T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

EKSENEL DÖNEL SİMETRİK HETEROJEN PLAKLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE LAPLACE UZAYINDA DİNAMİK ANALİZİ

Doktora Tezi

Silda Ghazi Mohammed DOORI

Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2024

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Silda Ghazi Mohammed DOORI

Tezin Dili **:** Türkçe

Tezin Adı **:** Eksenel Dönel Simetrik Heterojen Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Laplace Uzayında Dinamik Analizi

Enstitü **:** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı **:** İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Türü **:** Doktora

Tezin Tarihi **:** 24.06.2024

Sayfa Sayısı **:** 200

Tez Danışmanları **:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

Dizin Terimleri **:** Eksenel Dönel Simetrik Plak, Fonskiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), Dairesel Plaklar, Halka Plaklar, Titreşim, Sonlu Eleman Yöntemi, Laplace Dönüşümü, Kelvin Sönüm Modeli

Türkçe Özet **:** Bu tezin temel amacı, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeli (FDM) eksenel dönel simetrik plakların statik ve zorlanmış titreşimi teorik olarak incelenmektir. Malzeme özellikleri izotrop, lineer viskoelastik veya elastik olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, FD plağın malzeme özelliği kalınlık yönünde sürekli olarak değişmektedir. Statik yükleme durumunda Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli (FDG) malzemelerden yararlanılırken, dinamik durumda ise kalınlık boyunca FD malzemeler kullanılmıştır. Bu araştırmanın özgünlüğü, kuadratik dörtgen elemanlar kullanılarak hem FDG plakların

statik davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile hem de FDM'li eksenel dönel simetrik plakların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışının SEY ile Laplace uzayında ilk defa ele alınmasıdır. Bu çalışmanın sonuçları, yayınlanmış literatür ve SEY paket programı sonuçları ile doğrulanmıştır. Sunulan modelin sonuçları ile farklı yöntemlerin sonuçlarının arasında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

Dağıtım Listesi **:** 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

Silda Ghazi Mohammed DOORI

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

EKSENEL DÖNEL SİMETRİK HETEROJEN PLAKLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE LAPLACE UZAYINDA DİNAMİK ANALİZİ

Doktora Tezi

Silda Ghazi Mohammed DOORI

Danışman
Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2024

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.

Silda Ghazi Mohammed DOORI

…/…/2024

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Silda Ghazi Mohammed DOORI' nın Eksenel Dönel Simetrik Heterojen Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Laplace Uzayında Dinamik Analizi adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan	*Prof. Dr. Beytullah TEMEL*
Üye	*Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN*
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI* (Danışman)
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Aylin Ece KAYABEKİR*
Üye	*Dr. Öğr. Üyesi Ali ETEMADI*

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

... / ... / 20..

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu tezin temel amacı, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeli (FDM) eksenel dönel simetrik plakların statik ve zorlanmış titreşimi teorik olarak incelenmesidir. Malzeme özellikleri izotrop, lineer viskoelastik veya elastik olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, FD plağın malzeme özelliği kalınlık yönünde sürekli olarak değişmektedir. Statik yükleme durumunda Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli (FDG) malzemelerden yararlanılırken, dinamik durumda ise kalınlık boyunca FD malzemeler kullanılmıştır. Statik hal için, üç farklı gözeneklilik dağılımı (üniform, simetrik ve monolitik) kullanılımıştır. Gözenekliliğin dairesel plakların eksenel simetrik eğilme analizi üzerindeki etkisi parametrik olarak analiz edilmiştir. Birçok mühendislik uygulamasında ideal sınır koşullarının sağlanmasında yaygın olarak kullanılan ankastre ve kayıcı mesnet tipleri uygulanmıştır. Dinamik analizde, olayı idare eden diferansiyel denklem Laplace dönüşümü alınarak dönüşmüş uzayda bir takım Laplace parametresi için çözülür ve zamandan bağımsız hale getirilir. Laplace uzayından zaman uzayına geçmek için modifiye edilmiş Durbin'in ters Laplace yöntemi kullanılmıştır. Zorlanmış titreşim davranışı altı periyot için ele alınmıştır. Çözümlerde 64, 128 ve 512 zaman adım sayısı kullanılmış olup bu adımlar için elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda altı periyot için 64 zaman adımın yeterli olduğu anlaşılmıştır. Kullanılan yöntemin bu etkinliği işlem sürecini zaman ve çaba açısından önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu araştırmanın birinci özgünlüğü, kuadrik dörtgen elemanlar kullanılarak FDG plakların statik davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile ilk kez ele alınmasıdır. Statik analizden elde edilen sonuçlara göre, gözeneklilik katsayısının ve dairesel plakğın kalınlığının yarıçapına oranının artmasıyla yer değiştirmenin arttığı görülmüştür. Porozite katsayısının artmasıyla üniform gözeneklilik dağılımına sahip plakların yer değiştirme değerleri simetrik ve monolitik gözeneklilik dağılımlarına göre daha fazla etkilenmiştir. Dairesel ve halka plakların modelini oluşturmak için, her düğümde iki serbestlik derecesine sahip sekiz düğümlü kuadratik bir dörtgen eleman uygulanmıştır. Bu tezin ikinci özgünlüğü ise FDM'li eksenel dönel simetrik plakların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışının SEY ile Laplace uzayında ilk defa ele alınmasıdır. Dinamik analizlerde, adım tipi, kare dalga tipi, testere dişi vb. zamana

bağlı yükler uygulanmıştır. Viskoelastik davranışların incelemesinde ise Kelvin sönüm modelinden faydalanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, yayınlanmış literatür ve SEY paket programı (ANSYS)'in sonuçları ile doğrulanmıştır. Sunulan modelin sonuçları ile farklı yöntemlerin sonuçlarının arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir. Karşılaştırmalara göre, önerilen yöntemin son derece doğru ve etkin olduğu gösterilmiştir. FDM değişim katsayısı ele alınan plakların dinamik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Malzeme değişim katsayısı arttıkça yer değiştirme genlikleri azalmakta ve periyotlar ise artmaktadır. Viskoelastik durumunda ise sönüm oranının artmasıyla genliklerin daha hızlı bir şekilde sönümlendiği görülmektedir. Dalga tipi yükler uygulandığında vuruş olayı gözlemlenmiştir. Bu durumda sönüm katsayısı arttıkça genliklerin küçüldüğü ve statik değerine yaklaştığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Dönel Simetrik Plak, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Malzeme, Zorlanmış Titreşim, Sonlu Eleman Yöntemi, Laplace Dönüşümü.

SUMMARY

The main purpose of this thesis is to theoretically examine the static and forced vibration of Functionally Graded Material (FGM) axisymmetric plates. The material properties are assumed to be isotropic, linear viscoelastic or elastic and vary continuously in the direction of the thickness of the plate. In the bending case, Functionally Graded Porous (FGP) materials are used, while in the dynamic case, FGM are used throughout the thickness. For the static state, three different porosity distributions (uniform, symmetric and monolithic) are used. The effect of porosity on the axisymmetric bending analysis of circular plates is analyzed parametrically. In many engineering applications clamped, roller, simply supported types, which are widely used to ensure ideal boundary conditions, have been applied. In the dynamic analysis, the equation governing the event is obtained in Laplace domain with the help of the Laplace transformation, depending on a number of Laplace parameters and independent of time. A modified Durbin's inverse Laplace method is used to move from Laplace domain to time domain. Forced vibration behavior is considered for six periods. 64, 128 and 512 time steps are used in the solutions and the results obtained for these steps are compared. As a result of the comparison, it is revealed that 64 time steps are sufficient for six periods. This effective feature of the method used significantly facilitates the working process in terms of time and effort. The first uniqueness of this research is that it is the first time that the static behavior of functionally graded porous FGP plates is addressed with the Finite Element Method (FEM) using quadrilateral elements. According to the results obtained from the static analysis, it has seen that the displacement of the plate increased as the porosity coefficient and the ratio of the thickness of the circular plates to their radius increased. As the porosity coefficient increased, the displacement values of plates with uniform porosity distribution are affected more than those with symmetrical and monolithic porosity distributions. To model the circular and annular plates, an eight-node quadratic quadrilateral element with two degrees of freedom at each node is implemented.

The second originality of this thesis is that the damped and undamped forced vibration behavior of (FGM) axisymmetric plates is discussed for the first time in Laplace

domain with FEM. In dynamic analysis, step load, square wave, sawtooth types etc. Time dependent loads such as are applied. Kelvin damping model is used to examine viscoelastic behavior. The results of this study are confirmed by the published literature and the results of the SEY package program (ANSYS). A good agreement is has been observed between the results of the presented model and the results of different methods. According to the comparisons, it has been shown that the proposed method is extremely accurate and effective. FDM coefficient of variation significantly affects the dynamic behavior of the plates considered. As the material change coefficient increases, displacement amplitudes decrease and periods increase. In the viscoelastic case, it is seen that the amplitudes are damped more quickly as the damping ratio increases. Beating phenomenon has been observed when wave type loads are applied. In this case, it is observed that when the damping coefficient increased, the amplitudes became smaller and approached each other.

Keywords: Axisymmetric Plate, Functionally Graded Materials, Functionally Graded Porosity Materials, Forced Vibration, Finite Element Method, Laplace Transforms.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
SUMMARY ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **viii**
GRAFİKLER LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xvii**
ÖNSÖZ ..... **xviii**
GİRİŞ ..... **…1**
Tezin Önemi 2
FDM'den Yararlanılan Alanlar 4

BİRİNCİ BÖLÜM
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) ve Gözenekli (FDG) Plakların Eksenel Simetrik Eğilme Analizi 5
1.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Dairesel Ve Halka Şeklindeki Plakların Dinamik Analizi
....11

İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal 18
2.1.1. A tipi – Fnksiyonel derecelendirilmiş malzeme 19
2.1.2. B tipi- Güç yasası fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme .....……20
2.2. FDG Dairesel Plakların Eksenel Simetrik Eğilme Analizi……..…. .21
2.2.1. Gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri ..... ……..21
2.2.2. Sonlu Eleman Yaklaşımı ile Elaman Matrisleri Hesabı 23
2.2.3. Eleman rijitlik matrisi 25
2.2.4. Eleman yük vektörü 29
2.3. FDM Dairesel ve Halka Plakların Dinamik Analizi…….....…. ..30
2.3.1. Eleman kütle matrisinin oluşturulması 30
2.3.2. Hareket denkleminin Laplace dönüşümü 32
2.3.3. Sayısal ters laplace dönüşüm algoritması 33
2.3.4. Sönüm etkisi 34

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik Yükleme Altında FDM Dairesel Plağın SEY Doğrulaması 36
3.2. FDM Dairesel Plağın Literatür ve SEY İle Karşılaştırılması 38
3.3. Dairesel Plakğın Zorlanmış Titreşim Analizi 51
3.3.1. Sonuçların doğrulanması 51
3.3.2. Dairesel plakğın elastik ve viskoelasik analizi 62
3.3.2.1. Uygulama1- ankastre mesnetli (h=0.1m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi 62
3.3.2.2. Uygulama2- kayıcı mesnetli (h =0.1m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi 67
3.3.2.3. Uygulama3- ankastre mesnetli (h =0.5m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi 70
3.3.2.4. Uygulama4- kayıcı mesnetli (h =0.5m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi 75
3.4. Halka Plağın Zorlanmış Titreşim Analizi 78
3.4.1. Halka plak için önerilen yöntemin TFY ile verifikasyonu 78
3.4.2. Halka plağın adım tipi yük fonksiyonu için çözüm 84
3.4.3. İmpulsif dik üçgen Yük Fonksiyonu için dinamik analizlerin yapılması…. 125
3.4.4. İmpulsif Sinüs Yük Fonksiyonu için çözüm 130
3.4.5. Testere Yük Fonksiyonu için çözüm 134
3.5. Vuruş Olayı 137
3.5.1. Halka plak 138
3.5.2. Dairesel plak 139
3.6. Gerilme Analizi……..……141

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 146
KAYNAKÇA 148
EKLER 156
ÖZGEÇMİŞ 174

KISALTMALAR

s.	**:**	Saniye
ν	**:**	Poisson oranı
E	**:**	Elastisite Modülü
ρ	**:**	Kütlesel yoğunluk
G	**:**	Kayma Modülü
h	**:**	Plağın kalınlığı
r	**:**	Eksenel dönel simetrik cismin yarıçapı
[J]	**:**	Jacobian matrisi
$\mathbf{N_i}$	**:**	Şekil fonksiyonları
$\mathbf{[k_e]}$	**:**	Eleman rijitlik matrisi
$\mathbf{[m_e]}$	**:**	Eleman kütle matrisi
$\mathbf{[f_e]}$	**:**	Eleman yük vektörü
g	**:**	Malzemenin viskoz sönüm oranı
q	**:**	Yayılı yük
3B	**:**	Üç boyutlu
2B	**:**	İki boyutlu
FDM	**:**	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
FDG	**:**	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözeneklilik
SEY	**:**	Sonlu eleman yöntemi
TFY	**:**	Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi
$\mathbf{w_i, w_j}$	**:**	Gaus integrasyon ağırlık değerleri
T, Π	**:**	Kinetik ve potansiyel enerjileri
s	**:**	Laplace dönüşüm parametresi
$\mathbf{E_v, G_v}$	**:**	Viskoelastik malzeme sabitleri

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Malzemelerin mekanik özellikleri 20
Tablo 2. Şekil fonksiyonları 27
Tablo 3. Ağırlık değerleri ve Gauss integrasyon noktası koordinatları 32
Tablo 4. Sınır koşuları 34
Tablo 5. Sonlu eleman yöntem ile düşey yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırması (mm) 37
Tablo 6. Ankastre mesnetli için FDM dairesel plağın sonuçlarının doğrulanması (mm) 39
Tablo 7. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/10) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm) 40
Tablo 8. Ankastre mesnetli dairesel plak (h/r =1/20) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm) 40
Tablo 9. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/30) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm) 40
Tablo 10. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/40) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm) 41
Tablo 11. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/50) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm) 41
Tablo 12. Ankastre mesnetli UMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 42
Tablo 13. Ankastre mesnetli SMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 42
Tablo 14. Ankastre mesnetli MMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 42
Tablo 15. Kayıcı mesnetli UMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 43
Tablo 16. Kayıcı mesnetli SMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 43
Tablo 17. Kayıcı mesnetli MMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm) 43

GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 1. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 1/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 44
Grafik 2. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 2/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 45
Grafik 3. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 3/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 45
Grafik 4. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 4/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 46
Grafik 5. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 5/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 46
Grafik 6. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 1/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 47
Grafik 7. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 2/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 47
Grafik 8. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 3/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 48
Grafik 9. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 4/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 48
Grafik 10. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 5/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması 49
Grafik 11. 0.6 gözeneklilik katsayısı için SMCR, UMCR ve MMCR türlerinin elastiklik modüllerinin karşılaştırılması 49
Grafik 12. 0.4 gözeneklilik katsayısı için SMCR, UMCR ve MMCR türlerinin elastiklik modüllerinin karşılaştırılması. 50
Grafik 13. Üniform gözenekli malzeme türü için 0.2, 0.4, (0.6) ve (0.8) gözeneklilik katsayılarının elastiklik modülü arasındaki karşılaştırma 50
Grafik 14. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=0) 53
Grafik 15. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=0.5) 53
Grafik 16. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=1) 54
Grafik 17. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=2) 54
Grafik 18. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=4) 55
Grafik 19. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=5) 55

Grafik 20. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (Δ_z=10) 56
Grafik 21. Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması..... 57
Grafik 22. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması 58
Grafik 23. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması 58
Grafik 24. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükü için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması..... 59
Grafik 25. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması 59
Grafik 26. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması 60
Grafik 27. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükü için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması..... 60
Grafik 28. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması 61
Grafik 29. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması..... 61
Grafik 30. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 63
Grafik 31. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 64
Grafik 32. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 64
Grafik 33. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 65
Grafik 34. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 65
Grafik 35. Adım tipi yükleme için dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 66
Grafik 36. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 66
Grafik 37. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 67
Grafik 38. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 68
Grafik 39. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 68
Grafik 40. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 69

Grafik 41. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 69
Grafik 42. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 70
Grafik 43. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 70
Grafik 44. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 71
Grafik 45. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 71
Grafik 46. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 72
Grafik 47. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi..... 72
Grafik 48. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 73
Grafik 49. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 73
Grafik 50. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 74
Grafik 51. Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması 75
Grafik 52. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi . 77
Grafik 53. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi . 77
Grafik 54. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi . 78
Grafik 55. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki elastik deplasman karşılaştırması 80
Grafik 56. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 80
Grafik 57. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 81
Grafik 58. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki elastik deplasman karşılaştırması 81
Grafik 59. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 82
Grafik 60. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması. 82
Grafik 61. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 83
Grafik 62. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 83

Grafik 63. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması 84
Grafik 64. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 85
Grafik 65. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 85
Grafik 66. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 86
Grafik 67. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 86
Grafik 68. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 87
Grafik 69. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 87
Grafik 70. Farklı malzeme katsayısı için halka plağın düşey deplasmanın zamanla değişimi... 88
Grafik 71. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 89
Grafik 72. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 89
Grafik 73. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 90
Grafik 74. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 90
Grafik 75. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 91
Grafik 76. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 91
Grafik 77. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 92
Grafik 78. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 92
Grafik 79. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 93
Grafik 80. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 93
Grafik 81. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 93
Grafik 82. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 94
Grafik 83. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 94

Grafik 84. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 95
Grafik 85. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 95
Grafik 86. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 96
Grafik 87. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 96
Grafik 88. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 97
Grafik 89. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 97
Grafik 90. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 98
Grafik 91. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 98
Grafik 92. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 99
Grafik 93. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 99
Grafik 94. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki farklı malzeme katsayısı için viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 100
Grafik 95. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 110
Grafik 96. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 110
Grafik 97. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 102
Grafik 98. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 102
Grafik 99. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 103
Grafik 100. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 103
Grafik 101. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 104
Grafik 102. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 104
Grafik 103. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi. 105
Grafik 104. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 105

Grafik 105. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 106
Grafik 106. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 106
Grafik 107. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 107
Grafik 108. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 107
Grafik 109. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 108
Grafik 110. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 108
Grafik 111. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 109
Grafik 112. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 109
Grafik 113. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 110
Grafik 114. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 110
Grafik 115. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 111
Grafik 116. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 111
Grafik 117. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 112
Grafik 118. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 112
Grafik 119. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi. 113
Grafik 120. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki farklı malzeme katsayısı için viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 113
Grafik 121. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 114
Grafik 122. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 115
Grafik 123. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 115
Grafik 124. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 116
Grafik 125. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 116

Grafik 126. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 117
Grafik 127. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 117
Grafik 128. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 118
Grafik 129. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 118
Grafik 130. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 119
Grafik 131. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 119
Grafik 132. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 120
Grafik 133. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 120
Grafik 134. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 121
Grafik 135. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 121
Grafik 136. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 122
Grafik 137. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 122
Grafik 138. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 123
Grafik 139. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 123
Grafik 140. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 124
Grafik 141. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 124
Grafik 142. İmpulsif dik üçgen yükleme durumu için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 127
Grafik 143. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 127
Grafik 144. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 128
Grafik 145. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 128
Grafik 146. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 129

Grafik 147. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 129
Grafik 148. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 131
Grafik 149. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 131
Grafik 150. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 132
Grafik 151. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 132
Grafik 152. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 133
Grafik 153. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 133
Grafik 154. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 134
Grafik 155. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 135
Grafik 156. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 135
Grafik 157. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 136
Grafik 158. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 136
Grafik 159. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi 137
Grafik 160. Testere dişi dalga tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi 138
Grafik 161. Kare dalga yük tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi 139
Grafik 162. Kare dalga yük tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi 140
Grafik 163. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi 141
Grafik 164. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi 141
Grafik 165. Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi 142
Grafik 166. Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi 142
Grafik 167. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi 143
Grafik 168. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi 144
Grafik 169 Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi 144
Grafik 170. (Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi 145

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İki malzemeden oluşan yapı elemanının görüntüsü ve oluşan çatlaklar 1
Şekil 2. Dairesel plağın kalınlık yönünde olan geometrisi ve farklı katmanlardan oluşması 2
Şekil 3. Farklı gözeneklilik dağılımlarına sahip dairesel şeklindeki bir plakanın şeması 19
Şekil 4. Sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eleman..... 23
Şekil 5. Gauss integrasyon noktaları..... 32
Şekil 6. Ansys programında analiz adımları 37
Şekil 7. Dairesel plağın geometrisi ve dinamik yük..... 52
Şekil 8. Ankastre mesnetli dairesel plakğın geometrisi ve dinamik yük 63
Şekil 9. Kayıcı mesnetli dairesel plakğın geometrisi ve dinamik yük 76
Şekil 10. (3D)- Halka plağın geometrisi ve adım tipi yük..... 79
Şekil 12. (2D)- Halka plağın geometrisi ve İmpulsif dik üçgen yük..... 126
Şekil 12. İmpulsif sinüs dalga tipi yük..... 130
Şekil 13. Testere dişi dalga yük fonksiyonu 134
Şekil 14 Testere dişi dalga yük..... 138
Şekil 15 Kare dalga yük fonksiyonu..... 139

ÖNSÖZ

Bu uzun yolculuğumda, öncelikle Allah'a şükranlarımı sunmak istiyorum. Yüce Allah, rahmetiyle bu yolu tamamlamak için bana zaman, güç ve yetenek verdi.

