

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ
SANDVIÇ KİRİŞLERİN STATİK VE SERBEST TİTREŞİM
ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

SURA KAREEM ABBAS AL-ITBI

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori

İstanbul – 2023

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : SURA KAREEM ABBAS AL-ITBI

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Statik ve Serbest Titreşim Analizi

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 31/03/2023

Sayfa Sayısı : 108

Tez Danışmanları : Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori

Dizin Terimleri : Statik analiz, Sonlu elemanlar yöntemi, FDM, Gözenekli malzemeler, Sandviç kiriş, Serbest titreşim Analizi

Türkçe Özet : Bu tez çalışmasında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışı teorik olarak araştırılmıştır. Porozite dağılım fonksiyonlarının ve porozite katsayısının yer değiştirmeler, gerilmeler ve serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri sunulmuştur.

Dağıtım Listesi :

1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası
Sura Kareem

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ
SANDVIÇ KİRİŞLERİN STATİK VE SERBEST TİTREŞİM
ANALİZİ

Yüksek Lisans Tezi

SURA KAREEM ABBAS AL-ITBI

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.

Sura Kareem

.../.../2023



İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Sura Kareem Abbas Al – Itbi’ın Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin statik ve serbest 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

Üye

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORİ

(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

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç malzemeler, çeşitli yapı elemanlarının yapımında kullanılan kompozit malzemelerdir. Bu yapı elemanları gemi sanayisi, denizcilik, otomotiv, yüksek bina yapıları ve enerji mühendisliği uygulamaları ve daha birçok alanda kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, açıklığı boyunca düzgün yayılı yüke maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli (FGP) sandviç kirişlerin statik davranışını analiz etmek için kullanılmıştır. Çubuğun çekirdeği fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemenin, üst ve alt tabakaları ise izotropik homojen malzemelerden yapılmıştır. Üniform ve simetrik gözenekli malzeme dağılımları, iki farklı gözenekli malzeme çeşidi olarak kullanılmıştır. ANSYS programında BEAM189 elemanı kullanılarak kayma deformasyon etkisi dikkate alınmıştır. Bu sonlu eleman, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanmaktadır. Gözeneklilik katsayısının, sınır koşullarının ve gözenekli malzemenin türünün, ele alınan yapı elemanların statik davranışı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Sonuçlar, gözeneklilik katsayısının FD sandviç kirişlerin statik analizi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bu malzemelerin gözenekli olması rijitlik ve mukavemet gibi bazı davranışsal yönleri ve özellikleri olumsuz etkileyebilir, ancak titreşim azaltma, termal izolasyon, enerji absorpsiyonu ve diğer özellikler gibi diğer alanlarda üstün performans sağlayabilir. Porozitenin ele alınan sandviç kirişlerin dinamik davranışları üzerindeki etkisinin araştırılması, hesaplanan serbest titreşim frekanslarının yorumlanması ile gerçekleştirilmiştir. FD sandviç kirişlerinin mekanik özellikleri kalınlık boyunca porozite katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu katsayının serbest titreşim frekansları üzerinde etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Dört adet farklı mesentli kiriş (ankastre- ankastre, sabit-sabit, ankastre -serbest, ankastre- sabit) için analizler gerçekleştirilmiştir. Gözeneklilik katsayısına ise (0,1 – 0,9) arasında değerler verilerek 4 gruptan oluşan toplam 264 kiriş örneği analiz edilmiştir. Simetrik tabakalı durumunda her gözeneklilik dağılımı (üniform ve SMCR) için 44 model, simetrik olmayan tabakalanma durumu için 44 model ve PLANE183 sonlu elemanı için de 44 model oluşturulmuştur.

Dinamik analizden elde edilen sonuçlar, gözeneklilik sabitinin FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal frekansları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Eğilme analizi, Sonlu elemanlar yöntemi, Fonksiyonel derecelenmiş malzeme, Gözenekli malzemeler, Sandviç kiriş, Serbest titreşim Analizi



SUMMARY

Functionally graded sandwich materials are composite materials used to build a variety of structures. These structures are used in ships industries, marine, automotive, high building structures, energy engineering applications, and many more.

Finite element method is used to analyze the static response of the functionally graded porous (FGP) sandwich beam is subjected to uniformly distributed load along the beam span. The core of the beam is made from functionally graded porous material while the top and bottom layers are made from isotropic homogenous materials. Uniform distribution and symmetric material constitutive relationships (SMCR) are used as two different types of porous material. Shear deformation is considered in the analysis by utilizing beam189 in ANSYS which is a finite element package program. This element method is based on the first-order shear deformation theory. The influence of porosity coefficient, boundary conditions, and type of the porous material on the static response for the considered structures is presented in details. The results demonstrate that the porosity coefficient has an important impact on the static response of the FGP sandwich beams.

The porosity made in these materials may negatively affect some of behaviour aspects and properties like stiffness, and strength, nonetheless it may provide superior performance in other fields like vibration reduction, thermal isolation, energy absorption, and others characteristics. A discussion based on dynamic analysis theories is performed about the effect of porosity on the measured natural frequencies for functionally graded porous (FGP) sandwich beams. The mechanical properties of the FGP sandwich beams are mutually changing with the porosity in the thickness direction. The free vibration of the beam is examined with the effect of porosity variations. The analysis is carried out for four different beam supporting types (pinned–pinned, fixed – fixed, fixed – free, fixed–pinned). Various porosity ratios are considered with a range from (0.1 – 0.9). Total of two hundred sixty – four beam’s samples divided to four groups. Forty–four samples are analyzed for each type of core material distribution which is the symmetric material constitutive relationships (SMCR), and uniform core material in addition to forty-four samples for nonsymmetric cross section materials, and forty – four beams for Plane183

method. The results obtained from the dynamic analysis show that the porosity constant has a significant effect on the natural frequencies of the FGP sandwich beams

Keywords: Bending analysis, Finite element method, Functionally graded materials, Porous materials, Sandwich beam, Free vibration Analysis.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR	vii
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xv
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜRE TARAMASI

1.1 Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Sandviç Malzemeler	2
1.2 Gözenekli Çekirdek Yapısı.....	2
1.3 FD Sandviç Malzemelerin Uygulamaları	4
1.3.1 Yaya Geçitleri Ve Köprüler.....	5
1.3.2 Kirişler	6
1.3.3 Konut İnşaatları	7
1.3.4 Raylı Sistemler	8
1.3.5 Yanal Destek Elemanları.....	9
1.4 FD Sandviç Kirişlerin Statik Analizi	9
1.4.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi.....	9
1.4.2 Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi	11
1.4.3 Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Etkisi	12
1.4.4 Quasi – 3D Teorisi.....	13
1.4.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)	13
1.4.6 Önerilen Diğer Teoriler	14
1.5 FD Sandviç Kirişlerin Dinamik Analizi	15
1.5.1 Titreşim.....	15
1.5.2 Titreşim Çeşitleri	15
1.5.3 Euler – Bernoulli Kiriş Teorisi.....	17
1.5.4 Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Etkisi	18
1.5.5 Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Teorileri (HOBT)19	

1.5.6	Quasi – 3D Teorisi.....	20
1.5.7	Sonlu Elemenlar Metodu	20
1.5.8	Kullanılan Diğer Metotlar	22

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1	Beam189 ile Analiz	23
2.2	Kirişlerin Yapısal Analizi	25
2.3	FD Sandviç Kirişlerin Statik Analizi.....	26
2.4	Gözenekli Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi	28

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1	Statik Analiz	31
3.1.1	Yerdeğiştirme Sonuçları	31
3.1.2	Von Mises Gerilmeleri	38
3.1.3	Dönme Açıları	42
3.1.4	Birinci Asal Gerilmeler	45
3.2	Serbest Titreşim Analizi	50
3.2.1	BEAM189 Elemanı ile Serbest Titreşim Frekanslarının Elde Edilmesi	50
3.2.2	PLANE183 Elemanı ile Serbest Titreşim Analizi	72
SONUÇLAR.....		77
KAYNAKLAR.....		80

KISALTMALAR

FD	:	Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş
SMCR:	:	Simetrik gözenekli malzeme
VARTM	:	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
L	:	Uzunluk
H	:	Kesit kalınlığı
B	:	Kesit genişliği
Q	:	Yük
e_o	:	Porosity katsayısı
E_1	:	Maksimum elastisite modülü
A – A	:	Ankastre – Ankastre
A – S	:	Ankastre – Sabit
S – S	:	Sabit- Sabit
A-SR	:	Ankastre – Serbest
E_1	:	En büyük elastisite modülü
G_1	:	En büyük kayma modülü
ρ_1	:	En büyük kütleli yoğunluk değeri
e_m	:	ütlesel yoğunluk için porozite katsayısı
V	:	Poison oranı
U_z	:	Düşey deplasman
DMX	:	Maksimum yer değiştirme
SMN	:	Minimum gerilme
SMX	:	Maksimum gerilme
S_1	:	Birinci asal gerilme
‘i’	:	Çubuğun sol ucu
‘j’	:	Çubuğun sağ ucu

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Sınır Koşulları	27
Tablo 2. SMCR malzeme drumu için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)	31
Tablo 3. Üniform malzeme drumu için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)	32
Tablo 4. Sınır Koşulları	50
Tablo 5. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	51
Tablo 6. SMCR malzemeli Ankastr – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	52
Tablo 7. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	52
Tablo 8. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	53
Tablo 9. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	54
Tablo 10. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	55
Tablo 11. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	55
Tablo 12. Üniform malzemeli Ankastre – serbest mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	56
Tablo 13. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	59
Tablo 14. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	60
Tablo 15. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)	61
Tablo 16. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz).....	62
Tablo 17. Birinci mod için titreşim genlik değerleri	65
Tablo 18. İkinci mod için titreşim genlik değerleri.....	69

- Tablo 19.** Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)..... 73
- Tablo 20.** Üniform malzemeli Ankastre – serbest mesnetli simetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz))..... 74
- Tablo 21.** Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli asimetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)..... 74
- Tablo 22.** Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli asimetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz))..... 75



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. FD sandviç kiriş örneği Singh ve ark	2
Şekil 2. Porozite dağılımları Sayyad ve ark.	3
Şekil 3. Sandviç yapısı Wadley ve N.G.....	4
Şekil 4. Sandviç köprü Manalo	6
Şekil 5. Hafif sandviç panel Manalo	6
Şekil 6. Köprü yapımında kullanılan kompozit sandviç kiriş Manalo	7
Şekil 7. Hafif sandviç çatı Keller ve ark.	8
Şekil 8. Kompozit sandviç traversler	8
Şekil 9. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi Craig ve Bauchau	10
Şekil 10. Sönümlü titreşim davranış	16
Şekil 11. Serbest Titreşim Tipleri Khurmi ve Gupta	17
Şekil 12. Simetrik gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli (SMCR)	24
Şekil 13. Üniform gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli	24
Şekil 14. Kiriş analizi örnek sayısı	25
Şekil 15. FD sandviç kiriş	26
Şekil 16. (a) Üniform gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş; (b)Simetrik gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş.....	28
Şekil 17. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	33
Şekil 18. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	33
Şekil 19. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	33
Şekil 20. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	34
Şekil 21. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	34
Şekil 22. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	34

Şekil 23. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	35
Şekil 24. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m).....	35
Şekil 25. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$)	36
Şekil 26. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$)	36
Şekil 27. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$).....	37
Şekil 28. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$).....	37
Şekil 29. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	38
Şekil 30. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	38
Şekil 31. SMCR malzemeli Sabit– Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	39
Şekil 32. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	39
Şekil 33. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	40
Şekil 34. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	40
Şekil 35. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	41
Şekil 36. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	41
Şekil 37. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$).....	42
Şekil 38. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$).....	43
Şekil 39. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)	43
Şekil 40. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)	43

Şekil 41. Üniorm malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$).....	43
Şekil 42. Üniorm malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$).....	44
Şekil 43. Üniorm malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)	44
Şekil 44. Üniorm malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$).....	44
Şekil 45. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	45
Şekil 46. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	46
Şekil 47. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	46
Şekil 48. SMCR malzemeli Sabit -Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	47
Şekil 49. Üniorm malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	47
Şekil 50. Üniorm malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	48
Şekil 51. Üniorm malzemeli Ankastre – serbest mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$).....	48
Şekil 52. Üniorm malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)	49
Şekil 53. Ankastre – Ankastre mesnetli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 54. Ankastre – Sabit mesnetli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 55. Sabit – Sabit mesnetli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 56. Ankastre – Serbest mesnetli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 57. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve iki ucu ankastre mesnetli FD üniorm gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 58. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- sabit mesnetli FD üniorm gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması	63

Şekil 59. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- serbest mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 60. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve iki ucu sabit mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması	64
Şekil 61. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Ankastre mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli.....	66
Şekil 62. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – sabit mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli	66
Şekil 63. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – serbest mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli	66
Şekil 64. Farklı e_0 değerleri için sabit – sabit mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli ...	67
Şekil 65. Ankastre – Ankastre mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 66. Ankastre – sabit mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması	68
Şekil 67. Sabit – Sabit mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması	68
Şekil 68. Ankastre – serbest mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması.....	69
Şekil 69. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Ankastre mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli.....	70
Şekil 70. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – sabit mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli	70
Şekil 71. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Serbest mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli	71
Şekil 72. Farklı e_0 değerleri için sabit – sabit mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli.....	71
Şekil 73. Ankastre – Ankastre mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması.....	71
Şekil 74. Ankastre – Sabit mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması.....	72
Şekil 75. Sabit – Sabit mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması	72
Şekil 76. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- ankastre mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için PLANE183 ile elde edilen serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması	76

Şekil 77. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- serbest mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için PLANE183 ile elde edilen serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması..... 76



ÖNSÖZ

Öncelikle, bu çalışmayı tamamlayabilmem için bana şans, güç ve sağlık lütfeden yüce Allah (c.c)'ya şükürler olsun.

Merkezi Kahramanmaraş ve 10 ilde büyük yıkıma sebep olan deprem felaketinde hayatını kaybedenlere Allah'tan rahmet, ailelerine başsağlığı, yaralılara acil şifalar diliyorum. Onları asla dualarımda unutmayacağım.

istanbul Gelişim üniversitesine sizin bursunuz kazananlarından biri olmaktan onur duymaktayım, geleceğimin güvencesi, çağdaş bireyler olarak yetişmelerine verdiğiniz değerli destek için, En içten teşekkürlerimi sunarım

Yüksek lisans tez danışmanım *Dr. Öğr. Üyesi. Ahmad Reshad Noori*'ye bu çalışma süresi boyunca bana verdiği tavsiyeleri, yaptığı danışmanlığı, beni cesaretlendirmesi, gösterdiği sabrı, verdiği motivasyonu ve paylaştığı bilgisi için en içten duygularıyla derin şükranlarımı sunmak isterim.

Beni daima azim ve cesaret için teşvik eden *babama* teşekkür ederim.

Bana her zaman sevmeyi öğreten, gücüme güç katan, beni en zorlu olaylarda bile yüreklendiren *anneme* teşekkür etmeyi borç bilirim.

Sonsuz sevgi, destek ve sadakatı ile hayallerimi gerçekleştirmeme yardım eden, bu tez çalışması, boyunca en iyisini yapabilmem için beni teşvik eden ve akademik çalışmalarında yardımını eksik etmeyen eşim *Ahmed'e* teşekkürlerimi sunuyorum.

Harika çocuklarım *Murtadha'ya, Rawan'a ve Razan'a* ...

Aileme ve arkadaşlarıma destekleri ve cesaretlendirmeleri için teşekkür ederim.

GİRİŞ

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) sandviç malzemeler, modern kompozit malzemeler olup inşaat mühendisliği gibi mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok endüstriyel ve bilimsel araştırma merkezleri FD malzemelerin davranışını ve özelliklerini araştırmışlardır. Bu malzemeler ısı izolasyonu, yüksek dayanımı, korozyon direnci, gerilme ve titreşim davranışlarına etkisi ve buna benzer özelliklere sahip olduklarından havacılık, uzay ve inşaat gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Mühendislik yapıların tasarımcıları üstün yapı performanslarını elde etmeyi amaçlamaktadırlar. Tasarlanan yapı işlevini yerine getirmenin yanı sıra maruz kaldığı yükleri de güvenli bir şekilde taşımalıdır. Kullanım ve tasarım gereksinimlerini karşılamak için geleneksel malzemelerin kabul edilebilir bir performans sağlayamayacağı durumlar oluşabilmektedir. Örneğin sönüm, yüksek mukavemet, ısı izolasyonu, hafiflik, sürdürülebilirlik, rijitlik gibi özellikler aynı anda bir geleneksel malzemede olmayabilir.

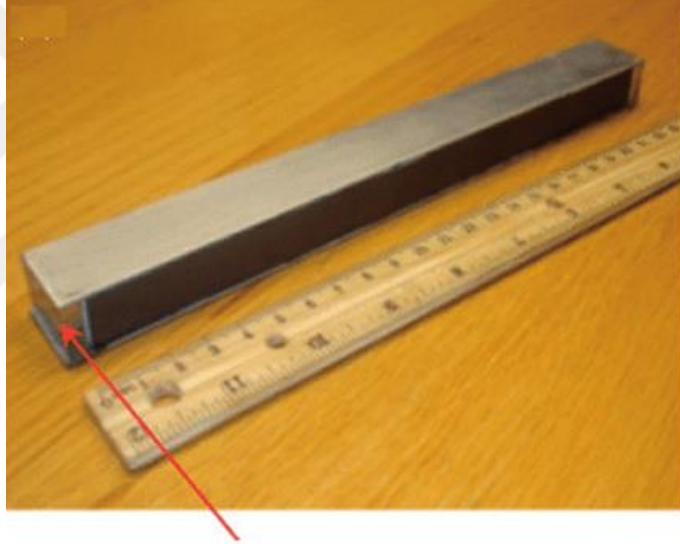
Malzeme mekanik özellikleri fonksiyonel olarak değişen birçok katmanların üst üste eklenerek birleştirilmesi ile FDMler oluşturulmaktadır. FDM'lerin üretim teknolojisi daha başlangıç aşamasında olmasına rağmen mühendislik uygulamalarında terich edilmektedir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜRE TARAMASI

1.1 Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Sandviç Malzemeler

FD malzemeler, özellikleri kalınlık boyunca bir fonksiyon ile değişen kompozit malzemelerdir. FD sandviç malzemeden yapılmış olan yapı elemanları yüzey ve çekirdek katmanlarından oluşmaktadır. Yüzey tabakaları genelde izotropik homojen malzemeden yapılırken çekirdek yapısı ise özellikleri çeşitli FD malzemelerden yapılmaktadır. Yüzey tabakaları ve çekirdek kalınlıkları ise yapı elemanın kullanılacağı yere göre değişiklik göstermektedir. FD malzemeli bir kiriş şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. FD sandviç kiriş örneği Singh ve ark. (2015)

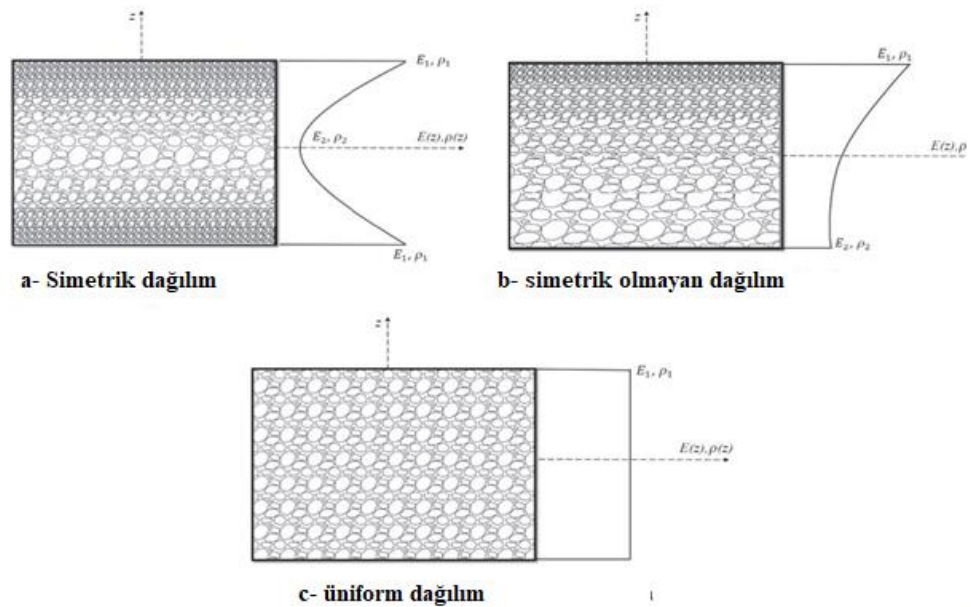
1.2 Gözenekli Çekirdek Yapısı

FD sandviç malzemeli yapı elemanların çekirdek malzemesi bu elemanların davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Çekirdek ahşap, polimer, köpük, seramik vb gibi malzemelerden yapılabilmektedir. Bu malzemenin seçimi karmaşık bir süreç olup

çekirdek yapısından beklenen davranışa göre belirlenir. Bu süreç için en önemli etkenler dayanım, kalınlık, birim hacim ağırlığı ve serbest titreşim davranışı olarak sayılabilir.

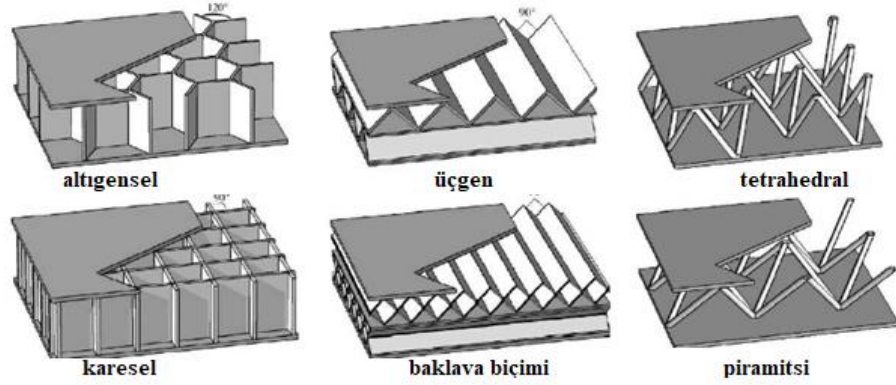
Çekirdek yapısının gözenek şekli ve dağılımı yapı elemanların davranışına etki ederek yapının performansının gelişmesine katkı yapabilmektedir. Wu ve ark. (2020) Gözenekli malzemeler için çeşitli dağılımlar Şekil 2’de verilmiştir.

Simetrik gözenek dağılımı (SMCR) durumunda malzeme özellikleri kalınlık boyunca tarafsız eksene göre simetrik olarak değişmektedir Şekil 2’a’de gösterildiği gibi bu malzeme dağılımında malzemenin mekanik özellikleri kesitin en alt ve en üst liflerinde maksimum olurken tabakanın ortasında minimum değerleri almaktadır. Şekilde 2’b’den de görüldüğü gibi simetrik olmayan porozite dağılımında (MMCR), gözeneklik oranı kesitin en üst liflerinde düşük iken en alt liflerinde daha yoğun olmaktadır. Mekanik özelliklerin değerleri kesit boyunca dereceli olarak değişmektedir. Üniorm porozite dağılımında ise gözeneklik oranı kesit boyunca eşittir Şekil 2’c.



Şekil 2. Porozite dağılımları Sayyad ve ark. (2019)

Şekil 3'te verildiği gibi düşük kütleli yoğunluğa sahip olan çekirdek yapısı farklı petek, tetrahedral, piramit, üçgen ve prizmatik gibi birçok farklı şekillerde olabilir.



Şekil 3. Sandviç yapısı Wadley ve N.G (2006)

İstenildiği takdirde boşluklar düşük kütleli yoğunluğa sahip olan malzemeler ile doldurularak yapının dayanımı artırılabilir. Mahfuz ve ark. (2004) sandviç yapıların mukavemetini artırmak için Titanyumdioksit (TiO_2) kullanmışlardır ve yapı elemanın dayanımının %26 oranında artırıldığını gözlemlemiştir. Ayrıca eğilme dayanımının da %53 oranında iyileştiğini ortaya çıkarmıştır. Daniel ve Abot (2000) tarafından yapılan deneylerde boşlukların epoksi ile doldurulması durumunda kayma kırılmasının engellendiği ortaya çıkmıştır.

1.3 FD Sandviç Malzemelerin Uygulamaları

Son yıllarda kompozit malzemeler sınıfından olan FD sandviç malzemelerin uygulamaları hızlı bir şekilde artış göstermektedir ve yapı elemanları bu malzemeler ile tasarlanabilmektedir.

Genel olarak FD malzemelerin farklı alanlardaki uygulamaları aşağıdaki gibi listelenebilir Trinh ve Cong (2017).

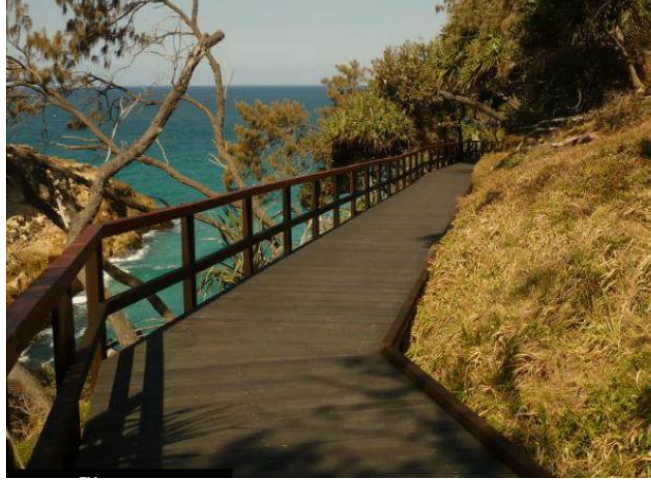
1. FD malzemler hızlı çatlamaya karşı direnç gösterdiği için, savunma sanayisinde kurşungeçirmez yeleklerin ve zırhların yapımında tercih edilmektedir.
2. Nükleer reaktörler, Kimyasal reaktörler.
3. Hava-uzay araçları, bu araçların yüksek sıcaklığa maruz kalan parçaları.
4. Enerji sektöründe, türbin kanadı koruyucu kaplamalarında ve enerji dönüştürme cihazlarında FD malzemeler kullanılmaktadır.
5. FD malzemeler tıp alanında da kullanılmaktadır özellikle dişlerin yapımında.
6. Basınç borularında ve tanklarda.

Yapı elemanından beklenen performansa göre malzeme özellikleri belirlenebilir. FD malzemelerin tipine ve özelliklerine göre kesitin eğilme performansı belirlenerek mukavemeti hesaplanabilir. Sandviç malzemeler hafif olduklarından dolayı yapının performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bazen taşıma sırasında yapı elemanların hafif olması, uygulama kolaylığı ve fiyatlardaki düşüşü inşaat mühendisliği alanında tercih edilmektedir Kampner ve Grenestedt (2008). Sandviç malzemelerin bazı uygulamaları aşağıda özetlenebilir.

1.3.1 Yaya Geçitleri ve Köprüler

Köprü inşaatlarında betonarme yapı elemanlarının kullanılması bu yapıların ölü yükünü artırdığı için bir dezavantaj olarak görülmektedir. Sandviç yapı elemanları aynı dayanım ve rijitliği sağladığı gibi daha hafif olabilmektedir. Bu özellikler tasarımcıların daha geniş açıklıklar ve az sayıda kolonların kullanılmasına imkân sağlayabilir.

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi Avustralyada sandviç malzemedan yapılmış olan çok sayıda yaya geçitleri ve yaya üst geçitlerine rastlanabilir. Bu tür yapılar için bakım maliyeti, özellikle kıyı veya yakın deniz bölgelerinde inşa edilen ve ana fabrikasyon malzemeleri olarak metal malzemelerin yerini elyafların aldığı yerlerde azalmaktadır. Modifiye edilmiş yüksek dayanımlı çekirdeğe sahip hafif sandviç paneller şekil 5'te verilmiştir Manalo (2013).



Şekil 4. Sandviç köprü Manalo (2013).



Şekil 5. Hafif sandviç panel Manalo (2013).

Steuben County, New York projesinde olduğu gibi çeşitli projelerin bakım ve onarım aşamalarında betonarme döşemeler, sandviç yapı elemanlar ile değiştirilmektedir. Benzer şekilde ABD'nin Kansas, Missouri ve West Virginia bölgelerinde sandviç paneller köprülerin döşemelerinde sıklıkla ile kullanılmaktadır.

1.3.2 Kirişler

İnşaat alanında yapılan projelerde kullanılan sandviç kirişlerin çeşitli özellikleri geliştirilmektedir. Burkulma ve basınç dayanımı artırmak için kirişlerin herhangi bir yüzüne betondan yapılan bir katman eklenebilir. İspanya'da yapılan bir köprüde

Primi ve ark. (2009) benzer bir teknik uygulanmıştır. Çekirdek bölgesinde ise, cem elyaf kaplamalar ve poliüretan kullanmıştır.

USQ/Avusturlay'da sandviç paneller ve elyaflar ile güçlendirilmiş kirişler köprülerin inşaatlarında kullanılmaktadır. Güçlendirilmiş sandviç elemanlar kullanıldığında köprü yapıların performansının artırıldığı gözlemlenmiştir şekil 6



Şekil 6. Köprü yapımında kullanılan kompozit sandviç kiriş Manalo (2013)

1.3.3 Konut İnşaatları

Sandviç kirişler hafif oldukları için yapım sürecindeki işçiliği kolaylaştırır ve böylece yapım maliyetinin düşmesine katkı sağlar. Ayrıca, hafif oldukları için tasarım boyutlarının küçük olmasına olanak sağlayarak zemin güçlendirme ihtiyacını da azaltabilir. Bu özellikler çok katlı projelerin yapımını önemli ölçüde kolaylaştırır Keller ve ark. (2007).

Isı ve ses izolasyonu özelliklerine sahip olmaları, sandviç yapı elemanları sıcak/soğuk iklim bölgeleri ve ses izolasyonu gereken yerler için iyi bir seçenek haline getirmektedir. İklimlendirme üniteleri için enerji kullanımı daha aza indirilecektir.

Şekil 7'de İsviçre'de bir yapının ana girişi için özel olarak tasarlanan ve ses, su ve ısı yalıtımı özellikleri olan hafif bir sandviç yapı elemanı gösterilmiştir.



Şekil 7. Hafif sandviç çatı Keller ve ark. (2007)

1.3.4 Raylı Sistemler

Bu alanda sandviç yapı elemanların kullanımı bir yenilik olarak sayılabilir. Büyük yüklere maruz kalan yapı elemanlarının sandviç malzemeler ile yapılabilmeleri için güçlendirme türleri kullanılabilir.

