<sup>3</sup> değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir.

Elastik çözüm ve farklı sönüm oranları için viskoelastik çözümler, Şekil 86- 96'da birlikte gösterilmiştir. Elastik durumda, dinamik davranışa ait dönme değerleri, statik değerlerin etrafında salınım yapmaya devam ederken, viskoelastik durumda bu salınım genlikleri zamanla statik değere yaklaşarak kaybolmaktadır. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, sönüm oranının artması, titreşim genliklerinin daha hızlı bir şekilde statik değere yaklaşmasına neden olmaktadır. Viskoelastik durumda, yer değiştirme salınım genlikleri sönüm oranı arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır.



**Şekil 86.** Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.1$ )



Şekil 87. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönme değişimi( $e_0=0.1$ )



Şekil 88. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre düşey deplasmanın değişimi( $e_0=0.2$ )



**Şekil 89.** Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre moment değişimi(e<sub>0</sub>=0.2)



Şekil 90. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönme değişimi( $e_0=0.2$ )



**Şekil 91.** Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi( $e_0=0.3$ )



Şekil 92. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi( $e_0=0.3$ )



Şekil 93. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi( $e_0=0.4$ )



**Şekil 94.** Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi(e<sub>0</sub>=0.4)



Şekil 95. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre deplasmanın değişimi( $e_0=0.5$ )



Şekil 96. Üniform malzemeli S – S mesnetli sandviç kirişinin sönüm oranına göre dönmenin değişimi $(e_0=0.5)$ 

Beklendiği gibi viskoelastik davranış incelendiğinde sönüm oranı arttıkça titreşim genliklerinin statik deplasmanın etrafında daha hızlı bir şekilde sönümlendiği gözlemlenmektedir.

Elastik durumda ( $\beta = g = 0$  olduğunda) titreşim genliklerin düşmediği görülmüştür.Gerçek problemlerinin sönüm oranın belirlerken yapısal sönüm oranları kullanılabilir. Yapısal sönüm oranlar ile  $\beta$  katsayısı arasındakı ilişki şöyledir.

 $\beta = \frac{2\zeta i}{wi}$  Bu denklemde Ç yapısal sönüm oranı, Wi ise açısal serbest titreşim frekansıdır.

Tezin bu aşamasında farklı malzeme durumları için elde edilen değerlerin karşılaştırılması şekil (97 – 108)'de verilmektedir.



Şekil 97. A-A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre moment değişimi (e<sub>0</sub>=0.1)



Şekil 98. A-A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre moment değişimi (e<sub>0</sub>=0.3)



Şekil 99. A - A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre moment değişimi ( $e_0=0.5$ )



Şekil 100. A – A mesnetli kirişine için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.3$ )



Şekil 101. A - A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.5$ )



Şekil 102. A – A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.7$ )



Şekil 103. A - A mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.9$ )



Şekil 104. A - S mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.1$ )



Şekil 105. A – S mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.3$ )



Şekil 106. A – S mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre düşey deplasman değişimi ( $e_0=0.5$ )



Şekil 107. A – S mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre moment değişimi  $(e_0=0.7)$ 



Şekil 108. A – S mesnetli kiriş için malzeme değişimine göre moment değişimi  $(e_0=0.9)$ 

Şekil (97-108) incelendiğinde ise malzeme fonksiyonlarının dinamik davranış sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Örneğin  $e_0 = 0.1$  değeri için simetrik malzemeli kirişin yer değiştirmleri en küçük değerleri alırken yine aynı malzeme  $e_0 = 0.9$  için en yer değiştirme değerleri diğer iki malzeme fonkisyonuna göre en büyük değerleri almaktadır.  $e_0 = 0.5$  için elde edilen sonuçlara bakıldığında ise monolitik ve üniform malzeme fonksiyonlarının sonuçları birbiriyle örütüşürken simetrik malzeme durumu için elde edilen düşey deplasmanlar daha küçük değerler almaktadır.

## SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmış sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı teorik olarak incelenmiştir. Üç tabakadan oluşan sandviç kirişin altı ve üst katmanı izotropik homojen ve çekirdek tabakası ise gözenekli malzemeli olarak modellenmiştir. Modellen kirişlerin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilebilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır.

Üniform, simetrik ve monolitik gözenekli malzeme durumları için porozite katsayısı arttıkça yer değiştirme ve dönme sonuçları için titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmüştür. Sınır koşulları açısından karşılaştırma ise, titreşim genlik değerleri ankastre – ankastre , ankastre – sabit , ve ankastre – serbest mesnetler için küçükten büyüğe doğru sıralanabilir. Eğilme momentlerinin zaman ile değişimi incelendiğinde ise porozite katsayısı moment değerlerinin periyodunu etkilediğini ancak moment genlik değerlerini etkilemediği görülmüştür.

Malzeme dağılım fonksiyonlarının karşılaştırılması sonucunda ise  $e_0 = 0.1$  porozite katsayısı için elde edilen edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.  $e_0 = 0.3$  katsayısı için ise monolitik malzeme fonksiyonun sonuçları en büyük değerleri alırken simetrik gözeneklik dağılım durum için elde edilen sonuçlar en küçük değerleri almaktadır.  $e_0 = 0.5$  ve  $e_0 = 0.7$  durumu için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ise monolitik ve üniform malzeme fonksiyonları için elde edilen değerlerinin yakın olduğu ve simetrik malzeme durum için elde edilen sonuçların diğer malzeme durumlarına göre daha küçük değerler aldığı gözlemlenmiştir.  $e_0 = 0.9$  durumunda ise en büyük değerlerin simetrik malzeme durumunda olduğu ve en küçük değerlerinin ise monolitik malzeme durumunda olduğu ve en küçük değerlerinin ise

## KAYNAKLAR

- A. Alshorbagy, E., M. Eltaher, A. and Mahmoud, F. F. (2011). "Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method," *Appl. Math. Model*, vol. 35, no. 1, pp. 412–425.
- A. Naderi and Saidi. A.R. (2013). Bending–stretching analysis of moderately thick functionally graded anisotropic wide beams. *Arch. Appl. Mech.*, vol. 83, no. 9, pp. 1359–1370.
- Ai, Q., & Weaver, P. M. (2016). Simplified analytical model for tapered sandwich beams using variable stiffness materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(1), 3-25.
- Ait Atmane, H., Tounsi, A., & Bernard, F. (2017). Effect of thickness stretching and porosity on mechanical response of a functionally graded beams resting on elastic foundations. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 13, 71-84.
- Akbaş, Ş. D. (2018). Forced vibration analysis of functionally graded porous deep beams. *Composite Structures*, 186, 293-302.
- Akbas, S.D. (2015). Free vibration and bending of functionally graded beams resting on elastic foundation. *Res. Eng. Struct. Mat.*, vol. 1, no. 1, pp. 25–37, 2015.
- Al Rjoub, Y.S., Hamad, A.G. (2017). Free vibration of functionally Euler-Bernoulli and Timoshenko graded porous beams using the transfer matrix method. *KSCE J. Civ. Eng.* 21, 792–806
- AL-ITBI, S. K., & NOORI, A. R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4).
- Amirani, M. C., Khalili, S. M. R., & Nemati, N. (2009). Free vibration analysis of sandwich beam with FG core using the element free Galerkin method. *Composite structures*, 90(3), 373-379.
- Aydogdu, M. (2008). Semi-inverse Method for Vibration and Buckling of Axially Functionally Graded Beams," J. Reinf. Plast. Compos., vol. 27, no. 7, pp. 683– 691.
- Aydogdu, M. and Taskin, V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1651–1656.