Akademik çalışmalarımda, mekanik alanında ilerlememe yardımcı olan ve tez çalışmamda beni yönlendiren danışman hocama sayın Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI'ye teşekkür derim. İlk doktora öğrencisi olarak bu çalışmamızı tamamlamaktan gurur duyuyorum.
Bana katkısı olan ve beni bu uzun akademik yolumda sabırla eşlik eden, ilk danışmanım değerli Dr. Öğr. Üyesi Ali ETEMADİ hocama teşekkür ederim.
Yardımlarını hiç esirgemeyen, Çukurova Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi, Inşaat Mühendisliği, bölümünde görev yapan değerli **Prof. Beytullah TEMEL** hocamıza teşekkür ederim.
İstanbul Gelişim Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği Bölümünde, bigilerini ve yardımlarını hiç esirgemeyen Doç.Dr.Anıl NİŞ, Dr.Öğr.Üyesi Mustafa NURİ, Dr.Öğr.Üyesi Yasin PAŞA, Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Yücel ÜRÜŞAN, Dr.Öğr.Üyesi Metin MEHMETOĞLU hocalarıma teşekkür ederim.

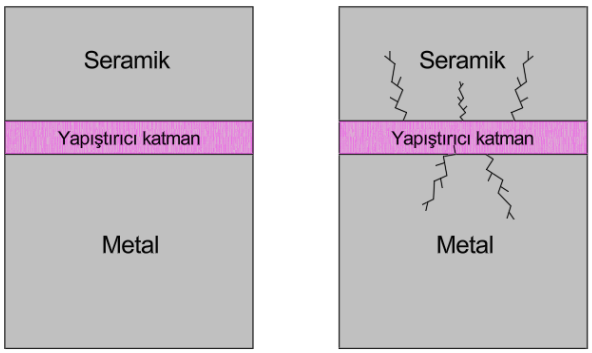
Tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım, **Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN**, Dr. Öğr. Üyesi Aylin Ece KAYABEKİR ve bana bu yolda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.
Bana bu hayatta hayalimi gerçekleştirmek için ve aldığım her kararı destekleyen Annem (**Eklem**), Babam (**Ghazi**) ve kardeşlerim (**Sail ve Mohammed**)'e sonsuz teşekkür ederim.
Beni manevi olarak destekleyen yakınlarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Selda

GİRİŞ

Eksenel dönel simetrik plaklar, mühendislik tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür yapı elemanları, mühendislik yapılarının dinamik etkilerine maruz kalabilir. Bu yapı elemanlarının statik ve dinamik davranışlarının incelenmesi önem arz etmektedir. Karmaşık mühendislik problemlerinin analitik çözümleri mümkün olmadığı için dinamik yükler ektisindeki problemler sayısal olarak çözülebilmektedir. Bu tezde FDM ve FDG eksenel simetrik plakların davranışlarının incelenmesi için SEY ile çözümler sunulmaktadır. Bu tür eksenel dönel simetrik üç boyutlu problemler, iki boyutlu basit problemler olarak ele alınabilmektedir.

Mühendislik uygulamaları çeşitli malzeme özelliklerinin bir arada olmasını gerektirebilir, ama bu özelliklerin hepsi bir malzemede bulunmayabilir. Malzemelerin birlikte kullanılması halinde ise, tabakalar arası büyük gerilmelere neden olabilirler (Şekil (1)). Bunun gibi istenmeyen etkileri önlemenin yollarından biri, malzeme özellikleri sürekli olarak değişen Fonksiyonel Derecelendirmiş Malzemelerin (FDM) kullanılmasıdır. Bu şekilde yapıların özellikleri iyileştirilebilir ve birden fazla malzeme tek bir yapıda bulunması aynı anda gerçekleştirilebilir.

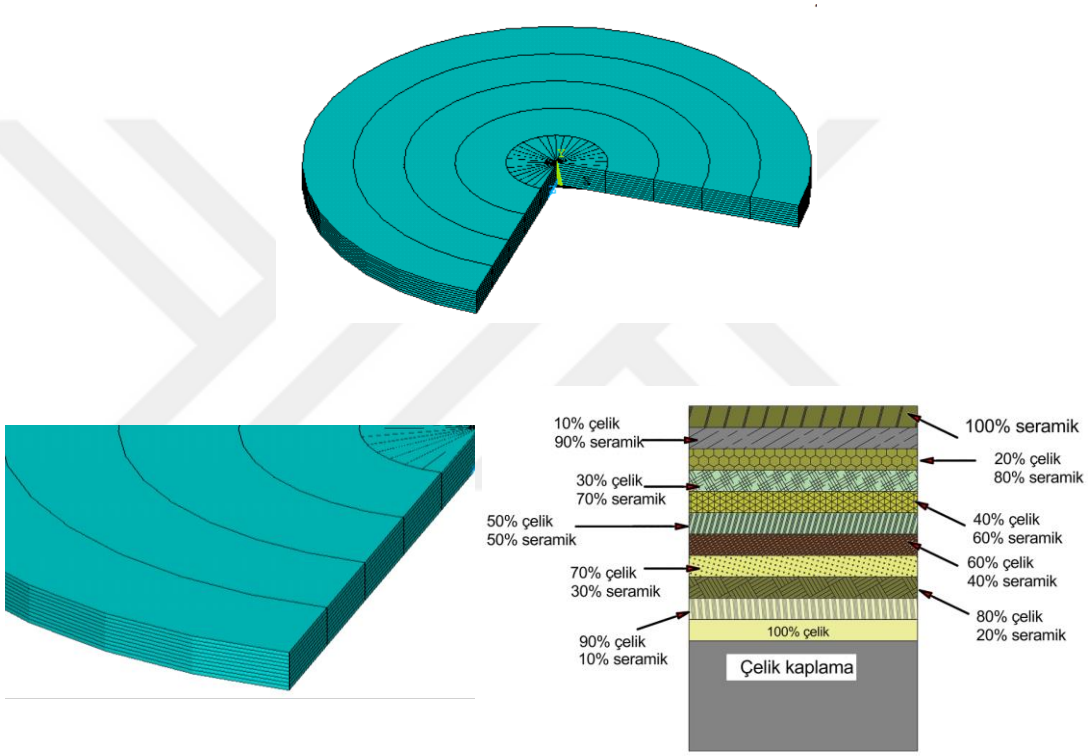


Şekil 1. İki malzemeden oluşan yapı elemanının görüntüsü ve oluşan çatlaklar

Bu tezde malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak değiştiği kabul edilmektedir. Kalınlık boyunca farklı katmanlardan oluşan dairesel plağın geometrisi Şekil (2)'de gösterilmiştir. Sayısal analizler bölümünde çeşitli fonksiyonel değişimli malzemeden oluşan FDM'li eksenel dönel simetrik dairesel ve halka plakların ele alınmış, çeşitli seramik ve metal kombinasyonları birarada kullanılmıştır. Bu tür malzemelerin nükleer, mikroelektronik ve havacılık endüstrilerinde bulunan yüksek

sıcaklık etkisindeki yapılarda uygulamaları vardır. FDM'lerin işleme teknikleri alanında başarılı örnekleri mevcuttur (Kieback, ve ark. (2003)). Bu tezde, FDG malzemeler de kullanılmıştır. Gözenekli malzeme hafiflik ve ısı izolasyonu için önemli bir rol oynamaktadır. Böyle bir avantajlı malzemedem yapılan eksenel simetrik plakların analizi, bu çalışmanın bir parçası olarak sunulmuştur.

Seramik korozyon, oksidasyon ve aşınmaya karşı korumaktadır. Metal kaplaması ise, dayanımı arttırmaktadır. Şekil (2)'de seramik ve metalin kombinasyonu kademeli derecelendirilmiş şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 2. Dairesel plağın kalınlık yönünde olan geometrisi ve farklı katmanlardan oluşması

Tezin önemi

- Önemli ve kritik mühendislik yapılarının öngörülen yüklemeler altında güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi sağlanarak, literatüre ve mühendislik hesaplamalarına önemli katkılar sağlaması,

- Türkiye’de bu alanda çalışan bilim insanlarının ulaşacağı bilimsel düzeyin birikimsel getirisi,
- Son yıllarda bilgisayar destekli üretim süreçlerindeki yeni teknolojiler (örneğin 3B yazıcı teknolojilerindeki gelişmeler gibi) tek yönlü FDM'lerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu malzemelerin kullanıldığı inşaat, makine, otomotiv, havacılık, gemi, nükleer ve savunma endüstrilerinde problemlerin ulusal çözümü ile ülkenin mali kaynaklarının verimli kullanılabilmesi ve özel sektörün benzeri türdeki akademik düzey gerektiren problemlerinin ulusal çözümü ile ülkenin mali kaynaklarının verimli kullanılabilmesi,
- Nükleer, mikro-elektronik ve havacılık alanları olmak üzere yüksek sıcaklığa maruz kalan uygulamalarda kullanılmaksı,
- Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli (FDG) dairesel plakların statik davranışını, sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eksenel simetrik eleman kullanılarak, ilk kez SEY ile incelenmiştir.
- Modern ve teknolojinin çeşitli alanlarında önemli olan FDM'li eksenel dönel simetrik dairesel ve halka plağın, hem sönümlü hem sönümsüz dinamik davranışının incelenmesi ile, deprem analizleri gibi bu konular için, Türkiye’de ve dünyade kritik bilgi birikiminin kazanılmasını sağlayacak olmasıdır.
- Dinamik yüklemeler için yükün frekansı yapının doğal titreşim frekansına çok yakın olduğu durumda meydana gelen vuruş olayının incelenmektedir.
- Sonuçlar önce zaman uzayında elde edilmektedir, sonra etkin bir ters laplace dönüşüm tekniği ile laplace uzayında çözülmektedir.
- Literatürde bulunan çalışmaların arasında, ilk kez FDM dairesel ve halka plakların zorlanmış titreşim analizi SEY kullanarak, Laplace uzayında çözülmektedir.

FDM'den Yararlanılan Alanlar

Uzay ve havacılık, FDM'lerin ortaya çıkış nedenlerinden birisidir. İyi ısıl iletkenlik ve iyi ısıl direnç gibi iki zıt özelliğin bir malzemede bulunabilmesi amacıyla FDM'ler geliştirilmiştir. FDM yapısal malzeme ve enerji değişim malzemesi olarak özellikle roket yapımında ve uzay araçlarının motorlarının dış duvarlarında kullanılmaktadır.

Bu tür malzemeler, endüstriyel ve tıp alanlarında kullanılmaktadır. Diş ve kemik protezleri için dental ve ortopedik uygulamalarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. FDM'nin en önemli özelliklerinden biri, çatlak yayılımını önleme kabiliyetidir. Bu özellik, zırh plakları ve kurşun geçirmez yelekler için kullanılan penetrasyon dirençli malzemeler olarak savunma alanında oldukça faydalıdır. Enerji ve optoelektronik geliştirilmesi durumunda FDM'ler dünyadaki görsel iletişimi çok daha kaliteli hale getirebilecek yapıya sahiptir (Mahamood ve ark. (2012)).

BİRİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

1.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme ve Gözenekli Plakların Eksenel Simetrik Eğilme Analizi ile İlgili Çalışmalar

Uzay araçları, 1500 °C'ye kadar sıcaklığa maruz kalabilir. Bu yüksek sıcaklık önemli sorunlara yol açabilir. Araştırmacılar 1985 yılında uzay araçları ve hava taşıtlarının FDM'lerin geliştirilmesi yoluyla bu sorunu çözmeye başlamıştır. Kompozit malzemeler, yapı mühendisliğinde çok önem taşımaktadır. İki malzemeden oluşan kompozit malzemenin farklı ısıl genleşme katsayılarından kaynaklanan ısıl gerilmelere maruz kalabilir. Bu da yapıyı olumsuz etkilebilir. Bu tür sorunları azaltmak için FDM kullanılması yaygınlaşmıştır. Kademeli olarak derecelendirilmiş malzeme, yapıya ve özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarına olumlu katkıda bulunmaktadır Alagöz ve Civalek (2013). FDM'ler, iki veya daha fazla malzemeden oluşur ve homojen olmayan bir malzeme olarak kabul edilmiştir Udupa ve Gangadharan (2014). Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için farklı yüklemeler altında, malzemede meydana gelebilecek hasarların anlaşılması ve araştırılması çok önemlidir. Dolayısıyla çoğu araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Bu çalışmaların biri, Kaya ve ark (2023) tarafından yapılan çalışmada Fonksiyonel kademelendirilmiş (FK) plakların kırılma analizleri yapılmıştır. PeriDinamik (PD) teorisi kullanılarak FK plaklarının kırılma, malzeme dağılımları ile önemli ölçüde ilişkilidir. Yapılan araştırma neticesinde malzeme dağılımlarının plağın kırılma davranışları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Malzeme dağılımlarının davranışının kontrol edilmesi ile plak mukavemetinde artışa yol açabileceğini gösterilmiştir.

Foroutan ve ark. (2011), iç basınç ve dış basınç maruz kalan FDM silindir kabukların statik analizi için ağsız bir yöntem önermiştir. Elde edilen sonuçlar kapalı formda elde edilen sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Önerilen metodun gerilme analizi için etkin olduğu rapor edilmiştir. Yoo ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada FDM'li bir

örnek, tek malzemeli bir örnek üzerinde deney yapılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada birinci örnek için Lazer metal biriktirme (LMD) ve tel katmanlı üretim (WAAM) kullanarak, diğer örnekte yalnızca WAAM kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, LMD-WAAM numunelerinin yalnızca WAAM kullanılarak üretilen numunelere göre %8 daha yüksek çekme kuvvetine sahip olduğunu gösterilmiştir.

Momennia ve Akbarzadeh (2011), SEY'ye dayalı ABAQUS programını kullanarak FDM'li dikdörtgen ve dairesel plakların mekanik davranışını analiz etmiştir. Çalışmalarında kayıcı mesnetli plaklar için elde edilen sayısal sonuçlar, yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ve klasik plak teorisi kullanılarak elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırmış ve sonuçların analitik çözümlere tamamen benzer olduğu görülmüştür. Bir yandan, Nguyen ve ark. (2023), Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli (FDG) sandviç plakların statik ve dinamik analizi için Shi'nin üçüncü mertebeden kayma deformasyon teorisine (TSDT) dayanan yeni bir dikdörtgen eleman geliştirerek gözenekli malzemenin sandviç plakların tasarımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Shariyat ve Asemi (2014), tarafından SEY yaklaşımı kullanılarak ortotropik heterojen FDM plakların kayma burkulması üzerindeki etkilerini incelemek için hem ön burkulma hem de burkulma durumlarının etkileri incelenmiştir. Mod şekillerinin ayrıntıları ve temel etkileri tartışılmıştır. Son olarak, kesme burkulması yükünün sayısal değerleri sunulmuştur. Elde edilen burkulma mod şekillerin sonuçları, ANSYS'ten elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar ve ANSYS sonlu elemanlar analiz kodundan elde edilenlerle karşılaştırılması, mevcut tahminlerin doğruluğunu göstermiştir. Bundan başka SEY'ne dayanarak, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi Al-Itbi ve Noori (2022), tarafından kullanılarak çubuk problemleri ele alınmıştır. FDG sandviç kirişlerin doğal frekansları, sınır koşullarının ve gözeneklilik katsayısının önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Son zamanlarda SEY analizlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Çok sayıda araştırmacı, karmaşık problemler analiz etmek ya da çeşitli teori prensiplerine dayanarak karşılaştırmak ve doğrulamak için bu yöntemi kullanmıştır. Dolayısıyla, SEY yaklaşımı kullanarak ve farklı teorilere dayanarak FDM plaklarının statik analizi yapılmıştır (Talha ve Singh (2010). Zafarmand ve Kadkhodayan (2014), Talha ve Singh (2014), Gilewski ve Pełczynski (2020)). Bu çalışmaların yanı sıra, birçok

çalışma yapısal elemanların statik davranışını ve burkulma analizini ele almak için SEY yöntemini kullanılmıştır (Özakça ve Kolcu (2003), Nagesh ve Gupta (2022), Ma ve Wang (2004), Liu ve ark. (2016)). Ayrıca, FDM'li kabuklar, sıklıkla tartışılan konulardan biridir. FDM kabukların mekanik yapılarda yaygın kullanımı nedeniyle, önem taşımaktadır. Araştırmacıların çoğunun, FDM kabukların sayısal simülasyon sonuçlarının literatürle karşılaştırılması ilgi alanı olmuştur (Mellouli ve ark. (2019), Liew ve Kitipornchai (2004), Chaker ve ark. (2021)). Ghomshei ve Abbasi (2013), tarafından yapılan çalışmada, FDM halka şeklindeki plakların eksenel simetrik termal burkulmasını analiz etmek için sonlu bir eleman formülasyonu geliştirilmiştir. Kirchhoff plak teorisine dayanarak ve minimum toplam potansiyel enerji ilkesini kullanılarak incelenmiştir. Sunulan sonlu elemanın yakınsaması ve doğrulanması sayısal sonuçlar literatürde mevcut olanlarla karşılaştırılarak model araştırılmıştır. FDM halka şeklindeki plakları analiz etmek için çeşitli formüller ve sayısal çözümler önerilmiştir. Ayrıca, Tran ve Nguyen-Thoi (2020), kütleyi göz önüne alan elastik temel üzerindeki FDG plakların serbest titreşim analizi araştırılmıştır. FDG plağın temel denklemleri Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiştir. Elastik temel üzerine oturan FDG plağın serbest titreşimi yeni sayısal sonuçları incelenmiştir. FDG plağın temel denklemi için hesaplanmış sonuçların, yayınlanan diğer sonuçlarla mükemmel bir uyum sağladığı görülmüştür.

Araştırmacılar çoğunlukla, FDG kirişlerinin ve plaklarının titreşimlerini ve dinamik reaksiyonlarını incelemeye odaklanmıştır. Çeşitli teknikler kullanılarak bu konu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Li ve ark. (2018), Pham ve Nguyen (2023), Turan ve Adiyaman (2023), Wu ve ark. (2018), Shafiei ve ark. (2017), Noori ve ark. (2021), Tran ve ark. (2021)). Bu tez çalışmasına benzer şekilde Noori ve ark. (2019), izotropik homonej malzemeli eksenel dönel simetrik dairesel plakları incelemiştir. Model, iki farklı dinamik yükleme altındaki davranışını teorik olarak incelenmiştir. SEY ve Laplace dönüşüm tekniklerinin kombinasyonu ile sonuçlar elde edilmiştir. Bunula birlikte, SEY'ye dayalı bir FORTRAN programı geliştirilmiştir. ANSYS programı kullanılarak elde edilen analizin sonuçları, bu yöntemin doğruluğunu için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ANSYS programının kullandığı Newmark adım adım integrasyon metoduna göre önerilen yöntemin daha etkili olduğunu ortaya çıkmıştır. İlaveten, Kutlu ve Omurtag (2012) incelemesinde, orta kalınlıkta keyfi

ortotropik elastik temel üzerine oturan eliptik plakların büyük deplasmanları araştırılmıştır. Lineer olmayan karışık sonlu elemanlar formülasyonu Hellinger-Reissner ilkesine göre geliştirilmiş ve artımlı yöntem kullanılarak doğrusallaştırılmıştır. Eliptik plakların büyük deplasman tepkisi temel parametrelerinden ve ortotropinin temel yönlerinden, plağın eliptikliğinden oldukça etkilendiği görülmüştür. FDM'li elektro-mekanik yüklemeye tabi tutulan plakların stabilite analizi Jadhav ve Bajoria (2013), tarafından SEY yaklaşımına dayalı birinci mertebe kayma deformasyon teorisi kullanılarak incelenmiştir. Hacim oranının artmasıyla burkulma mukavemetinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Analizde, alüminyum ve paslanmaz çelik karışımı olan tek malzemede korozyon direncinin yanı sıra yüksek mukavemet özelliği de sergileyen metal bazlı FDM üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım nakliye, inşaat ve metal endüstrisinde tek malzemede korozyon direnci ve yüksek mukavemet özelliklerinin üstesinden gelmek için faydalı olduğu kanıtlanmıştır. Öte yandan, Temel ve Noori (2020), tarafından yapılan çalışmada, değişken kalınlıktaki iki yönlü FD kalın dairesel ve halka plakların zorlanmış ve serbest titreşim davranışlarını etkin bir şekilde Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) aracılığıyla sayısal olarak örnekle çözülmüştür. TFY kullanılarak elde edilen sonuçlar, mevcut yayınlanmış literatür ile doğrulanmıştır ve iyi bir uyum sağladığı görülmüştür. Üstelik Li ve Gao (2018), yapının doğal frekanslarının ve mod şekillerinin çeşitli geometrik parametrelerden, sınır koşullarından, gözeneklilik katsayısından ve gözeneklilik dağılımından modelinden nasıl etkilendiğini göstermek için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, FDM plakların belirsiz malzeme özelliğine sahip statik yükler altında deterministik olmayan yapısal davranışlarını incelenmiştir. Uygulanabilirliği, doğruluğu ve verimliliğini kanıtlamak için standart olmayan geometrilere sahip iki farklı FDM plak araştırılmıştır. Standart olmayan geometriye sahip, pratik olarak modifiye edilmiş FDM plağın statik yüklemelere ve fiziksel olarak doğasında olan belirsizliklere karşı güvenliğini değerlendirmek için niceliksel bir değerlendirme çerçevesi sağlamıştır.