Şekil 8'de gösterilen güçlendirilmiş sandviç malzemelerden üretilen demiryolu traversleri, geleneksel tipe göre daha iyi mekanik performans göstermektedir Omar (2008).



Şekil 8. Kompozit sandviç traversler Omar (2008)

1.3.5 Yanal Destek Elemanları

Kıyı yapıları en çok korozyona maruz kalan yapılar olarak sayılabilir. Betonarmeden yapılan kıyı yapılarının servis süresi kısa olabilir. Bu yapıların korozyona karşı dirençli malzemelerden yapılması gerekmektedir. Bu alanda sandviç yapı elemanların uygulaması Avustralya'da görülebilir Manalo (2013).

1.4 FD Sandviç Kirişlerin Statik Analizi

Geçen yüzyılın seksenli yıllarında kullanılmasına başlanan sandviç kirişler ve levhalar, kabul edilebilir performans ve dayanıklılık göstermiş olup geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yapı elemanları inşaat, makine, uzay, havacılık, imalat, otomobil ve buna benzer birçok alanda kullanılmaktadır.

Vakum destekli reçine transfer kalıplama teknolojisi (VARTM), sandviç kirişler veya plaklar gibi sandviç elemanların üretilmesinde kullanılmaktadır Dweib ve ark. (2004). Bir sandviç kiriş, özelliklerinin kullanımına göre değiştirilebilen gözenekli malzemelerden yapılabilir Gibson ve Ashby (1999).

Bir sandviç kiriş çeşitli özelliklere sahip olabilir, örneğin sandviç kirişler yüksek mukavemetli ve ince olup rijitlik/ağırlık oranları çok yüksektir. Sandviç kirişlerin yüzey katmanları katı metallere yapılırken çekirdeği ise derecelendirilmiş gözenekli malzemelerden yapılır.

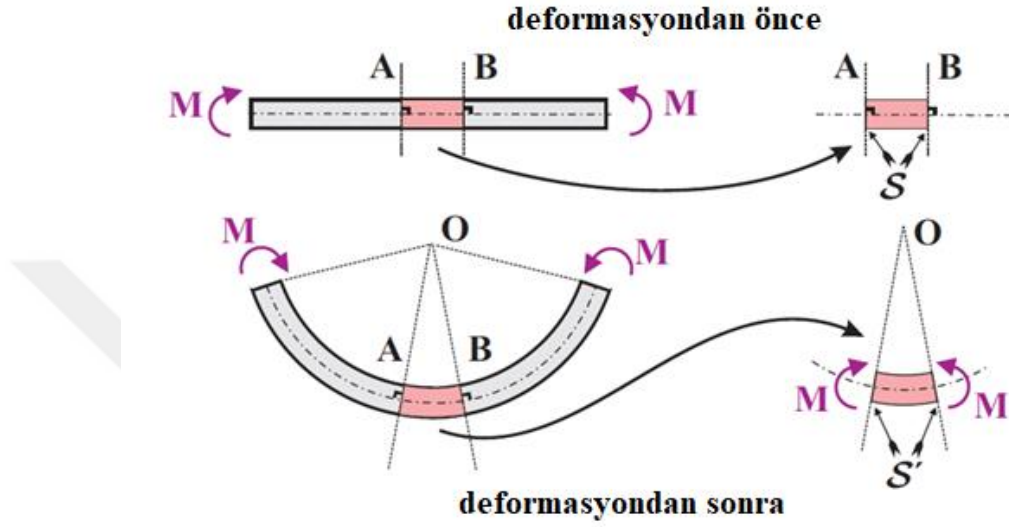
Çekirdekte kullanılan malzemeler kemik, mercan, seramik, polimer, ahşap vb. olabilir. Çekirdekteki gözeneklilik artırıldığı takdirde toplam dayanımı azalabilir, ancak diğer yönlerden üstün özellikler sağlayabilir. Bu durumda beklenen performansa göre çekirdek gözenekliği oluşturulabilir George ve ark. (2013).

FD gözenekli kirişlerin özellikleri ile ilgili daha detaylı bilgi almak için aşağıda verilen derleme makaleleri incelenebilir: Sayyad ve Ghugal (2019), Njim ve ark. (2021), ve Wu ve ark. (2020).

1.4.1 Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi

Katı cisimler mekaniğinde ince kiriş teorisi olarak kullanılan teori basit bir teori olup çeşitli yapıların yapısal analizlerinde tasarımcılara önmeli ölçüde kolaylık

sağlamaktadır. Bu yöntemin varsayımları kesitin her zaman eğilme çizgisine dik olduğu ve kayma deformasyonunun etkisinin ihmal edilebilir olduğu şeklinde özetlenebilir. Bu teori ince ve uzun çubukların analizinde kullanılabilir şekil 9’da gösterildiği gibi Craig ve Bauchau (2009).



Şekil 9. Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi Craig ve Bauchau (2009)

Düşey yük etkisinde olan FD kirişler düzlem elastisite problemi olarak da ele alınabildiği gibi Euler-Bernoulli kiriş teorisi ile de çözülebilir. Kesit boyunca gerilmelerin dağılımı ile ilgili araştırmalar Venkataraman ve Sankar (2001) tarafından detaylı bir şekilde yapılmıştır.

Euler-Bernoulli kiriş teorisi ince ve uzun çubukların analizinde oldukça etkin sonuçlar vermektedir. FD kirişlerin statik analizinde elastisite modülü kalınlık boyunca değişmekte olup Poisson oranı sabit olarak ele alınmaktadır. Gerilme ve yer değiştirme değerleri malzeme değişim indikslerine, mesnet koşullarına ve yük durumuna göre değişiklik gösterir Sankar (2001).

Geliştirilmiş teori de temel şekil fonksiyonu kullanılarak analizlere uyarlanabilir. Bu düzeltme ile çözümde kullanılan eleman sayısını en aza indirgenebilir ve kesin sonuçlara oldukça yakın sonuçlar elde edilebilir Shahba ve ark. (2013).

Euler-Bernoulli teorisi kullanılarak kirişlerde yer değiştirme tahmini, gerilme çifti elastisite teorisi ve gradyan elastisite teorileriyle geliştirilebilir Kahrobaiyan ve ark. (2012).

1.4.2 Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Teorisi

Bu teoride kayma deformasyon etkiliri de ele alınarak çubuklar analiz edilir. Bu teori birçok bilimsel araştırmada kullanılmıştır. Ele alınan kirişlerin yüksekliği fazla olduğu durumlarda Euler-Bernoulli kiriş teorsine göre daha iy sonuçlar vermektedir. Vinh (2021) farklı sınır koşullarına sahip olan FD kirişlerin eğilme davranışın birinci mertebeden kayma teorisi kullanarak ele almıştır. Çalışmasının doğruluğunu ispatlamak için literatürde mevcut olan sonuçları karşılaştırma için kullanmıştır. Karşılaştırmaları yaparken yükseklik/uzunluk oranını, çekirdiğin kalınlığını, yüzey tabakalarının kalınlığını ve malzeme indikslerine dikkate almıştır.

Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemini kullnarak FD kirişlerin statik analizi Noori ve ark. (2020) tarafından ele alınmıştır. Elastisite modülü kirişin kalınlık boyunca dereceli olarak kabul edilirken Poison oranı sabit olarak kabul edilmiştir. Birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi kullanılarak olayı idare eden denklem takımı minimum toplam postansiyel prensibine dayanarak elde edilmiştir. Sonuçlar literatürde daha önce yayınlanan sonuçlar ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir.

Inam ve ark. (2014) tarafında geliştirilmiş kayma deformasyon teorisi kullanarak FD kirişlerin statik ve titreşim davranışlarını incelemiştir. Geliştirilmiş teoride herhangi bir kayma düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Malzeme anizotropisin kayma deformasyona etkisi olduğu gösterilmiştir. Hamilton prensipleri kullanılarak FD kirişlerin hareketinin idare eden denklemler elde edilmiştir. Kullanılan metotlar statik eğilme davranışı ve serbest titreşim frekansları hesaplanabilir benzer şekilde ilgili mod şekilleri de çizilebilir.

Simetrik ve simetrik olmayan katmanlı sandviç kirişlerin statik davranışını Noori ve ark. (2020) tarafından ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan kirişlerin yüzey katmanları FD malzemelerden yapıldığı çekirdiği ise homojen izotropik olarak varsayılmıştır. Bu kirişlerin davranışını idare eden denklemler iki farklı kiriş teorileri (Euler-Bernoulli ve Timoshenko) kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaç ile minimum

toplam potansiyel enerji varasını kullanılmıştır. alışmalarında (L/h) oranının, farklı sınır koşullarının, katman oranlarının ve malzeme değişim katsayılarının FD sandviç kirişlerin eğilme davranışı üzerinde etkisi incelenmiştir.

1.4.3 Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Etkisi

Bu kayma deformasyon teorisinde deplasmanın kalınlık boyunca nonlinear olarak değiştiği dikkate alınmaktadır. Yer değiştirme değişimi kuadratik veya Fourier serileri olarak ele alınabilir Petras (1998).

Kadoli ve ark. (2008) tarafından yüksek mertebeli kayma deformasyon teorisi metal-seramik FD kirişlerin statik davranışını incelemek için uygulanmıştır. Hacim indikslerinin ve malzeme değişim indikslerinin etkisinin araştırılması öncellikle olarak amaçlanmıştır. Potansiyel enerji prensibine dayanarak iki adet rijitlik matrisi oluşturulmuştur.

şimşek (2009) Ritz metodunu kullanarak Timoshenko ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı FD kirişlerin analizini araştırmıştır. Malzeme değişim katsayısının gerilme dağılımları ve yer değiştirmeler üzerindeki etkileri rapor edilmiştir.

APETRE ve ark. (2008) Fourier – Galerkin dayalı sonlu elemanlar analizi ynetmini kullanarak yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı FD sandviç kirişlerin analizini elde etmiştir ve çeşitli sandviç kirişlerini incelemiştir.

Srikarun ve ark. (2021) FD malzemeleri çekirdeği olan sandviç kirişlerin lineer ve non-lineer eğilme davranışını çeşitli yayılı yükler altında incelemiştir. Ele alınan sandviç kirişin ekirdiğinin gözenekli malzemededen yapıldığı varsayılmıştır. Gerilme ve Şekil değiştirme arasındaki doğrusul olmayan ilişki kullanılarak olayı idare eden denklemler çıkarılmıştır. Gram-Schmidt ortogonal prosedürü kullanılarak Şekil değiştirme uzayındaki fonksiyonlar oluşturulmuştur. Daha sonra sonuçları elde etmek için Ritz yöntemi uygulanmıştır.

1.4.4 Quasi – 3D Teorisi

Bu teori FD sandviç kirişlerin statik davranışını incelemek için kullanılabilir. Bu teoride hiperbolik Tai Thai ve ark. (2013), kübik, kuadratik Neves ve ark.(2013) ve sinüzoidal Ferreira ve ark. (2011) gibi yaklaşımlar ele alınabilir.

Beşten daha az (L/h) oranına sahip olan FD sandviç kirişler in analizi için düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği yöntemi ile 3 Boyutlu Quasi teorisi birilkte uygulanabilir Karamanlı (2017). Vo ve ark. (2015)'in araştırmalarına göre FD sandviç kirişlerin eğilme analizinde normal şekil değiştirme etkisi de dikkate alınmalıdır.

1.4.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) bir sayısal metot olup çeşitli mühendislik problemlerinin yaklaşık çözümünde uygulanmaktadır. SEY karmaşık mühendislik problemlerinin etkin bir şekilde çözülmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır Güler ve Şen (2016).

Yapısal analiz aşamasında yapı elemanları küçük sonlu elemanlara bölünmektedir bu elemanların düğüm noktası sayısı çözümün doğruluğunu etkilemektedir. İyi sonuçları elde etmek için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir. Erhunmwun ve Ikponmwosa (2017):

1. Tüm elemanlar düğüm noktaları yardımıyla birbirine bağlı olmalı böylece olayı idare eden sistem denklemleri elde edilmelidir.
2. Her bir elementin davranışı, farklı fiziksel büyüklükler için tanımlanacaktır.
3. Sistem denklemleri düğüm noktalarındaki bilinmeyenler için çözülür.
4. Seçilen elemanların istenilen gerilme değerleri hesaplanır.

Sonlu elemanlar metodu, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlarla ilgili çeşitli mühendislik problemlerinin yanı sıra yapısal mekanik problemlerini çözmek için de yaygın olarak kullanılır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

1. Yapısal Analiz (Dinamik, Statik, Doğrusal/Doğrusal Olmayan).

2. İnşaat / Makine / Otomotiv / Uçak Mühendisliği uygulamaları.
3. Akışkanlar mekaniği ve ısı iletimi problemleri.
4. Tıbbi, Biyomekanik, Elektromanyetik, uygulamalar vb.

Teknolojinin ilerlemesiyle daha da karmaşık hale gelen güncel mühendislik problemlerinin artması, çözüm sistematığında sonlu elemanların kullanımını genişletmiştir. Böylece bu etkin yöntem birçok analiz programına entegre edilmiş ve farklı kullanım alanlarında kendine yer bulmuştur.

ANSYS 2021 R1 yazılımı kullanılarak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kiriş davranışını analiz etmek için bir sonlu elemanlar analizi (FEA) gerçekleştirilebilir. Sonuçlar, sandviç kiriş davranışının malzeme indisine, gözenekliliğe ve FG gözenekli metal çekirdek kalınlıklarına bağlı olduğunu göstermiştir Njim ve ark. (2022).

Sonlu elemanlar yöntemi çeşitli sınır koşullarına uygulanabilir. Kesit kalınlığı boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç kirişler için gerilme dağılımının analiz edilebilmesi için de sonlu elemanlar modeli geliştirilebilir. Bu amaç ile Das ve Sarangi (2016) tarafından geliştirilen modelin sonuçları literatür ile doğrulanmıştır. Kiriş için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç kiriş malzemesi, çeşitli homojen malzeme katmanlarından oluşur. FD sandviç kirişlerin analizi için ANSYS programı kullanılabilir. bu amaçla SOLID186 katmanlı sonlu elemanı kullanmıştır.

1.4.6 Önerilen Diğer Teoriler

Sandviç konsol kirişlerin sönümlenme özellikleri, Yim ve ortak yazarları tarafından viskoelastik çekirdek kalınlığının sönümlenme faktörünü azaltmada büyük bir etkiye sahip olduğundan bahsetmişlerdir Yim ve ark. (2003)

Bu çalışmada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) malzemelerden oluşan prizmatik olmayan sandviç kirişlerin statik olarak derecelendirilmiş davranışı ilk kez incelenmiştir. Minimum toplam potansiyel enerji ilkesi, olayı idare eder denklemleri türetmek ve çözmek için Ritz yöntemiyle birlikte uygulanmıştır. Formülasyon, iyi bilinen Timoshenko ve Reddy kiriş teorileri (TBT, RBT) çerçevesinde geliştirilmiştir.

Sınır koşulları, koniklik oranı, gradyan indeks değeri ve çekirdek/kalınlık oranının gerilme ve sehim tepkilerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir Pajand (2018).

Minimum toplam potansiyel enerji yöntemi, yaklaşık bir çözüm elde etmek için Ritz tekniği ile birlikte kullanılmıştır. Geometrik olarak lineer olmayan etkiler, mevcut formülasyonda, ön yüz tabakalarına ve çekirdeğe von Kármán etkilerinin dahil edilmesiyle göz önünde bulundurulur. Sonuçlar, önerilen modelin, üç boyutlu sonlu eleman analizine kıyasla, yer değiştirmelerin ve gerilmelerin doğru tahminini sağladığını göstermektedir. Çekirdekteki aksenal rijitlik değişimi nedeniyle, kirişlerin yer değiştirmeleri ve yüzey levhaları ve çekirdeğin gerilmelerinin önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Sandviç yapılarda değişken rijitlik malzemeleri kullanılarak potansiyel tasarım alanının genişletildiği gösterilmiştir Ai ve Weaver(2017).

1.5 FD Sandviç Kirişlerin Dinamik Analizi

1.5.1 Titreşim

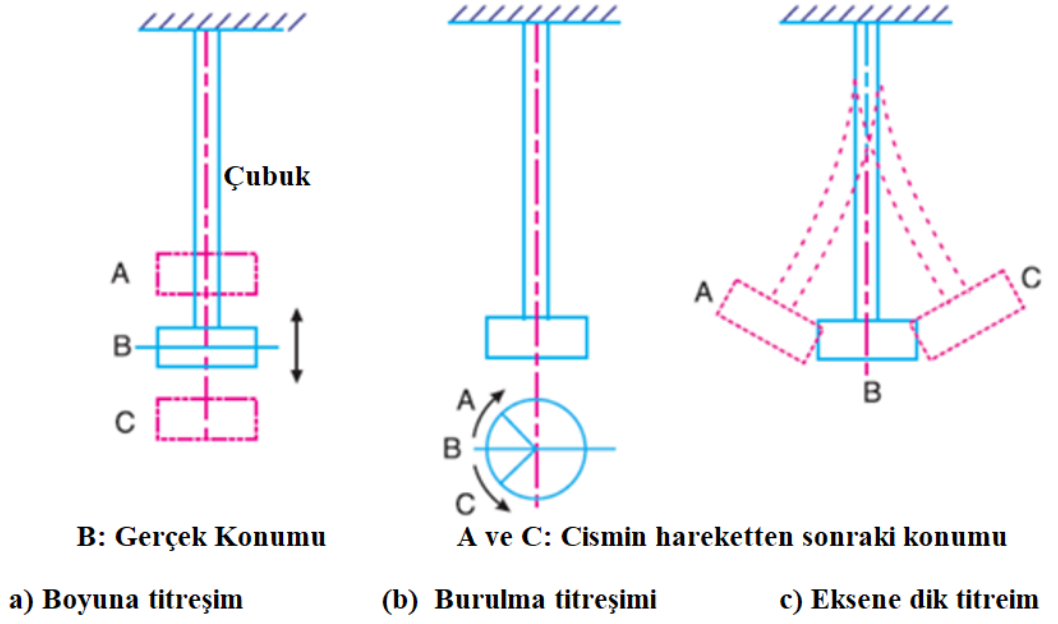
Titreşim, belirli bir denge konumu etrafında tekrarlayan ve periyodik olarak salınım davranışdır. Birçok durumda titreşim, mühendisler ve tasarımcılar için istenilen bir durum değildir.

Yapı elemanlarının titreşim etkisiyle dinamik davranış, çeşitli önceki araştırma çalışmalarda incelenmiştir. FD malzemeli kirişlerin doğal titreşim frekansları üzerindeki gözeneklilik etkisi 4 sonlu elmenalar yöntemi ile araştırılabilir.

1.5.2 Titreşim Çeşitleri

Titreşim çeşitli gruplara ayrılabilir Rao (2007):

1. Olayı idare eden denklemler doğrusal olmayan durumlarda nonlinear denklem takımlarının çözülmesi gerekmektedir. Bu tür davranış doğrusal olmayan titreşim davranışı olarak adlandırılmaktadır.
2. Doğrusal titreşim: Bu tip titreşimde, olayı idare eden diferansiyel denklemler doğrusal olup nonlinear etkiler ihmal edilmektedir.



Şekil 11. Serbest Titreşim Tipleri Khurmi ve Gupta (2005)

1.5.3 Euler – Bernoulli Kiriş Teorisi

Statik analizde olduğu gibi serbet titreşim davranışında da Euler – Bernoulli kiriş teorisi yaygın olarak kullanılmaktadır bu teori literatürde klasik kiriş teorisi olarak da adlandırılmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi bu teoride kayma şekil değiştirme etkisi ihmal edilmektedir Craig ve Bauchau (2009).

Harmonik hareketli yükler için denklemler elde edilip dinamik analiz uygulanabilir. Bu kiriş teorisinde aksenal ve düşey deplasmanlar bulunabilir. Yük frekansı ve malzeme özellikleri gibi temel girdiler deplasman ve hızın değerlerine önemli ölçüde etkiler yapmaktadır Şimşek ve Kocatürk (2009).

Bu kiriş teorisine birçok araştırmacı tarafından düzeltmeler uygulanmıştır. Örneğin, B-Spline ve üniform olmayan B-Spline doğrusal olmayan titreşim davranışı için uygulanabilir. Bu fonksiyonlar nümerik çözümlerde kullanılır. Bu kapsamda kullanılmakta olan K-metodu P metoduna göre daha çok tercih edilmektedir Weeger ve ark. (2013).

Jin ve Wang (2015) diferansiyel kuadratik metodu ile Euler – Bernoulli kiriş teorisini birleştirerek FD malzemeli kirişlerin titreşim davranışını incelemiştir. Gauss ve Guass-Lobatto-Legendre (GLL) gibi metotları kullanılarak kütle matrisi ve eleman

rijitlik matrisleri oluşturulmuştur. Bu metot sınır düğüm noktası olduğu durumlarda daha iyi sonuçlar vermektedir.

1.5.4 Birinci Mertebeden Kayma Deformasyon Etkisi

Kayma etkisinin analizlerde dikkat alındığı durumlardır. Bu teori Timoshenko kiriş teorisi veya birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi olarak bilinmektedir. Başka metotlar ile karşılaştırıldığında uygulanması kolay olduğu için FD sandviç kirişlerin analizlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kompozit malzemelerin özel hali olan sandviç kirişler, genellikle hafif bir çekirdek ve iki ince rijit yüzeysel tabakasından yapılmaktadır. Bu tür kirişlerin eğilme rijitliği yüksek olup kütleli yoğunluğu düşük olmaktadır. Çekirdek malzemeleri genellikle çeşitli köpüklerden oluşmaktadır. Yüzey katmanları ise karbon fiber, cam fiber gibi çeşitli malzemelerden yapılabilmektedir. Bazen de polimerler yüzey katmanlarında kullanılmaktadır Wang ve Quek (2000).

Sandviç FD malzemelerin analizleri için klasik kiriş teorisi, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri Rayleigh-Ritz, Sonlu elemanlar, Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi ve benzeri sayısal yöntemler ile birlikte uygulanmaktadır Bui ve ark. (2013), Vo ve ark. (2014) ve Amirani ve ark. (2009).

Yang ve ark. (2014) sandviç gözenekli kirişlerin doğrusal olmayan serbest titreşim davranışını incelemiştir. Kayma deformasyon etkisi Timoshenko kiriş teorisine göre dikkate alınmıştır. Metal köpüklerin mekanik özellikleri analizlerde kullanılarak gözenekli çekirdek yapısı oluşturulmuştur. Lineer ve nonlineer titreşim frekanslarını elde etmek için Ritz yaklaşımı uygulanmıştır. Kirişin performansı gözenekliğin dağılımlarına göre irdelenmiştir. Ayrıca gözeneklilik katsayısının, narinlik oranının ve mesnet koşullarının serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri nümerik olarak elde edilmiş daha sonra karşılaştırılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır.

Chen ve ark. (2015) ise FD malzemeleri kirişlerin eğilme ve burkulma davranışlarını incelemiştir. İki farklı gözenekli malzeme dağılımlarının elastik eğilme ve burkulma tepkileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizlerinde Timoshenko çubuk teorisini kullanmıştır. Olayı idare eden diferansiyel denklemlerin nümerik

çözümlerinde ise Ritz tekniğini uygulamıştır. Yapı elemanlarının yapısal perforansını irdelemek için porozitenin etkisi parametrik olarak incelenmiştir.

Chen ve ark. (2016), Timoshenko kiriş teorisini, Lagrange denklemini ve Ritz metodunu kullanarak adım adım zaman integrasyon yöntemi ile FD malzemeli kirişlerin serbest titreşim ve zorlanmış titreşim davranışını araştırmıştır. Analizleri simetrik, simetrik olmayan ve üniform gözenek dağılımı durumları için yapılmıştır. Simetrik dağılıma sahip olan porozite dağılımı durumunda dinamik yer değiştirmelerin az olduğu gözlemlenmiştir. L/h oranı düştükçe deplasman değerlerinde düşüş ve doğal titreşim frekans değerlerinde artış olduğu ortaya konulmuştur.

Zhao ve ark. (2019), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli derin kirişlerin serbest titreşim davranışını irdelemek için birleşik bir analitik yaklaşım önermiştir. Çalışmalarında hem eğri eksenli ve hem de düz eksenli çubukların davranışlarını ele almıştır. Kayma deformasyon etkisini dahil etmek için Timoshenko kiriş teorisini tercih etmiştir. Yapılan analizler neticesinde sınır koşullarının, malzeme özelliklerinin ve geometrinin serbest titreşim çıktılarına önemli ölçüde katkı yaptığı gösterilmiştir.

Sina ve ark. (2009), Nguyen ve ark. (2013) ve Senjanovic ve ark. (2016) gibi çalışmalarda da benzer metodlar kullanılmıştır. Birinci mertebeden kayma deformasyonuna dayalı teorisinin en önemli kısıtı bir düzeltme faktörüne bağlı olmasıdır. Bu düzeltme faktörünü çeşitli parametreye bağlı olduğundan düzgün olarak belirlenebilmesi güçtür.

1.5.5 Yüksek Mertebeden Kayma Deformasyon Teorileri (HOBT)

Daha önce bahsedilen kiriş teorilerindeki kısıtlamaların ortadan kaldırılması amacı ile yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri geliştirilmiştir. Bu teorileri kayma düzeltme faktörlerine bağlı kalmaksızın daha etkin ve kabul edilebilir sonuçların elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2014) porozitenin FD gözenekli kirişlerin titreşim davranışını üzerindeki etkilerini teorik olarak irdelemiştir. Mesnetlerde ise elastik sınır koşulları kullanılmıştır. Elastik mesnet elde edebilmek için yaylar ve

dönen yaylar kullanmıştır. Serbest titreşim davranışının ele edilebilmesi için diferansiyel transfer metodu uygulanmıştır. Porozite hacminin, sınır koşullarının ve yay katsayılarının lineer ve doğrusal olmayan titreşim frekanslarına önemli ölçüde etki ettiği rapor edilmiştir.

Ebrahimi ve Jafari (2016), Hamilton prensibini ve Navier tipi çözümü metodunu kullanarak FD malzemeli kirişlerin çeşitli termal yükler etkisinde davranışını araştırmıştır. Araştırmalarına istinaden sıcaklık arttıkça frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Üniform sıcaklık dağılımının ise boyutsuz frekanslara etki ettiği görülmüştür. Hacim indis oranları arttıkça serbest titreşim frekansları da artmıştır.

1.5.6 Quasi – 3D Teorisi

Quasi – 3D teorisi, sandviç FD kirişlerin analizlerinde kullanılan teorilerinden bir başkasıdır. Bu teori hem statik hem de dinamik analizlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu teoride de kayma etkisi dikkate alınmakta olup herhangi bir kayma düzeltme faktörüne gerek yoktur.

Vo ve ark. (2015) FD kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizi için Quasi – 3D teorisini kullanmıştır. Çekirdek ve yüzey katmanların malzeme özelliklerine bağlı olarak serbest titreşim frekanslarını ve eğilme davranışı sonuçlarını elde etmiştir. Benzer şekilde malzeme özelliklerinin dinamik ve statik tepkileri üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmıştır.

Atmane ve ark. (2017), iki parametrelili elastik zemine oturan FD kirişlerin eğilme, burkulma ve serbest titreşim davranışlarını Quasi-3D teorisi yardımıyla araştırmıştır.

1.5.7 Sonlu Elemanlar Metodu

Sandviç kirişler yüksek mukavemet ve yüksek rijitliğe sahip fakat yoğunluğu az ve hafif yapı elemanlarıdır. Prasad ve ark. (2014) sonlu elemanları kullanarak FD kirişlerin genel dinamik tepkisini teorik olarak incelemiştir. Şekil değiştirme ve gerilme değerleri yüzey katmanları çelik ve çekirdeği elastik bir malzemeden yapılan bir kiriş için elde edilmiştir. Çalışmasında hem statik hem de dinamik analizleri

yapmayı hedeflemiştir. Kesit kalınlığı ve maksimum serbest titreşim frekansları arasında bir ilişki elde etmiştir.

Noori ve ark. (2020) simetrik ve simetrik olmayan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin statik ve dinamik davranışlarını tahkik etmek için etkin bir sayısal yöntem önermiştir. Simetrik ve simetrik olmayan malzeme fonksiyonları gözenekli kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşim davranışına etkisi olduğu rapor edilmiştir. Özellikle simetrik olmayan malzeme çeşiti kullanıldığı zaman titreşim genliklerinin ve periyotların daha yüksek olduğu bulunmuştur. Zorlanmış titreşim durumunda ise sönüm oranı arttıkça titreşim genliklerini daha hızlı sönümlendiği ve statik davranışa yaklaştığı görülmüştür.

Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler için dinamik yük altında zorlanmış titreşimin etkisi, kalınlık yönünde değişen gözeneklilik ile değişen fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin mekanik özellikleri dikkate alınarak incelenmiştir. fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir derin kirişin zorlanmış titreşimi, alt harmonik gözenekliliğin etkisiyle incelenmiştir. Gözenekliliğin önemli bir rolü, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kirişlerin dinamik tepkilerinde açıkça gösterilmiştir ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin uygun dağılımı seçildiğinde gözenekliliğin olumsuz etkileri azaltılabilir.

Derin kirişler için gerçekçi modeller elde etmek için, kiriş teorilerinin sınır koşulları hesabı başarısızlığı nedeniyle modellemede düzlem katı sürekli model kullanılmalıdır. Eşit ve eşit olmayan modeller arasındaki gözeneklilik farkının artması, ölçülen frekansta daha yüksek farkla sonuçlanacaktır ve bunun tersi de geçerlidir. Derin kirişler durumunda idaree denklemler sonlu elemanlar yöntemi ve Hamilton prosedür ile elde edilmiştir Akbaş ve Doğuşcan (2018).

Sonlu elemanlar yöntemi, yapısal mekanikte çok çeşitli problemlerin sayısal çözümü için kullanılan en güçlü ve verimli araçlardan biridir Noori ve ark. (2019) Bunun yanı sıra yapıların dinamik tepkisi birçok araştırmacı ve mühendis tarafından incelenmektedir Noori ve Temel (2020). Ayrıca, son yıllarda araştırma alanındaki en trend konulardan biri de kompozit ve FGP malzemeleridir. Örneğin bazı güncel çalışmalardan Doori ve Noori (2021) bahsedilebilir.

1.5.8 Kullanılan Diğer Metotlar

Şimşek ve Aydın (2017), Mindlin plak teorisini kullanarak mikroplakların zorlanmış titreşim davranışını inceleyerek porozitenin bu davranışa olan etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu plakların hareketini idare eden diferansiyel denklemler Lagrange kuralları yardımıyla elde edilmiştir. Daha sonra etkin bir sayısal metot kullanılarak elde edilen denklemler çözülmüştür.