- Aydogdu, M., Maroti, G., and Elishakoff, I. (2013). A note on semiinverse method for buckling of axially functionally graded beams. J. Reinf. Plast.Compos., vol. 32, no. 7, pp. 511–512.
- Bhangale, R. K., and Ganesan, N. (2006). Thermoelastic buckling and vibration behavior of a functionally graded sandwich beam with constrained viscoelastic core. J. Sound Vib., vol. 295, no. 1–2, pp. 294–316.
- Celebi, K. and Tutuncu, N. (2014). Free vibration analysis of functionally graded beams using an exact plane elasticity approach. Proc. IMechE Part C: J. *Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 14, pp. 2488–2494.
- Chen, D., Kitipornchai, S., & Yang, J. (2016). Nonlinear free vibration of shear deformable sandwich beam with a functionally graded porous core. *Thin-Walled Structures*, 107, 39-48.
- Chen, D., Yang, J., & Kitipornchai, S. (2015). Elastic buckling and static bending of shear deformable functionally graded porous beam. *Composite Structures*, 133, 54-61.
- Chen, D., Yang, J., & Kitipornchai, S. (2016). Free and forced vibrations of shear deformable functionally graded porous beams. *International journal of mechanical sciences*, 108, 14-22.
- Chen, D., Yang, J., Kitipornchai, S. (2019). Buckling and bending analyses of a novel functionally graded porous plate using Chebyshev-Ritz method. Archives of Civil and Mechanical Engineering ;19(1):157-170.
- Chu, P., X.F. Li, Wu, J.X., and Lee, K.Y. (2015). Two-dimensional elasticity solution of elastic strips and beams made of functionally graded materials under tension and bending," *Acta Mech.* vol. 226, no. 7, pp. 2235–2253.
- D.J. Huang, D.H. Ding, and W.Q. Chen. (2007). Analytical solution for functionally graded anisotropic cantilever beam subjected to linearly distributed load. *Appl. Math. Mech.*, vol. 28, no. 7, pp. 855–860.
- Daikh, AA., Zenkour, AM. (2019). Free vibration and buckling of porous power-law and sigmoid functionally graded sandwich plates using a simple higher-order shear deformation theory. *Materials Research Express*. 6(11):115707.
- Daouadji, T. H., Henni, A. H., Tounsi, A., and El Abbes, A. B. (2013). Elasticity solution of a cantilever functionally graded beam. *Appl. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–15.

- Das, S., & Sarangi, S. K. (2016, September). Static analysis of functionally graded composite beams. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 149, No. 1, p. 012138). IOP Publishing.
- Ding, D.H., Huang, D.J. and Chen, W.Q. (2007). Elasticity solutions for plane anisotropic functionally graded beams. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 1, pp. 176–196.
- Ebrahimi, F., Ghasemi, F., Salari, E. (2016). Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities. *Meccanica* 51, 223–249.
- Fouaidi, M., Jamal, M., Belouaggadia, N. (2020). Nonlinear bending analysis of functionally graded porous beams using the multiquadric radial basis functions and a Taylor series-based continuation procedure. *Composite Structures*, 252:112593.
- Gao, K., Li, R., Yang, J. (2019). Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Eng. Struct.* 197, 109441.
- Huang, D.J. Ding, D.H. and W.Q. Chen. (2009) . Analytical solution and semi-analytical solution for anisotropic functionally graded beam subject to arbitrary loading. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, vol. 52, no. 8, pp. 1244–1256.
- J. Ying, C.F. Lu, and W.Q. Chen. (2008). Two-dimensional elasticity solutions for functionally graded beams resting on elastic foundations. *Compos. Struct.*, vol. 84, no. 3, pp. 209–219.
- Jabbari, M., Mojahedin, A., Khorshidvand AR, Eslami MR. (2014). Buckling Analysis of a Functionally Graded Thin Circular Plate Made of Saturated Porous Materials. *Journal of Engineering Mechanics*,140(2):287-295.
- Jamshidi, M., Arghavani, J., Maboudi, G. (2019). Post-buckling optimization of twodimensional functionally graded porous beams. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*,15(4):801-815.
- Kiani, Y. and Eslami, M. R. (2010). Thermal buckling analysis of functionally graded material beams. *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 6, no. 3, pp. 229–238.
- Kiani, Y. and Eslami, M. R. (2013). Thermomechanical buckling of temperature dependent FGM beams," Lat. Am. J. Solids Struct., vol. 10, no. 2, pp. 223–246.
- Kim, N., and Lee, J. (2016). Theory of thin-walled functionally graded sandwich beams with single, and double-cell sections. *Compos. Struct.*, vol. 157, pp. 141–154.