Ayrıca, son zamanlarda dikkate değer mekanik özellikleri, elektriksel iletkenlikleri ve yüksek geçirgenlikleri nedeniyle mühendislik malzemeleri ve yapıları ile ilgili olarak bilim adamları ve tasarımcılar arasında gözenekli malzemelere olan ilgi artmıştır.

Gözenekli malzemeler, yoğunluklarının çok düşük olması nedeniyle havacılık endüstrisinde ve deniz yapılarında kullanılabileceği gibi, yüksek özgül yüzeyleri nedeniyle denizaltılarda, reformerlerde (hidrokarbon zengin gazını sentez gazına dönüştüren cihaz) ve katalizörlerde (kimyasal reaksiyonu hızlandıran madde) kullanılabilmektedir. Örnek olarak, Kiarasi ve ark. (2021) yaptıkları incelemede, farklı yükleme koşullarına maruz kalan FDG dikdörtgen plakların burkulma davranışı incelenmiştir. Çalışmalarında kalınlık boyunca üç farklı gözeneklilik dağılımını ele almıştır; dağılımlar, doğrusal olmayan simetrik, doğrusal olmayan asimetrik ve üniform dağılım. Burada genelleştirilmiş diferansiyel kareleme (GDK) yöntemi ile sonlu elemanların birleşimine dayalı yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Elde edilen sonuçlar, üniform bir dağılım için gözeneklilik katsayısının burkulma yükü üzerindeki etkisi, diğer üniform olmayan gözeneklilik dağılım türlerinden daha büyük olduğu göstermiştir. Önerilen yöntemin tasarım açısından bile gözenekli malzeme ve yapıların hesaplamalı çalışması için güvenilir bir araç olduğu doğrulanmıştır. Özet olarak FDG dikdörtgen plakların çeşitli yükleme senaryoları altında eğilme davranışı alternatif bir çalışmada araştırılmıştır.

Bir yandan Babaei ve ark. (2021) çalışmasında gerilme dalgası yayılımı ve fonksiyonel olarak serbest titreşim davranışını kademeli grafen trombosit (FG-GPL) takviyeli gözenekli birleştirilmiş kesik konik-silindirik-konik kabuk incelenmiştir. İki boyutlu eksenel simetrik elastikiyet denklemlerini çözmek için SEY ile birlikte Rayleigh-Ritz enerji yöntemi kullanılmıştır. Üç farklı gözeneklilik dağılımı altında farklı sınır koşullarının, geometrilerin, gözeneklilik katsayısının ve gözeneklilik dağılımının modelinin doğal frekanslar, mod şekilleri, yer değiştirmenin ve kabuğun gerilmeleri zaman geçmişleri üzerindeki etkilerini göstermek için karşılaştırmalı ve ayrıntılı bir araştırma da yürütülmüştür.

Babaei ve Asemi (2022), FD gözenekli dönel kesik koninin statik davranışını incelemiştir. Gözeneklilik dağılımı için simetrik doğrusal olmayan, doğrusal olmayan asimetrik ve üniform dağılımlar olmak üzere üç farklı model dikkate alınmıştır. Problemi modellemek için iki boyutlu eksenel simetrik esneklik teorisi ve Rayleigh-Ritz enerji formülasyonuna dayalı SEY'yi kullanılmıştır. Gözeneklilik, farklı sınır koşulları ve gözenekliliğin farklı dağılımı gibi çeşitli parametrelerin koninin yer

değiştirmeleri ve gerilmeleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre, gözeneklilik katsayısının arttırılmasıyla radyal yer değiştirmenin arttığını, teğetsel gerilimin önemli ölçüde azaldığını ve eksenel gerilimin azaldığını göstermiştir. Babaei ve ark. (2022), termal yükleme altında grafen trombositleri ile güçlendirilmiş, FDG malzemelerden yapılmış eksenel simetrik kesik bir koniyi analiz edilmiştir. Problemler, hem zaman hem de dönüşmüş uzay alanında çözmek için Rayleigh-Ritz enerji formülasyonu ve Crank-Nicolson algoritmasını temel alan dereceli SEY uygulanmıştır. Termo-mekanik davranışını, farklı gözeneklilik dağılımları (üniform ve FD) açısından kontrol edilmiştir. Khatounabadi ve ark. (2022) çalışmasında, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı olarak grafen plaklarla güçlendirilmiş FDG dairesel plağın düşük hızlı darbe analizi sunulmaktadır. Plağın yönetim denklemlerini, çözmek için Picard yöntemiyle birlikte SEY yaklaşımını kullanılmıştır. Sonuçları daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre, gözeneklilik dağılım katsayının zamana bağlı davranışı ve yapının zorlanmış titreşim deplasman değerlerine etkisinin, diğer parametrelere göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Asemi ve ark. (2022), incelemesinde grafen nanoplateletlerle güçlendirilmiş, FDG halka şeklindeki plakların statik, dinamik ve doğal frekans analizleri etmiştir. Plağın kalınlık yönüne göre üniform ve iki tür simetrik fonksiyonel dereceli dağılım olmak üzere üç farklı gözeneklilik dağılımı dikkate alınmıştır. Birinci mertebe kayma deformasyon teorisine ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı Hamilton prensibi, hareket denklemlerini türetmek için kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmanın sonuçları, gözeneklilik katsayısının artmasıyla deplasmanın artığını görülmüştür. Xia ve ark. (2023), Grafen plakları ile güçlendirilmiş FDG kesik konik kabuk panellerin serbest titreşim analizini araştırmıştır. Üç farklı gözeneklilik dağılımı tipinin ve beş farklı GPL modelinin kabuğun dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Diğer basitleştirilmiş kabuk teorilerinden farklı olarak daha doğru sonuçlar elde etmek için üç boyutlu esneklik teorisi ve sonlu elemanlar yönteminin Rayleigh-Ritz yöntemiyle birlikte uygulamıştır. Gözeneklilik dağılımının, kabuğun gözeneklilik katsayısından yapının doğal frekans değeri üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Zhou ve ark. (2023), Grafen trombositleri ile güçlendirilmiş FDG küresel kabukların burulma davranışı değerlendirmiştir. Beş farklı GPL dağılımıyla birlikte metal matriste hem

simetrik hem de üniform gözeneklilik modellerini içermektedir. Çözümü klasik sonlu elemanlardan belirlenen virtüel iş ilkesine göre belirlenmiştir. Üstelik GPL'lerin yüksek ağırlık fraksiyonunun ve yüksek gözeneklilik katsayısının, yapının burkulma yükleri üzerinde sırasıyla %100 ve %12,5 miktarında en yüksek ve en düşük etkileri sağladığı da bulunmuştur.

Babaei ve ark. (2023), araştırmalarının temel amacı gözeneklilik ve GPL deseninin en iyi dağılımını elde etmek ve nano parçacıkların eklenmesinin kabuğun burulma burkulma kuvvetleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Denge durumunu elde etmek için virtüel iş prensibi ve sayısal kademeli SEY ile birlikte uygulanmıştır. Kabuğun burulmalı burkulma kuvvetleri için optimal gözeneklilik dağılımını belirlemek amacıyla gözeneklilik dağılımına ilişkin üç fonksiyon araştırılmıştır.

1.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Dairesel ve Halka Şeklindeki Plakların Dinamik Analizi ile İlgili Çalışmalar

Bu tez araştırmasında, FDM'li eksenel dönel simetrik dairesel ve halka plakların, zorlanmış titreşimi analizleri teorik ve sayısal olarak incelenmiştir. Olayı idare eden diferansiyel denklemlerin çözümlerinde SEY ile Laplace dönüşümün kullanılması, etkin bir ters Laplace dönüşümünün uygulanması ile elde edilen sonuçların zaman uzayında elde edilmesi, periyodik yüklerin frekansı yapının doğal titreşim frekanslarına yakın olduğu durumlarda ele alınan elemanların davranışının incelenmesi, dinamik analiz için etkin bir sayısal yaklaşım uygulanması, sayısal olarak elde edilen sonuçların literatürde bulunan mevcut veriler ile karşılaştırılması, amaclandırılmıştır.

Bu konuyla ilgilenen araştırmacıların biri Narayanan (2024), dairesel ve kare kesikli ve kesiksiz FDM plakların zorlanmış ve serbest titreşim davranışlarının incelemesine odaklanmıştır. Dinamik davranışı tahmin etmek için birinci mertebeden kayma deformasyon teorisini kullanmıştır. MATLAB yazılımı ile kullanılan güçlü bir sonlu elemanlar (SE) formülasyonu uygulamıştır. Sönümsüz zorlanmış titreşim analizi, Newmark Beta yöntemi kullanılarak sinüzoidal harmonik yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Plağın sertliği azaldığında titreşim frekansının azaldığı ve plağın orta noktasında yer değiştirme değerlerinin arttığı fark edilmiştir. Doğal tireşim

frekansı, plağın bir kenarı serbest bırakıldığında en düşük değeri almaktadır. Ardından kayıcı mesnetli kenar gelmekte ve ankastre mesnetli hal için bu değer maksimumdur; yani sınırdaki kısıtlamalar artarsa doğal frekansların arttığı görülmüştür. SEY çözümünün doğal özellikleri nedeniyle mevcut bulgular, diğer sayısal ve analitik yöntemlerin değerlendirilmesi için kıyaslama çözümleri olarak yararlı olmaktadır.

Pham ve ark. (2024), birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı üçgen elemanlar kullanarak, simetrik olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli (UFGP) katlanmış sandviç plakların serbest ve zorlanmış titreşimini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, gözeneklilik katsayısı gibi malzeme parametreleri, UFGP katlanmış sandviç plakların titreşimini önemli ölçüde etkilediği kanıtlanmıştır. Bu parametrenin ayarlanması, sandviç plakların titreşiminin istendiği gibi kontrol edilmesine yardımcı olduğu belirlenmiştir. Liew ve ark. (2003) tarafından sıcaklık değişimli ortamlarda FDM plakların statik ve dinamik piezotermoelastik analizi ve kontrolü için etkili bir sonlu eleman modeli sunulmuştur. Statik analizden, yer değiştirme kontrol kazancının ayarlanmasının, FDM plaklarının gerilmesi ve deplasmanı etkili bir şekilde kontrol edebileceği görülmüştür. Dinamik davranış ayrıca, uygun hız kazanımı değerleri kullanıldığında FDM plağın titreşim genliğinin çok yüksek oranlarda zayıfladığını da gösterilmiştir. Dolayısıyla FDM plaklarının statik ve dinamik davranışlarının kontrolü için çok etkili olduğunu göstermiştir. Lee ve Han (2006), arafından izotropik ve kompozit tabakalı plakların doğal frekansları sunulmuştur. Keyfi yüklemeye maruz kalan lamine kompozit plakların ve kabukların zorlanmış titreşim analizi yapılmıştır. Kayma deformasyonunun ve kutupsal atalet etkisinin dikkate alınmasına izin veren Mindlin-Reissner teorisi, dokuz düğümlü varsayılan şekil değiştirme kabuk elemanının geliştirilmesi için ele alınmıştır.

Nguyen ve ark. (2012), SEY ile üçgen bir eleman kullanarak FDM plakların statik, serbest titreşim ve mekanik/termal burkulma problemlerini incelemiştir. Formülasyonda yalnızca doğrusal yaklaşımlar kullanılmış ve sonlu eleman programlarına oldukça basit ve etkili bir şekilde aktarılmıştır. Sayısal sonuçlar literatürde yayınlanmış diğer çözümlerin çözümleri ile karşılaştırıldığında önerdikleri yöntemin yüksek güvenilirliğe ve doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, Prakash ve Ganapathi (2012) tarafından yapılan çalışmada FDM plakların büyük genlikli eğilme titreşim özellikleri, kesme esnek sonlu elemanlar yaklaşımına

dayanarak araştırılmıştır. Burada ele alınan FDM plağın, Alüminyum-Alüminadan yapılmıştır (Al/Al_2O_3). Öte yandan Wattanasakulpong ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada, üçüncü mertebeden geliştirilmiş kayma deformasyon teorisine dayanarak, FDM plakların serbest ve zorlanmış titreşim davranışlarını çalışmıştır. Titreşim analizi için temel denklemleri Ritz yöntemi kullanarak çözmüştür. Sıcaklığa bağlı malzeme özelliği çözümünün, termal ortamda serbest ve zorlanmış titreşim analizleri için FD plakların tasarlanmasında önemli bir rol oynadığını görülmüştür. Termal etkisinin dahil olduğu serbest titreşim analizi açısından, sıcaklık artışı ile frekansların azaldığı gözlemlenmiştir. Dinamik yüklemeye maruz kalan FD plakların, frekans oranı ve sıcaklığın artmasıyla maksimum deplasmanın arttığı da gözlemlenmiştir.

Akgöz ve Civalek (2013), çalışmasında iki sınır koşulu: ankastre ve kayıcı mesnet için mikro kiriş problemini incelemiştir. Rayleigh-Ritz çözüm tekniği, ankastre-ankastre ve ankastre-serbest sınır koşullarına sahip mikro kirişlerin titreşim probleminin yaklaşık çözümünün elde edilmesi için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre elastisite modülü oranındaki bir artış, her iki model için de boyutsuz doğal titreşim frekanslarının artmasına neden olmuştur.

Yer değiştirme, gerilmeler, kritik burkulma yükü ve doğal titreşim frekanslarla ilgili olarak katmanlı FDM plağın doğrusal olmayan davranışı Vasiraja ve Nagaraj (2019), tarafından araştırılmıştır. ANSYS yazılım programı, katmanlı bir FDM plağın sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılmıştır. Güç kanunu indeksi, kalınlık oranı, en boy oranı, sıcaklık ve uygulanan yük türleri gibi değişen parametrelerle gözlemlenen FDM plakların statik ve dinamik davranışına ilişkin ve bu konuyla ilgilenen tasarımcılar için yararlı olduğuna inanılmaktadır.

Aslan ve ark. (2020), tarafından yapılan başka bir çalışmada, FD kirişin zorlanmış titreşimi araştırılmıştır. Elde edilen kanonik denklemler TFY ve Laplace dönüşümü ile sayısal olarak çözülmüştür. Adım tipi yüke yönelik bir örnek ele alınmıştır. Viskoelastik malzeme durmlarında, zaman içinde deplasman ve dönme genliklerinin azaldığı gösterilmiştir. Buna ek olarak, Temel ve Noori (2021), tarafından yapılan başka bir çalışmada, değişken kalınlıktaki 2B-FD kalın eksenel simetrik dairesel ve halka plakların serbest titreşim, sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışları incelenmiştir. Laplace uzayında TFY kullanarak, problemler çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, periyodik yükleme durumunda, uygulanan yükün frekansları ile ele

alınan yapının birbirine yakın olması durumunda vuruş olayının meydana geldiği gösterilmiştir. Plağın kalınlık doğrultusunda FD olması nedeniyle, Kalınlık yönünde malzeme katsayısı değerindeki artışın yapının doğal frekanslarında artışa yol açtığı sonucuna varılmıştır. Artan malzeme değişim katsayısı değerleri ile yer değiştirme periyotlarının ve genliklerinin azaldığı gözlenmiştir.

Son yıllarda araştırmacılar kompozit malzemeye önem vererek, plaklarda FDM'nin statik ve dinamik etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, bu konuyu çeşitli yönlerden ele almışlardır (Dastjerdi ve Akgöz (2018), Salawu ve ark. (2020), Liew ve ark. (2001), Liew ve ark. (2003), Ye ve Wang (2021), Ray ve Sachade (2006)).

Buna ilave olarak (Sina ve ark. (2009), Ikramullah ve Maknun (2024), Nie ve ark. (2013), Noori ve Yıldırım (2022), Lü ve ark. (2008), Zhong ve Yu (2007), Chakraborty ve ark. (2003), Kumar ve ark. (2024), Turan ve Adiyaman (2024), Mesbah ve ark. (2024)) tarafından yapılan önceki çalışmalarda, farklı yöntemler kullanarak FDM'li kirişlere başarıyla uygulanmıştır. Bir yandan (Weiwei ve ark. (2024), Moita ve ark. (2024), Pang ve ark. (2024), Kulikov ve Plotnikova (2024), Weiwei ve ark. (2024), Laureano ve ark. (2024), Chen ve Li (2024)) tarafından yapılan çalışmalarda, FDM'li kabuklar başarıyla incelenmiştir. Ayrıca, Noori ve ark. (2018), düzlem içi ve düzlem dışı yüklü kademeli eğri eksenli çubukların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış davranışının incelenmesine odaklanmıştır. Araştırmacılar tarafından yapısal elemanların dinamik davranışlarını incelemek için TFY ile Laplace dönüşümünü birleştiren birleşik bir yaklaşım uygulamıştır. TFY'ne dayalı başlangıç değer problemlerinin sayısal çözüm sürecinde RK5 algoritması kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin izotropik, homojen, elastik veya viskoelastik olduğu varsayılmaktadır. Sönümlü zorlanmış titreşim durumunda, Kelvin viskoelastik modeli dikkate alınmıştır. Çalışmaların sonuçlarını doğrulamak ve karşılaştırmak için FORTRAN dilinde bilgisayar programı kodlanmıştır. Yazılan programların etkinliği ve doğruluğu, yöntemin sonuçları, geleneksel SE programı olan ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Adım adım entegrasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında oldukça doğru ve verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, geleneksel adım adım zaman entegrasyonu yaklaşımı, kaba zaman adımları için hatalı sonuçlar verirken, daha ince zaman artışları için daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla hesaplama süresi açısından daha pahalıdır. Eğri eksenli kademeli çubukların zorlanmış titreşim

davranışı için daha doğru ve etkin sonuçlar sağlanmıştır. Ayrıntılı karşılaştırma çalışmalarında önerilen yöntemin doğruluğu, kararlılığı ve üstünlüğü ortaya konulmuştur.

Bu tez çalışmasının temel amacı, FDG dairesel ve halka plakların eksenel simetrik eğilme tepkisinin (davranışını) incelenmesi ve FDM dairesel/halka plakların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışlarının araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda etkili bir sayısal yöntem önerilmektedir. Problemlerin çözümü için SEY yöntemine dayalı FORTRAN dilinde bir bilgisaya kodu yazılmış ve sayısal çözüme yönelik modelinin analizi için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Literatür taramaları, farklı yöntemler kullanılarak dairesel plakların statik davranışını analiz eden birçok çalışmanın bulunduğunu göstermiştir.

Eğilme analizinde, üniform (UMCR), simetrik (SMCR) ve monolitik (MMCR) fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzeme fonksiyonları kullanılmıştır. FDG dairesel plakların eksenel simetrik eğilme davranışı için sekiz düğümlü kuadratik dörtgen elemanı kullanılarak SEY ile ilk kez bu araştırmada ele alınmıştır. Plak elastisite modülünün kalınlık yönünde sürekli olarak değiştiği ve Poisson oranı (ν) değerinin sabit olduğu varsayılmıştır. FDG plakların statik davranışı farklı gözeneklilik katsayıları için incelemiştir. Buna ek olarak, çeşitli gözeneklilik katsayıları (0.1-0.9) için farklı yarıçap değerleri (r=1m-5m) kullanılarak ve çeşitli (h/r) oranları için FDG dairesel plak örnekleri analiz edilmiştir. Ankastre sınır koşulu, FDM'li dairesel plağın doğrulaması için kullanılırken, FDG plaklarının analizinde ankastre ve kayıcı mesnet durumları kullanılmıştır. FDG dairesel plağın yer değiştirme sonuçları farklı gözeneklilik katsayıları için incelenmiştir. ANSYS APDL yazılımının sonuçları ile bu çalışmada elde edilen bulgular karşılaştırıldığında, mükemmel bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte FDM dairesel plağın SE sonuçları, TFY ile elde edilen çözümler de dahil olmak üzere, literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Dinamik analizde dairesel ve halka plak için sonuçlar sunulmuştur. Bilindiği üzere zamana bağlı yapısal mekanik problemlerinin çözümünde zaman adım aralığının doğru bir şekilde saptanması önem arz etmektedir. Zaman adım aralığının doğru bir

şekilde saptanması çoğu zaman zor olmaktadır. Bu amaç ile dinamik problemleri idare eden diferansiyel denklemlerin zamana bağımsız hale getirilerek Laplace veya Forier uzayında çözülmesi literatürde benimsenmektedir. Bu tezde, ele alınan problemlerin dinamik davranışını idare eden denklemlerin zamandan bağımsız bir şekilde çözülebilmesi için Laplace uzayına transfer edilmiştir.