Mechab ve ark. (2016) Winkler-Pasternak elastik zemine oturan FD malzemeli nano plakların davranışını incelemiştir. Yaptıkları çalışmanın temel amacı bu yapı elmanlarının serbest titreşim frekanslarının elde edilmesidir.

Wang ve ark. sandviç panellerin dinamik davranışını temsil etmek için şok tüpü deneyleri kullandı Wang ve ark.(2009).

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, 2 farklı gruptan oluşan toplam 264 FD sandviç kirişlerin statik ve dinamik davranışı sunulmuştur. Bu yapı elemanların statik davranışı 88 örnekte ele alınmıştır. Ele alınan kirişlerin dinamik davranışı ise toplamda 176 BEAM189 ve PLANE183 elemanları ile incelenmiştir. Her grup simetrik (SMCR) gözenekli ve üniform gözenekli çekirdeğe sahip olmak üzere ikişer alt gruba ayrılmıştır. Alt gruplardaki kirişler ise farklı mesnetleme koşullarına ve malzeme indislerine sahiptir. Bu çalışmanın temel amacı malzeme porozite katsayısının çeşitli sınır koşullarına sahip olan FD sandviç kirişlerinin davranışına etkisini araştırmaktır. Analiz metodu ve gerekli teorileri ile ilgili detaylı bilgi sonraki bölümlerde verilecektir.

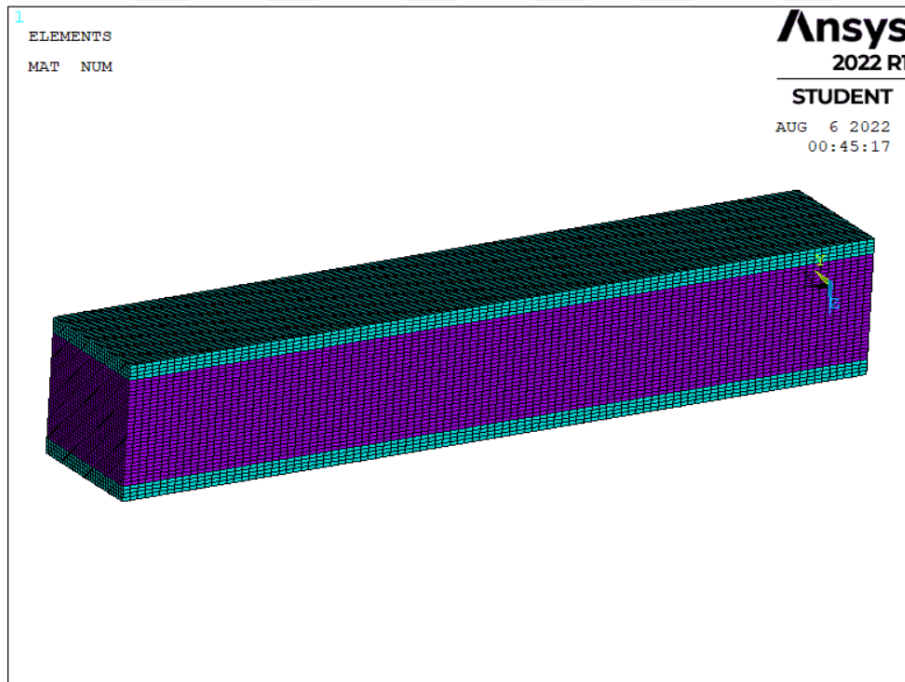
2.1 Beam189 İle Analiz

Ele alınan yapı elemanların sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS ile statik analiz edilmesi için BEAM189 sonlu elemanı kullanılmıştır. Dinamik analiz durumunda ise BEAM189 ve PLANE183 elemanlarından yararlanılmıştır. BEAM189 üç düğümlü kuadrik bir eleman olup her düğüm noktasında altı adet serbestlik derecesine sahiptir. Kullanılan bu eleman birinci mertedeben kayma deformasyon teorisine dayalıdır. Bu elemanın teorisi, kısıtlamaları ve kabulleri gibi daha detaylı bilgilere Kathryn Thompson ve M.Thompson (2013) kaynağından ulaşılabilir.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme özelliklerinin FD sandviç kirişlerine atanabilmek için daha önceden excel yardımıyla hesaplanmıştır. Literatürde Noori ve ark. (2020) FD kirişler ANSYS ile analiz edilirken kalınlık boyunca 36 katmana Şekil 12 bölündüğü için bu çalışmada da çubuk kalınlığı boyunca 36 katmana bölünerek daha önce hesaplanan malzeme özellikleri her katmana ayrı ayrı girilmiştir. Çubuğun uzunluğu boyunca daha hassas gerilme değerlerine elde edebilmek için ele alınan kiriş 100 adet sonlu elemana bölünmüştür. Sisteme etki eden yük ise z eksenine doğrultusunda uygulanmıştır. Şekil 12 ve Şekil 13 simetrik ve üniform gözenekli malzeme durumlarını göstermektedir.



Şekil 12. Simetrik gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli (SMCR)

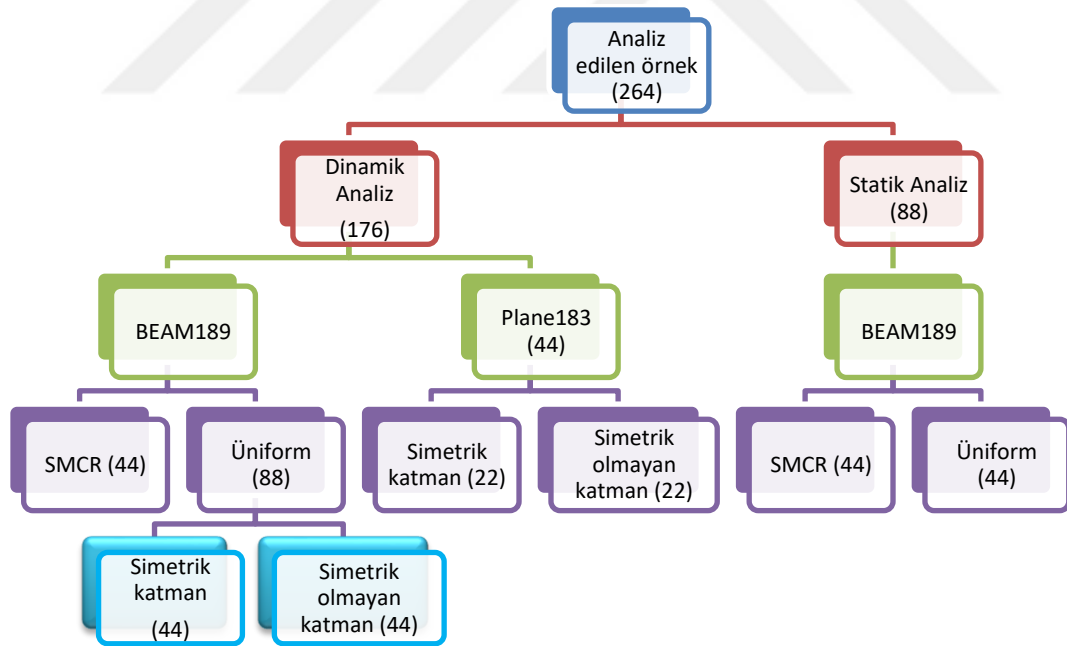


Şekil 13. Üniform gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş için sonlu eleman modeli

2.2 Kirişlerin Yapısal Analizi

Bu çalışmada ele alınan kirişlerin analizleri temel olarak statik ve dinamik olmak üzere iki ayrı grupta incelenmiştir. Simetrik malzeme kesitine sahip ve üniform yüke maruz kalan 88 adet kiriş statik olarak analiz edilmiştir. Bunların 44'ünün çekirdeği simetrik malzeme dağılımına sahip (SMCR) iken geri kalan 44'ünün çekirdeği ise üniform malzemeden yapıldığı varsayılmıştır. Her iki grup için de farklı sınır koşulları dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

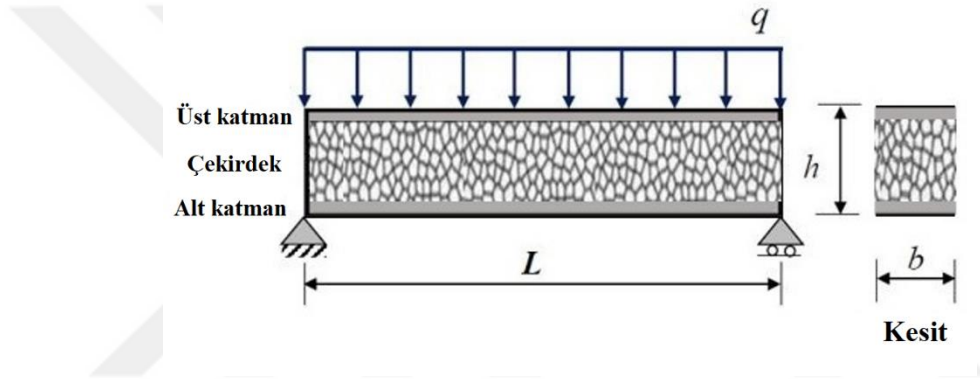
Dinamik analizi iki ayrı grup olmak üzere BEAM189 ve PLANE183 için yapılmıştır. 132 adet kirişin analizinde BEAM189 elemanı kullanılırken hem simetrik gözeneklilik dağılımı hem de üniform gözeneklilik dağılımı için parametrik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Üniform porozite durumunda ise alt ve üst yüzey katmanlarına bağlı olarak kirişler simetrik ve simetrik olmayan iki ayrı durumda incelenmiştir. Benzer bir şekilde PLANE183 sonlu elemanı kullanılarak gerekli parametreler irdelenmiştir. Analizlerde kullanılan örnek sayısının dahah iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki şema Şekil 14 sunulmuştur.



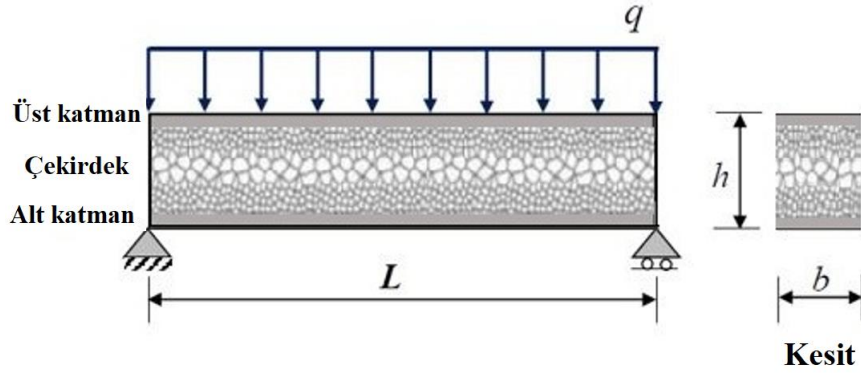
Şekil 14. Kiriş analizi örnek sayısı

2.3 FD Sandviç Kirişlerin Statik Analizi

Şekil 15 'te verilen uzunluğu L , kalınlığı h ve genişliği b olan FD sandviç kirişi ele alınmıştır. Bu tezde kullanılan kirişlerin 3 adet kalınlığı farklı olan katmanlardan oluştuğu varsayılmıştır. Alt ve üst katmanın izotropik homojen iken çekirdek katmanı ise fonksiyonlar olarak derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmıştır. Çekirdekte kullanılan gözenekli malzeme için iki farklı durum dikkate alınmıştır. Bu iki farklı malzeme durumu simetrik porozite dağılımı (SMCR) ve üniform gözeneklik dağılımı olarak ele alınmıştır şekil 15. Poisson oranı ise kalınlık boyunca sabittir. SMCR malzemeler denklem 1 ile ve üniform porozite durumu da denklem 2 ve 3 ile ifade edilmiştir Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2022).



(a) Üniform gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş



(b) Simetrik gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş

Şekil 15. FD sandviç kiriş

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

$$E(z) = E_1 [1 - e_0 \varphi] \quad (2)$$

φ değeri ise aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$\varphi = \frac{1}{e_0} - \frac{1}{e_0} \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - e_0} - \frac{2}{\pi} + 1 \right)^2 \quad (3)$$

Bu denklemlerde, e_0 porozite katsayısı, h kesit kalınlığı, E_1 ise maksimum elastisite modülünü göstermektedir. Sınır koşulları ise Tablo (1)'de sunulmuştur. Elastisite modülünün kalınlık boyunca dağılımı denklem (4)'te verilmiştir.

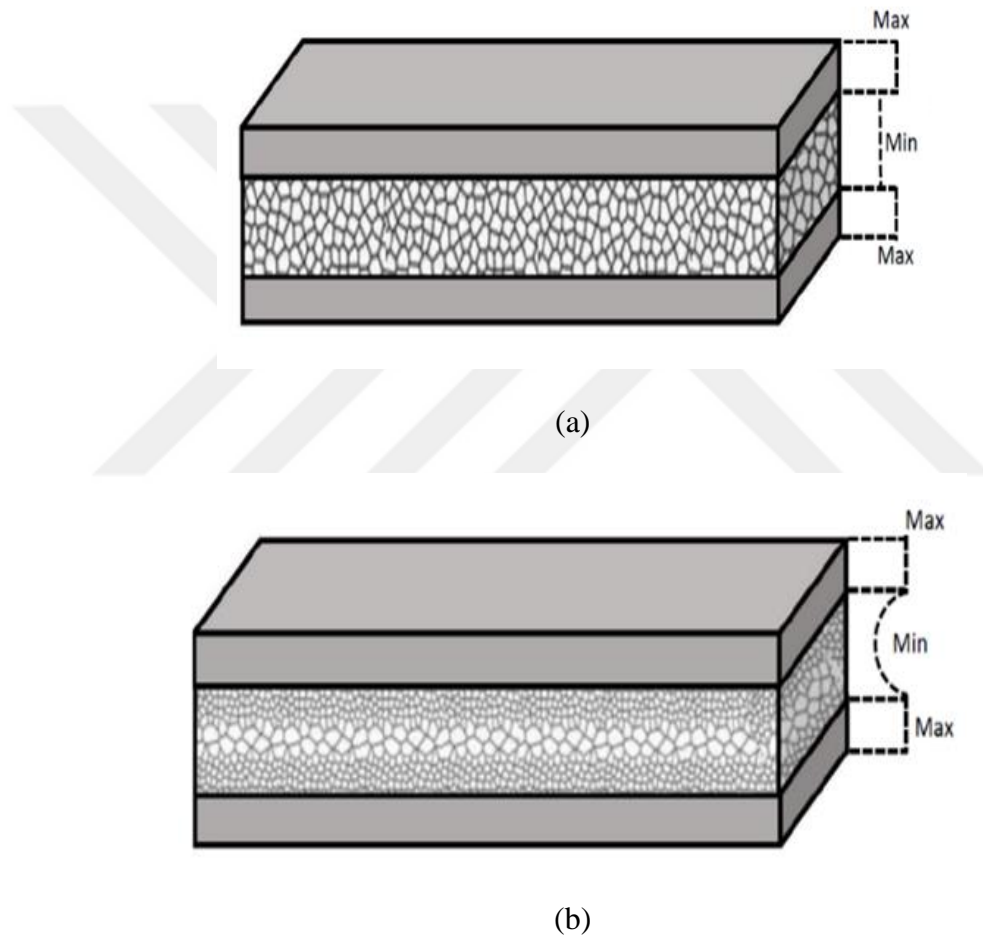
$$\begin{aligned} E &= E_1 & -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{7h}{18} \\ E &= E(z) & -\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{7h}{18} \\ E &= E_1 & +\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{h}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

Tablo 1. Sınır Koşulları

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

2.4 Gözenekli Kirişlerin Serbest Titreşim Analizi

Şekil 16’da verilen uzunluğu L , genişliği b ve yüksekliği h olan ve gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kirişlerin serbest titreşim frekanslarını elde etmek için sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Kiriş kalınlığı boyunca 3 adet katmandan oluşmaktadır. Önceki durumda olduğu gibi altı ve üst katmanlar izotropik homojen iken çekirdek katmanı gözenekli malzemeden yapılmıştır. Yine statik durumuna benzer şekilde SMCR ve üniform gözenklik olarak iki farklı porozite durumu ele alınmıştır Şekil 16’de.



Şekil 16. (a) Üniform gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş; (b) Simetrik gözenekli çekirdeğe sahip FD sandviç kiriş

Poisson oranı sabit olarak kabul edilmiştir. Kütleli yoğunluk ve elastisite modülünün dağılımı bu bölümde verilecektir. Malzeme dağılım fonksiyonları üniform porozite durumu için denklem (5-13)’te simetrik porozite durumu için ise denklem (14-22)’de verilmiştir Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2022).

$$\text{Üst Katman} \quad \left(+\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{h}{2} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_1 \quad (5) \\ G(z) = G_1 \quad (6) \\ \rho(z) = \rho_1 \quad (7) \end{array} \right.$$

$$\text{Çekirdek} \quad \left(-\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{7h}{18} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_1 [1 - e_o \varphi] \quad (8) \\ G(z) = G_1 [1 - e_o \varphi] \quad (9) \\ \rho(z) = \rho_1 \sqrt{1 - e_o \varphi} \quad (10) \end{array} \right.$$

$$\text{Alt katman} \quad \left(-\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{7h}{18} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_2 \quad (11) \\ G(z) = G_2 \quad (12) \\ \rho(z) = \rho_2 \quad (13) \end{array} \right.$$

$$\text{Üst katman} \quad \left(+\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{h}{2} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_1 \quad (14) \\ G(z) = G_1 \quad (15) \\ \rho(z) = \rho_1 \quad (16) \end{array} \right.$$

$$\text{Çekirdek} \quad \left(-\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{7h}{18} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_1 \left[1 - e_o \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (17) \\ G(z) = G_1 \left[1 - e_o \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (18) \\ \rho(z) = \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (19) \end{array} \right.$$

$$\text{Alt katman} \quad \left(-\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{7h}{18} \right) \left\{ \begin{array}{l} E(z) = E_2 \quad (20) \\ G(z) = G_2 \quad (21) \\ \rho(z) = \rho_2 \quad (22) \end{array} \right.$$

burada h_c çekirdek kalınlığı ve φ ise,

$$\varphi = \frac{1}{e_o} - \frac{1}{e_o} \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - e_o} - \frac{2}{\pi} + 1 \right)^2 \quad (23)$$

Yukarıdaki denklemlerde, e_o porozite katsayısı, h kesit yüksekliği, E_I , G_I ve ρ_1 s sırasıyla maksimum elastisite modülünü, kayma modülünü ve kütleli yoğunluğu göstermektedir. Kütleli yoğunluk için porozite katsayısı (e_m) aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$e_m = 1 - \sqrt{1 - e_o} \quad (24)$$

Ele alınan problemin sonlu elemanlar paket programı ANSYS ile çözüm sürecinde BEAM 189 elemanı kullanılmıştır. Bu elemanın üç düğümü ve her düğümün altı serbestlik derecesi vardır. Bu serbestlik dereceleri, x,y ve z yönlerinde yer değiştirme ve x,y ve z eksenleri etrafındaki dönmelerdir. Üç boyutlu bir eleman olan BEAM189, birinci dereceden kayma deformasyon teorisine dayanmaktadır. Bu çalışmada düzlem içi serbest titreşim frekansları elde edilmiştir, bu nedenle z yönünde yer değiştirme x ve y eksenleri etrafındaki dönmeler tutulmuştur.

Ansys Mechanical APDL'de Kohnke (2022) FD gözenekli sandviç kirişlerin modelini oluşturabilmek için öncelikle malzeme değişim fonksiyonlarına bağlı olarak kütleli yoğunluk ve elastisite modülü gibi malzeme özellikleri daha önceden hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler için *.csv formatında bir veri dosyası oluşturulmuştur ve kesit kalınlık doğrultusunda 36 katmana bölünmüştür. Şekil 12'den de görüldüğü üzere kirişin kesiti 1296 sonlu elemandan oluşmuştur. İlk ve son dört katman izotropik homojen olup orta katmanlar ise fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemelerden yapılmıştır. Ansys Mechanical APDL'deki Custom Sections sekmesinden Edit/ Built-up özelliğinin yararlanarak her katmana gerekli malzeme özelliği tanımlanmıştır. Kirişler uzunlukları boyunca 100 adet sonlu elemana bölünmüştür.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tezde boyutları genişliği ve yüksekliği 0.5 m ve uzunluğu 3 m olan bir kiriş örneği çeşitli parametreler için analiz edilecektir. Kirişin malzeme özellikler kalınlık boyunca fonksiyonel olarak değişmektedir. Ele alınan kirişe 10 N/m’lik bir yayılı yük etki etmektedir. Verilen boyutların ve yükleme durumun bu şekilde tercih edilmesinin herhangi bir sebebi olmayıp sadece parametrik karşılaştırmaların yapılabilmesi için seçilmiştir. Üst ve alt katmanlar çelik ve/veya alüminyum malzemelerden yapılmıştır. Çekirde yapısı için ise SMCR ve üniform olmak üzere iki çeşit gözenekli malzeme fonksiyonu belirlenmiştir. Her iki durum için farklı kiriş örnekleri ele alınmıştır ve gözeneklik parametrenin FD sandviç kirişlerin statik ve titreşim davranışları üzerine olan etkileri sonlu elemanlar metodu ile detaylı olarak araştırılmıştır.

3.1 Statik Analiz

3.1.1 Yerdeğiştirme Sonuçları

Porozitenin FD malzemeli sandviç kirişlerin statik davranışına olan etkisinin araştırılabilmesi için farklı gözeneklik katsayıları ve sınır koşulları dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Bu tezde malzeme özellikleri $E_I = 200$ GPa ve $\nu = 0.3$ olarak kabul edilmiştir. Elde edilen en büyük deplasman değerleri Tablo 2 ve Tablo 3 ‘de listelenmiştir.

Tablo 2. SMCR malzeme drumu için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)

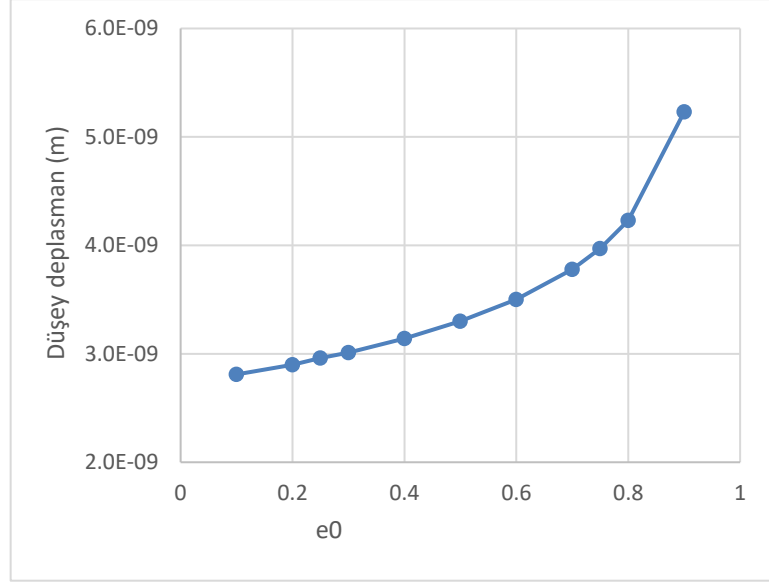
e_o	A-A	A-SR	A-S	S-S
0.10	2.81E-09	1.02E-07	5.14E-09	1.10E-08
0.20	2.90E-09	1.04E-07	5.28E-09	1.13E-08
0.25	2.96E-09	1.04E-07	5.35E-09	1.14E-08
0.30	3.01E-09	1.05E-07	5.44E-09	1.15E-08
0.40	3.14E-09	1.07E-07	5.61E-09	1.18E-08
0.50	3.30E-09	1.10E-07	5.83E-09	1.21E-08
0.60	3.50E-09	1.12E-07	6.09E-09	1.24E-08
0.70	3.78E-09	1.15E-07	6.45E-09	1.28E-08

0.75	3.97E-09	1.16E-07	6.69E-09	1.31E-08
0.80	4.23E-09	1.18E-07	7.01E-09	1.35E-08
0.90	5.23E-09	1.24E-07	8.19E-09	1.46E-08

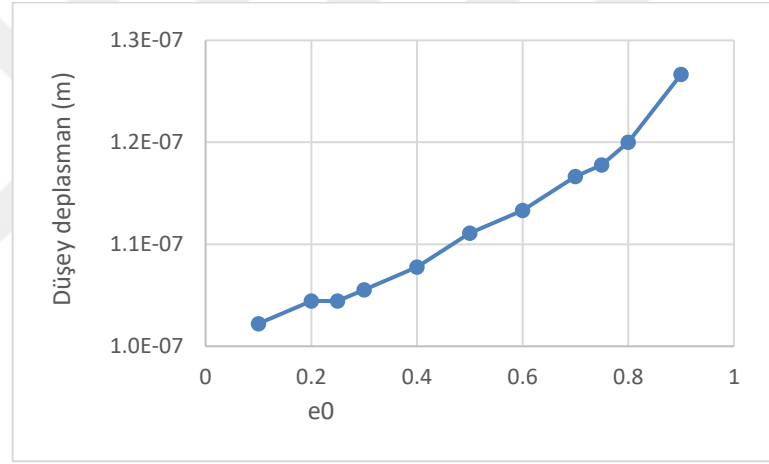
Tablo 3. Üniform malzeme drumu için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)

e₀	A-A	A-SR	A-S	S-S
0.10	2.83E-09	1.03E-07	5.20E-09	1.12E-08
0.20	2.95E-09	1.07E-07	5.40E-09	1.16E-08
0.25	3.02E-09	1.09E-07	5.51E-09	1.18E-08
0.30	3.08E-09	1.11E-07	5.62E-09	1.20E-08
0.40	3.24E-09	1.15E-07	5.88E-09	1.25E-08
0.50	3.42E-09	1.20E-07	6.17E-09	1.31E-08
0.60	3.64E-09	1.25E-07	6.52E-09	1.37E-08
0.70	3.92E-09	1.32E-07	6.96E-09	1.45E-08
0.75	4.10E-09	1.35E-07	7.23E-09	1.49E-08
0.80	4.31E-09	1.40E-07	7.55E-09	1.55E-08
0.90	4.94E-09	1.51E-07	8.46E-09	1.69E-08

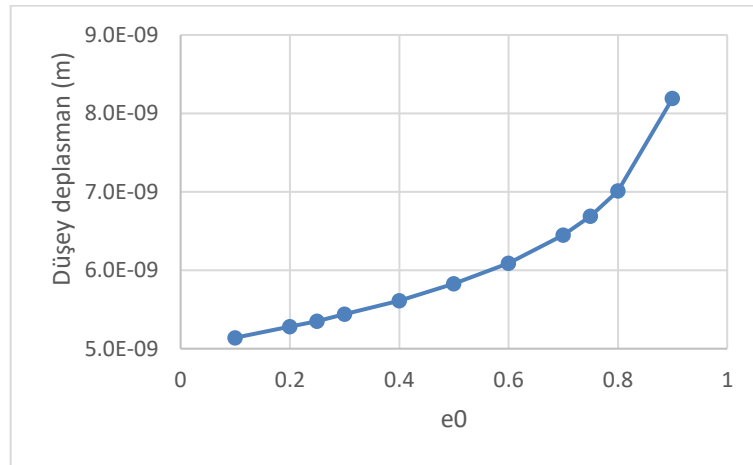
Yukarıda verilen tablolar incelendiğinde porozite katsayısının düşey deplasmanlara etki ettiği aşikar bir şekilde anlaşılmaktadır. En küçük deplasmanlar porozite katsayısının 0.1 olduğu durumda ankastre – ankastre mesnetli kirişte meydana gelmektedir. En büyük yer değiştirmeler ise porozite katsayısı 0.9 olduğunda konsol kirişte oluşmaktadır. Sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için tablolarda verilen sonuçlar Şekil 17-24 arasında grafik formunda sunulmuştur.