- Kim, N., and Lee, J. (2017). Flexural-torsional analysis of functionally graded sandwich I-beams considering shear effects. *Compos. Part B-Eng.*, vol. 108, pp. 436–450.
- Liu, Z., Yang, C., Gao, W., Wu, D., Li, G. (2019). Nonlinear behaviour and stability of functionally graded porous arches with graphene platelets reinforcements. *International Journal of Engineering Science*, 137:37-56.
- Mojahedin, A., Jabbari, M., Khorshidvand AR, Eslami, MR. (2016). Buckling analysis of functionally graded circular plates made of saturated porous materials based on higher order shear deformation theory. *Thin-Walled Structures*; 99:83-90.
- Njim, E. K., Bakhi, S. H., & Al-Waily, M. (2022). Experimental and numerical flexural properties of sandwich structure with functionally graded porous materials. *Engineering and Technology Journal*, 40(01), 137-147.
- Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2019). Dairesel Plaklarin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Laplace Uzayinda Dinamik Analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 193-205.
- Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2020). Static analysis of FG beams via complementary functions method. *European Mechanical Science*, 4(1), 1-6.
- Noori, A. R., Rasooli, H., Aslan, T. A., & Temel, B. (2020). Fonksiyonel Derecelenmiş Sandviç Kirişlerin Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi ile Statik Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1091-1102.
- Rezaiee-Pajand, M., Masoodi, A. R., & Mokhtari, M. (2018). Static analysis of functionally graded non-prismatic sandwich beams. *Adv. Comput.* Des, 3(2), 165-190.
- Sankar, B. V. (2001). An elasticity solution for functionally graded beams. *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 5, pp. 689–696.
- Şimşek, M. and Al-Shujairi, M. (2017) Static, free and forced vibration of functionally graded (FG) sandwich beams excited by two successive moving harmonic loads. *Compos. Part B-Eng.*, vol. 108, pp. 18–34, 2017.
- Srikarun, B., Songsuwan, W., & Wattanasakulpong, N. (2021). Linear and nonlinear static bending of sandwich beams with functionally graded porous core under different distributed loads. *Composite Structures*, 276, 114538.
- Su, J., Xiang, Y., Ke, L-L., Wang, Y-S. (2019). Surface Effect on Static Bending of Functionally Graded Porous Nanobeams Based on Reddy's Beam Theory. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 19(06):1950062

- Turan, M., Kahya, V. (2021). Free vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich beams by Navier's method. J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. 36, 743–75.
- Venkataraman, S. and Sankar, B.V. (2003). Elasticity solution for stresses in a sandwich beam with functionally graded core," *AIAA J.*, vol. 41, no. 12, pp. 2501–2505.
- Vo T. P., Thai H. T., Nguyen T. K. & Inam F. (2014). Static and vibration analysis of functionally graded beams using refined shear deformation theory. *Meccanica*, 49, 155-168.
- Wattanasakulpong N., Chaikittiratana A. (2015). Flexural vibration of imperfect functionally graded beams based on Timoshenko beam theory: Chebyshev collocation method. Meccanica 50, 1331–1342.
- Y. Xu, T. Yu, and D. Zhou, "Two-dimensional elasticity solution for bending of functionally graded beams with variable thickness," Meccanica, vol. 49, no. 10, pp. 2479–2489, 2014.
- Zhao, J., Wang, Q., Deng, X., Choe, K., Xie, F., & Shuai, C. (2019). A modified series solution for free vibration analyses of moderately thick functionally graded porous (FGP) deep curved and straight beams. Composites Part B: Engineering, 165, 155-166.
- Zhong, Z. and Yu, T. (2007). Analytical solution of a cantilever functionally graded beam. *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 3–4, pp. 481–488, 2007.