Zamandan bağımsız ve bir takım Laplace prametresine bağlı olarak elde edilen cebrik denklemler, statik bir probleminin denklemlerine benzemektedir. Laplace uzayında elde edilen denklemler ise SEY ile etkin bir şekilde çözülmektedir. Ancak sonuçların zaman uzayına geri tranfer edilmesi, analiz raporun en önemli parçasıdır. Bu nedenle Laplace uzayından zaman uzayına geçmek için modifiye edilmiş Durbin ters Laplace yönteminden istifade edilmiştir. Kullanılan bu ters dönüşüm yönteminin çok etkin olduğu daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir. Temel ve Noori (2021)'nin SEY ile Laplace dönüşümün birlikte kullanılmasına çok güzel bir örnek olup hesaplama sürecini zaman ve çaba açısından önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu yaklaşım daha önce çeşitli mekanik problemlere uygulanmasına rağmen, yazarın bilgisine göre, FD dairesel ve halka plakların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışının bu şekilde araştırılması hiç yapılmamış olup FD dairesel plakların analizinde ilk kez bu tezde uygulanmıştır.

Dairesel veya halka plak modelini oluşturabilmek için, her düğümde iki serbestlik derecesine sahip olan sekiz düğümlü kuadratik bir dörtgen eleman tercih edilmiştir. Sönümlü zorlanmış titreşim davranışı için Kelvin tipi sönüm modelinden yararlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları mevcut yayınlanmış literatür sonuçları ile karşılşatırılarak doğrulanmış olup uygulanan yaklaşımın etkin ve doğru olduğu gösterilmiştir.

Bu tezde yapılan dinamik uygulamaların genel amacı sistemlerin veya yapıların yükleme koşullarındaki zamana bağlı değişikliklere karşı davranışlarını anlamaktır. Bu, gerçek dünya koşullarında yapıların güvenliği ve en iyi performansını sağlamak tasarımcılar için vazgeçilmezdir.

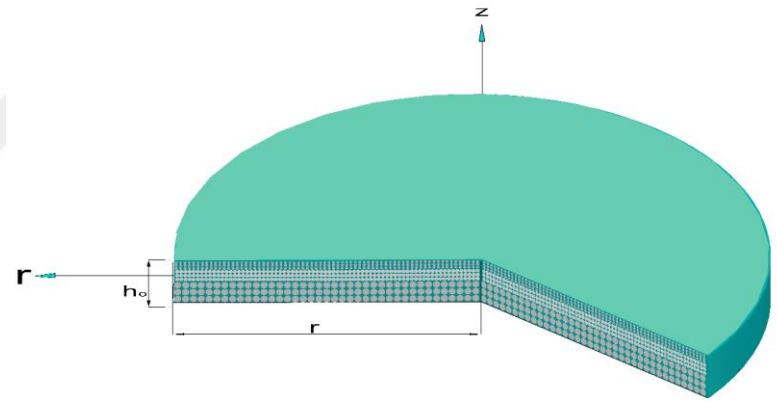
Bu çalışmada önerilen yaklaşım tek tip bir FD malzeme fonksiyonuna sahip dairesel plakların geometrik özellikleri ile kısıtlı değildir. Çeşilti malzeme fonkisyonları, sınır koşulları, yarıçap/kalınlık oranları, dinamik yük fonksiyonları ve malzeme değişim

katsayıları için uygulanbilmektedir. Önerilen yaklaşımın bu üstün özelliği parametrik çalışmaların yapılabilmesi için avantajlı olmasını sağlanmaktadır. Bu sebeple uygulanan yöntemin doğrulaması yapıldıktan sonra bu tezde çeşitli parametrik çalışmalar yapılarak sonuçlar garfik ve tablo formunda sunulmuştur.

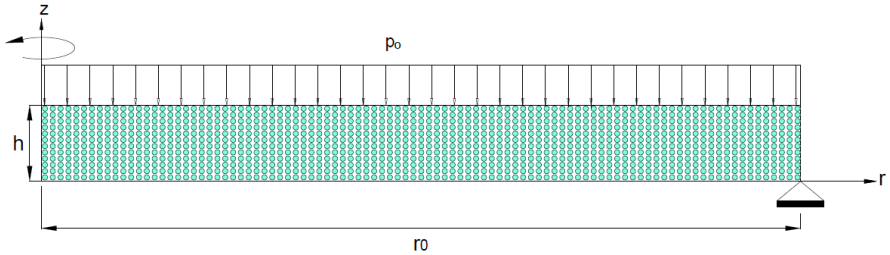
İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

2.1 Materyal

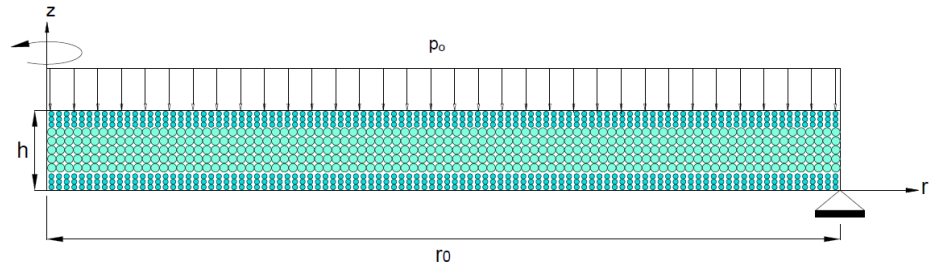
Bu çalışmada, eksenel dönel simetrik yükleme ve geometriye sahip üç boyutlu (3B) dairesel plak problemler, basit iki boyutlu (2B) problemler olarak analiz edilebilmektedir. Planda, r-z düzlemindeki problemler dikkate alınmaktadır. Bu bölümde FDG dairesel plakların eksenel simetrik eğilme davranışı araştırılmıştır. Şekil (3)'te gösterildiği gibi üç farklı malzeme dağılımı dikkate alınmıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri kalınlık yönüne göre değişmektedir. Plağın kalınlığı boyunca üniform gözeneklilik (UMCR) türü düzenli olarak dağılmaktadır. Ayrıca, simetrik gözeneklilik (SMCR) türü, plağın merkezi etrafında harmonik bir dağılım göstermektedir. Monolitik gözeneklilik (MMCR) türüne göre, etkileri kalınlık yönü boyunca en yüksekten en düşüğe doğru değişmektedir.



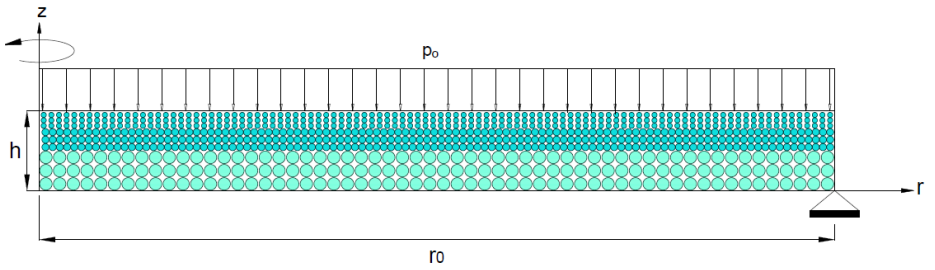
a) Dairesel plağın geometrisi



b) UMCR gözenekli malzemeden yapılmış dairesel plak



c) SMCR gözenekli malzemeden yapılmış dairesel plak



d) MMCR gözenekli malzemeden yapılmış dairesel plak

Şekil 3. Farklı gözeneklilik dağılımlarına sahip dairesel şeklindeki bir plakanın şeması

Dinamik analiz durumunda ise malzemenin kalınlık boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme (FDM) olarak değiştiği kabul edilmiştir.

Bu tez çalışmasında iki tür FD malzeme değişim fonksiyonu dikkate alınmıştır.

2.1.1. A tipi - Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme

Ele alınan plağın hem kütlesel yoğunluğu hem de elastisite modülü fonksiyonel olarak değiştiği kabul edilmiştir. Bu denklemlerde E=380 GPa, ρ=3800 kg/m^3 ve Poisson oranının sabit olduğu varsayılmaktadır (v= 0.3). Bu tip malzeme bağıntıları, aşağdaki denklemlerde açıklanmaktadır (Noori 2019).

$$E(z) = E_0 * e^{\lambda z\,(\frac{z}{H_0})} \tag{1}$$

$$\rho(z) = \rho_0 * e^{\lambda z\,(\frac{z}{H_0})} \tag{2}$$

Plağın alt yüzeyi ile r ekseni arasındaki mesafe z'dir. Plağın iç yarıçapının radyal yönde dışarıya doğru uzanmasıyla radyal koordinat elde edilir. λ_z malzeme değişim katsaysını göstermektedir.

2.1.2. B tipi – Güç yasası fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme

Bu tür FDM'ler, genellikle biri metal ve biri seramik olan iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Bu tezde çözülen örneklerde malzeme özeliklerinin kalınlık yönünde değiştiği kabul edilmiştir. Bu tür FD malzeme özelliklerinin fonksiyonlarını temsil eden denklemler (3-6)'da verilmiştir (Noori 2019).

$$V_{Mm} = \left(\frac{h-2z}{2h}\right)^{\lambda z} \tag{3}$$

$$V_{MC} = \left[1 - \left(\frac{h-2z}{2h}\right)^{\lambda z}\right] \tag{4}$$

Burada, M_M, M_C, metal ve seramik malzemeleri ve z plağın orta yüzeyin'den z ekseni boyunca olan uzaklığı göstermektedir. Radyal koordinat ise plağın iç yarıçapından dışarıya doğru alınmaktadır. Plağın elastisite modülü ve kütlesel yoğunluğu denklem (5-6)'da verilmiştir.

$$E(z) = E_{Mm}\, V_{Mm} + E_{Mc}\, V_{Mc} \tag{5}$$

$$\rho(z) = \rho_{Mm}\, V_{Mm} + \rho_{Mc}\, V_{Mc} \tag{6}$$

Bu durumda kullanılan iki farklı malzemenin mekanik özellikleri Tablo (1)'de gösterilmektedir. Poisson oranı sabit olarak ve plağın kütlesel yoğunluğu ile elastisite modülü kalınlık yönünde sürekli değişken olarak alınmıştır.

Tablo 1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Simge	Malzeme	E (GPa)	ρ (kg/m^3)
M_m	Alüminyum alaşım	70	2715
M_c	Alümina	380	3800

$$E(z) = E_1\left[1 - \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right] + E_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) = E_1\left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right] \tag{7}$$

$$G(z) = G_1\left[1 - \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right] + G_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) = G_1\left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\right] \quad (8)$$

$$E(z) = E_1\left[1 - e_0\left(\frac{1}{e_o} - \frac{1}{e_o}\left(\frac{2}{\pi}\sqrt{1-e_o} - \frac{2}{\pi} + 1\right)^2\right)\right] = E_1[1 - e_0\psi] \quad (9)$$

$$G(z) = G_1\left[1 - e_0\left(\frac{1}{e_o} - \frac{1}{e_o}\left(\frac{2}{\pi}\sqrt{1-e_o} - \frac{2}{\pi} + 1\right)^2\right)\right] = G_1[1 - e_0\psi] \quad (10)$$

$$\psi = \frac{1}{e_o} - \frac{1}{e_o}\left(\frac{2}{\pi}\sqrt{1-e_o} - \frac{2}{\pi} + 1\right)^2 \quad (11)$$

$$E(z) = E_1\left[1 - e_0\, cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{0.5\pi}{2}\right)\right] \quad (12)$$

$$G(z) = G_1\left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{0.5\pi}{2}\right)\right] \quad (13)$$

SMCR, UMCR ve MMCR modellerinin gözenekliliği denklem (7-13)'deki ilişkilerle açıklanabilir (Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2023)). Bu denklemlerde e_0 gözeneklilik katsayısını, h ise plağın kalınlığını göstermektedir.

Bu denklemlerde, G kayma modülünü, E_1 çeliğin elastisiste modülünü (210×10^9 N/m^2) ve G_1 ise çeliğin kayma modülü $G_1 = E_1/2(1+\nu)$ ile ifade edilir.

2. 2. FDG Dairesel Plakların Eksenel Simetrik Eğilme Analizi

2.2.1. Gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri

Birim hacim dikkate alındığında potansiyel enerji, (14 -15) denklemlerdeki gibi elde edilebilir. Bu ifadelerde alan, $dA = drdz$, dz= kalınlık yönü, dr= radyal yönü ve $d\theta$ = açısal yönü göstermektedir (Chandrupatla ve Belegundu (2021));

$$\Pi = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_A \boldsymbol{\sigma}^T\boldsymbol{\varepsilon}\, r\, dA\, d\theta - \int_0^{2\pi}\int_A \boldsymbol{m}^T\boldsymbol{f}\, r\, dA\, d\theta - \int_0^{2\pi}\int_L \boldsymbol{m}^T\boldsymbol{T}\, r\, dl\, d\theta - \sum_i \boldsymbol{m}_i^T\boldsymbol{P}_i \quad (14)$$

$$\Pi = 2\pi \left(\frac{1}{2} \int_A \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon}\, r\, dA - \int_A \boldsymbol{m}^T \boldsymbol{f}\, r\, dA - \int_L \boldsymbol{m}^T \boldsymbol{T}\, r\, dl \right) - \sum_i \boldsymbol{m}_i^T \boldsymbol{P}_i \tag{15}$$

Herhangi bir noktanın, düşey yer değiştirmesi (*m*) ve yatay yer değiştirmesi (*n*) şekilde yazılmaktadır:

$$m = m(r,z) \ , \ n = n(r,z) \tag{16}$$

Ağırlık ve yayılı yükler şu şekilde verilmektedir:

$$\{f\} = \{f_r \ , f_z\}^T \ , \ \{t\} = \{t_r \ , t_z\}^T \tag{17}$$

Şekil değiştirme ve yer değiştirme arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_r, \varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \gamma_{rz}\}^{\mathrm{T}} = \left\{ \frac{\partial m}{\partial r} \ , \frac{\partial n}{\partial z} \ , \frac{m}{r} \ , \frac{\partial m}{\partial z} + \frac{\partial n}{\partial r} \right\} \tag{18}$$

Gerilme vektörü aşağıda verilmiştir:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_r, \sigma_Z, \sigma_\theta, \tau_{rz}\}^T \tag{19}$$

Bünye bağıntısı (Denk. 20), uzama oranları ile gerilmeler arasındaki ilişkiyi göstermektedir:

$$\{\sigma\} = [C]\,\{\varepsilon\} \tag{20}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\nu)p(z) & \nu p(z) & \nu p(z) & 0 \\ & (1-\nu)p(z) & \nu p(z) & 0 \\ & Simetrik & (1-\nu)p(z) & 0 \\ & & & G(z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \tag{21}$$

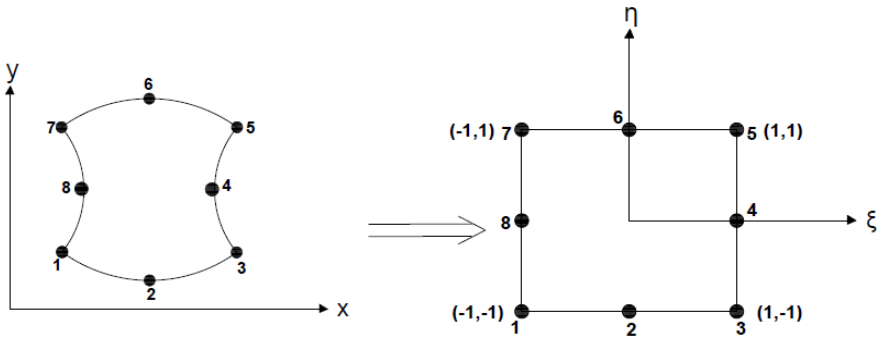
Burada p(z) ve kayma modülü G(z), (22 - 23) denklemleri ile tanımlanmıştır.

$$p(z) = \frac{E(z)}{(1+v)(1-2v)} \tag{22}$$

$$G(z) = \frac{E(z)}{2(1+v)} \tag{23}$$

2.2.2. Sonlu Eleman Yaklaşımı ile Elaman Matrisleri Hesabı

Şekil (4)'te gösterildiği gibi, bu çalışmada izoparametrik sekiz düğümlü kuadratik bir eleman kullanılmıştır.



a) Gerçek eleman b) Referans elemanı

Şekil 4. Sekiz düğümlü kuadratik dörtgen eleman

Düğümlerin koordinatları denklem (24) yardımıyla elde edilebilir; burada r_i ve z_i, i düğümünün koordinatlarıdır,

$$r = \sum_{i=1}^{8} N_i r_i \quad ; \quad z = \sum_{i=1}^{8} N_i z_i \tag{24}$$

N_i kuadratik şekil fonksiyonlarıdır. Deplasmanlar için 8 parametreli kuadratik polinomlar şu şekilde seçilmektedir:

$$m\,(\xi,\eta) = \{P(\xi,\eta)\}^T\{a\} \quad , \quad n\,(\xi,\eta) = \{P(\xi,\eta)\}^T \tag{25}$$

$$m = a_1 + \xi a_2 + \eta a_3 + \xi^2 a_4 + \xi\eta a_5 + \eta^2 a_6 + \xi^2\eta a_7 + \xi\eta^2 a_8 \quad (26)$$

$$n = a_1 + \xi a_2 + \eta a_3 + \xi^2 a_4 + \xi\eta a_5 + \eta^2 a_6 + \xi^2\eta a_7 + \xi\eta^2 a_8 \quad (27)$$

$$m(\xi_i, \eta_i) = m_i \quad (i = 1,2, \dots ,8) \quad (28)$$

Referans elemanının 8 düğümü için m_i matris formunda aşağıdaki gibi verilir:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ m_7 \\ m_8 \end{Bmatrix}}_{M_d} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 & \xi_1^2 & \xi_1\eta_1 & \eta_1^2 & \xi_1^2\eta_1 & \xi_1\eta_1^2 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 & \xi_2^2 & \xi_2\eta_2 & \eta_2^2 & \xi_2^2\eta_2 & \xi_2\eta_2^2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 & \xi_3^2 & \xi_3\eta_3 & \eta_3^2 & \xi_3^2\eta_3 & \xi_3\eta_3^2 \\ 1 & \xi_4 & \eta_4 & \xi_4^2 & \xi_4\eta_4 & \eta_4^2 & \xi_4^2\eta_4 & \xi_4\eta_4^2 \\ 1 & \xi_5 & \eta_5 & \xi_5^2 & \xi_5\eta_5 & \eta_5^2 & \xi_5^2\eta_5 & \xi_5\eta_5^2 \\ 1 & \xi_6 & \eta_6 & \xi_6^2 & \xi_6\eta_6 & \eta_6^2 & \xi_6^2\eta_6 & \xi_6\eta_6^2 \\ 1 & \xi_7 & \eta_7 & \xi_7^2 & \xi_7\eta_7 & \eta_7^2 & \xi_7^2\eta_7 & \xi_7\eta_7^2 \\ 1 & \xi_8 & \eta_8 & \xi_8^2 & \xi_8\eta_8 & \eta_8^2 & \xi_8^2\eta_8 & \xi_8\eta_8^2 \end{bmatrix}}_{P_d} \underbrace{\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{Bmatrix}}_{a} \quad (29)$$

$$\{M_d\} = [P_d]\{a\} \quad (30)$$

$$[P_d]_{ij} = P_j(\xi_i, \eta_i) \quad , \quad \{M_d\} = [P_d]\{a\} \quad , \quad \{a\} = [P_d]^{-1}\{M_d\} \quad (31)$$

$$m(\xi, \eta) = \underbrace{\{P(\xi, \eta)\}^T [P_d]^{-1}}_{\text{şekil fonksiyoları}} \{M_d\} \quad (32)$$

Şekil fonksiyonları aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\{N(\xi, \eta)\}^T = \{P(\xi, \eta)\}^T [P_d]^{-1} \quad (33)$$

$$\{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7, N_8\}^T = \{1, \xi, \eta, \xi^2, \xi\eta, \eta^2, \xi^2\eta, \xi\eta^2\}^T \, [P_d]^{-1} \quad (34)$$

Denklem(34)'deki matrislerin çarpılmasıyla elde edilen şekil fonksiyonları Denklem (35-42)'de verilmiştir (Dhatt ve Touzot 1984):

$$N_1 = \frac{1}{4}(-1 + \xi)\,(1 - \eta)(1 + \xi + \eta) \quad (35)$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(-1+\xi^2)\,(-1+\eta) \tag{36}$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)\,(-1+\eta)(1-\xi+\eta) \tag{37}$$

$$N_4 = \frac{1}{2}(1+\xi\,)\,(1-\eta^2) \tag{38}$$

$$N_5 = \frac{1}{4}(1+\xi)\,(1+\eta)(-1+\xi+\eta) \tag{39}$$

$$N_6 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)\,(1+\eta) \tag{40}$$

$$N_7 = \frac{1}{4}(-1+\xi)\,(1+\eta)(1+\xi-\eta) \tag{41}$$

$$N_8 = \frac{1}{2}(-1+\xi\,)\,(-1+\eta^2) \tag{42}$$

Elemanın herhangi bir noktasındaki düşey ve yatay yer değiştirmeler şekil fonksiyonları ile düğüm deplasmanlarına bağlıdır.

$$m = \sum_{i=1}^{8} N_i m_i \qquad\qquad n = \sum_{i=1}^{8} N_i n_i \tag{43}$$

2.2.3. Eleman rijitlik matrisi

Şekil değiştirme ve yer değiştirmeler arasındaki ilişkiler aşağıda verilmiştir (Chandrupatla ve Belegundu, (2021)) :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m \\ n \end{Bmatrix} \tag{44}$$

$$\{\varepsilon\} = \sum_{i=1}^{8} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{N_i}{r} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m_i \\ n_i \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{8} [B_i]\{d_i\} \tag{45}$$

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{N_i}{r} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix} \quad ; \quad \{d_i\} = \begin{Bmatrix} m_i \\ n_i \end{Bmatrix} \tag{46}$$

Tüm eleman için aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$[B_{\square}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \cdots & N_8 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \cdots & 0 & N_8 \end{bmatrix} \tag{47}$$

$$\{d_e\}^t = \{m_1, n_1, m_2, n_2, m_3, n_3, m_4, n_4, m_5, n_5, m_6, n_6, m_7, n_7, m_8, n_8\} \tag{48}$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{\partial N_i}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial \xi} \tag{49}$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial \eta} \tag{50}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{51}$$

Şekil fonksiyonları ve bunların ξ ve η'ya göre türevleri, Tablo (2) de verilmiştir.