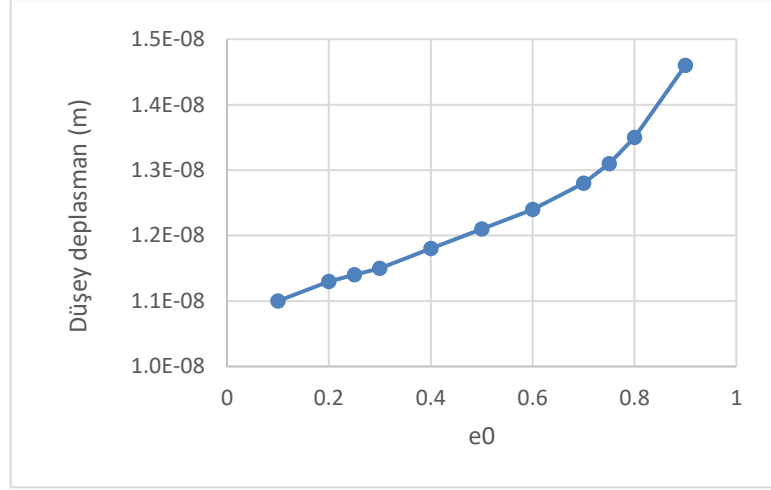
Ŗekil 17. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriŖ için elde edilen maksimum düŖey deplasman değerleri (m)



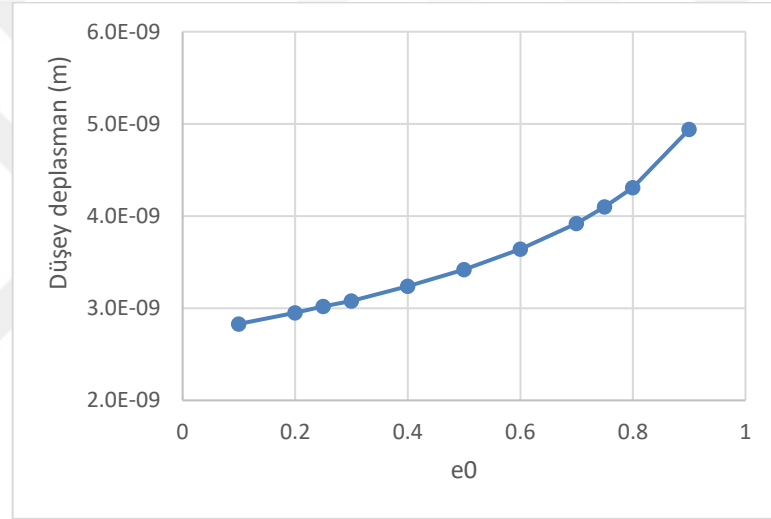
Ŗekil 18. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriŖ için elde edilen maksimum düŖey deplasman değerleri (m)



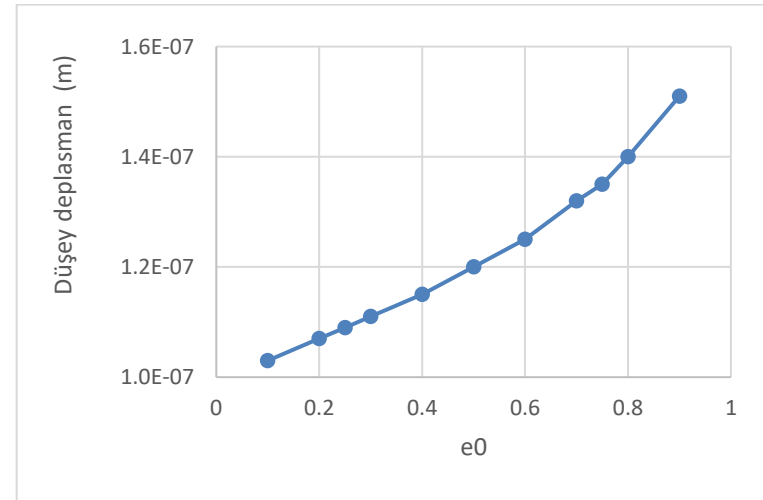
Ŗekil 19. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriŖ için elde edilen maksimum düŖey deplasman değerleri (m)



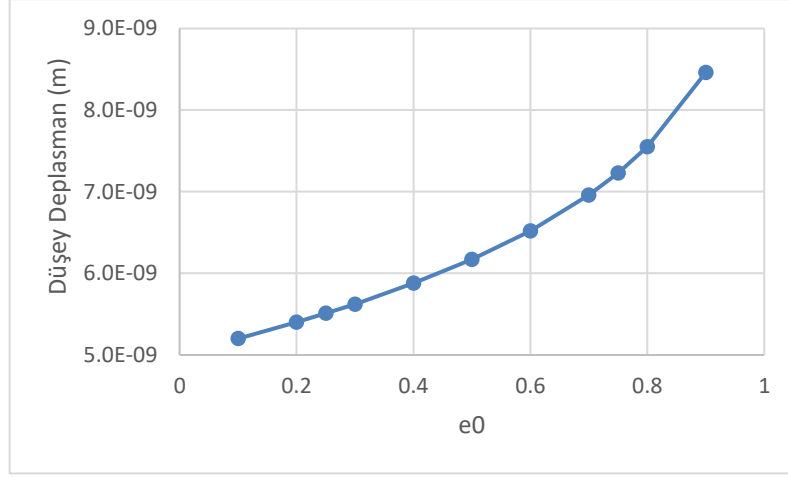
Şekil 20. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)



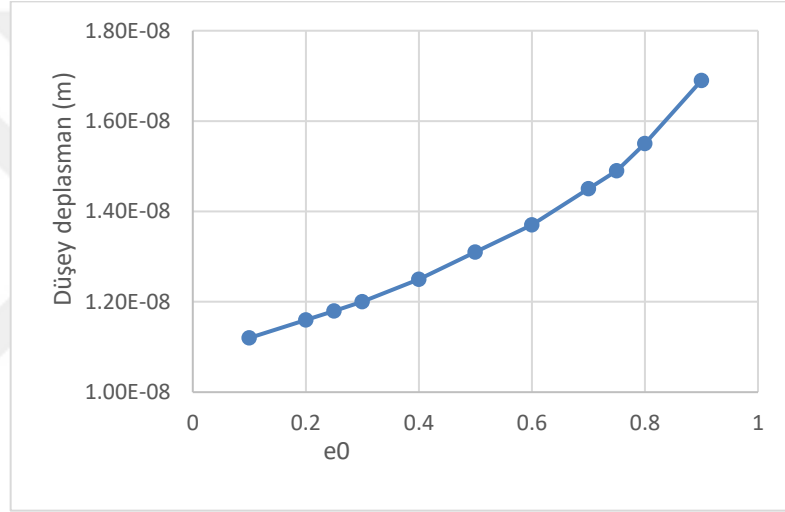
Şekil 21. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)



Şekil 22. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değerleri (m)



Şekil 23. Ünlform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değeri (m)

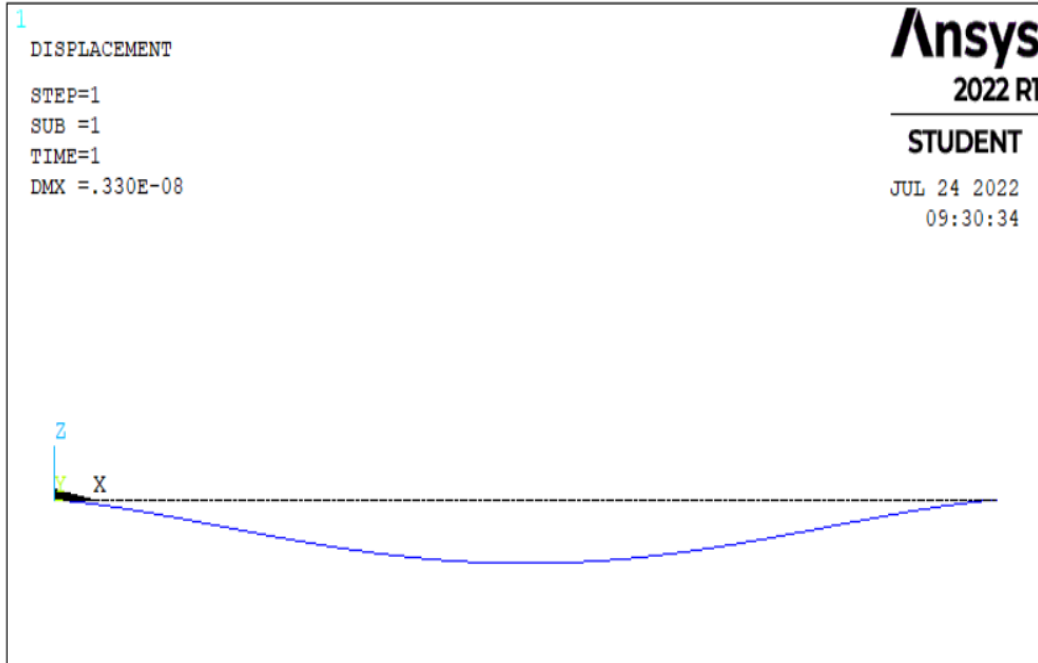


Şekil 24. Ünlform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen maksimum düşey deplasman değeri (m)

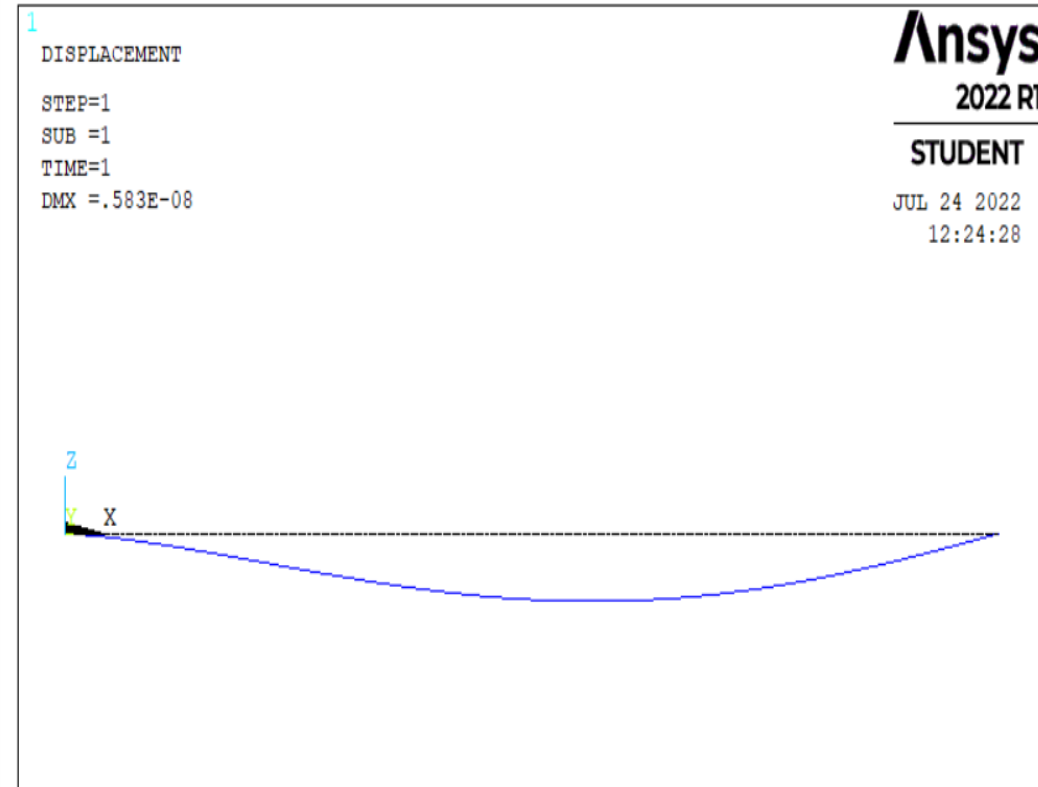
Yukarıda verilen grafiklere göre porozite katsayısı ile düşey deplasman değeri doğru orantılıdır. Porozite katsayısı arttıkça düşey deplasmanlarda da artış görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre düşey deplasman değerlerinin oluştuğu mesnet durumları küçükten büyüğe doğru ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit - sabit ve ankastre – serbest şeklinde sıralanabilir.

Çubuk ekseni boyunca düşey yerdeğıştirmeler (elastik eğri) ve dönme değeri (elastik eğrinin birinci türevleri) tüm durumlar için elde edilmiştir. Bu bölümde, SMCR malzeme durumu için FD sandviç kirişler için elde edilen elastik eğriler sunulacaktır. Şekil(25-28) arasında sunulan grafikler $e_0 = 0.5$ değeri için hesaplanan

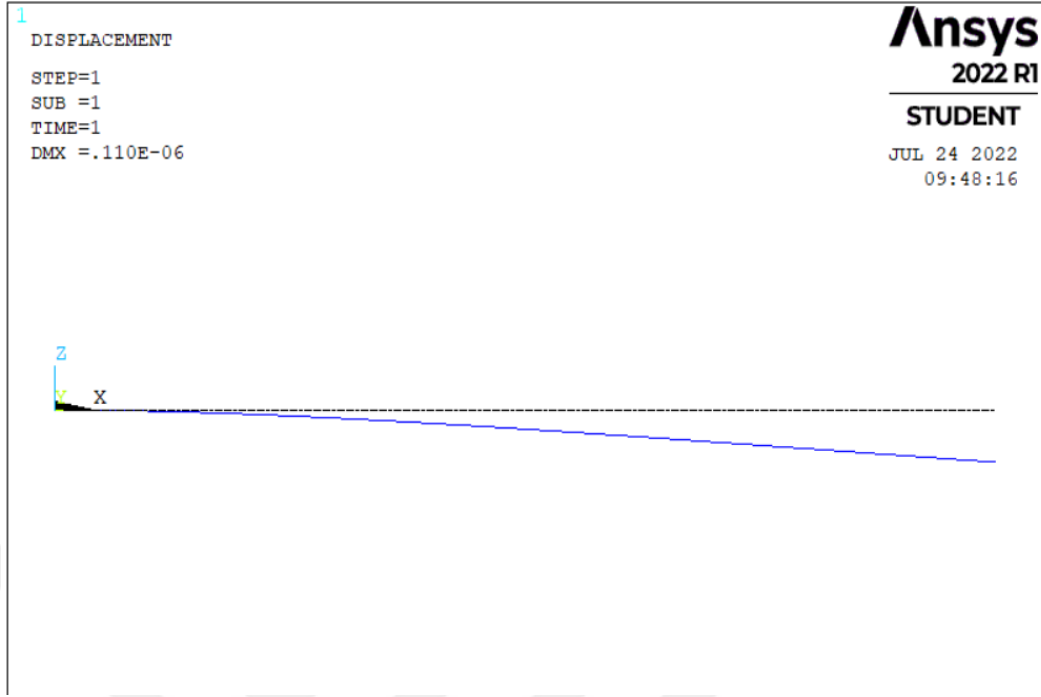
düşey deplasman değerlerini (U_z) göstermektedir. Şekillerde kesikli çizgi kirişin ilk konumunu temsil etmektedir.



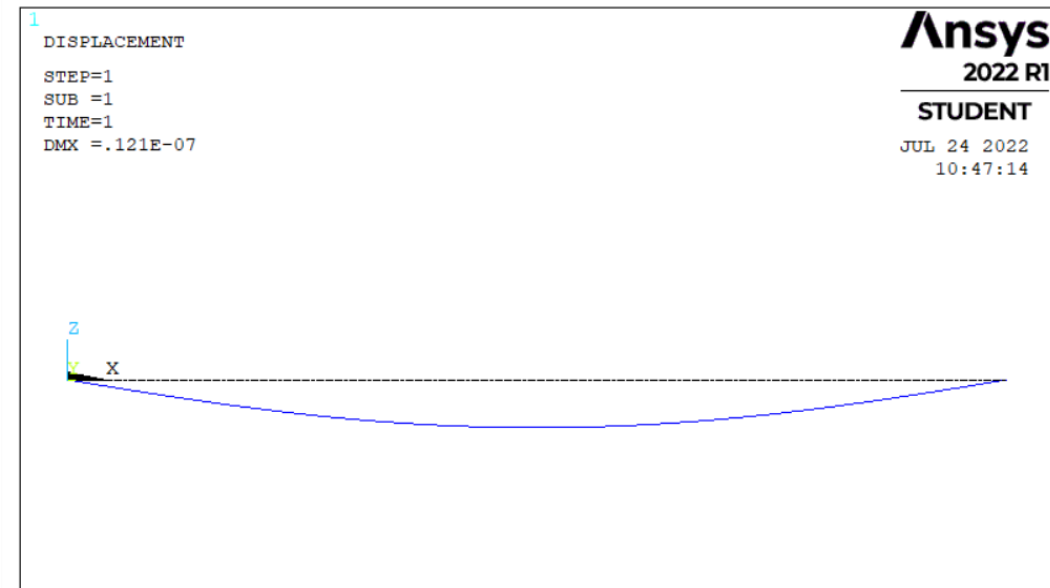
Şekil 25. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_0=0.5$)



Şekil 26. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_0=0.5$)



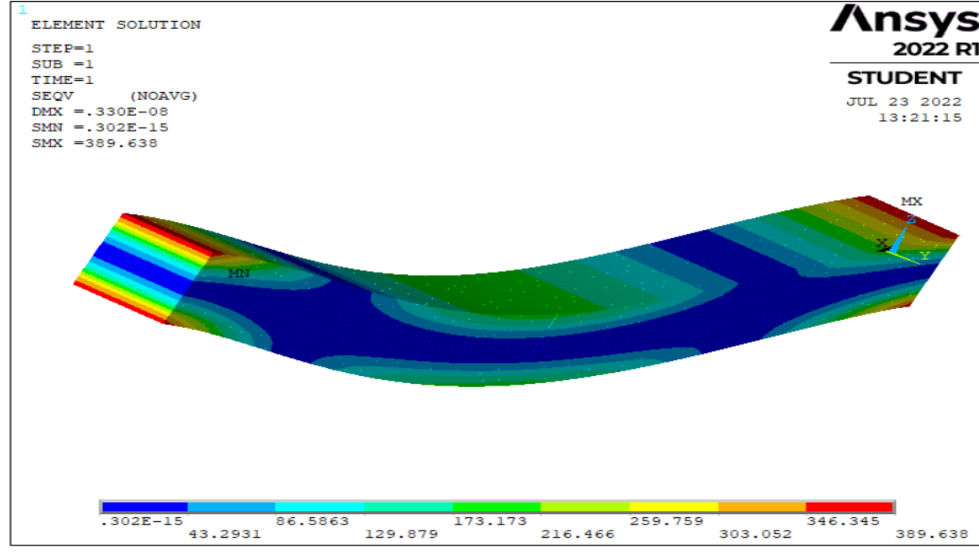
Şekil 27. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$)



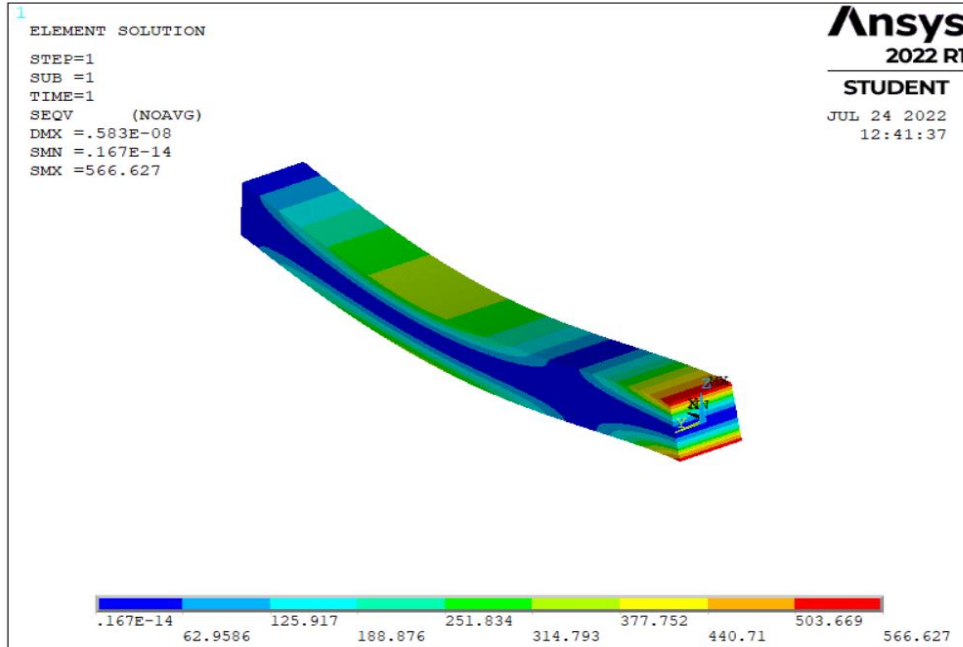
Şekil 28. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen elastik eğri ($e_o=0.5$)

3.1.2 Von Mises Gerilmeleri

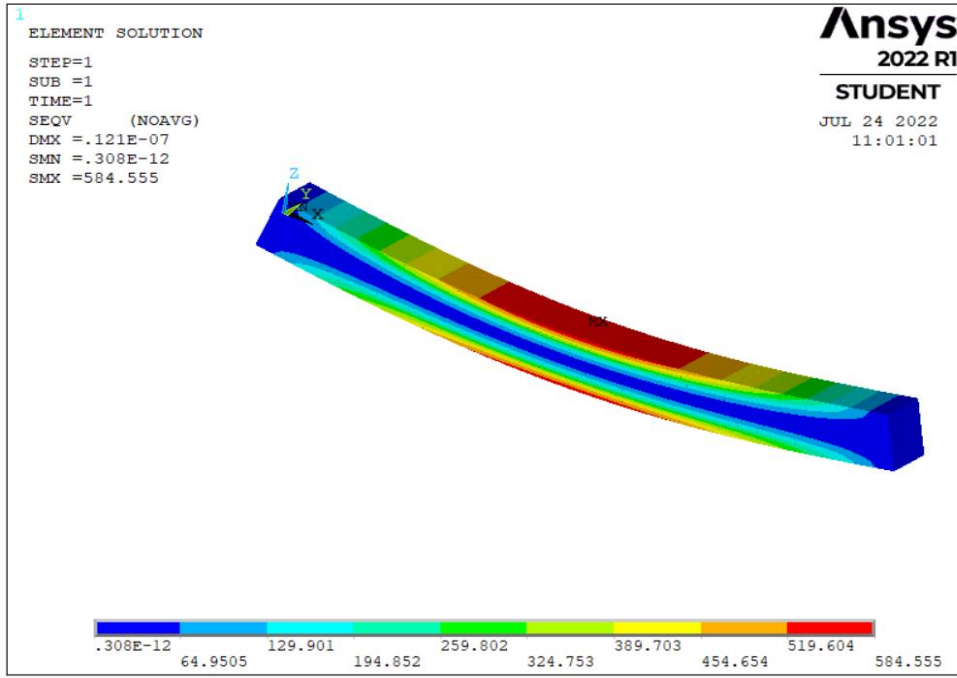
SMCR malzemeli sandviç FD kiriş için von-Mises gerilmeleri hesaplanıp şekil (29-32) arasında verilmiştir. Benzer şekilde üniform malzemeli FD sandviç kirişin von-Mises gerilme değerleri de Şekil (33-36) arasında sunulmuştur.



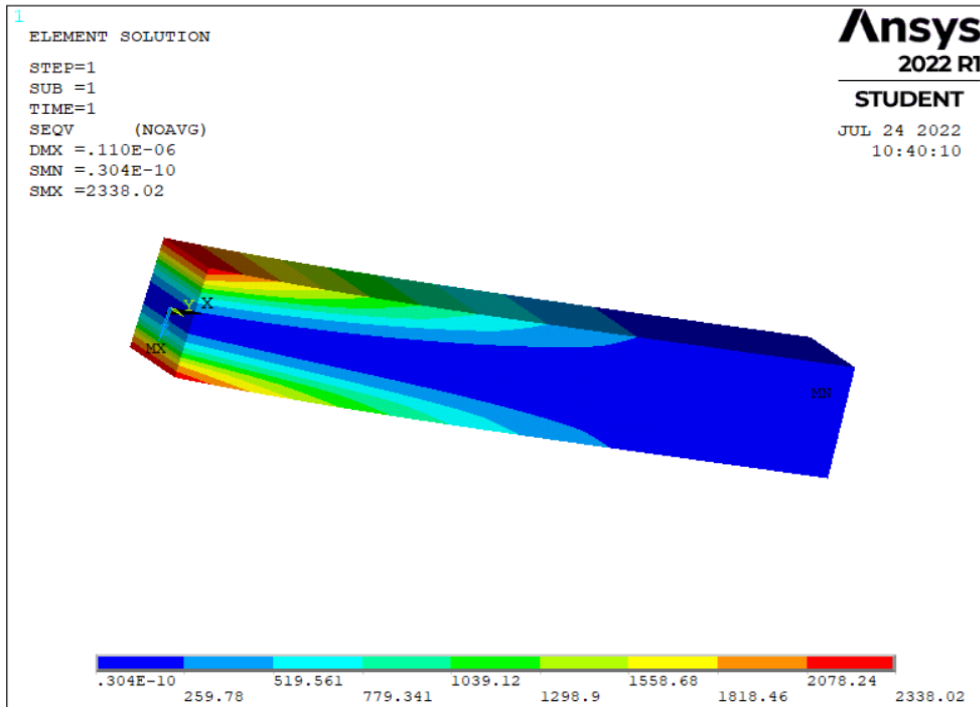
Şekil 29. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



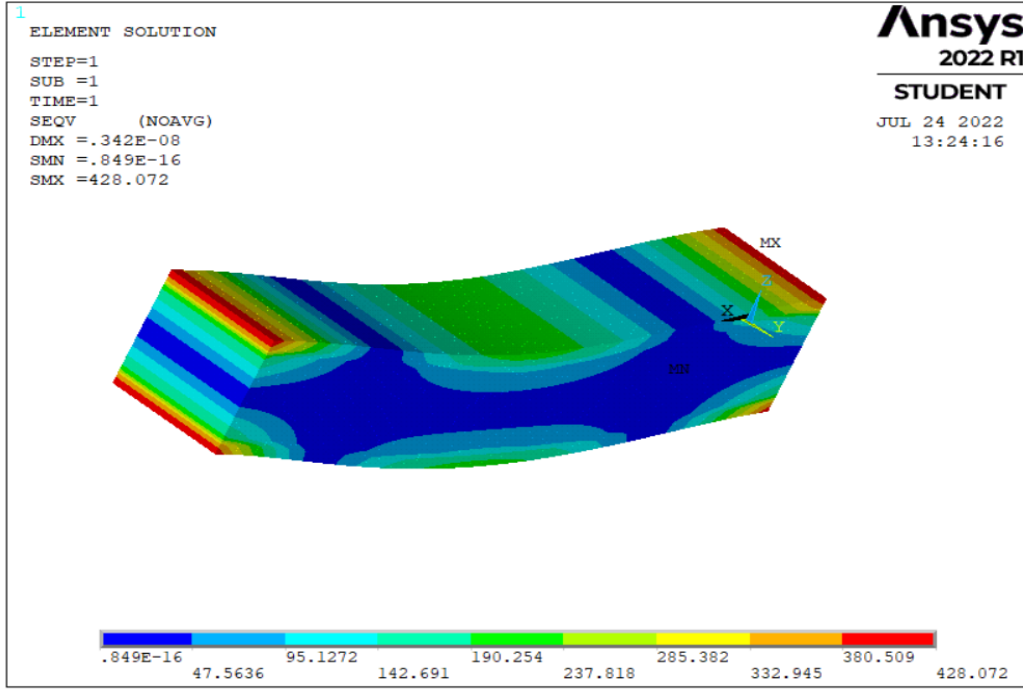
Şekil 30. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



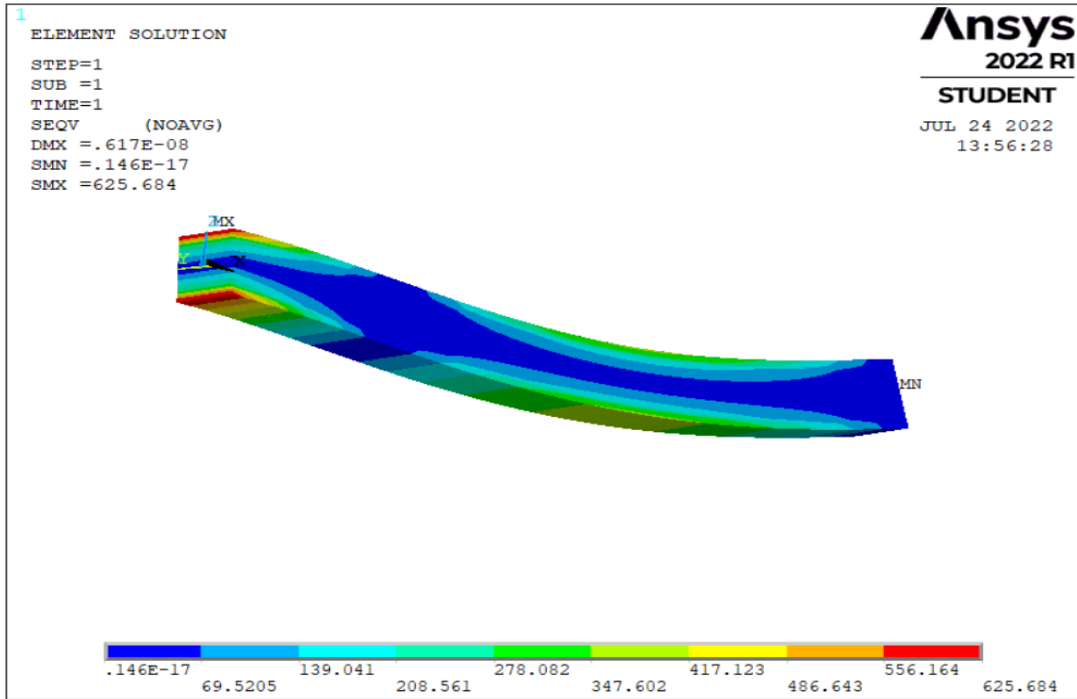
Şekil 31. SMCR malzemeli Sabit– Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



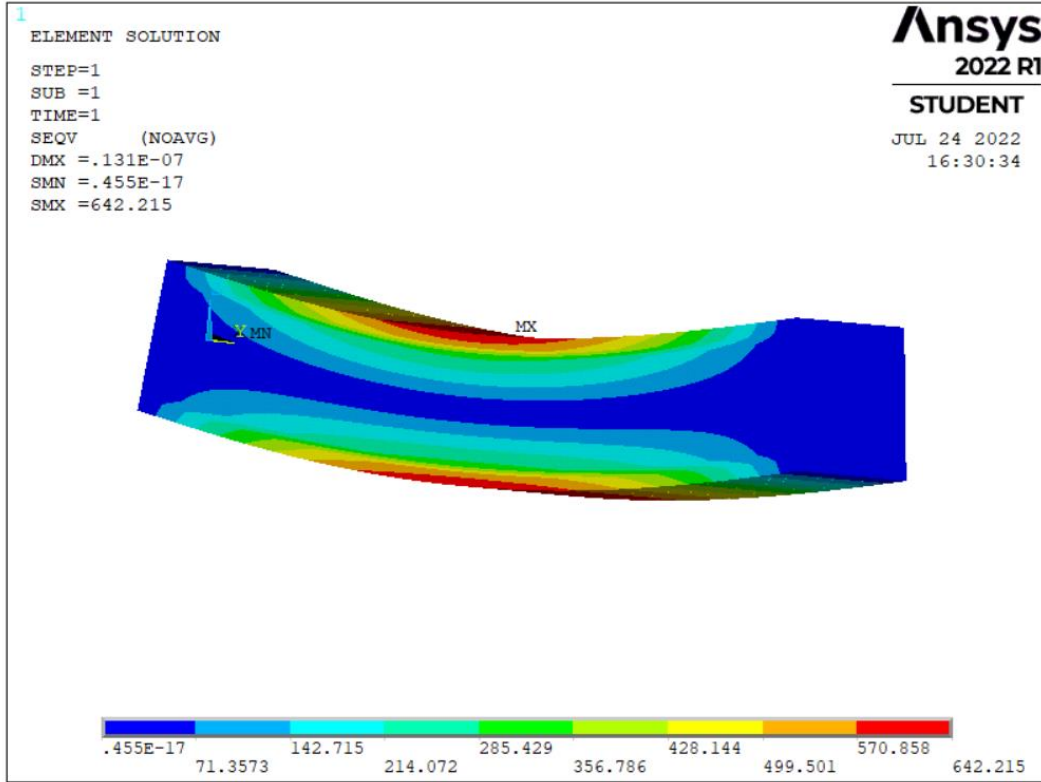
Şekil 32. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



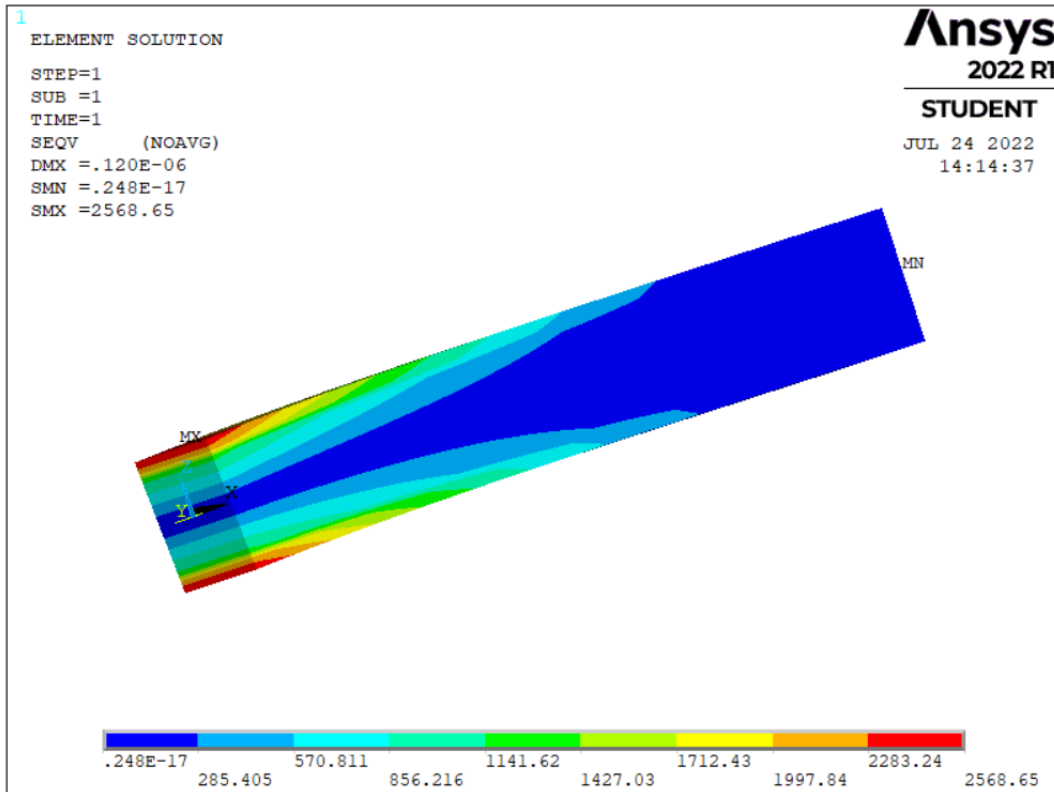
Şekil 33. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)



Şekil 34. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)



Şekil 35. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



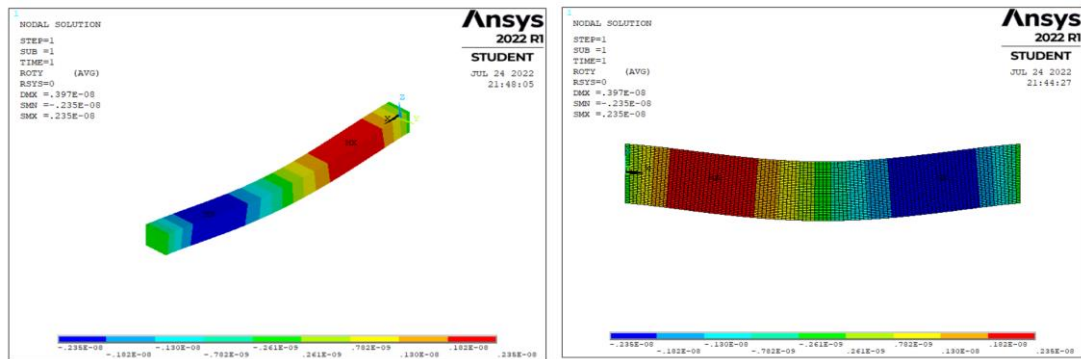
Şekil 36. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde Von-Mises gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)

Yukarıda şekiller incelendiğinde porozite katsayısının fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerinde oluşan von-Mises gerilemeleri üzerinde önemli ölçüde etki ettiği görülmektedir. SMCR malzeme durumunda porozite katsayısının $e_0 = 0.5$ değeri için maksimum von-Mises gerilmeleri ankastre – ankastre, ankastre – sabit , sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnetleme koşulları için sırasıyla 389.63 Pa, 566.63 Pa, 584.56 Pa,ve 2338.02 Pa olarak hesaplanmıştır. Üiform malzemeli FD sandviç kirişler için ise bu değerler $e_0 = 0.5$ porozite katsayısı ve aynı mesnet koşulları için 428.072 Pa, 625.684 Pa, 642.215 Pa, ve 2568.65 olarak ölçülmüştür.