Tablo 2. Şekil fonksiyonları ve türevleri

i	$\{N_i\}$	$\left\{\frac{\partial N_i}{\partial \xi}\right\}$	$\left\{\frac{\partial N_i}{\partial \eta}\right\}$
1	$\frac{1}{4}(-1+\xi)\,(1-\eta)(1+\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1-\eta)(2\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1-\xi)(\xi+2\eta)$
2	$\frac{1}{2}(-1+\xi^2)\,(-1+\eta)$	$(-1+\eta)\,\xi$	$\frac{1}{2}(-1+\xi^2)$
3	$\frac{1}{4}(1+\xi)\,(-1+\eta)(1-\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1-\eta)(2\xi-\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1+\xi)(2\eta-\xi)$
4	$\frac{1}{2}(1+\xi\,)\,(1-\eta^2)$	$\frac{1}{2}(1-\eta^2)$	$-\eta(1+\ \xi)$
5	$\frac{1}{4}(1+\xi)\,(1+\eta)(-1+\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1+\eta)(2\xi+\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1+\xi)(2\eta+\xi)$
6	$\frac{1}{2}(\xi^2-1)\,(1+\eta)$	$-(1+\eta)\,\xi$	$\frac{1}{2}(\xi^2-1)$
7	$\frac{1}{4}(-1+\xi)\,(1+\eta)(1+\xi-\eta)$	$\frac{1}{4}\,(1+\eta)(2\xi-\eta)$	$\frac{1}{4}\,(\xi-1)(2\eta-\xi)$
8	$\frac{1}{2}(1-\xi\,)\,(1-\eta^2)$	$-\frac{1}{2}(1-\eta^2)$	$-\eta(1-\ \xi)$

Jacobian dönüşüm matrisi aşağıdaki denklem ile verilmektedir:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{8} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} r_i & \sum_{i=1}^{8} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1}^{8} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} r_i & \sum_{i=1}^{8} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \end{bmatrix} \tag{52}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{det\,[J]} \begin{bmatrix} \frac{\partial z}{\partial \eta} & -\frac{\partial z}{\partial \xi} \\ -\frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial r}{\partial \xi} \end{bmatrix}}_{[J]^{-1}=[J^*]} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \tag{53}$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial r} = J_{11}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{12}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \tag{54}$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial z} = J_{21}^* \frac{\partial N_i}{\partial \xi} + J_{22}^* \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \tag{55}$$

[B] matrisi referans elemanı koordinatlarına göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{21}^* & J_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/r \\ J_{21}^* & J_{22}^* & J_{11}^* & J_{12}^* & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ N_i & 0 \end{bmatrix} \tag{56}$$

Eleman rijitlik matrisi aşağıdaki integralden hesaplanmaktadır:

$$[k_e] = \iint_{A_e} \left\{ \int_0^{2\pi} [B]^T [C][B]\, r d\theta \right\} dr dz \tag{57}$$

$$dA = dr dz = det[J]\, d\xi d\eta \tag{58}$$

Eleman rijitlik matrisi θ (0-2π) üzerinden integre edilirse aşağıdaki denklem gibi olmaktadır:

$$[k_e] = 2\pi \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [B]^T [C][B]\, r\, det[J]\, d\xi d\eta \tag{59}$$

2.2.4. Eleman yük vektörü

Hacim yükleri denklem (60-64)'te sunulmaktadır.

$$\{f_h\} = \iint_{A_e} \left\{ \int_0^{2\pi} \{N\}^T \{f\} r d\theta \right\} dr dz \tag{60}$$

$$\{f_e\} = 2\pi \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \rho\, g\, \{N\}^T \{f\} r\, det[J]\, d\xi d\eta \tag{61}$$

$$\{f_e\} = \int_{L_e} \left\{ \int_0^{2\pi} \{N\}^T \{T\} r d\theta \right\} dl \tag{62}$$

$$\{f_e\} = \int_{L_e} \left\{ \int_0^{2\pi} \{N\}^T \{T\} r d\theta \right\} dl \tag{63}$$

$$\{f_e\} = 2\pi \int_{-1}^{+1} \{N\}^T \{T\} r \frac{L_e}{2} d\xi \tag{64}$$

Hacim yükleri ve eleman sınırına etki eden yayılı yük için düğüm yük vektörü de aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \{f_e\} = \rho(r)\, g\, 2\pi \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \{N\}^T \{f\} r\, det[J]\, d\xi d\eta \\ + 2\pi \int_{-1}^{+1} \{N\}^T \{T\} r \frac{L_e}{2} d\xi \end{aligned} \tag{65}$$

2. 3. FDM Dairesel ve Halka Plakların Dinamik Analizi

Dinamik davranış incelenirken rijitlik martrisinin yanısasıra kütle matrisleri ve sönüm matrislerinin oluşturulması da önem arz etmtektedir. Bu kısımda kütle matrislerinin elde edilmesi ele alınmıştır.

2.3.1. Eleman kütle matrisinin oluşturulması

Kinetik enerji denklem (66)'daki gibi yazılır.

$$T = \frac{1}{2}\int_V \dot{\boldsymbol{m}}^T \dot{\boldsymbol{m}}\ \rho\,(z)\, r\, dV \tag{66}$$

$\rho(z)$, birim hacmin kütlesini ifade etmektedir

$$\dot{\boldsymbol{m}} = [\dot{m}, \dot{n}]^T \tag{67}$$

Aşağıdaki denklem, hız vektörünü$\{\boldsymbol{m}\}$ göstermektedir.

$$\{\boldsymbol{m}\} = [N]\{d\} \tag{68}$$

Dinamik analizde, düğüm deplasmanları vektörü $\{\mathrm{d}_e\}$ zamana bağlı olur ve hız vektörü de aşağıdaki gibi bulunur.

$$\{\dot{\boldsymbol{m}}\} = [N]\{\dot{d}_e\} \tag{69}$$

Denklem (69) denklem (66)'da yerine yazılması durumunda, kinetik enerji aşağdaki denklemdeki gibi elde edilir:

$$T_e = \frac{1}{2}\{\dot{d}\}^T \left[\int_e \rho(z)\,\{N\}^T\{N\}\ \ dV\right]\{\dot{d}_e\} \tag{70}$$

$$[m_e] = \int_e \rho(z)\,\{N\}^T\{N\}\ \ dV \tag{71}$$

$$dV = r\, d\theta\, dr\, dz = r\, d\theta\, dA \tag{72}$$

$$[m_e] = \iint_{A_e}\left\{\int_0^{2\pi} \rho(z)\,\{N\}^T\{N\}\, r d\theta\right\} dr dz \tag{73}$$

Verilen eleman kütle matrisi (73), θ üzerinde (0, 2π) arasında integral alındığında aşağıdaki gibi olur.

$$[m_e] = 2\pi \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \rho(z)\, \{N\}^T \{N\}\, r\, Det[J]\, d\xi d\eta \tag{74}$$

Aşağıdaki denklemler elemanların rijitlik ve kütle matrisleri ile yük vektörü için standart Gauss sayısal integral yöntemi kullanarak elde edilir.

$$\int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \boldsymbol{G}(\xi,\eta)\, d\xi\, d\eta = \int_{-1}^{+1} \left[\int_{-1}^{+1} \boldsymbol{G}(\xi,\eta)\, d\eta \right] d\xi \tag{75}$$

$$\cong \int_{-1}^{+1} \left[\sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{G}(\xi,\eta_j)\, w_j \right] d\xi \tag{76}$$

$$\cong \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \boldsymbol{G}(\xi_i,\eta_j)\, w_i\, w_j \tag{77}$$

Denklem (77)'de rijitlik matrisi için G(ξ,η) ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\boldsymbol{G}(\xi,\eta) = [B]^T [C][B] r\, Det[J] \tag{78}$$

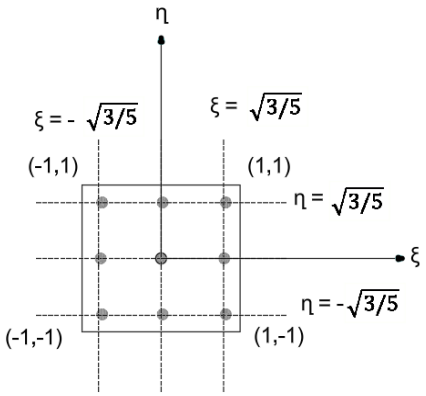
Denklem (77)'de kütle matrisi için G(ξ,η) ifadesi şu şekilde olur:

$$\boldsymbol{G}(\xi,\eta) = \{N\}^T \{N\} r\, Det[J] \tag{79}$$

Denklem (77)'de düğüm yük vektörü için *G(ξ,η)* ifadesi (80) şeklinde açıklanır.

$$\boldsymbol{G}(\xi,\eta) = \{N\}^T \{f\}\, r\, Det[J] \tag{80}$$

Denklem (77)'de *m* ve *n*, ξ ve η doğrultularındaki Gauss noktası sayılarıdır. 3x3 Gauss noktası için integrasyon (Şekil 5)'te, noktalarının yerleri Tablo (3)'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Gauss integrasyon noktaları

Tablo 3. Ağırlık değerleri ve Gauss integrasyon noktasının koordinatları

Gauss Noktası Sayısı	İntegrasyon Nokta Koordinatları ξ_i , η_j	İntegrasyon Ağırlık Değerleri W_i , W_J
3x3	0.00	8/9
	$\pm\sqrt{3/5}$	5/9

2.3.2 Hareket denkleminin Laplace dönüşümü

Bu tezin temel amaçlarından biri, zamana bağlı denklemlerin Laplace uzayına transfer edilerek zamandan bağımsız hale getirilip sonlu elemanlar yöntemi ile etkin bir şekilde çözülmesidir. Bu kapsamda tezin bu bölümü Laplace dönüşümüne ayrılmıştır.

Laplace dönüşümü $\mathcal{L}\{f(t)\}$ zamana bağlı bir fonksiyonun $f(t), \mathrm{t} > 0$ için aşağdaki denklemlerle belirlenmektedir:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \bar{F}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)\, dt \tag{81}$$

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f'(t)\, dt = \lim_{\mathrm{p}\to\infty} \int_0^{\mathrm{p}} e^{-st} f'(t) dt \tag{82}$$

$$\lim_{p\to\infty}\int_0^p e^{-st}\,f'(t)\,dt \tag{83}$$

$$= \lim_{p\to\infty}\left\{e^{-st}f(t)\,|_0^p + s\int_0^p e^{-st}\,f(t)\,dt\right\}$$

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = \lim_{p\to\infty}\left\{e^{-sp}f(p) - f(0) + s\int_0^p e^{-st}\,f(t)\,dt\right\} \tag{84}$$

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = s\int_0^p e^{-st}\,f(t)\,dt - f(0) = s\bar{F}\,(s) + f(0) \tag{85}$$

$$\mathcal{L}\{f''(t)\} = s^2\bar{F}(s) + sf(0) + \dot{f}\,(0)\} \tag{86}$$

2.3.3. Sayısal ters laplace dönüşüm algoritması

Sonuçlar, Laplace uzayından zaman uzayına aktarılmak için, modifiye edilmiş Durbin algoritması kullanılarak elde edilmektedir.

Modifiye edilmiş Durbin algoritması şu şekilde verilmektedir (Noori 2019).

$$f(t_j) \cong \frac{2e^{aj\Delta t}}{T}\left|-\frac{1}{2}\,Re\,\{\bar{F}(a)\}\right.$$
$$\left. + Re\left\{\sum_{k=0}^{N-1}(A(k) + i\,B(k))\,e^{\left(i\frac{2\pi}{N}\right)jk}\right\}\right| \tag{87}$$

$$A(k) = \sum_{l=0}^{L} Re\left\{\bar{F}(a + i(k + l\,N)\frac{2\pi}{T}\right\} \tag{88}$$

Bu tez kapsamında kullanılan dinamik yüklerin Laplace dönüşümleri Spiegel (1965)'de verilen fonksiyonlar ile tanımlanmıştır.

Adım tipi yük (Ani yük) için Laplace dönüşüm fonksiyonu aşağıdaki denklemde açıklanmaktadır. (Chandrupatla ve Belegundu, (2021))

$$p_0 = \frac{1}{s} \tag{89}$$

Kare dalga yük fonksiyonu

$$p_0 = \frac{1}{s}\frac{e^{cs} - 1}{e^{cs} + 1} \tag{90}$$

İmpulsif dik üçgen yük

$$p_0 = \left[\frac{1 - e^{\frac{cs}{2}} - 1}{s}\right]^2 \frac{2}{c} \tag{91}$$

İmpulsif sinüs dalga tipi yük

$$p_0 = \frac{\pi c(1 + e^{-cs})}{(c^2 s^2 + \pi^2)} \tag{92}$$

Testere dişi dalga yük fonksiyonu

$$p_0 = \frac{1}{(as^2)} - \frac{e^{-as})}{s(1 - e^{-as})} \tag{93}$$

Bu çalışmada, inşaat mühendisliği ugulamalarında sıklıkla kullanılan iki tür sınır koşulu kullanılmıştır. Örneklerde kullanılan sınır koşulları ile ilgili detaylar Tablo (4)'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Sınır koşuları

Sınır koşulu	**Simetri noktası için**	**Mesnet**
Ankastre	U_r=0	U_r=0 U_z=0
Kayıcı mesnet	U_r=0	U_z=0

2.3.4 Sönüm etkisi

Bu tez çalışmasında ele alınan FD eksenel simetrik plakların sönümlü zorlanmış titreşim analizinde sönüm etksi Kelvin tipi sönüm modeli ile modellenmiştir. Sönümlü sistemlerde elastik-viskoelastik analojisi yardımıyla sönüm etkisi kolay bir biçimde denklemlere dahil edilebilmektedir (Boley ve Weiner (2012)). Kelvin tipi sönüm modeli için bünye denklemi şöyledir:

$$\sigma_{ij} = 2G(z)\left(e_{ij} + g\frac{de_{ij}}{dt}\right) \tag{94}$$

Bu denklemde σ_{ij}, deviatorik gerilmeyi, e_{ij} deviatorik şekil değiştirmeyi ve g visköz sönüm oranını göstermektedir. Ele alınan plakların viskoelastik zorlanmış titreşim davranışını araştırmak için elastisite modülü E aşağıdaki formda yeniden elde edilmektedir.

$$E_v(z) = E(z)(1 + gs) \tag{95}$$

$$G_v(z) = G(z)(1 + gs) \quad (96)$$

Bu denklemlerde E_v ve G_v viksoelastik mekanik özelleri s ise Laplace parameteresini göstermektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, FD dairesel plakların statik ve zorlanmış titreşim davranışı teorik olarak araştırılmıştır. Bu bölümde ilk olarak kalınlık boyunca gerekli katman sayıların saptanması, ikinci olarak sonuçlarının literatür ile doğrulanması ve son olarak parameterik sonuçların sunulması amaçlanmaktadır.

3.1. Statik Yükleme Altında FDM Dairesel Plağın SEY Doğrulaması

Bu bölümde, FDM'li dairesel bir plak ele alınmaktadır. Plağın geometrisi: yarıçapı, r=1 m , kalınlığı, h = 0.1m olarak dikkate alınmaktadır. Malzeme özelikleri ise : Elastisite mödülü (E) kalınlık boyunca değişmektedir. Poisson oranı ise (v=0.3) sabit kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlar $\lambda z = 2$ için sunulmuştur.

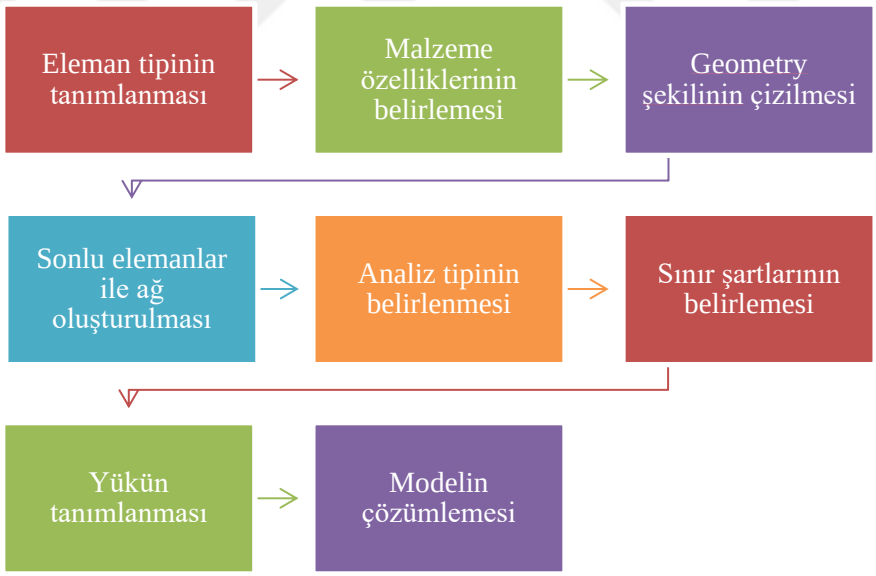
FMD plakların SEY ile analiz edilebilmesi için gerekli olan optimum bölme sayısının belirlenmesi amacıyla bu yöntem ile elde edilen sonuçlar ANSYS progamı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. ANSYS programında problemlerin modellenmesi için PLANE183 elemanı kullanılmıştır. Tezin bu bölümünde ele alınan tüm modeller için aynı sınır koşulu uygulanarak (ankastre mesnetli) analiz yapılmıştır. Plaklara yayılı yük (p=10 MPa) uygulanarak maksimum deplasmanlar elde edilmiştir. ANSYS (APDL) paket programında elde edilen sonuçlar, önerilen metodun sonuçları ile Tablo (5)'te karşılaştırılmıştır. Sunulan yöntem için FORTRAN dilinde bir program hazırlanmış olup programlama yazılım kılavuzları EK-1 ve EK-2'de verilmiştir.

Bu tezde kullanılan eleman, kalınlık yönünde 80 tabakaya bölünmüştür. Tablo (5)'te ANSYS ve FORTRAN programlarından elde edilen deplasman sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre kalınlık yönünde 20 tabakaya bölünen elemanların sonuçları birbirine yakın olduğu görünmektedir. 40 tabaka ve üzeri sonuçları ise, değerlerin örtüştüğünü ortaya çıkmıştır. Buna göre bu çalışmada kullanılan model, kalınlık yönünde 80 tabakaya bölünmesi uygun görülmüştür.

Tablo 5. Sonlu eleman yaklaşım ile düşey yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırması (mm)

Kalınlık yönünde bölme sayısı	Radyal yönde bölme sayısı	Toplam Eleman	Bu çalışma (mm)	ANSYS (mm)
2	5	10	0.0153760	0.015708
3	30	90	0.0162168	0.016242
5	5	25	0.0150456	0.015349
10	3	30	0.0135113	0.013572
20	5	100	0.0140429	0.01403
20	10	200	0.0141956	0.014192
20	20	400	0.0142509	0.014282
20	25	500	0.0142597	0.0142810
20	30	600	0.0142614	0.0142810
20	50	1000	0.0142735	0.014281
20	100	2000	0.0142700	0.014281
40	20	800	0.0143643	0.0143640

ANSYS programındaki analiz adımları Şekil (6)'da detaylı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 6. ANSYS programında analiz adımları

3.2. FDM Dairesel Plağın Literatür ve SEY İle Karşılaştırılması

Bu tezde öncelikle, SEY yöntemi kullanılarak iki tip sınır koşulu ve üç farklı malzeme değişim sabiti (0, 2 ve 6) için FDM'li dairesel plakların sayısal sonuçları sunulmaktadır. Bu amaçla FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı kodlanmıştır. Seçilen tekniği doğrulamak için boyutsuz düşey yer değiştirmelerin maksimum değerleri mevcut literatürle ve Tablo (6)'daki ANSYS (PLANE183) ile karşılaştırmaktadır. Plağın elastiklik modülü, kalınlık yönlerinde sürekli olarak değişirken, Poisson oranın (ν = 0.288) sabit olduğu varsayılmaktadır. Plağın Alüminyum/Zirkonya'dan yapıldığı dikkate alınmaktadır. E_r, Alüminyum ve seramiğin elastisite modüllerinin oranını (Saidi ve ark. (2009), Noori ve Temel (2021))'de olduğu gibi E_r= 0.396'ya eşit olarak gösterimektedir. Em, Alüminyumun elastisite modülünü (E_m =70 GPa) tanımlarken, E_c, seramiğin elastisite modülünü tanımlar. Düzgün yayılı yüke maruz kalan dairesel bir plak ele alınmıştır. Bu plağın yarıçapı (r_0 = 1.00 m), kalınlığı (h = 0.10 m) ve yayıylı yükü (p_z =10 N/m$^{2)}$. Denklem (91)'de maksimum boyutsuz deplasman, $\overline{w}$ simgesi ile gösterilmektedir ve D_c eğilme rijitliğini ifade etmektedir.

Bu çalışmada ankastre ve kayıcı mesnet sınır koşulları uygulanmaktadır. (Doori ve ark. 2024).

$$E(z) = (E_m - E_c)\left(\frac{h - 2z}{2h}\right)^n + E_c \tag{97}$$

$$E_r = E_m/E_c \tag{98}$$

$$D_c = \frac{E_c\, h^3}{12(1 - v^2)} \;\; ; \;\; \overline{w} = \frac{64\, Dc}{P_Z\, {r_0}^4\; w_{max}} \tag{99}$$

Tablo 6. Ankastre mesnetli için FDM dairesel plağın sonuçlarının doğrulanması (mm)

Sınır koşuları	n	Ref. [Saidi]	Ref. [Reddy]	Ref. [Noori]	ANSYS (SHELL209)	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
Ankastre	0	2.63820	2.6390	2.63870	2.63860	2.62835	2.62610
	2	1.44290	1.4440	1.44690	1.44580	1.43690	1.44290
	6	1.25520	1.2570	1.25920	1.25810	1.25320	1.25899
Kayıcı-mesnet	0	10.4810	10.481	10.4812	10.4803	10.4556	10.4576
	2	5.75460	5.7560	5.72650	5.76110	5.76920	5.77197
	6	5.00580	5.0070	4.98470	5.01270	5.03130	5.03537
Bağıl Hata %							
Sınır koşuları	**n**	**Ref. [Saidi]**	**Ref. [Reddy]**	**Ref. [Noori]**	**ANSYS (SHELL209)**	**ANSYS (PLANE183)**	**Bu çalışma**
Ankastre	0	0.45864	0.48882	0.47750	0.47373	0.08560	0
	2	0	0.07617	0.27645	0.200580	0.41756	0
	6	0.30194	0.08817	0.01667	0.07074	0.46201	0
Kayıcı-mesnet	0	0.22326	0.22326	0.2251	0.21659	0.01912	0
	2	0.301845	0.27744	0.79402	0.18867	0.04801	0
	6	0.590714	0.56660	1.01651	0.452251	0.80893	0

Reddy ve ark. (1999), birinci mertebeden kayma deformasyona (Mindlin plak teorisine) dayalı analitik yöntem kullanmıştır. Saidi ve ark. (2009), kısıtlanmamış üçüncü mertebeden kayma deformasyon plak teorisine dayanan çözümleri kullanmak için analatik yöntem uygulamıştır. Noori ve Temel (2021), TFY'i uygularak analiz yapmıştır. Bununla birilkte sunulan yaklaşımın sonuçlarının önceki literatürdekiler ile bağıl hata, % üzerinden tablo (6)'da sunulmuştur. Sunulan yaklaşımın sonuçlarının önceki literatürdekiler ile tablo (6)'da açıklandığı gibi mükemmel bir uyum içinde olduğu görülebilir. Bu bölümdeki çalışmada , kalınlık yönünde değişen malzeme özelliklerinin gözeneklilik üzerindeki etkilerini incelenmektir. Modellerin tasarımında, üniform UMCR, simetrik SMCR ve monolitik MMCR gözenekli malzeme türleri kullanılmıştır. Plak kalınlık yönünde 80 katmana bölünmüştür. Kalınlık değeri dikkate alındığında (h) sabit olup h=0.1 m'ye eşittir. Yarıçap değerinin r =1m-5 m arasında değişeceği varsayılmaktadır. Poisson oranı (ν =0.3) değerine eşit bir değerle sabit alınmaktadır. Ayrıca dairesel plak radyal yönde 30 katmana bölünmüştür. Sonuç olarak plağın modeli 2400 elemandan oluşmaktadır. Sonuçları doğrulamak için gözeneklilik katsayısı için bu çalışmadan elde edilen maksimum düşey yer değiştirme değerleri (e_0 = 0.2, 0.4 ve 0.9) sırasıyla Tablo (7-11)'de sunulan

ANSYS programıyla karşılaştırılmıştır. ANSYS'teki modele ilişkin olarak plak kalınlığı boyunca 80 katmanlı izotropik malzeme tanımlanmış ve model için PLANE-183 elemanı kullanılmıştır. Sonuç olarak dairesel plak 2400 elemana bölünmüştür. Bu eleman, her düğümde iki serbestlik derecesine sahip kuadratik diktötgen 8 düğümlü bir elemanla tanımlanmaktadır. Bu eleman hakkında daha fazla bilgi almak için Mekanik APDL Eleman Referansını (2013) bakınız.

Tablo 7. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/10) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm)

e_0	UMCR		MMCR		SMCR	
	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
0.2	0.0000097	0.0000097	0.000009143	0.00000996	0.009157000	0.00912457
0.4	0.0000115	0.0000115	0.000010008	0.00001089	0.000010009	0.00000993
0.9	0.0000265	0.0000265	0.000013684	0.00001487	0.000013798	0.00001348

Tablo 8. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r =1/20*) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm)

e_0	UMCR		MMCR		SMCR	
	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)		ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
0.2	0.00015051	0.00015054	0.0001420	0.00015565	0.1414600	0.14095500
0.4	0.00017852	0.00017855	0.0001550	0.00017023	0.1538500	0.15263200
0.9	0.00041069	0.00041076	0.0002120	0.00023267	0.2001900	0.19553400

Tablo 9. Ankastre mesnetli dairesel plak (*h/r* =1/30) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm)

e_0	UMCR		MMCR		SMCR	
	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
0.2	0.00075733	0.00075759	0.00071296	0.00078448	0.7113300	0.70889700
0.4	0.00089825	0.00089855	0.00078050	0.00085796	0.7729200	0.76687500
0.9	0.00206640	0.00206715	0.00106940	0.00117297	0.9938500	0.97086500

Tablo 10. Ankastre mesnetli dairesel plak (h/r =1/40) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm)

e_0	UMCR		MMCR		SMCR	
	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
0.2	0.0023888	0.00238934	0.00224890	0.00270732	2.243200	2.2352600
0.4	0.0028333	0.00283392	0.00246190	0.00270732	2.436600	2.4172400
0.9	0.0065182	0.00651951	0.00337370	0.00370166	3.119800	3.0472700

Tablo 11. Ankastre mesnetli dairesel plak (h/r =1/50) için deplasmanların ANSYS sonuçlarıyla doğrulanması (mm)

e_0	UMCR		MMCR		SMCR	
	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma	ANSYS (PLANE183)	Bu çalışma
0.2	0.0058267	0.00582759	0.0054852	0.00603902	5.4710000	5.4512200
0.4	0.0069108	0.00691190	0.0060050	0.00660473	5.9417000	5.8940800
0.9	0.0158990	0.01590110	0.0082294	0.00903085	7.5925000	7.4156400

Tablolardan (7-11) elde edilen sonuçlar, ankastre sınır koşulu için analiz edilmiştir. Bu çalışmada FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı kodlanmıştır. Plağın elastisite modülü kalınlık yönünde sürekli olarak değişmektedir (E_1= 210x 10^9 N/m^2). Sonuçları doğrulamak amacıyla, h/r'nin çeşitli oranları için analiz edilmektedir. Tablolara (7-11) göre gözeneklilik katsayısı ve h/r oranı arttıkça plağın deplasmanı da artmaktadır. Ankastre mesnetli dairesel plağın mevcut çalışma UMCR türü ile ANSYS sonuçlarının diğer iki türüyle karşılaştırıldığında, mükemmel bir uyum ortaya çıkmıştır. MMCR türü için ANSYS ile bu çalışma arasındaki en büyük fark, Tablo (11)'de h/r = 1/50 ve gözeneklilik katsayısı e_0 =0.9 iken SMCR tipinde en büyük fark Tablo (7)'de h/r =1/10) için e_0 =0.4 gözeneklilik katsayısı için görülmüştür. Tablolarda (12-17) gösterildiği gibi, maksimum deplasman değerleri, 0.1'den (0.9'a kadar değişen çeşitli gözeneklilik katsayıları için farklı h/r, r = 1m-5m değerleri dikkate alınarak iki sınır koşulu (ankastre ve kayıcı) için incelenmiştir.

Tablo 12. Ankastre mesnetli UMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00000900	0.00014000	0.00070450	0.00222180	0.00541890
0.2	0.00000970	0.00015050	0.00075760	0.00238930	0.00582760
0.3	0.00001050	0.00016320	0.00082110	0.00258950	0.00631580
0.4	0.00001150	0.00017860	0.00089860	0.00283390	0.00691190
0.5	0.00001280	0.00019790	0.00099590	0.00314120	0.00766130
0.6	0.00001440	0.00022320	0.00112340	0.00354300	0.00864130
0.7	0.00001670	0.00025830	0.00130000	0.00410010	0.01000020
0.8	0.00002010	0.00031190	0.00156940	0.00494970	0.01207230
0.9	0.00002650	0.00041080	0.00206720	0.00651950	0.01590110

Tablo 13. Ankastre mesnetli SMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00000877	0.00013578	0.00068312	0.00215426	0.00525398
0.2	0.00000912	0.00014096	0.00070890	0.00223526	0.00545122
0.3	0.00000951	0.00014655	0.00073672	0.00232265	0.00566394
0.4	0.00000993	0.00015263	0.00076688	0.00241724	0.00589408
0.5	0.00001040	0.00015928	0.00079968	0.00252002	0.00614396
0.6	0.00001093	0.00016659	0.00083558	0.00263218	0.00641638
0.7	0.00001155	0.00017474	0.00087514	0.00275534	0.00671493
0.8	0.00001233	0.00018405	0.00091936	0.00289188	0.00704464
0.9	0.00001348	0.00019553	0.00097087	0.00304727	0.00741564

Tablo 14. Ankastre mesnetli MMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00000957	0.00014952	0.00075361	0.00237802	0.00580134
0.2	0.00000996	0.00015565	0.00078448	0.00247544	0.00603902
0.3	0.00001040	0.00016250	0.00081901	0.00258439	0.00630480
0.4	0.00001089	0.00017023	0.00085796	0.00270732	0.00660473
0.5	0.00001146	0.00017904	0.00090239	0.00284753	0.00694680
0.6	0.00001210	0.00018921	0.00095370	0.00300949	0.00734195
0.7	0.00001286	0.00020113	0.00101383	0.00319927	0.00780498
0.8	0.00001377	0.00021535	0.00108557	0.00342574	0.00835759
0.9	0.00001487	0.00023267	0.00117297	0.00370166	0.00903085

Tablo 15. Kayıcı mesnetli UMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00003570	0.00056760	0.00286970	0.00906540	0.02212770
0.2	0.00003840	0.00061040	0.00308610	0.00974920	0.02379680
0.3	0.00004160	0.00066150	0.00334460	0.01056590	0.02579030
0.4	0.00004560	0.00072390	0.00366030	0.01156320	0.02822450
0.5	0.00005050	0.00080240	0.00405720	0.01281680	0.03128440
0.6	0.00005700	0.00090510	0.00457620	0.01445650	0.03528610
0.7	0.00006590	0.00104740	0.00529580	0.01672980	0.04083560
0.8	0.00007960	0.00126440	0.00639310	0.02019640	0.04929670
0.9	0.00010480	0.00166550	0.00842070	0.02660150	0.06493180

Tablo 16. Kayıcı mesnetli SMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00003464	0.00055032	0.00278226	0.00878913	0.02145300
0.2	0.00003596	0.00057101	0.00288662	0.00911850	0.02225660
0.3	0.00003739	0.00059334	0.00299914	0.00947357	0.02312280
0.4	0.00003894	0.00061750	0.00312083	0.00985752	0.02405940
0.5	0.00004064	0.00064375	0.00325291	0.01027400	0.02507530
0.6	0.00004251	0.00067240	0.00339682	0.01072760	0.02618120
0.7	0.00004459	0.00070386	0.00355435	0.01122360	0.02739000
0.8	0.00004696	0.00073873	0.00372795	0.01176900	0.02871780
0.9	0.00004989	0.00077841	0.00392202	0.01237480	0.03018830

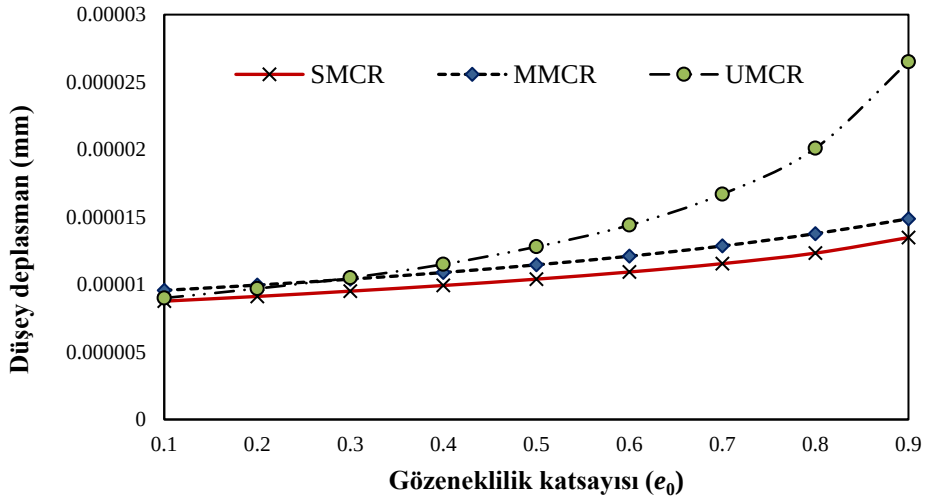
Tablo 17. Kayıcı mesnetli MMCR gözenekli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirme değerleri (mm)

			h / r		
e_0	**1/10**	**1/20**	**1/30**	**1/40**	**1/50**
0.1	0.00004666	0.00074289	0.00375751	0.01187180	0.02897950
0.2	0.00004857	0.00077333	0.00391146	0.01235820	0.03016680
0.3	0.00005070	0.00080736	0.00408361	0.01290210	0.03149450
0.4	0.00005312	0.00084577	0.00427788	0.01351590	0.03299290
0.5	0.00005586	0.00088957	0.00449945	0.01421600	0.03470180
0.6	0.00005904	0.00094017	0.00475541	0.01502470	0.03667610
0.7	0.00006276	0.00099946	0.00505536	0.01597250	0.03898950
0.8	0.00006720	0.00107022	0.00541333	0.01710360	0.04175070
0.9	0.00007260	0.00115643	0.00584950	0.01848180	0.04511500

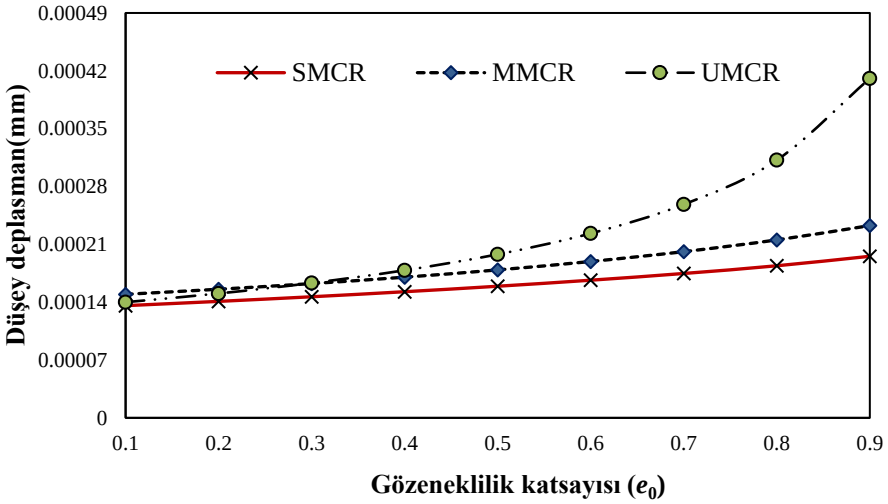
Tüm gözeneklilik katsayısı türleri için elde edilen sonuçlara göre, gözeneklilik katsayısı e_0 değeri arttıkça maksimum deplasman değerininde arttığını görülmektedir. Ayrıca tüm gözeneklilik katsayısı türleri için *h/r* değeri arttığında maksimum deplasman değerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Tablolar (12-17)'de elde edilen sonuçlar, tüm sınır koşulları türleri için analiz yapılmışrtır. Bu sonuçlara göre, gözeneklik katsayısı 0.9, *h/r* =1/50 olan UMCR türü için maksimum düşey yer değiştirmenin en yüksek değerinin Tablo (15)'te kayıcı mesnet tipte kaydedilirken, Tablo (13)'te ankastre mesnt tipi için en düşük değer (0.1) gözenekliliğin SMCR'si için kaydedilmiştir. Kayıcı mesnetli dairesel plağın, maksimum düşey yer değiştirmenin en yüksek değeri Tablo (15)'te UMCR gözenekli tip için kaydedilirken, en düşük değer Tablo (16)'da SMCR gözenekli tip için görülmüştür.

Ankastre mesnetli ve kayıcı mesnetli FDG dairesel plakların UMCR, SMCR ve MMCR malzeme tipleri için elde edilen maksimum deplasman değerleri, Grafik (1-10)'da sunulmaktadır.

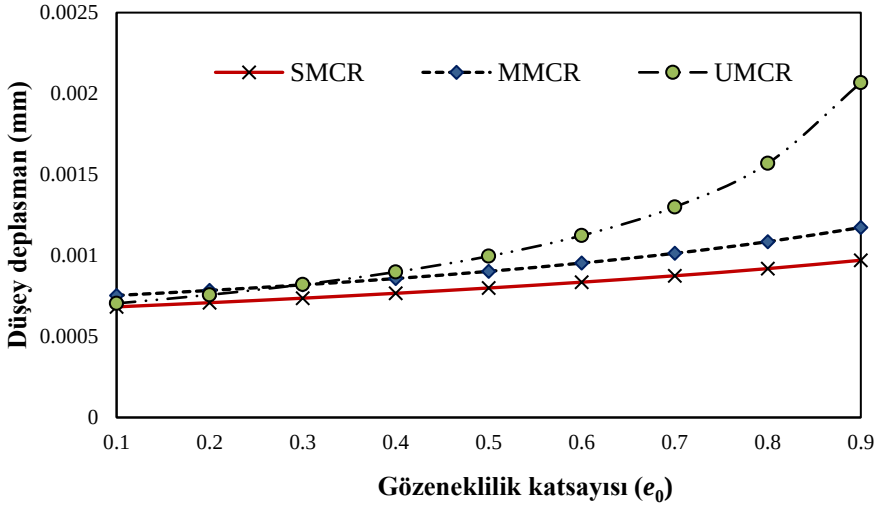
FDG dairesel plağın, bu tipler için maksimum düşey yer değiştirmesinin sonuçları karşılaştırılmaktadır. Ankastre mesnet sınır koşulu analizinde elde edilen sonuçlar Grafik (1-5)'te gösterilmektedir. Modelin çeşitli (*h/r*) değerleri için test edilmesi amaçlanmıştır.