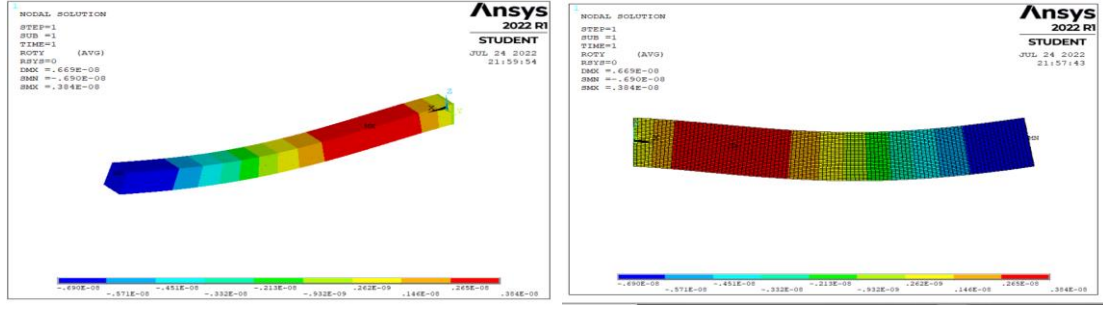
Mesnetleme türlerinin karşılaştırmalarından da anlaşıldığı gibi konsol kirişlerde maksimum von-Mises gerilmeleri oluşmakta olup en küçük von-Mises gerilmeleri ise ankastre – ankastre mesnetli çubuklarda meydana gelmektedir. SMCR ve üniform malzeme türleri karşılaştırıldığında ise çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan FD sandviç kirişlerde von-Mises gerilme değerlerinin daha yüksek olduğu bulunmuştur.

3.1.3 Dönme Açıları

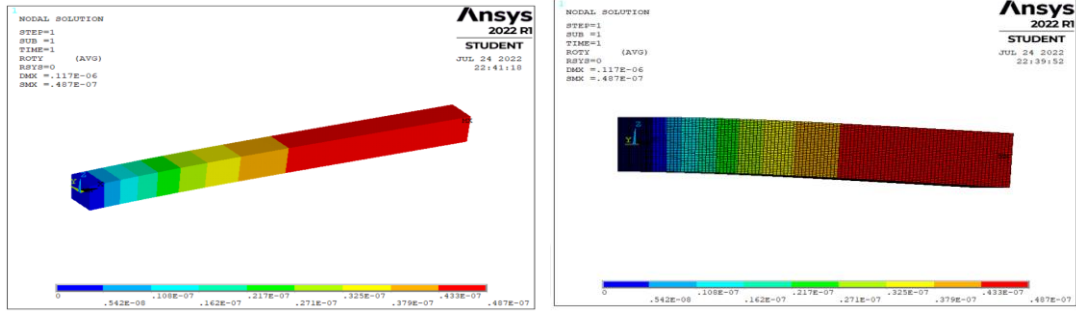
Y ekseninde oluşan dönme açıları her iki malzeme durumu için de hesaplanmış olup SMCR malzemeli sandviç kirişler için Şekil (37-40) arasında üniform gözenekli malzeme durumu için ise Şekil (41-44) arasında grafik formunda verilmiştir.



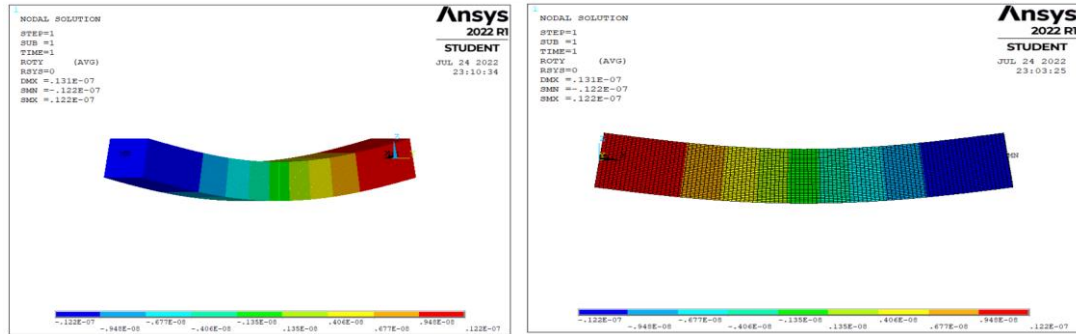
Şekil 37. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_0=0.75$)



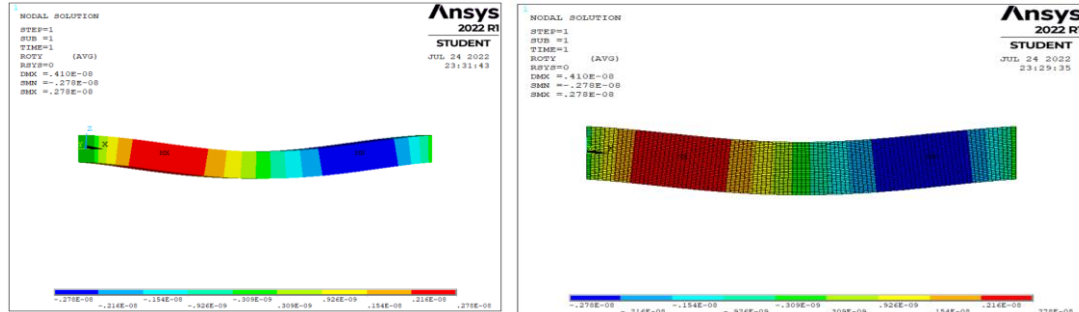
Şekil 38. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



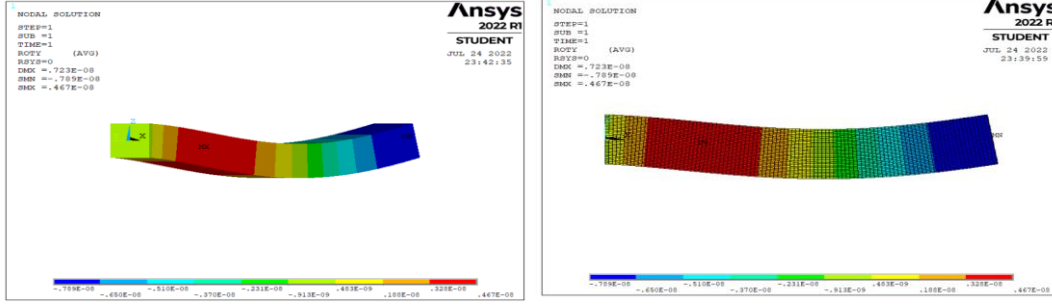
Şekil 39. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



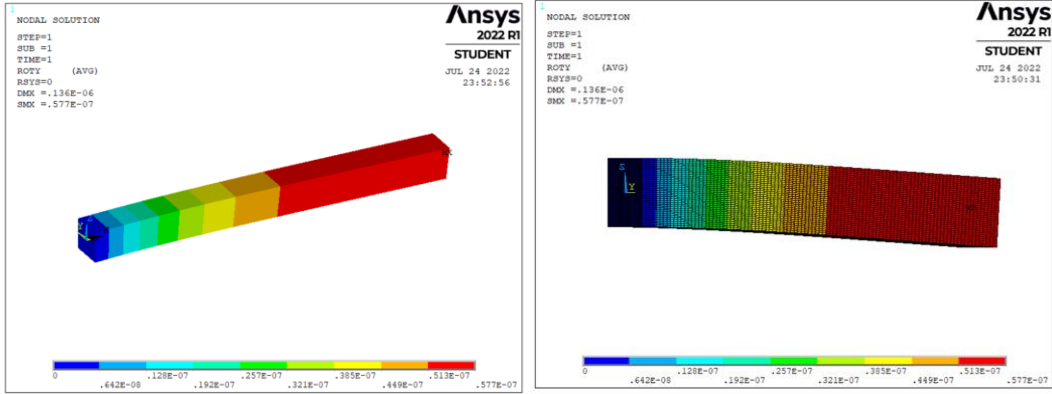
Şekil 40. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



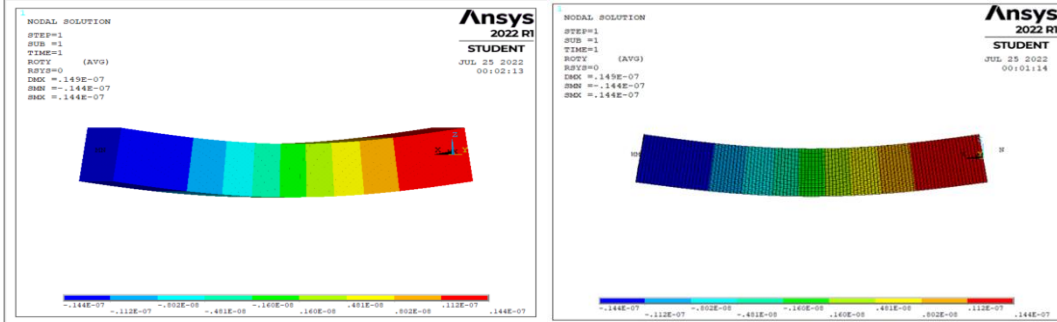
Şekil 41. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



Şekil 42. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



Şekil 43. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)



Şekil 44. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde edilen dönme açıları ($e_o=0.75$)

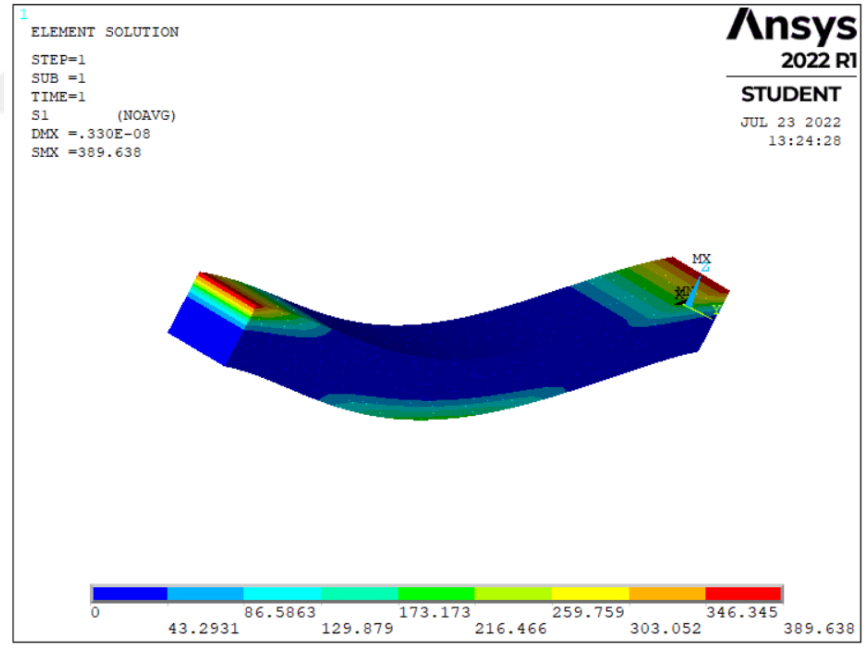
Şekiller (37-44), gözeneklilik dağılım tipinin FD sandviç kirişlerin dönme açıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. SMCR malzemeli ($e_o=0.75$) çekirdeğe sahip olan FD sandviç kirişler için dönem açıları ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnet durumları için sırasıyla 0.235×10^{-8} , 0.384×10^{-8} , 0.122×10^{-7} ve 0.487×10^{-7} radyan olarak elde edilmiştir.

Aynı şekilde y-ekseni etrafında dönme açı değerleri üniform ($e_o = 0.75$) gözenekli çekirdeği olan FD sandviç kirişler için hesaplanmıştır. Bu açılar ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnet durumları için 0.278×10^{-8} , 0.467×10^{-8} , 0.144×10^{-7} ve 0.577×10^{-7} olarak hesap edilmiştir.

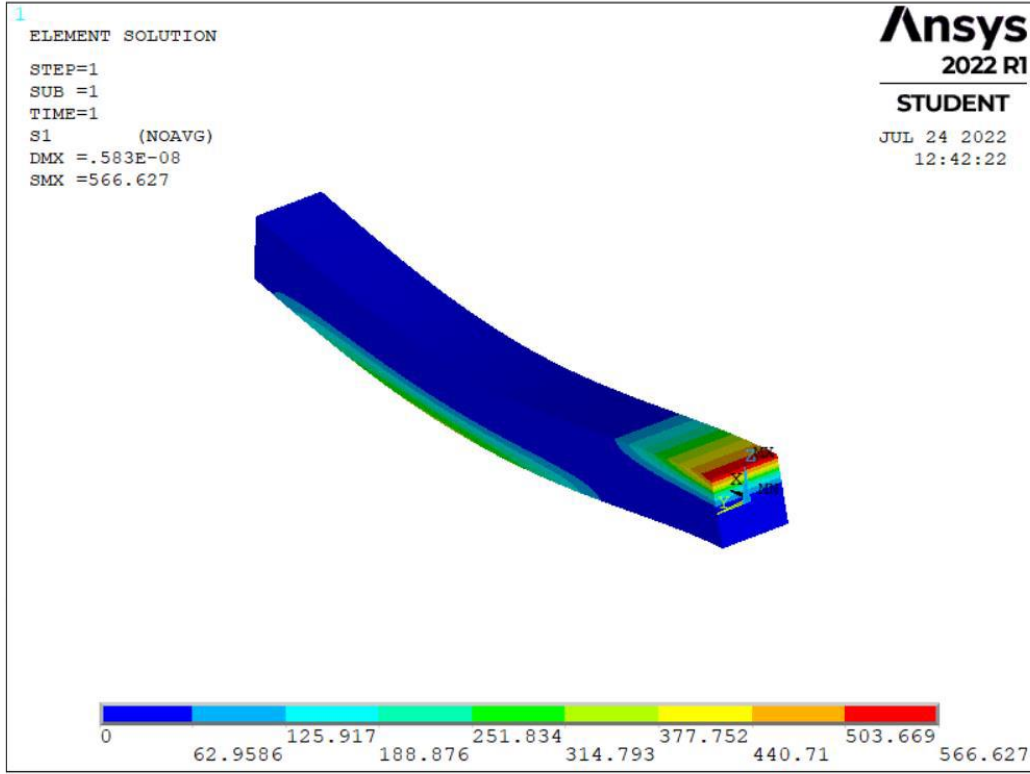
Buradaki sonuçlara bakıldığında en büyük dönme açılarının konsol kirişte olduğu en küçük dönme açıları ise iki ucu ankastre mesnetli çubukta meydana geldiği anlaşılmaktadır. $e_o = 0.75$ gözeneklik katsayısı için SMCR ve üniform malzeme durumları karşılaştırıldığında ise üniform FD çekirdekli sandviç kirişlerde oluşan dönme açı değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

3.1.4 Birinci Asal Gerilmeler

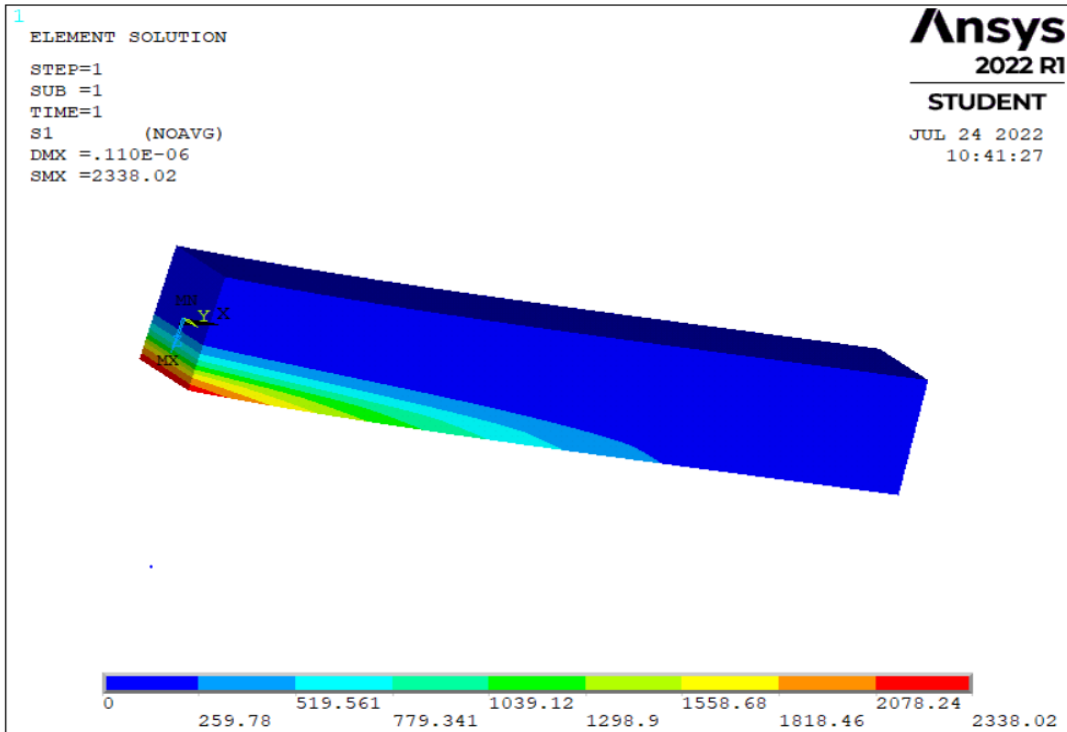
SMCR malzemeli sandviç FD kiriş için birinci asal gerilme değerleri hesaplanıp şekil (45 - 48) arasında verilmiştir. Benzer şekilde üniform malzemeli FD sandviç kirişin birinci asal gerilmeler ise Şekil (49 – 52) arasında sunulmuştur.



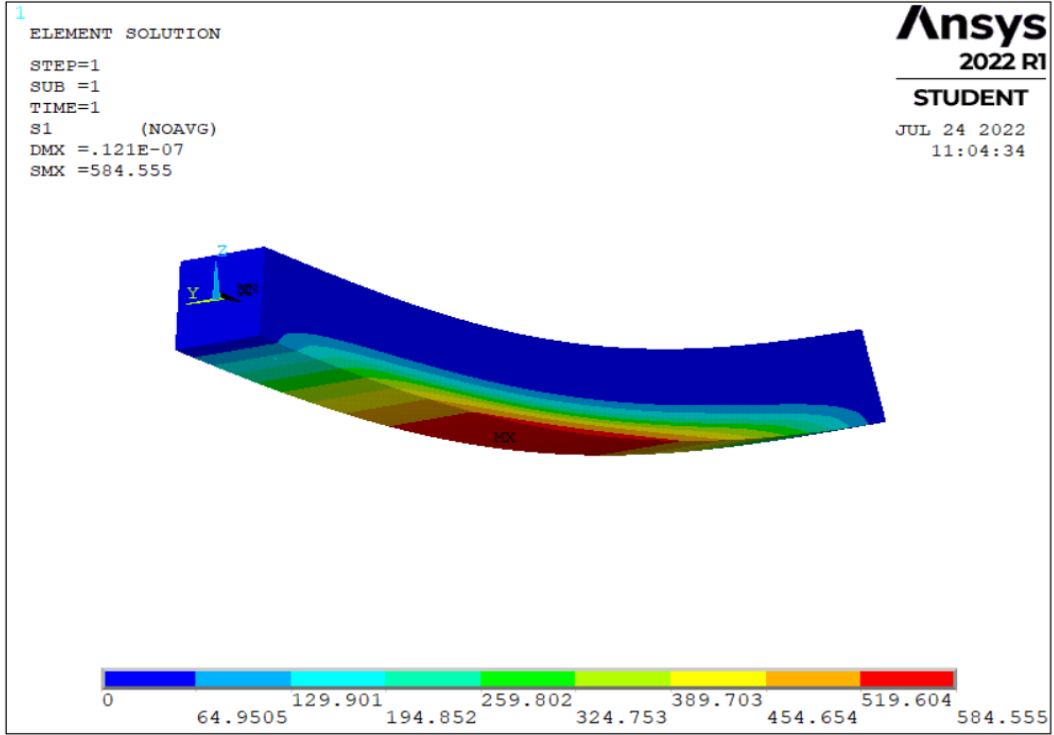
Şekil 45. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)



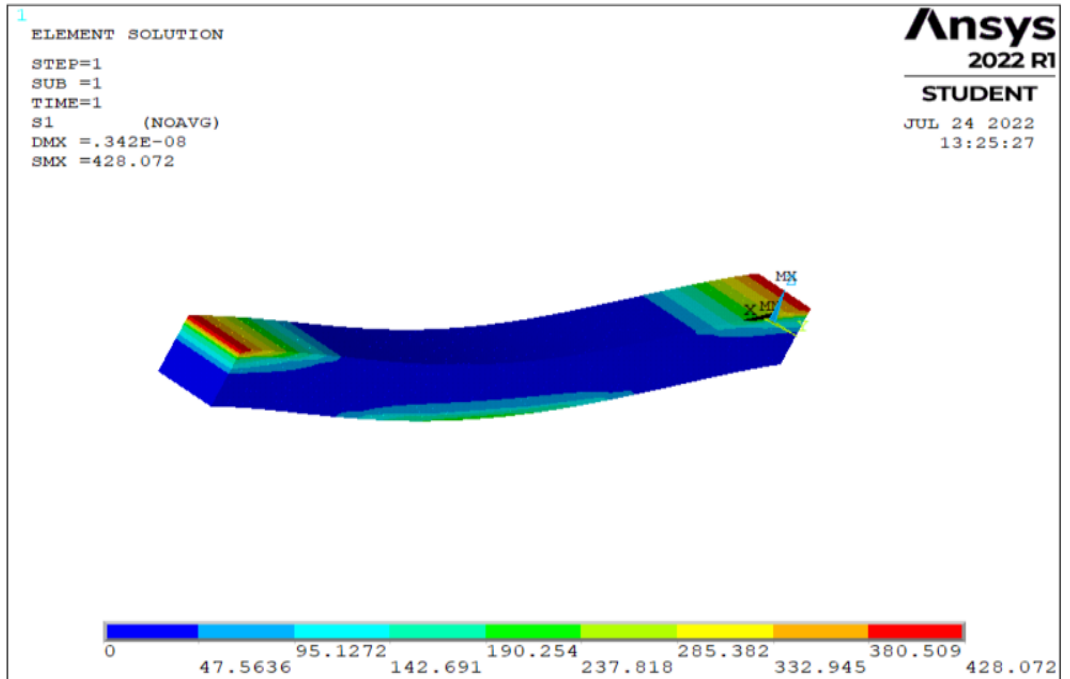
Şekil 46. SMCR malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($\epsilon_0=0.5$)



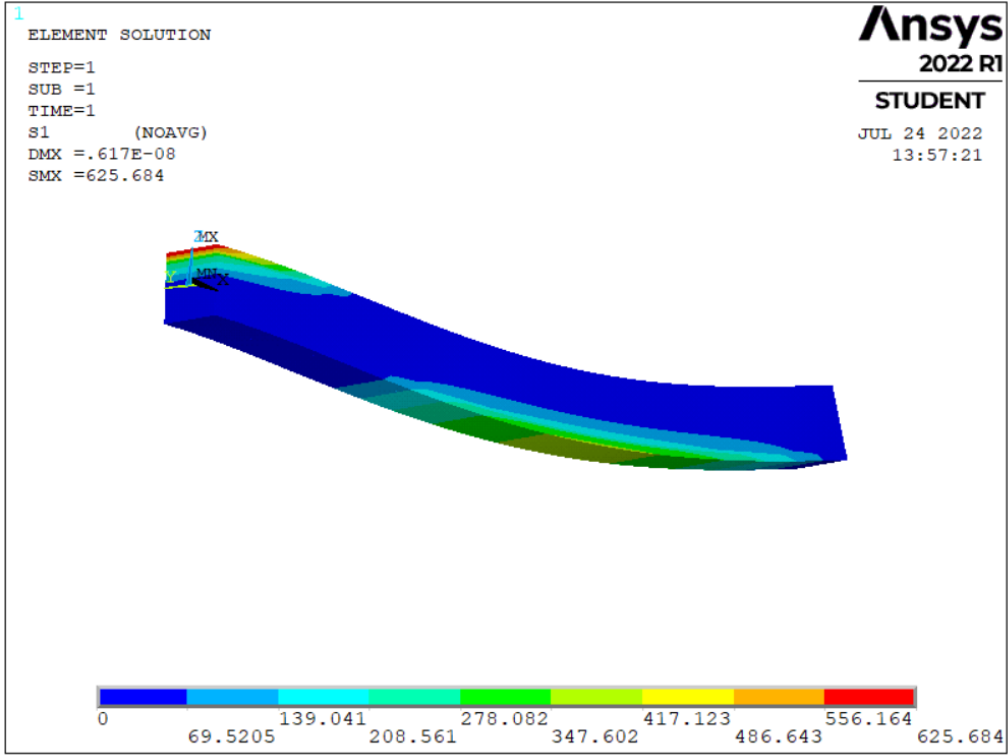
Şekil 47. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($\epsilon_0=0.5$)



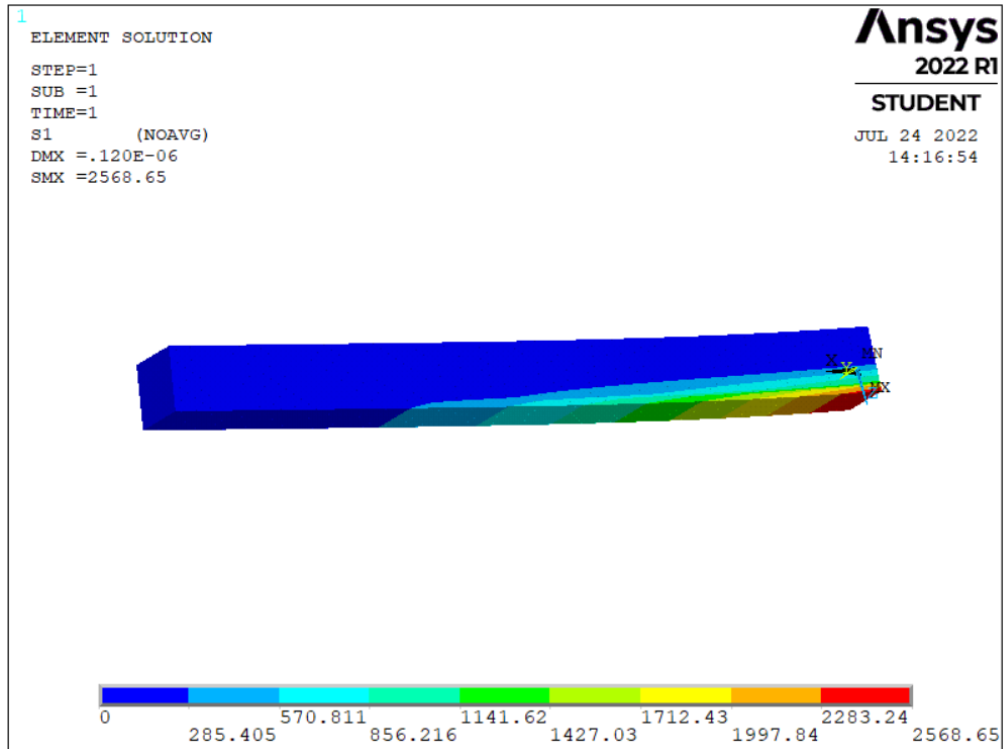
Şekil 48. SMCR malzemeli Sabit -Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)



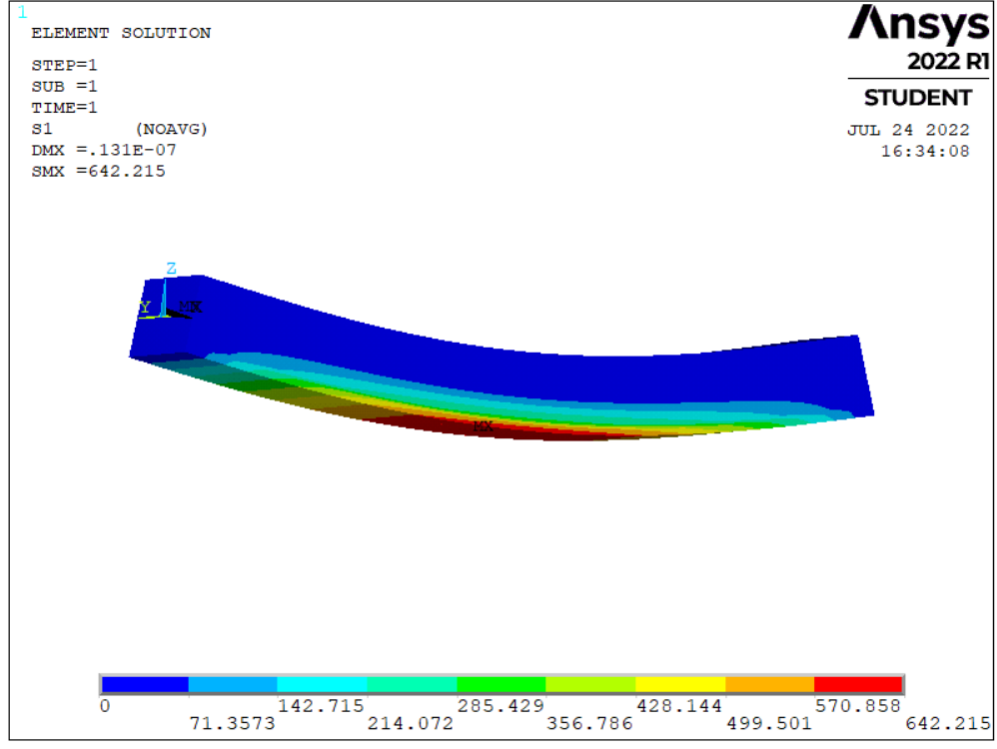
Şekil 49. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_o=0.5$)



Şekil 50. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



Şekil 51. Üniform malzemeli Ankastre – serbest mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)



Şekil 52. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç kiriş için elde birinci asal gerilme dağılımı ($e_0=0.5$)

Şekiller (45-52)'da gözenek dağılım tipinin FD sandviç kirişlerin birinci asal gerilme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. SMCR malzemeli ($e_0=0.5$) çekirdeğe sahip olan FD sandviç kirişler için birinci asal gerilme değerleri ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnet durumları için sırasıyla 389.638, 566.627, 584.55 ve 2338.02 MPa olarak elde edilmiştir.

Benzer şekilde birinci asal gerilme değerleri üniform ($e_0 = 0.5$) gözenekli çekirdeğe sahip olan FD sandviç kirişler için elde edilmiştir. Bu gerilme değerleri ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnet durumları için 428.072, 625.684, 642.215 ve 2568.65 MPa olarak bulunmuştur.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişler için, simetrik ve üniform gözeneklilik dağılımları karşılaştırıldığında ise ($e_0=0.5$), üniform gözeneklilik dağılımında birinci asal gerilme değerlerinin daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

3.2 Serbest Titreşim Analizi

3.2.1 BEAM189 Elemanı ile Serbest Titreşim Frekanslarının Elde Edilmesi

Sandviç FD gözenekli kirişlerin serbest titreşim frekansları, iki tip FD porozite dağılımı ve çeşitli sınır koşulları için farklı porozite katsayıları kullanılarak elde edilmiştir. Üniform gözeneklilik dağılımı için, kütleli yoğunluk ve elastisite modülü (5-13) denklemleri yardımıyla hesaplanır. Simetrik gözeneklilik dağılımı için ise aynı malzeme özellikleri, (14-22) denklemleri ile elde edilebilir.

Kütleli yoğunluk için maksimum ρ_1 değeri 7850 kg/m^3 ve maksimum elastisite modülü (E_1) ise 200 GPa olarak kabul edilmiştir. Kayma modülü ise program tarafından $\left(G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu)}\right)$ formülü yardımıyla hesaplanmaktadır. Statik durumunda olduğu gibi dinamik analizlerde de kirişin yüksekliği $h = 0,5 \text{ m}$, genişliği $b = 0,5 \text{ m}$ ve uzunluğu $L = 3 \text{ m}$ olarak alınmıştır. Bu çalışmada, Poisson oranı $\nu = 0.3$ olarak alınmıştır.

Analizler, çekirdek katmanının gözeneklilik dağılımına bağlı olarak simetrik ve üniform porozite dağılımı olmak üzere iki ana gruba ayrılan farklı sayıda FD sandviç kiriş için yapılmıştır. Her grupta, kiriş için farklı mesnet koşulları ve gözeneklilik katsayıları için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çubuğun i (çubuğun sol ucu) ve j (çubuğun sağ ucu) uçları için kullanılan sınır koşulları Tablo 4 'te listelenmiştir.

Tablo 4. Sınır Koşulları

Mesnet Durumu	Sınır koşulları	
	i	j
Ankastre– Ankastre (A-A)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$
Ankastre – Sabit (A-S)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	$U_z = U_x = U_y = 0$
Sabit – Sabit (S-S)	$U_z = U_x = U_y = 0$	$U_z = U_x = U_y = 0$
Ankastre – Serbest (A-SR)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	-----

Bu bölümün ilk problemi olarak Tablo 4’te verilen sınır koşulları için çekirdek katmanı SMCR gözenekli malzemeden yapılmış olan FD sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi ele alınmıştır. Gözeneklilik katsayısının (e_0) farklı değerleri için ilk on moda ait doğal serbest titreşim frekansları hesaplanmıştır. Ankastre – Ankastre mesnetli kiriş için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. SMCR malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

M od	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	244.50	243.56	243.08	242.45	241.16	239.26	236.76	232.84	230.05	226.01	210.86
2	576.28	570.34	567.17	563.46	555.39	544.95	531.75	513.04	500.55	483.83	424.91
3	976.87	820.98	816.18	810.87	801.33	791.39	782.69	775.27	772.89	770.75	669.90
4	1412.1	962.89	955.43	946.93	928.41	905.33	876.86	838.02	812.87	780.16	754.70
5	1868.9	1387.9	1375.0	1360.5	1328.9	1290.0	1242.1	1176.3	1131.5	1065.7	774.01
6	2337.2	1642.0	1632.4	1621.7	1602.7	1582.8	1565.4	1526.1	1378.8	1216.0	955.65
7	2811.1	1833.4	1814.4	1793.3	1747.1	1690.9	1621.8	1537.7	1459.5	1361.4	1001.4
8	3076.5	2288.8	2262.7	2233.5	2167.2	2063.5	1835.3	1550.5	1545.8	1541.5	1247.2
9	3302.8	2462.9	2448.5	2432.6	2399.2	2169.7	2031.7	1858.7	1699.6	1541.6	1285.6
10	3446.8	2748.2	2713.9	2636.9	2404.0	2374.2	2161.3	1902.8	1819.1	1701.2	1542.2

Aynı prosedür simetrik gözeneklilik dağılımından oluşan bir çekirdeğe sahip ankastre- sabit mesneti sandviç FD kiriş için uygulanarak serbest titreşim frekans değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 11 adet farklı porozite katsayısı için Tablo 6 'da sunulmuştur.

Tablo 6. SMCR malzemeli Ankastr – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mo d	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	179.65	179.48	179.43	179.29	179.09	178.58	177.85	176.39	175.20	173.23	164.45
2	507.71	503.99	502.03	499.65	494.52	487.62	478.72	465.63	456.67	444.35	399.97
3	916.88	820.98	816.18	810.87	801.33	791.39	782.69	775.27	772.89	752.71	646.50
4	1366.8	905.77	899.83	893.00	878.09	859.18	835.57	802.76	781.21	770.75	694.45
5	1837.5	1345.7	1334.4	1321.7	1294.0	1259.70	1217.6	1160.2	1122.4	1065.6	774.01
6	2318.5	1642.0	1632.4	1621.7	1602.0	1582.80	1565.4	1438.7	1275.9	1105.9	866.61
7	2802.5	1804.9	1787.6	1768.1	1725.7	1673.80	1609.6	1526.1	1454.4	1312.6	958.07
8	2980.3	2273.3	2249.2	2222.2	2162.6	2025.10	1750.6	1550.5	1534.9	1427.4	1139.7
9	3231.7	2462.9	2448.5	2432.6	2289.3	2094.10	1969.0	1683.9	1545.8	1541.5	1248.6
10	3308.7	2737.3	2646.6	2531.5	2404.0	2283.00	2042.4	1902.5	1806.1	1641.1	1431.3

Üçüncü örnek için de aynı yaklaşım uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. SMCR malzeme durumu ve sabit – sabit mesnet koşulu için bulunan serbest titreşim frekansları Tablo 7’de listelenmiştir.

Tablo 7. SMCR malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	121.88	122.16	122.34	122.49	122.93	123.30	123.73	124.03	124.07	124.25	124.66
2	435.07	433.30	432.39	431.20	428.70	425.01	420.05	412.16	406.48	398.21	366.36

3	852.41	820.98	816.18	810.87	801.33	791.39	782.69	764.77	747.39	724.15	644.76
4	1318.0	844.26	839.91	834.81	823.69	809.21	790.87	775.27	772.89	770.75	650.26
5	1804.3	1300.1	1290.6	1279.8	1256.1	1226.5	1190.1	1140.5	1108.6	1061.3	772.59
6	2298.6	1642.0	1632.4	1621.7	1602.7	1582.8	1565.4	1406.0	1240.4	1067.3	774.01
7	2795.0	1774.9	1759.2	1741.6	1703.3	1656.5	1599.7	1524.3	1371.5	1190.3	933.68
8	2943.4	2256.6	2234.3	2209.4	2155.4	1992.2	1714.2	1538.5	1476.7	1416.4	1021.5
9	3085.1	2462.9	2448.5	2432.6	2252.3	2090.4	1849.2	1550.5	1545.8	1480.2	1226.6
10	3290.8	2725.5	2612.8	2496.2	2390.6	2129.0	2012.3	1851.9	1674.5	1541.5	1306.0

SMCR malzemenin son örneği olarak ankastre – serbest mesnetli FD sandviç kirişler ele alınarak serbest titreşim frekansları hesaplanıp Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. SMCR malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	44.48	44.65	44.76	44.87	45.14	45.42	45.79	46.20	46.44	46.63	46.75
2	247.68	246.81	246.36	245.75	244.46	242.46	239.67	235.01	231.52	226.30	204.98
3	604.92	410.49	408.09	405.43	400.66	395.69	391.34	387.63	386.44	385.37	387.00
4	1025.2	599.22	596.14	592.52	584.53	573.97	560.31	540.38	526.80	508.38	443.50
5	1479.1	1010.7	1002.8	993.86	974.02	948.83	916.92	871.79	841.45	800.66	647.33
6	1945.9	1231.5	1224.3	1216.3	1202.0	1187.1	1174.0	1162.9	1159.3	1094.8	808.05
7	2413.0	1453.3	1439.3	1423.6	1388.9	1345.5	1291.1	1214.9	1163.7	1156.1	876.53
8	2846.3	1906.2	1884.7	1860.4	1806.0	1736.3	1639.7	1465.5	1333.3	1177.2	1092.5
9	3095.9	2052.4	2040.4	2027.2	2003.3	1978.5	1862.8	1631.8	1529.5	1414.1	1148.7
10	3239.8	2356.2	2324.8	2289.1	2205.4	2080.2	1956.7	1755.3	1627.5	1486.4	1161.0

SMCR malzeme dağılımı için uygulanan prosedürün aynısı üniform porozite dağılımlı çekirdek katmana sahip olan FD sandviç kirişlerinin serbest titreşim frekanslarını elde etmek için kullanılmıştır. Gözenekliliğin serbest titreşim analizinin sonuçları üzerindeki etkileri incelenecektir. Bu malzeme durumu için de daha önce uygulanan ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest mesnet koşulları uygulanacaktır. İlk on serbest titreşim moduna ait doğal titreşim frekansları Tablo (9-12)'de verilmiştir.

Tablo 9. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	243.76	242.11	241.25	240.36	238.49	236.43	234.12	231.40	229.79	227.92	222.62
2	576.21	570.54	567.54	564.39	557.59	549.94	541.06	530.28	523.79	516.19	494.72
3	830.58	819.33	813.46	807.41	794.71	781.06	766.23	749.86	740.93	731.34	709.33
4	978.59	967.07	960.93	954.49	940.54	924.76	906.41	884.18	870.86	855.33	812.27
5	1416.4	1397.8	1387.9	1377.5	1354.9	1329.3	1299.6	1263.6	1242.1	1217.1	1148.0
6	1661.2	1638.7	1626.9	1614.8	1589.4	1562.1	1532.5	1499.7	1481.9	1462.7	1418.7
7	1876.4	1850.0	1835.9	1821.2	1789.1	1752.8	1710.6	1659.6	1629.2	1593.9	1497.0
8	2348.3	2313.5	2294.9	2275.3	2232.8	2184.4	2127.7	2057.7	2013.8	1956.7	1709.5
9	2491.7	2458.0	2440.4	2422.2	2384.1	2343.2	2298.7	2249.6	2181.7	2066.3	1871.0
10	2826.5	2782.7	2759.2	2734.5	2680.5	2618.8	2485.5	2290.8	2222.8	2194.0	2033.1

Tablo 10. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

M od	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	178.87	177.93	177.45	176.96	175.96	174.91	173.78	172.53	171.82	171.03	168.86
2	506.99	502.80	500.59	498.28	493.36	487.87	481.58	474.04	469.53	464.27	449.42
3	830.58	819.33	813.46	807.41	794.71	781.06	766.23	749.86	740.93	731.34	709.33
4	917.62	907.90	902.73	897.32	885.64	872.47	857.21	838.75	827.70	814.80	778.85
5	1370.0	1353.2	1344.3	1334.9	1314.7	1291.7	1265.1	1232.9	1213.7	1191.3	1129.4
6	1661.2	1638.7	1626.9	1614.8	1589.4	1562.1	1532.5	1499.7	1481.9	1462.7	1418.7
7	1843.8	1819.1	1805.9	1792.1	1762.1	1728.2	1688.7	1641.0	1612.6	1579.4	1487.8
8	2328.3	2295.1	2277.3	2258.6	2218.1	2172.2	2118.7	2053.6	2013.2	1937.0	1622.9
9	2491.7	2458.0	2440.4	2422.2	2384.1	2343.2	2298.7	2183.4	2071.4	1975.5	1831.8
10	2816.6	2774.0	2751.2	2727.0	2671.7	2550.9	2381.1	2249.6	2222.8	2193.0	1893.8

Tablo 11. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	121.19	120.75	120.53	120.31	119.90	119.52	119.18	118.90	118.80	118.73	118.72
2	433.84	430.98	429.50	427.96	424.74	421.23	417.32	412.77	410.11	407.03	398.47
3	830.58	819.33	813.46	807.41	794.71	781.06	766.23	749.86	740.93	731.34	709.33
4	852.17	844.31	840.14	835.80	826.47	816.03	804.02	789.58	780.95	770.89	742.74
5	1320.0	1305.2	1297.3	1289.1	1271.2	1251.1	1227.8	1199.6	1182.8	1163.1	1108.7
6	1661.2	1638.7	1626.9	1614.8	1589.4	1562.1	1532.5	1499.7	1481.9	1462.7	1418.7
7	1809.4	1786.5	1774.2	1761.4	1733.6	1702.3	1665.8	1621.8	1595.5	1564.9	1480.8

8	2307.1	2275.5	2258.6	2240.8	2202.3	2158.8	2108.3	2047.3	2010.9	1906.0	1586.5
9	2491.7	2458.0	2440.4	2422.2	2384.1	2343.2	2298.7	2146.9	2033.1	1968.7	1722.4
10	2807.1	2766.4	2744.6	2721.7	2668.8	2517.1	2345.7	2249.6	2169.9	2042.5	1853.2

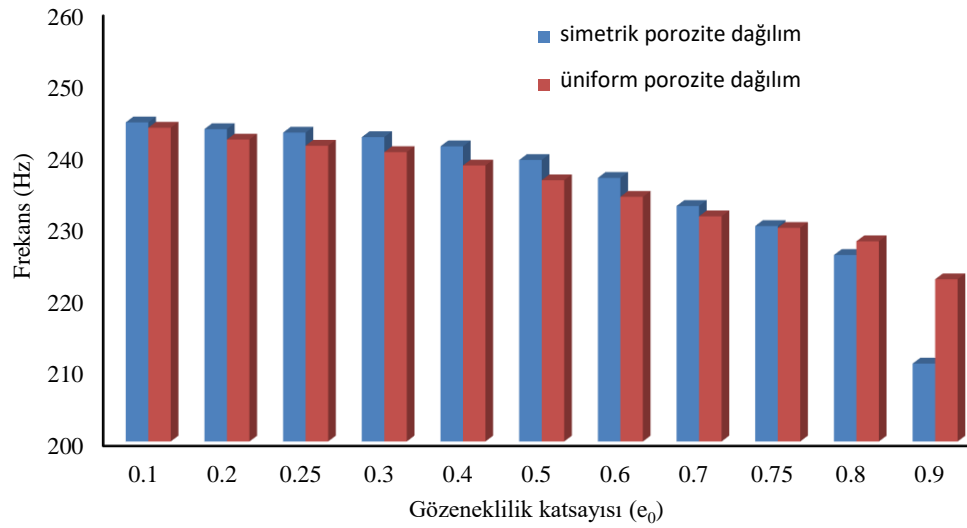
Tablo 12. Üniform malzemeli Ankastre – serbest mesnetli sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	44.20	44.07	44.00	43.95	43.84	43.76	43.71	43.71	43.74	43.80	44.07
2	246.92	245.37	244.56	243.73	241.99	240.10	238.00	235.55	234.12	232.46	227.75
3	415.29	409.67	406.73	403.71	397.35	390.53	383.11	374.93	370.46	365.67	354.66
4	604.73	599.25	596.35	593.33	586.83	579.55	571.16	561.05	554.99	547.91	527.98
5	1027.2	1015.5	1009.3	1002.8	988.79	972.91	954.43	931.99	918.51	902.73	858.50
6	1245.9	1229.0	1220.2	1211.1	1192.1	1171.6	1149.3	1124.8	1111.4	1097.0	1064.0
7	1484.2	1465.1	1454.8	1444.1	1420.7	1394.3	1363.5	1326.0	1303.4	1277.1	1203.3
8	1955.2	1927.3	1912.3	1896.6	1862.4	1823.3	1777.4	1720.8	1686.2	1645.0	1520.1
9	2076.5	2048.3	2033.7	2018.5	1986.8	1952.6	1915.6	1874.7	1852.3	1828.4	1728.2
10	2427.9	2390.0	2369.6	2348.1	2300.9	2246.4	2181.1	2097.5	2043.2	1972.1	1773.3

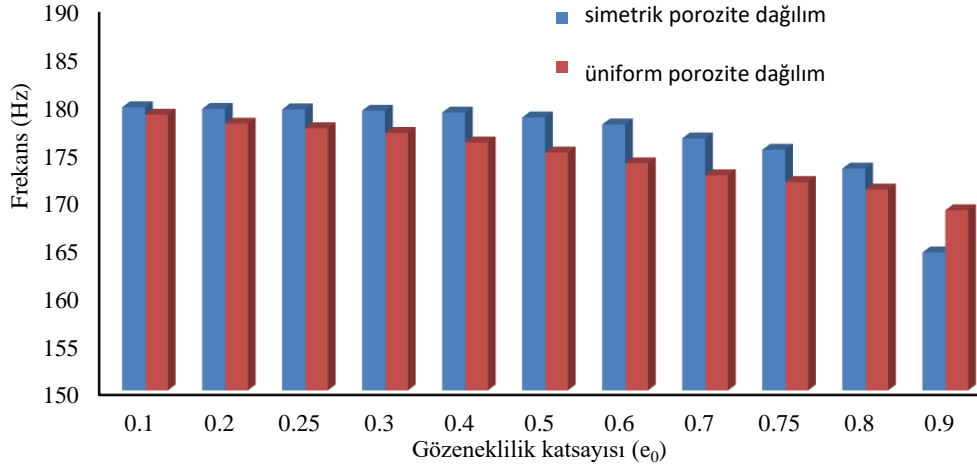
Yukarıda verilen Tablo (5-12)'de fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin serbest titreşim davranışı ile ilgili önemli sonuçlar gösterilmektedir. Gözeneklilik katsayısının doğal titreşim frekanslar üzerindeki etkisi verilen karşılaştırmalardan açıkça gözlemlenebilmektedir. Yukarıdaki örneklerin her birinde, e_0 için 11 adet farklı değer ele alınmıştır. Üniform gözenekli çekirdek kullanıldığı durumlarda e_0 oranı arttıkça doğal titreşim frekanslarının düştüğü görülmektedir. Ayrıca, SMCR gözeneklilik dağılımı kullanıldığında ankastre- ankastre ve ankastre-sabit mesnet durumları için porozite katsayısı arttıkça doğal titreşim frekanslarının azaldığı görülmüştür. Ancak sabit- sabit ve ankastre- serbest mesnet koşulları

kullandığında ise ilk serbest titreşim frekanslarını arttığı ve diğer mod frekanslarının ise düştüğü gözlemlenmiştir. Analizin genel incelemesinden, sonuçlar, beklenen kiriş davranışıyla iyi bir uyumluluk içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Beklenildiği gibi sınır koşullarının da FD gözenekli sandviç kirişlerin doğal titreşim frekansları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu da ortaya çıkmıştır. Tahmin edilebileceği gibi, doğal titreşim frekansların en yüksek değerleri ankastre- ankastre ve en düşük değerleri ise konsol kirişinde oluşmuştur.

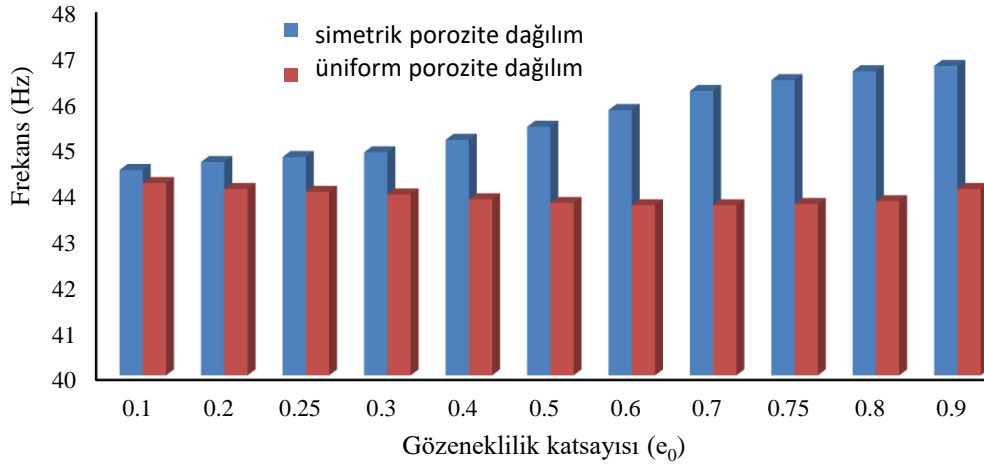
Bu bölümdeki amaçlarımızdan biri ise simetrik dağılım ve üniform porozite dağılım fonksiyonlarının fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin doğal titreşim frekanslarının üzerindeki etkisinin farkını tartışmaktır. İki farklı porozite dağılımının, söz konusu yapı elemanlarının serbest titreşim frekansları üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla Şekil (53-56)' ta karşılaştırmalar yapılmış olup grafik formunda sunulmuştur.



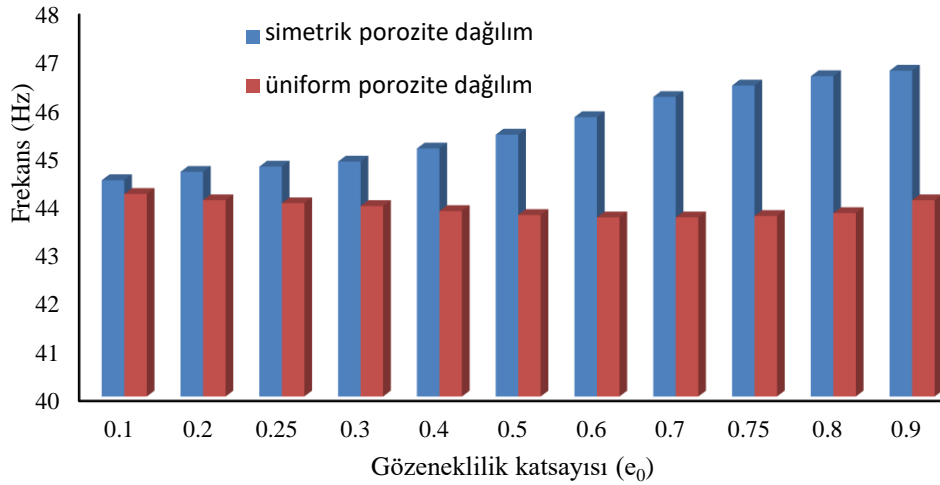
Şekil 53. Ankastre – Ankastre mesnteli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 54. Ankastre – Sabit mesnteli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 55. Sabit – Sabit mesnteli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 56. Ankastre – Serbest mesnteli FD sandviç kiriş için ilk on serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması

Şekil (53-56)'da verilen karşılaştırma grafiklerinden de görülebileceği gibi, çekirdek katmanının gözenekli malzeme dağılımı yapı elemanın serbest titreşim frekansları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 53 incelendiğinde ankastre – ankastre mesnetli çubukta e_0 değerinin 0.8'ten küçük olduğu durumlarda SMCR malzeme için elde edilen frekans değerlerinin üniform malzeme dağılımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 54'e göre ankastre – sabit mesnetli kirişte e_0 değerinin 0.9'dan büyük olduğu durumlarda üniform malzeme için elde edilen serbest titreşim frekans değerlerinin SMCR malzeme dağılımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil (55-56)'den de görüldüğü gibi sabit – sabit ve ankastre- serbest mesnetli FD sandviç kirişlerin ilk on serbest titreşim frekansları SMCR malzeme kullanıldığında üniform gözenekli malzemeli durumundan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Çözüm prosedürünü simetrik olmayan FD gözenekli kirişlere uygulanabilmek için, üst yüzey katmanı çelikten, çekirdek katmanı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli malzemeden ve alt yüzey katmanı alüminyumdan yapılan bir sandviç kiriş ele alınmıştır. Bu bölümde, geometrik özellikler ve E_1 ve ρ_1 değerleri önceki örneklerde olduğu gibi alınmış olup $E_2 = 70$ GPa ve $\rho_2 = 2700$ kg/m³ olarak kabul edilmiştir. Serbest titreşim frekansları hesaplanarak ankastre – ankastre FD kirişler için Tablo 13'te ankastre – sabit mesnetli sandviç kiriş için Tablo 14'te, ankastre – serbest çubuk için Tablo 15'te ve iki ucu sabit mesnetli kiriş için ise Tablo 16'te sunulmuştur.