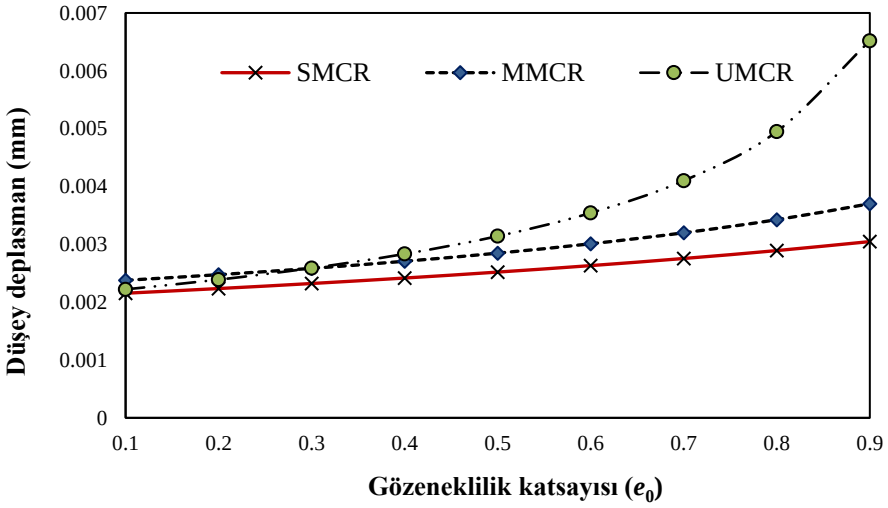
Grafik 1. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (*h* /*r* = 1/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



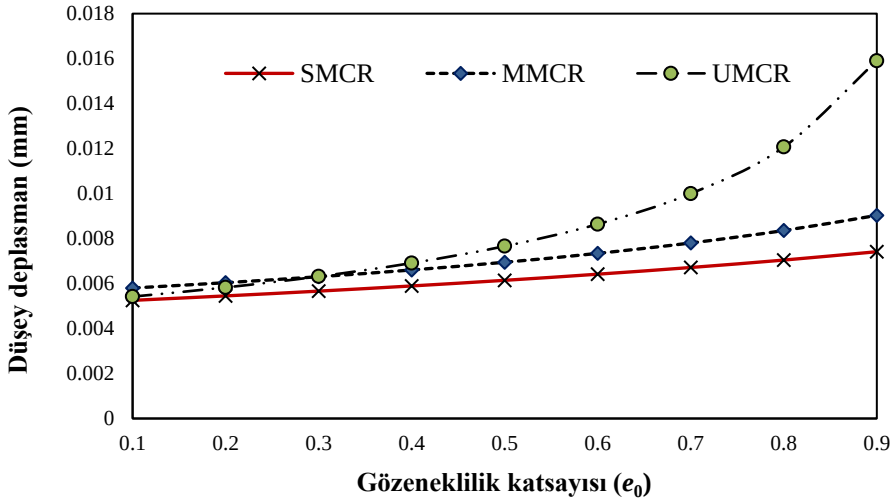
Grafik 2. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 2/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



Grafik 3. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h /r = 3/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



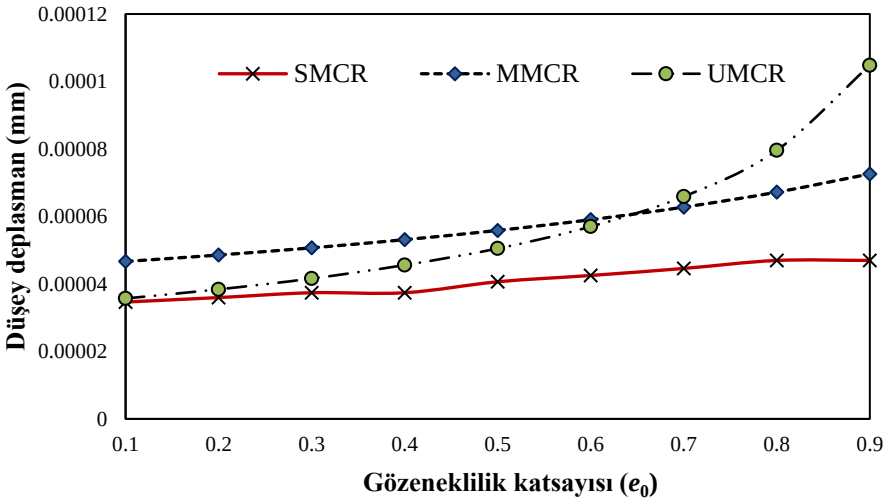
Grafik 4. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h/r = 4/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



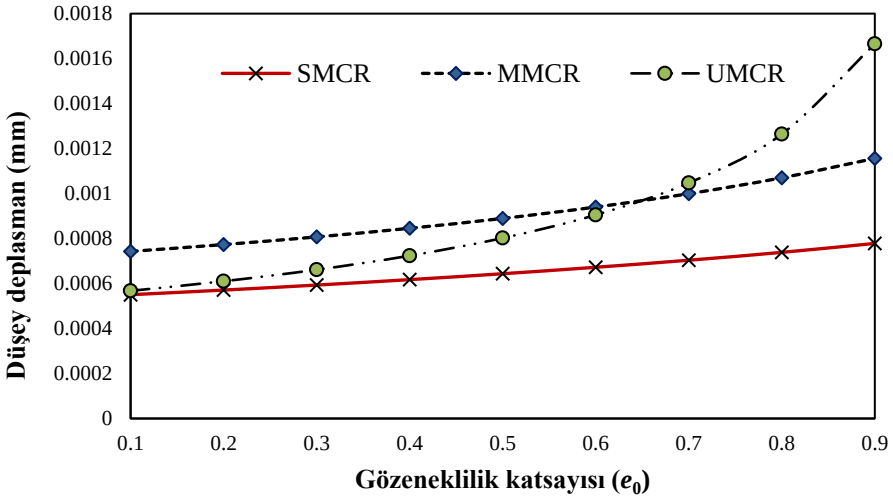
Grafik 5. FDG ankastre mesnetli dairesel plağın (h/r = 5/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması

FDG ankastre mesnetli dairesel plağın, Grafik (1, 2, 3, 4 ve 5)'te sunulan sonuçlara göre, e_0 =0.4 gözeneklilik katsayısını geçtikten sonra UMCR değerinde MMCR ve SMCR tiplerine göre maksimum düşey yer değiştirmede bir artış gözlenmektedir. Ancak bu (e_0 =0.4) değerden küçük değerler daha tutarlıdır.

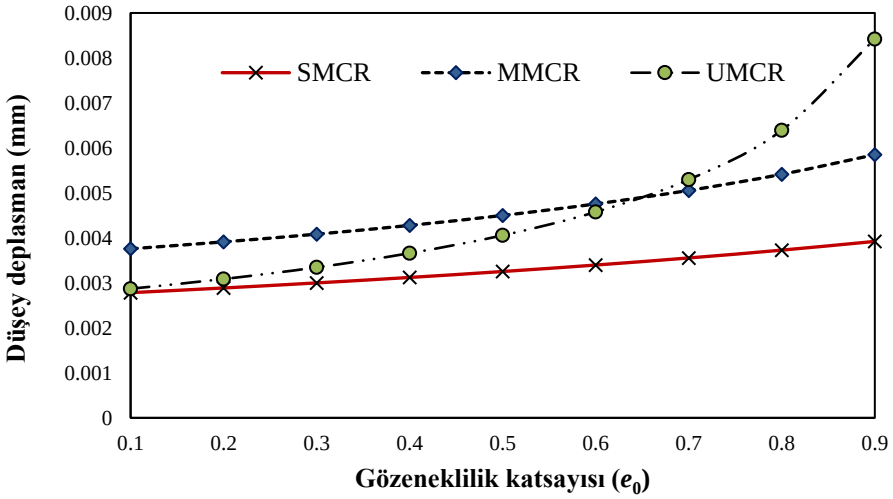
Kayıcı mesnet sınır koşulu analizinde, elde edilen sonuçlar Grafik (6-10)'da gösterilmektedir. Modelin çeşitli h/r değerleri için test edilmektedir.



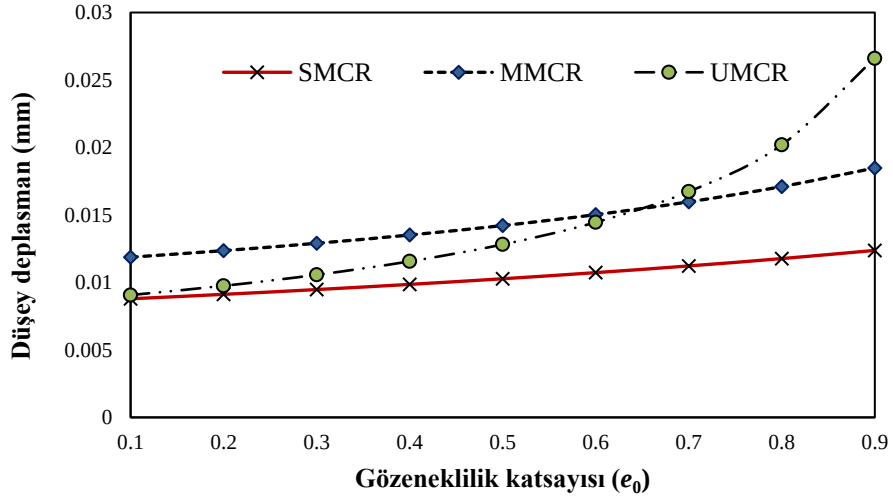
Grafik 6. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 1/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



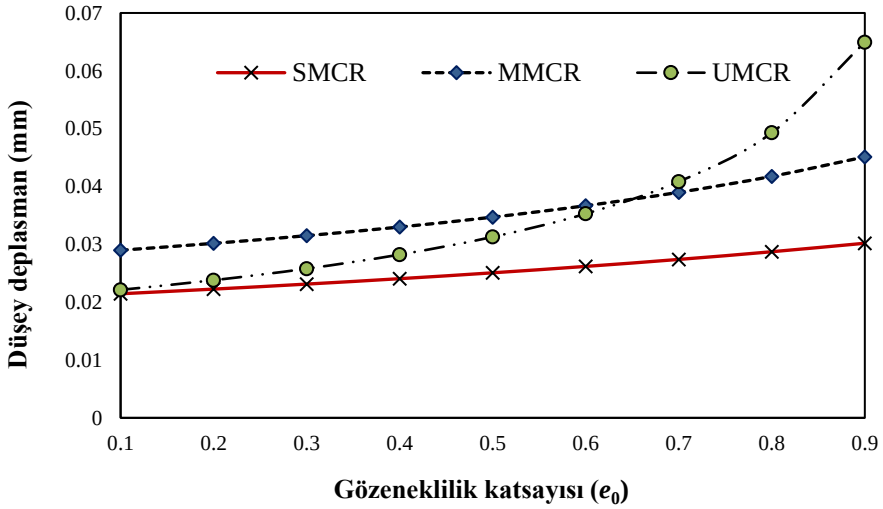
Grafik 7. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 2/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması



Grafik 8. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 3/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması

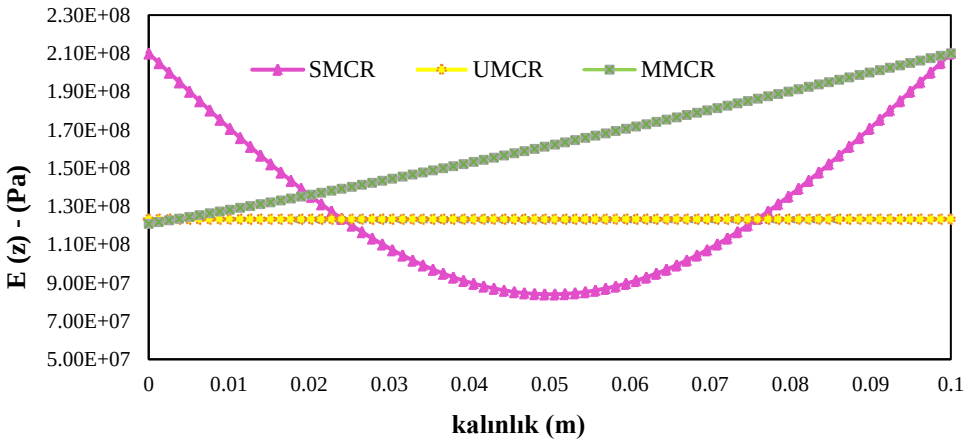


Grafik 9. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 4/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması

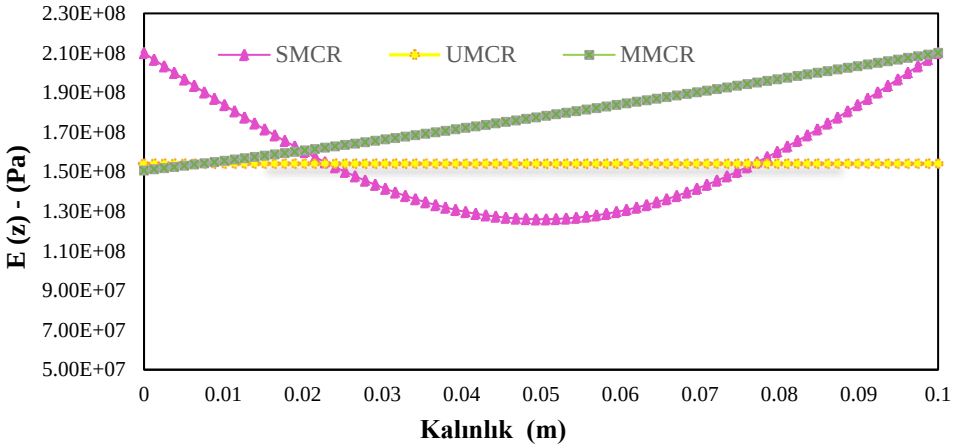


Grafik 10. FDG kayıcı mesnetli dairesel plağın (h /r = 5/10) için maksimum düşey yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Grafik (7, 8, 9, ve 10)'da gösterildiği gibi kayıcı mesnetli FDG dairesel plak için MMCR'nin maksimum düşey yer değiştirmesinin gözeneklilik katsayısı (0.6)'dan önce (UMCR)'den daha yüksek olduğu gözlenmiştir. (0.6) noktadan sonra performansının tam tersini göstermiştir. (UMCR) değerinde artış ve (MMCR) değerinde bir düşüş görünmüştür. (0.6) ve (0.4) gözeneklilik katsayılarına sahip (SMCR, UMCR ve MMCR) gözenekli malzeme tipleri arasındaki elastisite modülü karşılaştırması, Grafikler (11-13)'de sunulmaktadır.

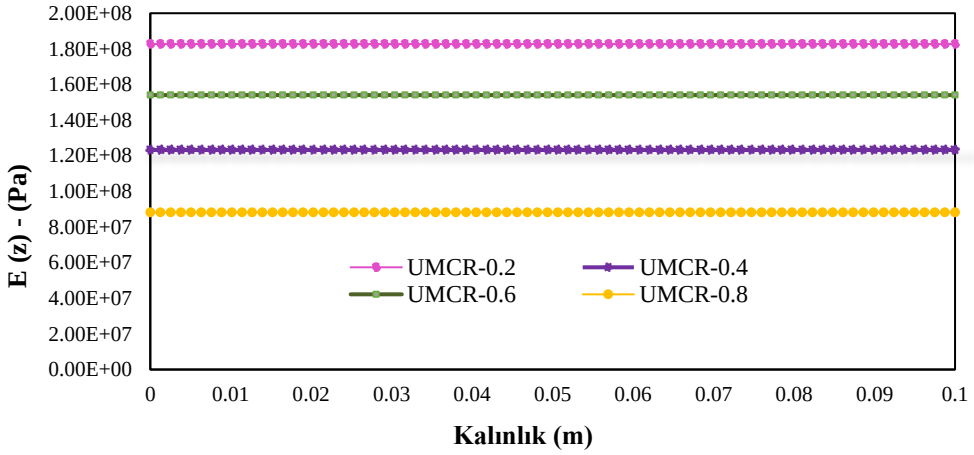


Grafik 11. 0.6 gözeneklilik katsayısı için SMCR, UMCR ve MMCR türlerinin elastiklik modüllerinin karşılaştırılması



Grafik 12. 0.4 gözeneklilik katsayısı için SMCR, UMCR ve MMCR türlerinin elastiklik modüllerinin karşılaştırılması

Grafikler (11, 12 ve 13)'de Elde edilen elastisite modülü karşılaştırmasından ve sonuçlara göre en düşük elastisite değeri, üniform gözenekli türünde gözlenmiştir, dolayısıyla beklenen en yüksek yer değiştirme bu tip malzemede meydana gelmektedir. Grafikta sunulan sonuçlarda bu uyumu sağlamıştır. Grafik (13)'te üniform gözenekli malzeme türü için (0.2, 0.4, 0.6 ve 0.8) gözeneklilik katsayılarının, elastisite modülü değerleri karşılaştırılmaktadır.



Grafik 13. Üniform gözenekli malzeme türü için 0.2, 0.4, (0.6) ve (0.8) gözeneklilik katsayılarının elastiklik modülü arasındaki karşılaştırma

Elde dilen Grafik (13)'teki sonuçlara göre, en düşük elastiklik değerinin 0.8 gözeneklilik katsayısında görülmüştür. Sonuç olarak, beklenen maksimum yer

değiştirme bu tip malzemede meydana gelmektedir. Dolayısıyla gözeneklilik katsayısı e_0 arttıkça plağın deplasmanıda artmasının sonucuna varabiliriz. Bu, çalışmanın bulgularını doğrulamıştır.

3.3. Dairesel Plağın Zorlanmış Titreşim Analizi

3.3.1. Sonuçların doğrulanması

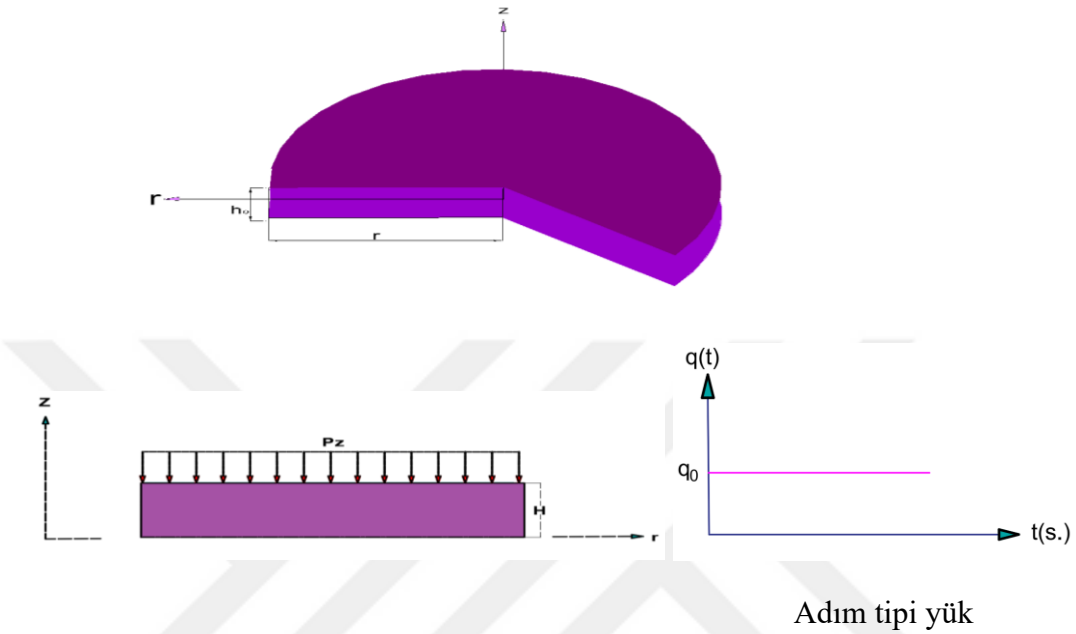
Zorlanmış titreşim davranışının analizi, bir sistemi veya yapıyı salınım kuvvetlerine maruz kaldığında davranışını değerlendirmeyi içermektedir. Yapıların veya bileşenlerin yükleme koşullarındaki ani değişikliklere nasıl tepki verdiğini incelemek için kuvvet, titreşimleriyle kademeli yük dalgaları uygulanabilir ve mühendislerin tasarımları, dayanıklılık ve performans açısından optimize etmesine yardımcı olur.

Bu bölümde, FDM'li dairesel plağın zorlanmış titreşim davranışını incelemek için, FORTRAN dilinde bir bilgisayar program kodu yazılmıştır. Çözümler Laplace uzayında elde edilmiştir. Önerilen yöntemin doğurlanması amacıyla Newmark metodu ile çözüm yapan ANSYS programının sonuçları kullanılmıştır. Önerilen yöntem kullanılırken analiz için n = 7 (128 zaman adımı) ve ANSYS'te ise (512 zaman adımı) kullanılmıştır. Sonuçların üst üste örtüştüğü ortaya çıkmıştır ve bu durumda, önerilen yaklaşım çabası ve zamanı azaltmada etkili şekilde yardımcı olmaktadır.

Plak kalınlık yönünde 80 katmana ve radyal yönde 20 elemana bölünmekte olup toplam 1600 elemandan oluşmaktadır. Her katman için farklı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. *z*, plağın alt yüzeyinden *z* ekseni boyunca olan mesafedir. Poisson oranının (ν=0.3) sabit olduğu kabul edilmiştir. Bu analizlerde A tipi malzeme, kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo (1)'de verilmiştir. Mekanik özelliklerinin kalınlık boyunca değişim fonksiyonları denklem (1 - 2)'de verilmiştir.

ANSYS paket programında PLANE183 elemanı kullanılmıştır. Dairesel plağın dinamik davranışları incelenirken çeşitli plak kalnlığı değerleri dikkate alınmıştır. Bu bölümde, Şekil (7)'de verilen ve adım tipi yüklemeye (Spiegel 1965) maruz kalan dairesel plağın zorlanmış titreşimi 128 adım için yapılmıştır. Dairesel plağın geometrisi: yarıçapı r = 1.00 m, iki farklı kalınlık durumu h = 0.1 m ve h = 0.5 m olan model ele alınmaktadır. Plağa q_0 =100 kN/m^2 şiddetinde yayılı yük uygulanmakta ve

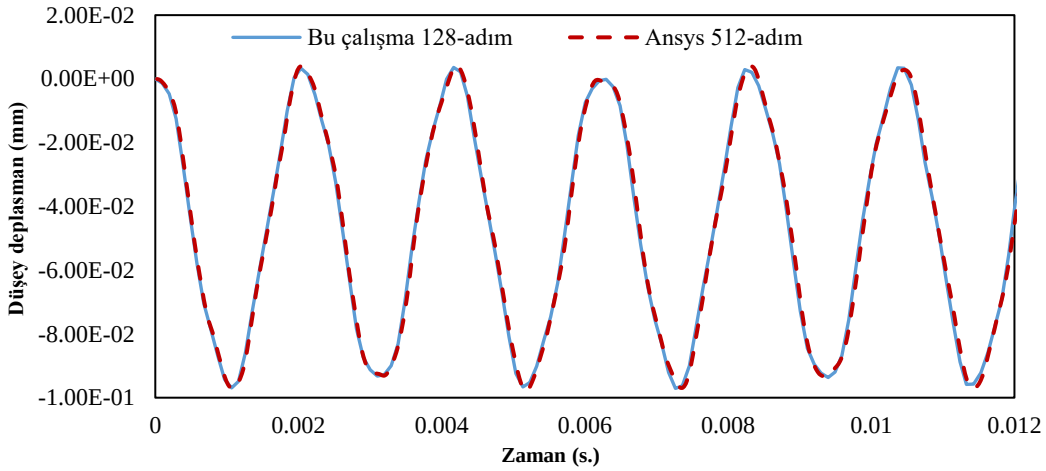
iki tip sınır koşulları bu model için analiz edilecektir. Kenarları ankastre ve kayıcı mesnet olan dairesel plağın zorlnamış titreşim analizi yapılacaktır. Adım tip yük fonksiyonu için hem elastik hem de viskoelastik malzemeler için incelenmesi hedeflenmiştir.