Tablo 13. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	232.5	230.51	229.47	228.4	226.15	223.71	221.01	217.94	216.19	214.22	209.06
2	557.66	551.66	548.49	545.19	538.15	530.35	521.49	511.04	504.92	497.9	478.92
3	830.03	817.81	811.4	804.78	790.78	775.6	758.91	740.2	729.83	718.54	691.82

4	956.25	944.53	938.32	931.84	917.93	902.4	884.64	863.57	851.17	836.91	798.43
5	1393.5	1375	1365.1	1354.8	1332.7	1307.9	1279.4	1245.6	1225.7	1202.8	1141
6	1660.1	1635.6	1622.8	1609.6	1581.6	1551.2	1517.8	1480.4	1459.7	1437.1	1383.6
7	1854.8	1828.7	1814.9	1800.4	1769.2	1734.2	1694	1646.1	1618	1585.6	1498.4
8	2330.1	2296	2277.9	2258.9	2217.9	2172	2119.1	2056	2018.7	1975.8	1858.2
9	2490.1	2453.4	2434.2	2414.3	2372.4	2326.8	2276.7	2220.6	2189.5	2155.6	2075.5
10	2813.5	2771	2748.4	2724.7	2673.5	2615.9	2549.6	2470.3	2423.2	2368.6	2078.5

Tablo 14. Üniform malzemeli Ankastre – Sabit mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	169.45	168.17	167.52	166.84	165.44	163.95	162.35	160.59	159.62	158.56	155.94
2	487.16	482.45	479.99	477.43	472	466.04	459.36	451.59	447.09	441.97	428.32
3	830.03	817.81	811.4	804.78	790.78	775.6	758.91	740.2	729.83	718.54	691.82
4	891.71	881.56	876.2	870.61	858.65	845.37	830.26	812.42	801.96	789.97	757.67
5	1342.1	1325.1	1316.1	1306.7	1286.6	1264.1	1238.3	1207.7	1189.8	1169.1	1113.5
6	1660.1	1635.6	1622.8	1609.6	1581.6	1551.2	1517.8	1480.4	1459.7	1437.1	1383.6
7	1816.8	1792.2	1779.1	1765.4	1736	1703.1	1665.3	1620.4	1594	1563.6	1481.8

8	2304.3	2271.5	2254	2235.8	2196.5	2152.4	2101.7	2041.4	2005.8	1964.9	1854.2
9	2490.1	2453.4	2434.2	2414.3	2372.4	2326.8	2276.7	2220.6	2189.5	2155.6	1981.4
10	2797.8	2756.4	2734.3	2711.3	2661.5	2605.6	2541.2	2463.6	2415.3	2312.4	2075.5

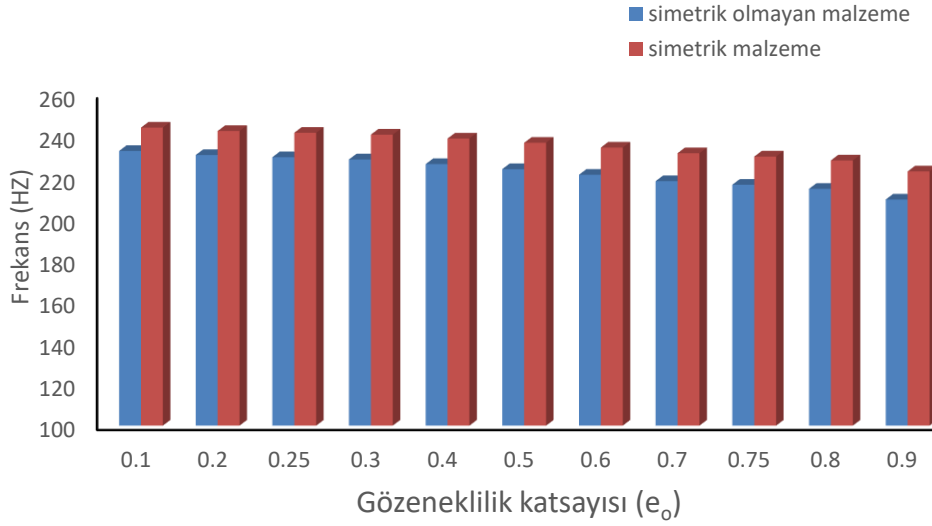
Tablo 15. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	41.439	41.189	41.063	40.937	40.682	40.426	40.173	39.926	39.809	39.7	39.527
2	235.08	233.14	232.14	231.1	228.93	226.6	224.04	221.15	219.51	217.69	212.97
3	415.02	408.9	405.7	402.39	395.39	387.8	379.45	370.1	364.91	359.27	345.91
4	583.4	577.44	574.3	571.05	564.11	556.47	547.84	537.74	531.86	525.15	507.14
5	1001.9	989.95	983.64	977.07	962.96	947.25	929.32	908.06	895.55	881.18	842.3
6	1245	1226.7	1217.1	1207.2	1186.2	1163.4	1138.4	1110.3	1094.7	1077.8	1037.7
7	1459.1	1440	1429.9	1419.2	1396.4	1370.9	1341.6	1306.7	1286.1	1262.4	1198.2
8	1934.5	1907.3	1892.8	1877.6	1844.9	1808.2	1765.9	1715.2	1685.1	1650.4	1554.9
9	2075.1	2044.5	2028.5	2012	1977	1939	1897.3	1850.5	1824.6	1796.4	1729.6
10	2416.6	2380.5	2361.2	2341.1	2297.4	2248.2	2191.2	2122.4	2081.1	2033	1895.8

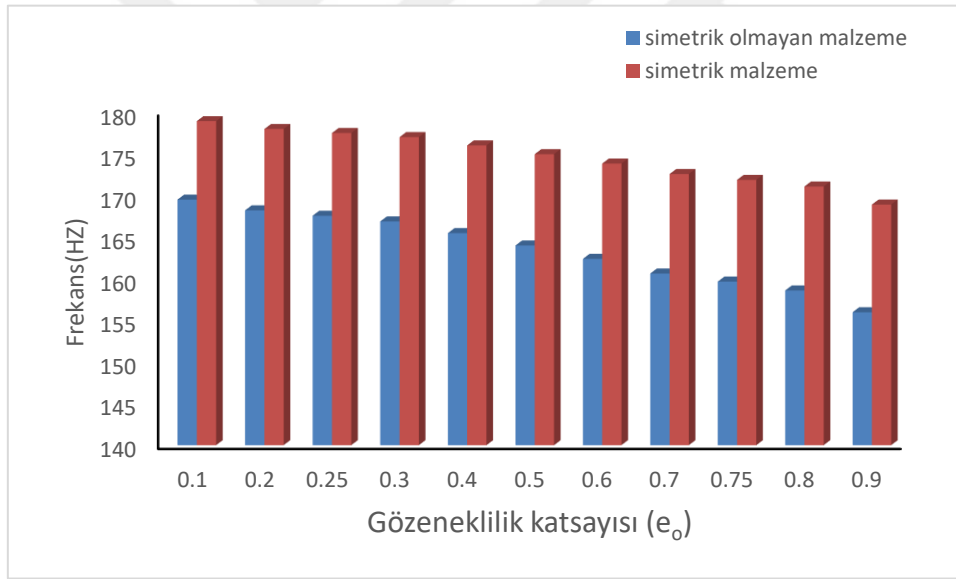
Tablo 16. Üniform malzemeli Sabit – Sabit mesnetli simetrik olmayan sandviç FD kirişi için elde edilen serbest titreşim frekans değerleri (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	114.01	113.27	112.89	112.51	111.73	110.94	110.12	109.28	108.85	108.42	107.52
2	413.66	410.16	408.33	406.45	402.51	398.25	393.56	388.24	385.23	381.86	373.15
3	822.82	814.28	809.79	804.78	790.78	775.6	758.91	740.2	729.83	718.54	691.82
4	830.03	817.81	811.4	805.12	795.17	784.21	771.83	757.34	748.9	739.28	713.54
5	1286.9	1271.6	1263.5	1255.1	1237.1	1216.9	1194	1166.9	1151	1132.8	1083.7
6	1660.1	1635.6	1622.8	1609.6	1581.6	1551.2	1517.8	1480.4	1459.7	1437.1	1383.6
7	1776.6	1753.5	1741.3	1728.5	1701	1670.2	1635.1	1593.3	1568.7	1540.5	1464.6
8	2277.2	2245.7	2229	2211.5	2173.8	2131.7	2083.3	2025.7	1991.8	1952.9	1848.3
9	2490.1	2453.4	2434.2	2414.3	2372.4	2326.8	2276.7	2220.6	2189.5	2155.6	1948.4
10	2781.5	2741.3	2719.9	2697.6	2649.4	2595.3	2533.2	2459.3	2412.1	2281.8	2073.1

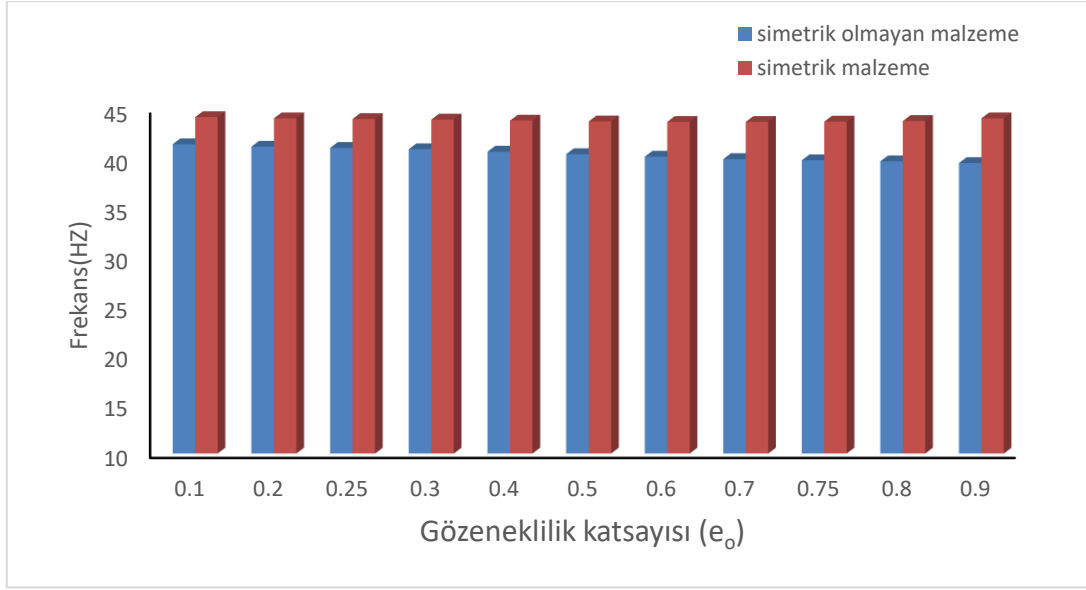
Tüm mesnet koşulları için simetrik katmanlı ve simetrik olmayan katmanlı FD sandviç kirişlerin birinci serbest titreşim frekansları Şekil (57-60)'ta karşılaştırılarak simetrik katmanlı durumunda 1. doğal frekanslarının daha yüksek olduğu gösterilmiştir.



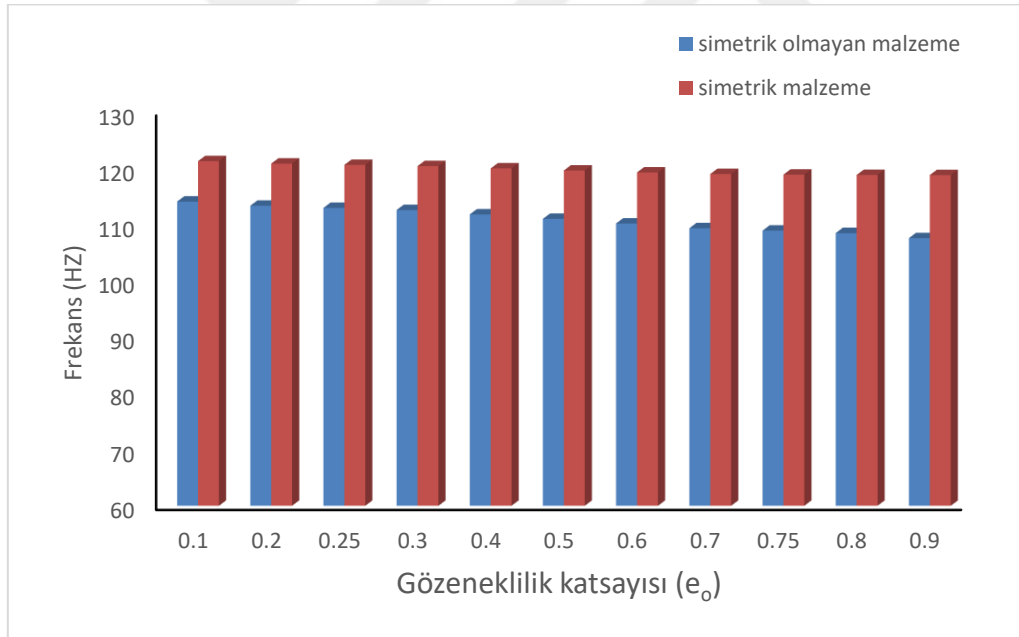
Şekil 57. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve iki ucu ankastre mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 58. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- sabit mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 59. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- serbest mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması



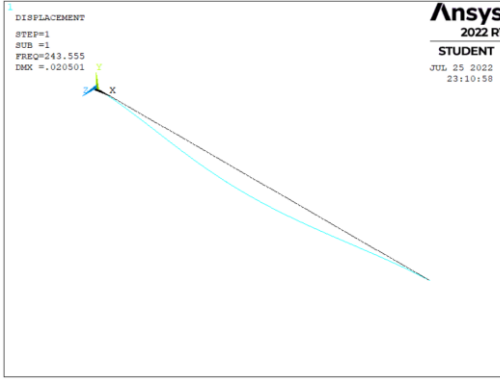
Şekil 60. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve iki ucu sabit mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için serbest titreşim frekans değerlerinin karşılaştırılması

3.2.1.1 Birinci Mod Şekilleri

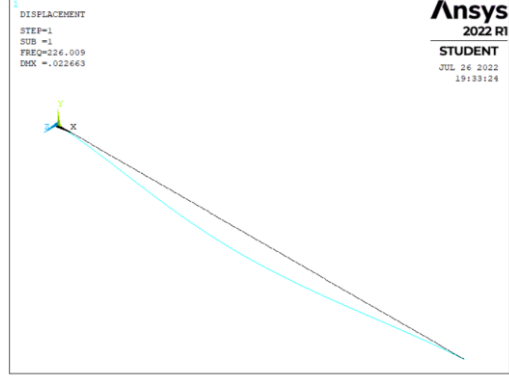
Tezin bu bölümünde çeşitli durumlar için birinci mod şekilleri elde edilecektir. Mod şekillerine ait titreşim genlik değerlerinin porozite katsayısına ve mesnet durumuna bağlı olarak hesaplanmış olup Tablo 17 ve Şekil (61-68) arasında sunulmuştur. Beklenildiği gibi porozite katsayısı arttıkça genlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek genlik değerleri konsol kirişinde ve en düşük genlik değerleri ise sabit – sabit mesnet durumlarında olduğu ortaya çıkmıştır.

Tablo 17. Birinci mod için titreşim genlik değerleri

e_0	Mesnet Türü			
	A – A	A – S	S – S	A- SR
0.1	0.020264	0.019479	0.018462	0.026036
0.2	0.020501	0.019712	0.018692	0.02636
0.3	0.020761	0.019967	0.018945	0.026717
0.4	0.021048	0.020248	0.019223	0.027112
0.5	0.021367	0.020558	0.019533	0.027551
0.6	0.021733	0.02091	0.019884	0.028053
0.7	0.022154	0.021306	0.020278	0.028624
0.75	0.022398	0.021527	0.020498	0.028947
0.8	0.022663	0.021755	0.020722	0.029285
0.9	0.023308	0.022188	0.021113	0.029955

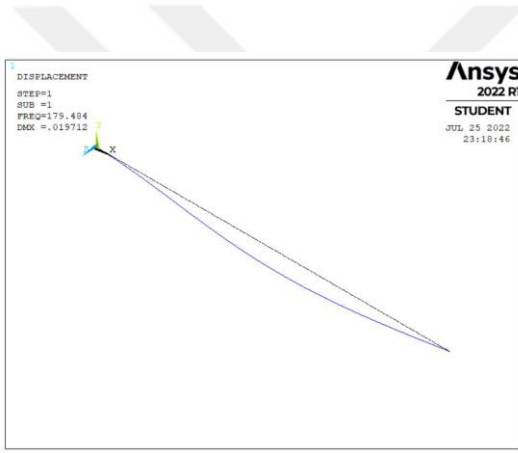


(a) 0.2

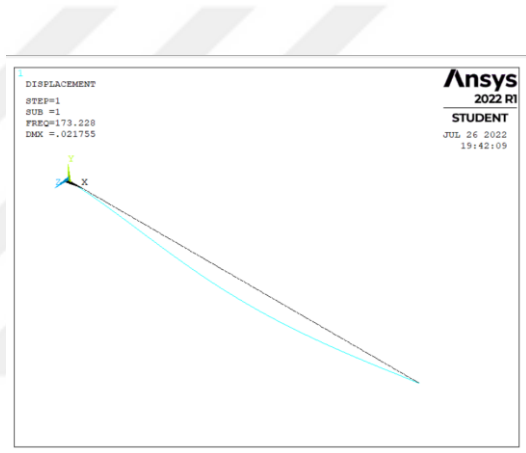


(b) 0.8

Şekil 61. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Ankastre mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli

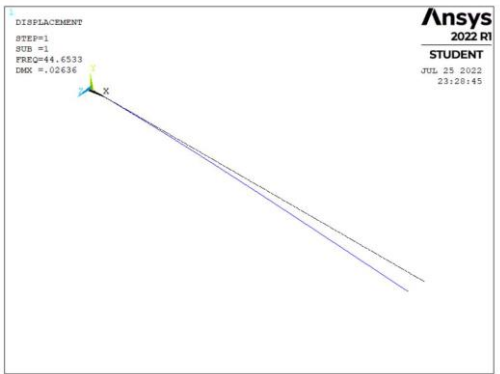


(a) 0.2

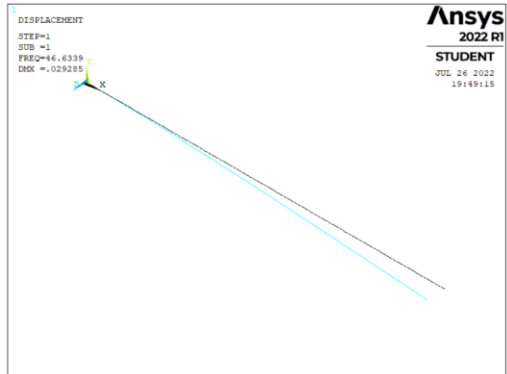


(b) 0.8

Şekil 62. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – sabit mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli

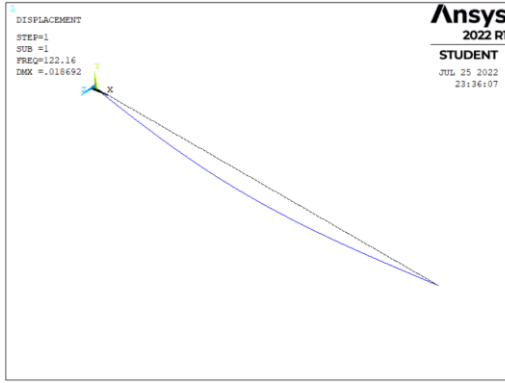


(a) 0.2

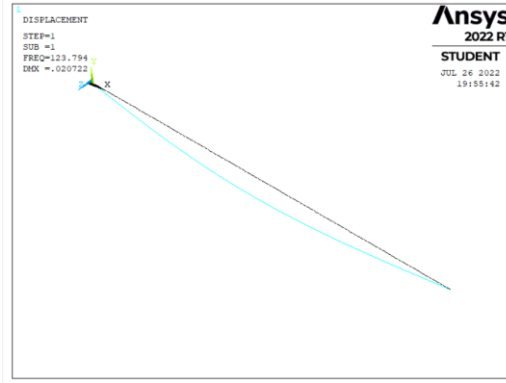


(b) 0.8

Şekil 63. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – serbest mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli

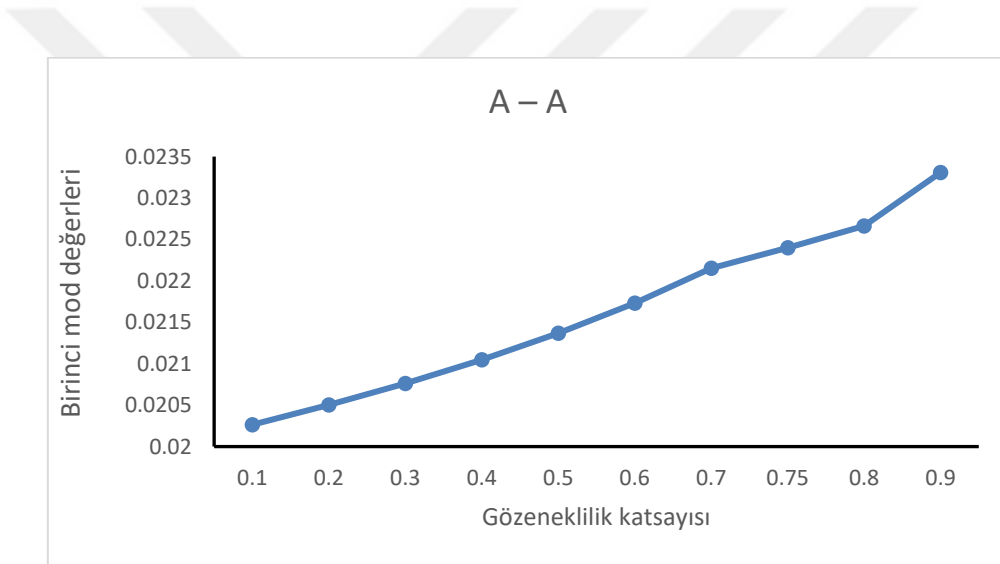


(a) 0.2

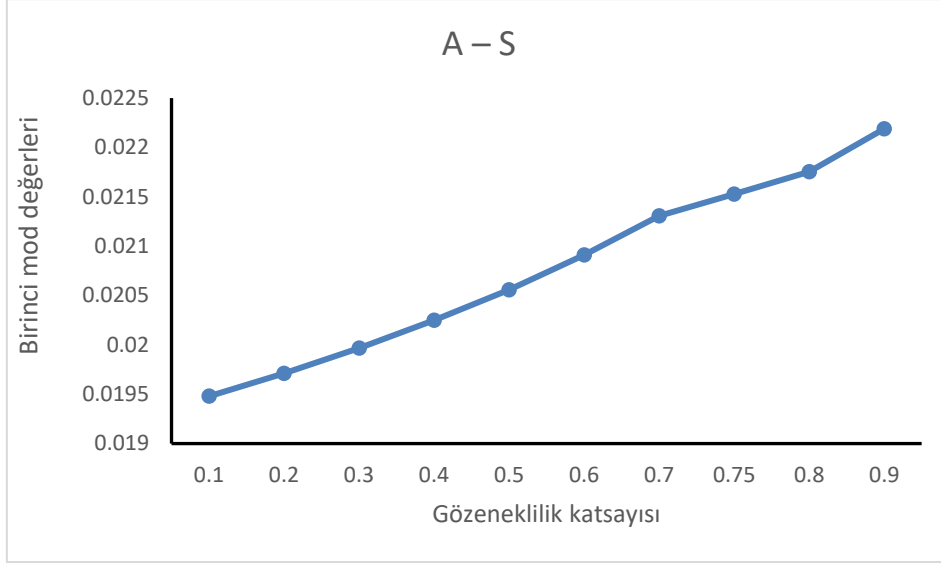


(b) 0.8

Şekil 64. Farklı e_0 değerleri için sabit – sabit mesnetli çubuğa ait birinci mod şekli



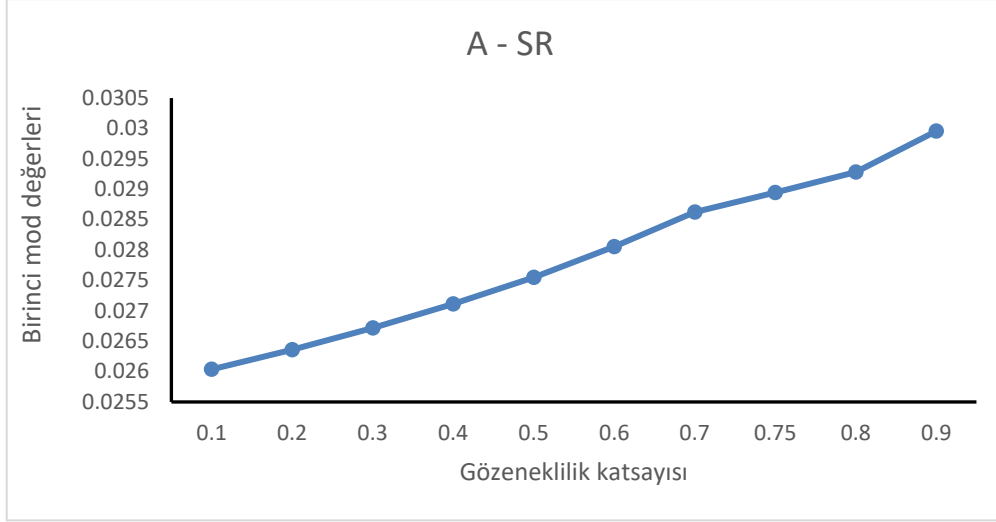
Şekil 65. Ankastre – Ankastre mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması



Şekil 66. Ankastre – sabit mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması



Şekil 67. Sabit – Sabit mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması



Şekil 68. Ankastre – serbest mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 1. Mod genliklerinin karşılaştırılması

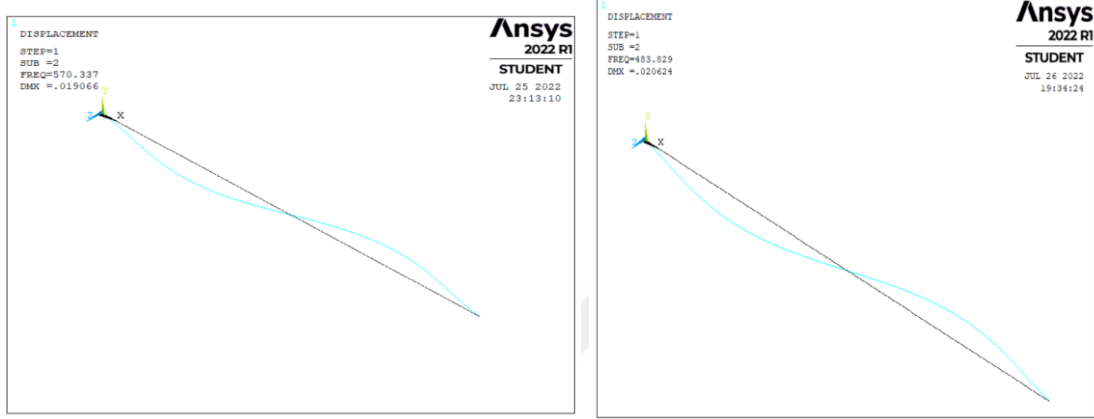
3.2.1.2 İkinci Mod Şekilleri

Tezin bu bölümünde ele alınan yapı elemanlarının ikinci mod şekilleri elde edilmiştir. İkinci moda ait genlik değerleri Tablo 18’de verilmiştir. Ankastre- ankastre, sabit – sabit, ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnet durumları ve farklı porozite katsayıları için çizilen 2. mod şekilleri Şekil 69-75 arasında verilmiş ve genlik değerleri karşılaştırılmıştır. Porozite katsayısı arttıkça 2. Moda ait genlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek genlik değerleri konsol kirişinde ve en düşük genlik değerleri ise sabit – sabit mesnetli kirişte oluşmuştur.

Tablo 18. İkinci mod için titreşim genlik değerleri

e_0	Mesnet Türleri			
	A – A	A – S	S – S	A- SR
0.1	0.018861	0.01939	0.018116	0.02411
0.2	0.019066	0.01962	0.018319	0.02428
0.3	0.019288	0.019871	0.018538	0.024447
0.4	0.019529	0.020146	0.018775	0.024599
0.5	0.019788	0.020448	0.019032	0.024721
0.6	0.020077	0.020795	0.019313	0.024784

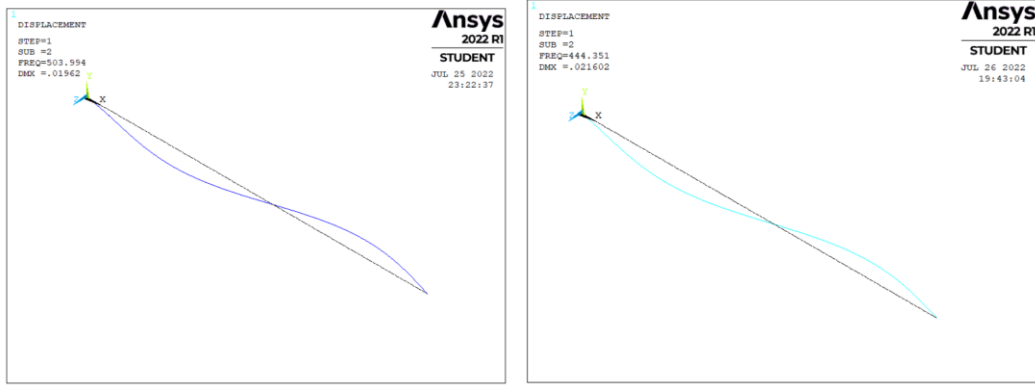
0.7	0.020373	0.021178	0.019605	0.024686
0.75	0.020517	0.021391	0.019755	0.024521
0.8	0.020624	0.021602	0.019886	0.02418
0.9	0.020229	0.021817	0.019911	0.021979



(a) 0.2

(b) 0.8

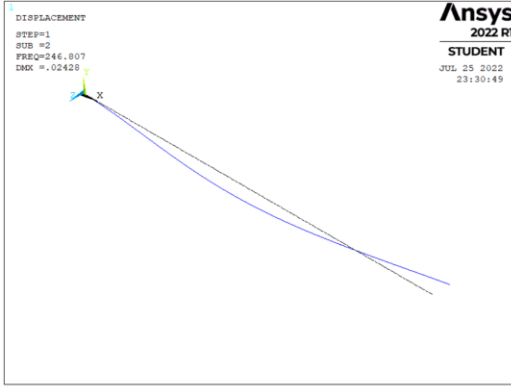
Şekil 69. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Ankastre mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli



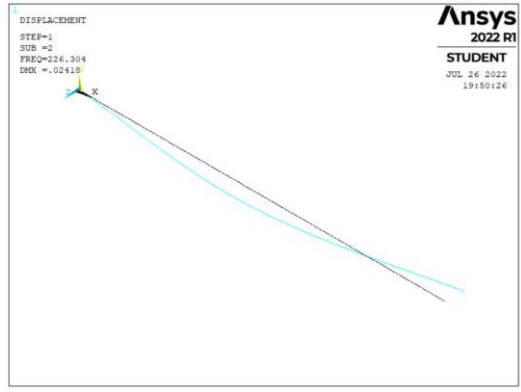
(a) 0.2

(b) 0.8

Şekil 70. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – sabit mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli

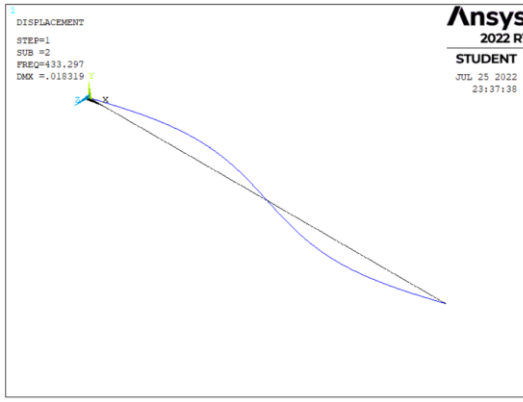


(a) 0.2

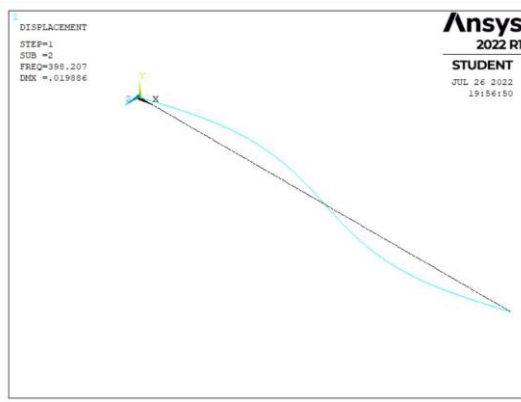


(b) 0.8

Şekil 71. Farklı e_0 değerleri için Ankastre – Serbest mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli



(a) 0.2

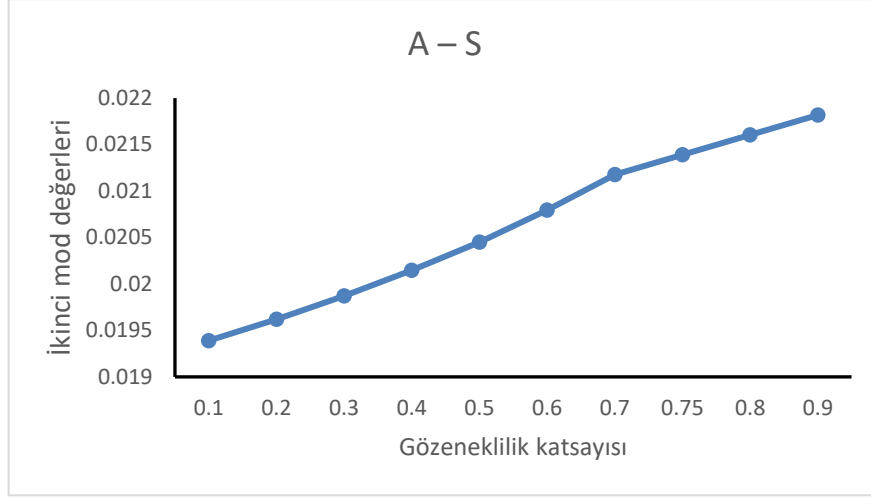


(b) 0.8

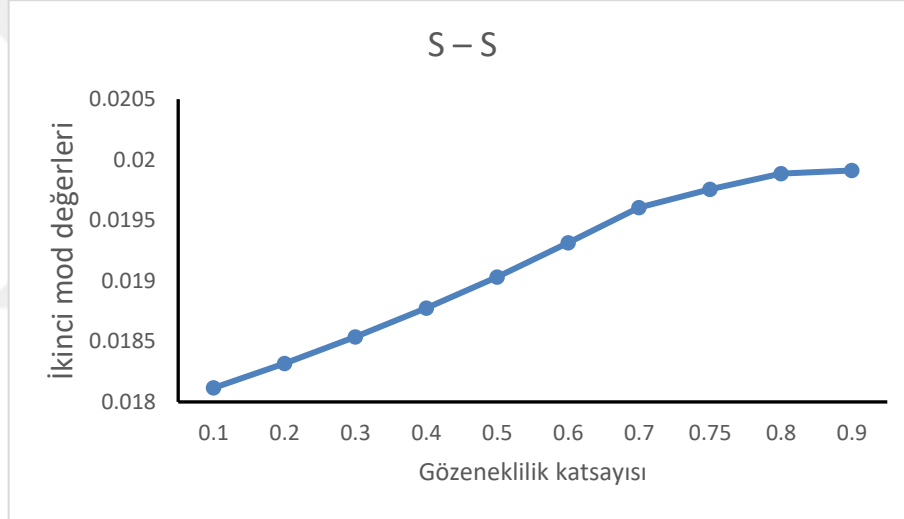
Şekil 72. Farklı e_0 değerleri için sabit – sabit mesnetli çubuğa ait ikinci mod şekli



Şekil 73. Ankastre – Ankastre mesnetli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması



Şekil 74. Ankastre – Sabit mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması



Şekil 75. Sabit – Sabit mesentli FD sandviç çubuğunun farklı e_0 değerleri için 2. Mod genliklerinin karşılaştırılması

3.2.2 PLANE183 Elemanı ile Serbest Titreşim Analizi

Tezin bu bölümünde düzlem gerilme prensibine dayalı PLANE183 elemanı kullanılarak ele alınan problemlerin serbest titreşim davranışı incelenmiştir. Çubuk kalınlık boyunca 36 tabakaya bölünmüştür. Simetrik tabakala durumunda en alt ve en üst dört tabakaya izotropik homojen (çelik) malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Çekirdek bölümünde yer alan 28 tabakanın malzeme özellikleri dışarıdan hesaplanarak ANSYS programında her tabakaya ayrı ayrı girilmiştir. Çözümler ankastre – ankastre ve ankastre – serbest mesnet koşulları için sırasıyla Tablo (19-20)'de verilmiştir.

Simetrik olmayan tabakalanma durumunda ise en üst dört katman çelik tanımlanırken en alt dört tabakaya ise alüminyumun malzeme özellikleri girilmiştir. Çekirdeği 28 tabakadan oluşan FD gözenekli malzemeli sandviç kirişin serbest titreşim frekans değerli yukarıdaki örnekte olduğu gibi iki ucu ankastre ve konsol çubuk için elde edilmiş olup sırasıyla Tablo (21-22)'de listelenmiştir.

Simetrik ve simetrik olmayan tabakalanma durumları için sonuçlar Şekil 76-77 karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalara göre simetrik tabakalı durumunda 1. doğal titreşim frekans değerlerinin asimetrik tabakalanmaya göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 19. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli simetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	245.49	243.95	243.15	242.32	240.57	238.67	236.53	234.02	232.54	230.81	225.89
2	582.42	577.2	574.43	571.53	565.31	558.31	550.22	540.43	534.54	527.64	508.13
3	833.3	822.07	816.22	810.18	797.5	783.87	769.05	752.68	743.73	734.12	711.93
4	992.31	981.75	976.13	970.24	957.52	943.17	926.51	906.34	894.25	880.14	840.84
5	1440.3	1423.3	1414.3	1404.8	1384.2	1361	1334.1	1301.4	1281.9	1259.2	1196.2
6	1661.3	1638.6	1626.7	1614.5	1588.8	1561	1530.8	1497.1	1478.5	1458.4	1411.1
7	1912.3	1888.2	1875.4	1861.9	1832.7	1799.6	1761.2	1714.6	1686.8	1654.3	1564.8
8	2397.6	2365.8	2348.8	2331	2292.2	2248.3	2197.2	2135.2	2098	2054.8	1935.6
9	2475	2440.2	2421.9	2403	2363	2319.7	2271.8	2217.7	2187.3	2153.8	2071
10	2889.7	2849.7	2828.3	2805.8	2756.9	2701.5	2636.9	2558.6	2511.8	2427.3	2207

Tablo 20. Üniform malzemeli Ankastre – serbest mesnetli simetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz))

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	44.302	44.19	44.139	44.092	44.011	43.957	43.94	43.983	44.038	44.128	44.489
2	248.23	246.94	246.28	245.61	244.23	242.78	241.22	239.49	238.51	237.41	234.39
3	416.08	410.49	407.58	404.57	398.27	391.49	384.14	376.03	371.61	366.86	355.97
4	609.92	605.35	602.95	600.47	595.18	589.35	582.73	574.88	570.22	564.8	549.57
5	1039.3	1029.5	1024.4	1019	1007.3	994.32	979.3	961.19	950.35	937.67	902.09
6	1245.6	1228.7	1219.9	1210.8	1191.7	1171.1	1148.7	1124	1110.4	1095.7	1061.6
7	1505.8	1489.5	1480.9	1471.8	1452.2	1430.2	1404.5	1373.5	1354.8	1333	1272.1
8	1987.9	1964	1951.3	1938	1909	1876.2	1837.9	1791.3	1763.2	1730.4	1638.6
9	2065.3	2036.7	2021.7	2006.2	1973.6	1938.3	1899.5	1856.1	1832	1805.6	1741.9
10	2472.2	2439.8	2422.4	2404.1	2364.3	2318.9	2265.7	2200.5	2161.1	2114.7	1983.5

Tablo 21. Üniform malzemeli Ankastre – Ankastre mesnetli asimetric tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

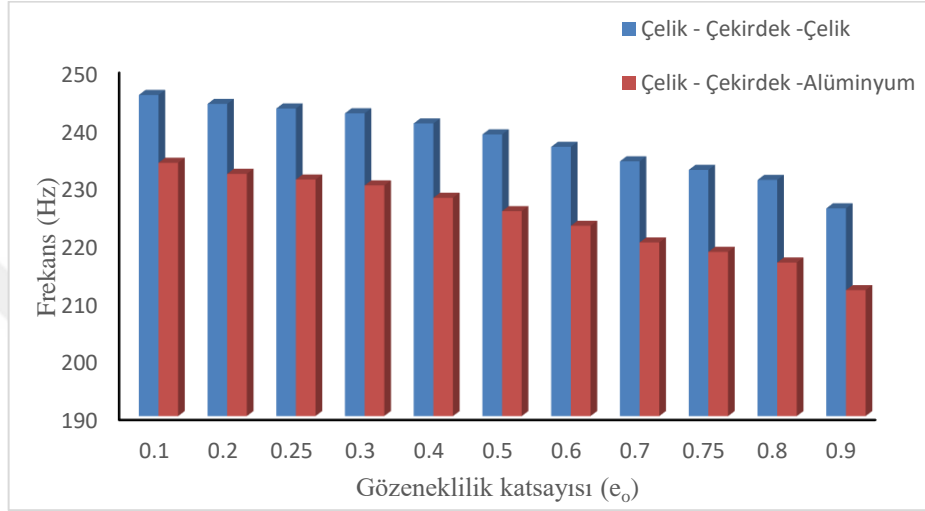
Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	233.76	231.86	230.87	229.86	227.72	225.41	222.88	220	218.37	216.53	211.76
2	562.31	556.66	553.68	550.59	544.01	536.74	528.52	518.88	513.25	506.81	489.44

3	832.71	820.51	814.12	807.5	793.54	778.38	761.72	743.02	732.65	721.37	694.54
4	966.8	955.85	950.05	944.02	931.09	916.72	900.34	880.98	869.61	856.56	821.35
5	1412.3	1395	1385.9	1376.3	1355.8	1332.9	1306.8	1275.8	1257.5	1236.6	1180
6	1660.9	1636.3	1623.4	1610.1	1581.9	1551.3	1517.5	1479.3	1458.1	1434.8	1378.6
7	1883.7	1859.5	1846.6	1833.2	1804.4	1772.1	1735.1	1691.2	1665.3	1635.6	1555.3
8	2370.7	2339	2322.1	2304.5	2266.5	2224	2175.1	2116.8	2082.3	2042.7	1935.4
9	2477.4	2440.1	2420.6	2400.3	2357.3	2310.3	2258.3	2199.3	2166	2129.2	2038.1
10	2866.8	2827.2	2806.2	2784.2	2736.7	2683.5	2622.2	2549.1	2505.9	2456	2321.1

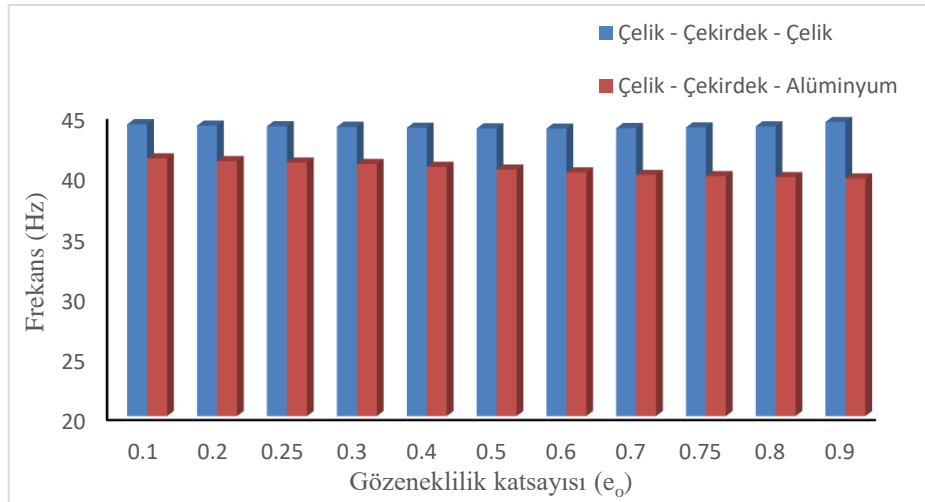
Tablo 22. Üniform malzemeli Ankastre – Serbest mesnetli asimetrik tabakalı sandviç FD kirişi için PLANE 183 ile elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz))

Mod	e_0										
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.8	0.9
1	41.461	41.227	41.109	40.991	40.755	40.522	40.294	40.079	39.981	39.894	39.787
2	235.54	233.79	232.89	231.97	230.05	228.01	225.82	223.41	222.08	220.62	217
3	415.78	409.7	406.52	403.22	396.26	388.72	380.43	371.15	366.01	360.43	347.22
4	585.84	580.54	577.76	574.89	568.83	562.22	554.87	546.39	541.52	536.01	521.47
5	1008.6	998.03	992.47	986.7	974.39	960.8	945.44	927.41	916.89	904.87	872.56
6	1245	1226.7	1217.1	1207.2	1186.2	1163.4	1138.3	1110.1	1094.4	1077.3	1036.3
7	1472.4	1455.4	1446.5	1437.1	1417.2	1395	1369.7	1339.8	1322.2	1302.1	1247.7

8	1956.1	1931.9	1919.1	1905.7	1876.8	1844.6	1807.7	1763.7	1737.7	1707.7	1626.4
9	2066.2	2035.4	2019.2	2002.5	1967	1928.5	1885.9	1837.8	1810.8	1781.3	1709
10	2447.3	2415.1	2398.1	2380.2	2341.7	2298.5	2248.8	2189.4	2154.2	2113.5	2002.5



Şekil 76. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- ankastre mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için PLANE183 ile elde edilen serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 77. Simetrik ve simetrik olmayan tabakalı ve ankastre- serbest mesnetli FD üniform gözenekli sandviç kiriş için PLANE183 ile elde edilen serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması

SONUÇLAR

Bu tezde, “ANSYS APDL software – 2022 student version” programı kullanılarak Timoshenko kiriş teorisine dayalı BEAM189 elemanı ve düzlem gerilmeye dayalı PLANE183 elemanı yardımıyla fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Tezin bulguları ve sonuçları, statik ve dinamik analizler olarak için iki ana bölüme ayrılmıştır.

Statik analiz için, gözeneklilik katsayısının FD sandviç kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmış olup sonuçlar çeşitli sınır koşulları ve malzeme indeksleri için elde edilmiştir. Araştırmada sandviç kirişlerin çekirdek tabakası için simetrik ve üniform olmak üzere iki tür gözeneklilik dağılımı ele alınmıştır. Gözeneklilik, sandviç kirişlerin ağırlığını azaltmaktadır ancak bu yapı elemanlarının mukavemet dayanımını da düşürmektedir. Sonuçlar, maksimum düşey yer değiştirme değerlerinin gözeneklilik katsayıları ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir. Gözeneklilik katsayısının değerinin artırılmasıyla düşey yer değiştirmelerin de arttığı görülmüştür. Çekirdekte tabakasının FD gözenekli malzemelerinin simetrik ve üniform dağılımları karşılaştırıldığında, e_0 katsayısının 0,9'dan küçük değerleri için elde edilen düşey deplasman değerlerinin üniform gözenekli malzeme durumunda daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. e_0 değeri 0,9'dan büyük olduğunda ise simetrik malzemeli kirişlerde oluşan düşey deplasman değerlerinin daha büyük olduğu bulunmuştur.

Bu araştırmada, von-Mises gerilmesinin dağılımının FD gözenekli sandviç kirişlerin çekirdek tabakasında kullanılan gözenek dağılımına ve gözeneklilik katsayısına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar, gözeneklilik dağılım tipinin ve mesnet tiplerinin FD gözenekli sandviç kirişlerin von Mises gerilme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ankastre -Serbest kirişlerin en yüksek von Mises gerilimine sahip olduğu, Ankastre - Ankastre kirişin ise en düşük değere sahip olduğu belirtilmiştir. Simetrik malzeme yapısal ilişkisi (SMCR) için von Mises gerilme değerlerinin, üniform gözeneklilik dağılımları için elde edilen değerlerden daha düşük olduğu bulunmuştur.

Çekirdek tabakasının gözeneklilik dağılım tipi, FD sandviç kirişlerin dönme açıları üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. SMCR malzeme dağılımı için elde edilen dönme açılarının üniform gözenekli malzeme dağılımına ait hesaplanan dönme açılarından daha

küçük olduğu görülmüştür. Ankastre - Ankastre mesnet durumu için dönme açıları minimum iken konsol kiriş için bu değerler maksimum olmaktadır

Benzer şekilde porozite derecelendirme fonksiyonu birinci asal gerilmelerinin dağılımına da önemli ölçüde etki etmektedir. Simetrik gözeneklilik dağılımı için elde edilen birinci asal gerilme değerleri üniform dağılım durumuna göre daha düşük olmaktadır. Mesnetleme durumu karşılaştırıldığında ise en yüksek birinci asal gerilme değerleri konsol kirişinde en düşük gerilmeler ise ankastre – ankastre mesnetli çubukta oluşmaktadır.

Bu tezde FD gözenekli sandviç kirişlerin serbest titreşim davranışı da sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Statik analiz aşamasında olduğu gibi dinamik analizlerde de birinci mertebeden kayma deformasyon etkisi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda porozite katsayısının, mesnet durumunun ve çekirdek tabakasının gözenek dağılımının serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenerek aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir

1. Çekirdek tabakasında üniform gözenek dağılımı olan derecelendirilmiş malzeme kullanıldığında porozite katsayısının ile serbest titreşim frekanslarının ters orantılı olduğu bulunmuştur. Porozite katsayısı arttıkça serbest titreşim frekanslarının düştüğü gözlemlenmiştir
2. FD gözenekli sandviç kirişin çekirdek tabakasında simetrik dağılımı olan malzeme kullanıldığında ankastre – ankastre ve ankastre – sabit mesnetli durumlarda malzeme gözeneklilik katsayısı arttıkça serbest titreşim frekansların düştüğü görülmüştür. Sabit – sabit mesnetli ve konsol çubuklarda ise porozite katsayısı arttıkça birinci doğal titreşim frekanslarında artış ve diğer modlara ait titreşim frekanslarında ise düşüş olduğu ortaya çıkmıştır.
3. En yüksek titreşim frekansları iki ucu ankastre mesnetli çubukta oluşurken en düşük doğal titreşim frekansları ise konsol kirişlerinde oluşmuştur.
4. Porozite dağılımının fonksiyonu serbest titreşim davranışını önemli ölçü etkilemektedir.

5. İki ucu sabit mesnetli ve konsol çubukların çekirdek tabakasında simetrik gözenekli malzeme dağılımı için elde edilen serbest titreşim frekansların üniform gözenekli malzeme durumu için hesaplanan değerlerden daha yüksek olduğu bulunmuştur.
6. İki ucu ankastre mesnetli çubuklar ve ankastre – sabit mesnetli kirişler için ise e_0 değeri 0.8'den büyük olduğunda, üniform gözenekli malzeme dağılımı için elde edilen serbest titreşim analiz sonuçlarının simetrik porozite dağılımının sonuçlarına göre daha büyük değerler almaktadır.
7. Simetrik (çelik – FD çekirdek – çelik) ve asimetrik (çelik – FD çekirdek – alüminyum) tabakalanma durumu için de analizler yapılmıştır. Tüm mesnetleme koşulları için simetrik tabakalı sandviç kirişlerin serbest titreşim frekansları daha büyük değerler almıştır. Bunun sebebi ise alt yüzey tabakasında kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin (elastite modülü, kütleli yoğunluk, poisson oranı) daha yüksek olmasıdır.
8. Düzlem gerilme prensibine dayalı PLANE183 elemanı kullanılarak simetrik (çelik – FD çekirdek – çelik) ve asimetrik (çelik – FD çekirdek – alüminyum) tabakalanma durumu için yeniden analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçların BEAM189 elemanı ile elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. En yüksek titreşim frekansları iki ucu ankastre mesnetli çubukta ve en düşük frekanslar ise konsol kirişte bulunmuştur.
9. Birinci ve ikinci mod şekillerine ait genlik değerleri ile porozite katsayılarının doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm mesnetleme durumları için porozite katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin de arttığı anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ai, Q., & Weaver, P. M. (2017). 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.
- 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.
- Apetre, N. A., Sankar, B. V., & Ambur, D. R. (2008). Analytical modeling of sandwich beams with functionally graded core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 10(1), 53-74.
- Bauchau, O. A., & Craig, J. I. (2009). Euler-Bernoulli beam theory. *Structural analysis*, 173-221.
- Bui, T. Q., Khosravifard, A., Zhang, C., Hematiyan, M. R., & Golub, M. V. (2013). Dynamic analysis of sandwich beams with functionally graded core using a truly meshfree radial point interpolation method. *Engineering structures*, 47, 90-104.
- Canonsburg, T. D. ANSYS Mechanical APDL Element Reference. vol, 15317, 724-746.
- 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.
- 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.
- Doori, S., & Noori, A. R. (2021). Finite element approach for the bending analysis of castellated steel beams with various web openings. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 38-49.

- Dweib, M. A., Hu, B., O'donnell, A., Shenton, H. W., & Wool, R. P. (2004). All natural composite sandwich beams for structural applications. *Composite structures*, 63(2), 147-157.
- Ebrahimi, F., & Jafari, A. (2016). A higher-order thermomechanical vibration analysis of temperature-dependent FGM beams with porosities. *Journal of Engineering*, 2016.
- Erhunmwun, I. D., & Ikponmwosa, U. B. (2017). Review on finite element method. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 21(5), 999-1002.
- Ferreira, A. J. M., Carrera, E., Cinefra, M., Roque, C. M. C., & Polit, O. (2011). Analysis of laminated shells by a sinusoidal shear deformation theory and radial basis functions collocation, accounting for through-the-thickness deformations. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1276-1284.
- George, T., Deshpande, V. S., & Wadley, H. N. (2013). Mechanical response of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 47, 31-40.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press
- Güler, M., & Sadri, Ş. E. N. (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Isaac, M. D. (2000). Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams. *Compos Sci Technol*, 60, 2455-2463.
- Jin, C., & Wang, X. (2015). Accurate free vibration analysis of Euler functionally graded beams by the weak form quadrature element method. *Composite Structures*, 125, 41-50.
- Kadoli, R., Akhtar, K., & Ganesan, N. (2008). Static analysis of functionally graded beams using higher order shear deformation theory. *Applied mathematical modelling*, 32(12), 2509-2525.
- Kahrobaiyan, M. H., Rahaeifard, M., Tajalli, S. A., & Ahmadian, M. T. (2012). A strain gradient functionally graded Euler–Bernoulli beam formulation. *International Journal of Engineering Science*, 52, 65-76.
- Kampner, M., & Grenestedt, J. L. (2008). On using corrugated skins to carry shear in sandwich beams. *Composite Structures*, 85(2), 139-148.
- Karamanlı, A. (2017). Bending behaviour of two directional functionally graded sandwich beams by using a quasi-3d shear deformation theory. *Composite structures*, 174, 70-86

- Keller, T., Haas, C., & Vallée, T. (2007). Function-integrated GFRP sandwich roof structure. In Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS2007), Hong Kong, China (No. CONF, pp. 571-576).
- Khurmi, R. (2005). Theory of Machines, New Dehli, S. Chand & Co. Ltd.
- Mahfuz, H., Islam, M. S., Rangari, V. K., Saha, M. C., & Jeelani, S. (2004). Response of sandwich composites with nanophased cores under flexural loading. *Composites Part B: Engineering*, 35(6-8), 543-550.
- Manalo, A. (2013, January). Fibre reinforced polymer composites sandwich structure: Recent developments and applications in civil infrastructure. In *Proceedings of the 2013 International Research Conference on Innovations in Engineering, Science and Technology (IRCIEST 2013)*. University of Southern Queensland.
- Mechab, I., Mechab, B., Benaissa, S., Serier, B., & Bouiadjra, B. B. (2016). Free vibration analysis of FGM nanoplate with porosities resting on Winkler Pasternak elastic foundations based on two-variable refined plate theories. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38, 2193-2211.
- Neves, A. M. A., Ferreira, A. J. M., Carrera, E., Cinefra, M., Roque, C. M. C., Jorge, R. M. N., & Soares, C. M. (2013). Static, free vibration and buckling analysis of isotropic and sandwich functionally graded plates using a quasi-3D higher-order shear deformation theory and a meshless technique. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 657-674.
- Nguyen, T. K., Nguyen, T. T. P., Vo, T. P., & Thai, H. T. (2015). Vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich beams by a new higher-order shear deformation theory. *Composites Part B: Engineering*, 76, 273-285.
- Nguyen, T. K., Vo, T. P., & Thai, H. T. (2013). Static and free vibration of axially loaded functionally graded beams based on the first-order shear deformation theory. *Composites Part B: Engineering*, 55, 147-157.
- Njim, E. K., Al-Waily, M., & Bakhy, S. H. (2021). A review of the recent research on the experimental tests of functionally graded sandwich panels. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(3), 420-441.
- 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., & Temel, B. (2020). On the vibration analysis of laminated composite parabolic arches with variable cross-section of various ply stacking sequences. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(19), 1658-1672.
- Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2019). Dairesel Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Laplace Uzayında 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., Aslan, T. A., & Temel, B. (2021). Dynamic analysis of functionally graded porous beams using complementary functions method in the Laplace domain. *Composite Structures*, 256, 113094.
- 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.
- Omar, T. (2008). Multi-pultrusion fibre composite truss systems for deployable shelters (Doctoral dissertation, University of Southern Queensland).
- Petras, A. (1999). Design of sandwich structures (Doctoral dissertation, University of Cambridge)
- Prasad, M. S., Reddy, P. S., Manoj, M., & Murthy, N. G. (2014). Analysis of sandwich beam. *International Journal of Science Engineering and Advance Technology*, 2(12), 901-908.
- Primi, S., Areiza, M., Bansal, A., & Gonzalez, A. (2009, July). New design and construction of road bridge in composites materials in Spain: Sustainability applied to civil works. In *Proceeding of the 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*.
- Rao, S. S. (2007). Vibration of continuous systems: John wiely & sons. New Jersey.
- 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. *Composites Science and Technology*, 61(5), 689-696.
- Sayyad, A. S., & Ghugal, Y. M. (2019). Modeling and analysis of functionally graded sandwich beams: A review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(21), 1776-1795..
- Senjanović, I., Vladimir, N., Hadžić, N., & Tomić, M. (2016). New first order shear deformation beam theory with in-plane shear influence. *Engineering Structures*, 110, 169-183.
- Shahba, A., Attarnejad, R., & Hajilar, S. (2013). A mechanical-based solution for axially functionally graded tapered Euler-Bernoulli beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 20(8), 696-707.

- Şimşek, M. (2009). Static analysis of a functionally graded beam under a uniformly distributed load by Ritz method. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3), 1-11.
- Şimşek, M., & Aydın, M. (2017). Size-dependent forced vibration of an imperfect functionally graded (FG) microplate with porosities subjected to a moving load using the modified couple stress theory. *Composite Structures*, 160, 408-421.
- Şimşek, M., & Kocatürk, T. (2009). Free and forced vibration of a functionally graded beam subjected to a concentrated moving harmonic load. *Composite Structures*, 90(4), 465-473.
- Sina, S. A., Navazi, H. M., & Haddadpour, H. (2009). An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams. *Materials & Design*, 30(3), 741-747.
- Singh, A. K., Cao, L., Ma, J., Seo, J., Bakis, C. E., Zhang, Y., ... & Rahn, C. D. (2015). Design, manufacture and test of a novel structural battery based on sandwich construction. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 17(6), 666-690.
- 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.
- Thai, H. T., & Choi, D. H. (2013). A simple first-order shear deformation theory for the bending and free vibration analysis of functionally graded plates. *Composite Structures*, 101, 332-340.
- Thai, H. T., Vo, T. P., Bui, T. Q., & Nguyen, T. K. (2014). A quasi-3D hyperbolic shear deformation theory for functionally graded plates. *Acta Mechanica*, 225, 951-964.
- Trinh, L. C. (2017). *Behaviours of functionally graded sandwich micro-beams and plates*. University of Northumbria at Newcastle (United Kingdom).
- Van Vinh, P. (2021). Static bending analysis of functionally graded sandwich beams using a novel mixed beam element based on first-order shear deformation theory. *Forces in Mechanics*, 4, 100039.
- Venkataraman, S., & Sankar, B. (2001). Analysis of sandwich beams with functionally graded core. In *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference* (p. 1281).
- 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.
- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., & Lee, J. (2015). Static behaviour of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D theory. *Composites Part B: Engineering*, 68, 59-74.

- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., & Lee, J. (2015). Static behaviour of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D theory. *Composites Part B: Engineering*, 68, 59-74.
- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Maheri, A., & Lee, J. (2014). Finite element model for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams based on a refined shear deformation theory. *Engineering structures*, 64, 12-22.
- Wadley, H. N. (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31-68.
- Wang, E., Gardner, N., & Shukla, A. (2009). The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores. *International Journal of Solids and Structures*, 46(18-19), 3492-3502.
- Wang, Q., & Quek, S. T. (2000). Flexural vibration analysis of sandwich beam coupled with piezoelectric actuator. *Smart Materials and Structures*, 9(1), 103.
- Wattanasakulpong, N., & Eiadtrong, S. (2022). Transient Responses of Sandwich Plates with a Functionally Graded Porous Core: Jacobi–Ritz Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2350039.
- Wattanasakulpong, N., & Ungbhakorn, V. (2014). Linear and nonlinear vibration analysis of elastically restrained ends FGM beams with porosities. *Aerospace Science and Technology*, 32(1), 111-120.
- Weeger, O., Wever, U., & Simeon, B. (2013). Isogeometric analysis of nonlinear Euler–Bernoulli beam vibrations. *Nonlinear Dynamics*, 72, 813-835.
- Wu, H., Yang, J., & Kitipornchai, S. (2020). Mechanical analysis of functionally graded porous structures: A review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(13), 2041015.
- Wu, H., Yang, J., & Kitipornchai, S. (2020). Mechanical analysis of functionally graded porous structures: A review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(13), 2041015.
- Yang, Y., Lam, C. C., Kou, K. P., & Iu, V. P. (2014). Free vibration analysis of the functionally graded sandwich beams by a meshfree boundary-domain integral equation method. *Composite Structures*, 117, 32-39.
- Yim, J. H., Cho, S. Y., Seo, Y. J., & Jang, B. Z. (2003). A study on material damping of 0 laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer. *Composite structures*, 60(4), 367-374.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SURA KAREEM ABBAS AL-ITBI

Uyruğu : IRAQI

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Babil Üniversitesi	2007
Lise	AL-Daghara Kız lise	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2021	Bir devlet kurumunda Irak'ta	İnşaat mühendis olarak çalışırım

Yabancı Dil

Arapça: Ana dili

İngilizce: orta

Türkçe: Orta