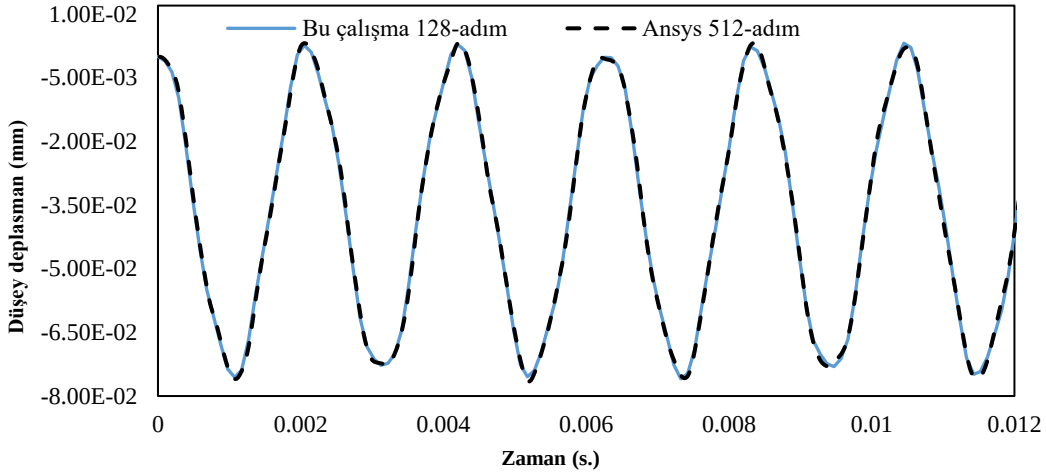
Adım tipi yük

Şekil 7. Dairesel plağın geometrisi ve dinamik yük

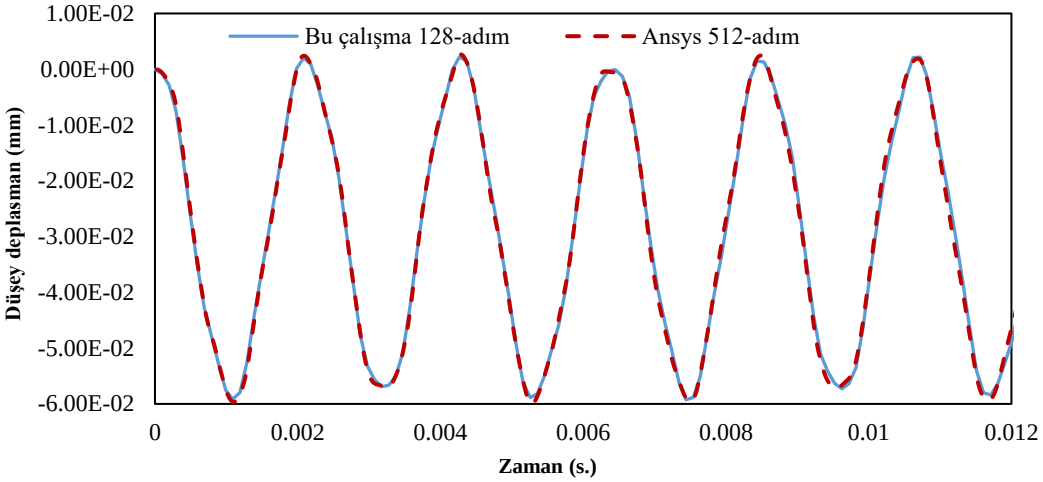
Bu bölümde yapılan çalışmanın sonuçları grafik olarak sunulmaktadır. Düşey deplasman sonuçları, ANSYS programı ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Grafik (14-28) üzerinde gösterilmiştir. Ankastre mesnetli ve *h*= 0.1m kalınlıkta olan dairesel plağın, adım tip yük uygulanarak analiz edilmiştir. Maksimum düşey deplasman karşılaştırması Grafik (14–20)'de sunulmuştur. İzotropik heterojen ankastre mesnetli dairesel plakların sönümsüz (g=0.0) (veya elastik durumu için) tireşim analizi için maksimum düşey deplasmanı, için Grafik (14-20)'te gösterilmektedir.



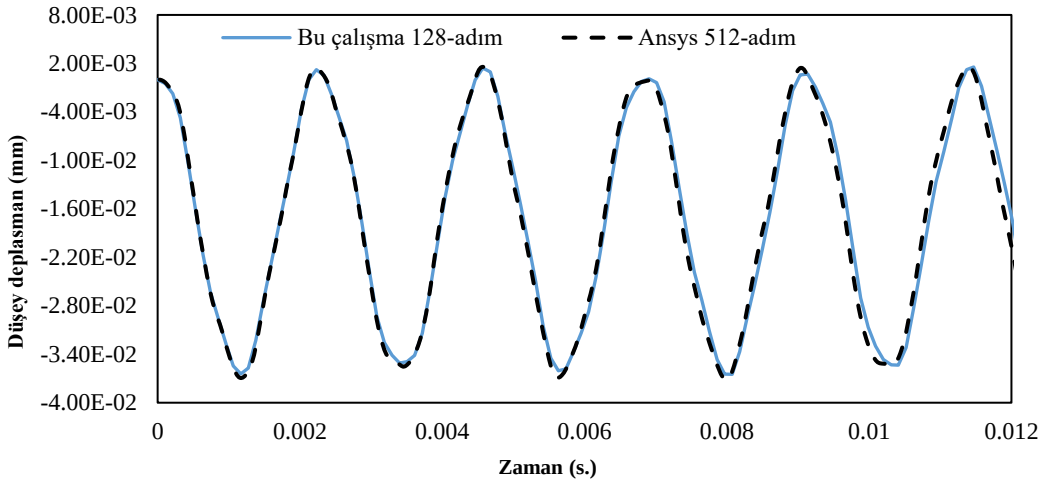
Grafik 14. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=0)



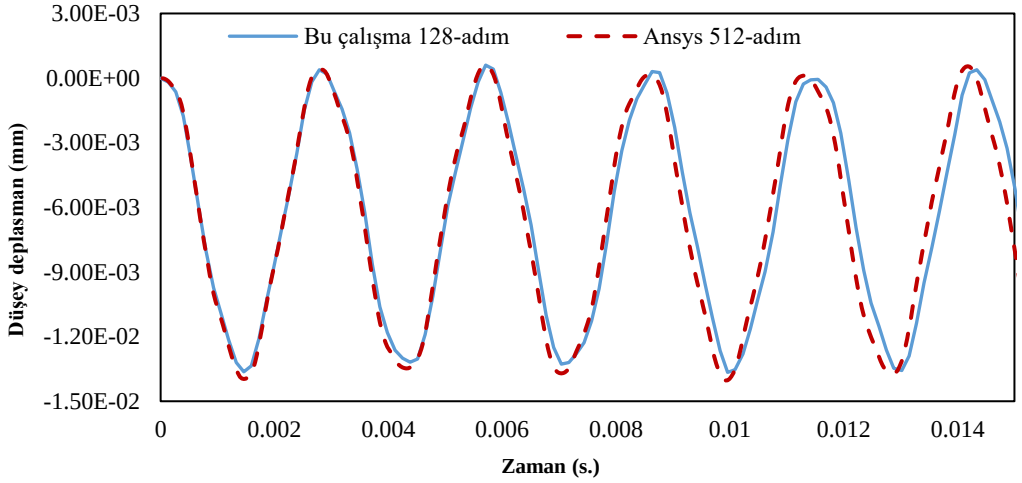
Grafik 15. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=0.5)



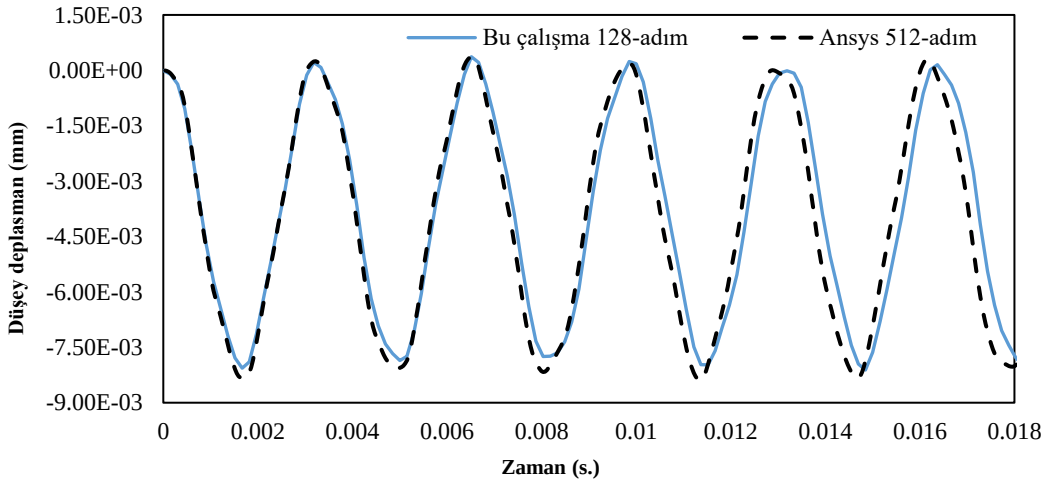
Grafik 16. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=1)



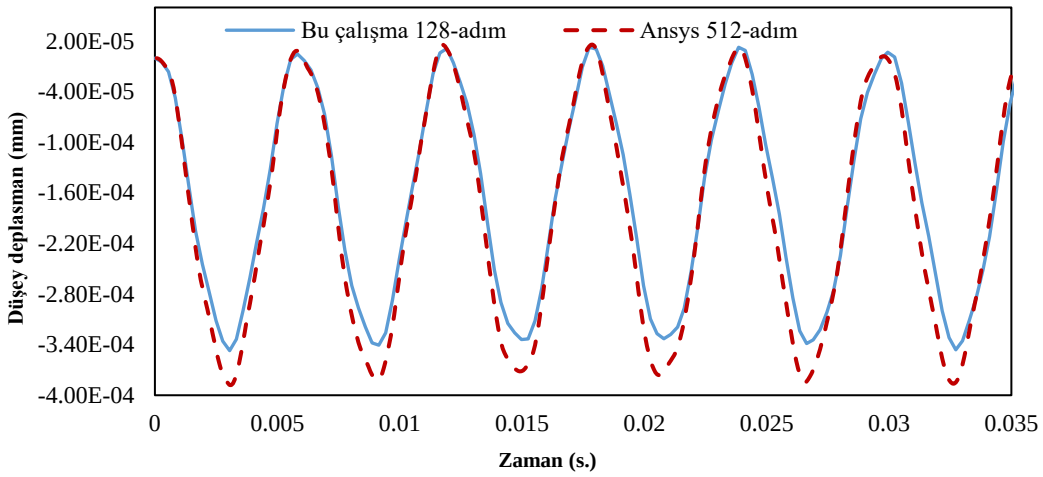
Grafik 17. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=2)



Grafik 18. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=4)



Grafik 19. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=5)



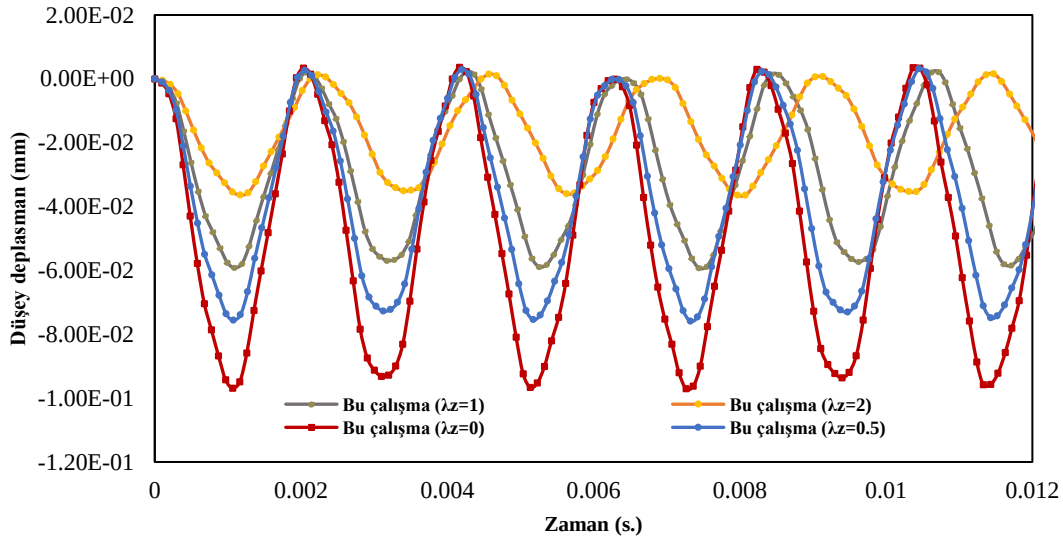
Grafik 20. Ankastre mesnetli dairesel plağın adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması (λ_z=10)

Adım tipi yüklemeye maruz kalan ankastre mesnetli dairesel plağın SEY çalışmasını doğrulamak için ANSYS paket programı kullanılarak maksimum düşey deplasman karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar çeşitli malzeme katsayısı için yapılmıştır. Grafik (14-17)'den de görüldüğü gibi analizlerden elde edilen değerlerin λ_z=0, 0.5, 1 ve 2 malzeme katsayısları için üst üste örtüştüğünü görülmüştür.

Fakat, bunun büyük λ_z değerleri için iki yöntemin sonuçlarının birbirinden biraz farklı çıkmıştır. Periyotların, zaman miktarı arttıkça birbirinden uzaklaştığı ortaya çıkmıştır. Grafik (18-19) incelendiğinde λ_z= 4 ve 5 değerleri için sonuçların farkı az iken Grafik (20)'de verilen λ_z =10 için bu fark daha belirgin hale gelmektedir.

Bu çalışmada kullanılan malzeme lineer elastik olarak kabul edilmiştir. λ_z değerleri arttıkça ANSYS ten elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçlarından uzaklaşmaktadır. Bu nedenle ANSYS'te daha güvenilir sonuçlar elde etmek için, plağın kalınlığı yönünde çok daha fazla katmana bölünmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, malzeme katsayısı λ_z arttıkça, ANSYS sonuçların güvenilirliğinin azaldığı kabul edilmektedir.

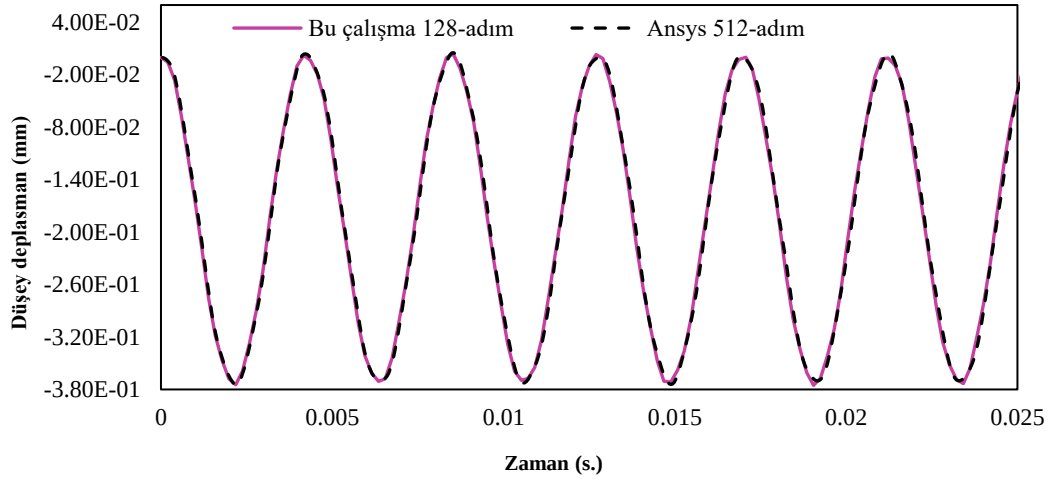
Ankastre mesnetli dairesel plakların, maksimum düşey deplasmanı, farklı malzeme katsayıları için karşılaştırılmıştır. Ankastre mesnetli ve (h= 0.1m) kalınlıkta olan dairesel plağın, Elastik (g=0.0) durum için elde edilen sonuçlar Grafik (21)'de gösterilmektedir.



Grafik 21. Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması.

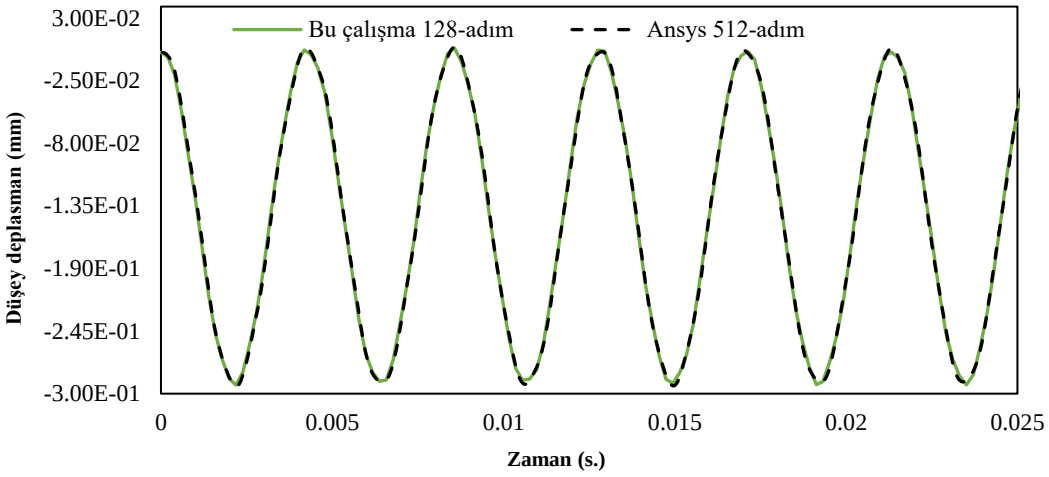
Grafik (21)'de elde edilen dairesel plağın sonuçlarından, malzeme katsayısı arttıkça salınım genliklerinin azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla, maksimum düşey deplasmanın genlik değeri (λ_z=2) için en düşük olarak kaydedilirken, (λ_z=0) için en yüksek olarak kaydedilmiştir.

Ankastre mesnetli (h= 0.1m) kalınlıkta olan dairesel plakların, adım tipi yükleme için dinamik nalizi yapılmıştır. Elde edilen maksimum düşey deplasman sonuçlarının, karşılaştırması Grafik (22 – 28)'de sunulmaktadır. Kayıcı mesnetli izotropik dairesel plakların, maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (22)'de gösterilmektedir.



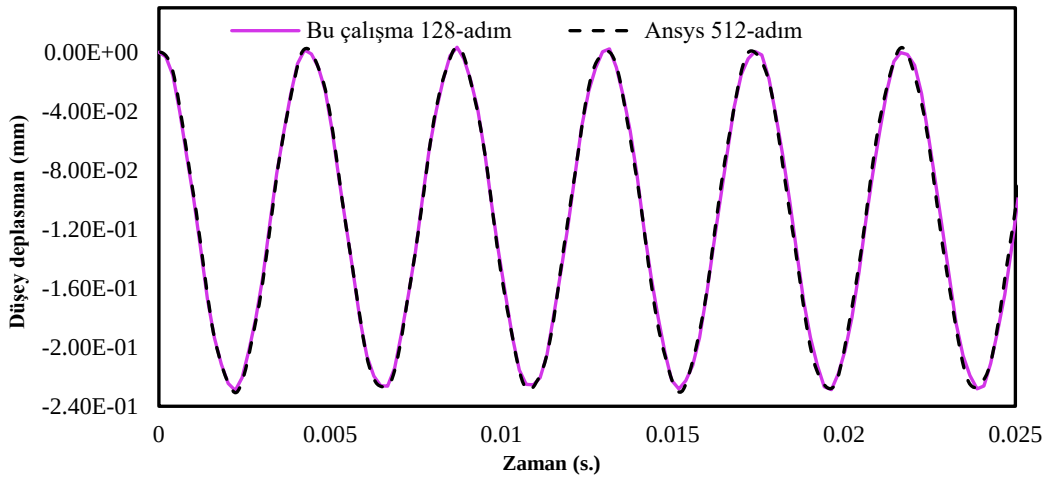
Grafik 22. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0.5) için Grafik (23)'te gösterilmektedir.



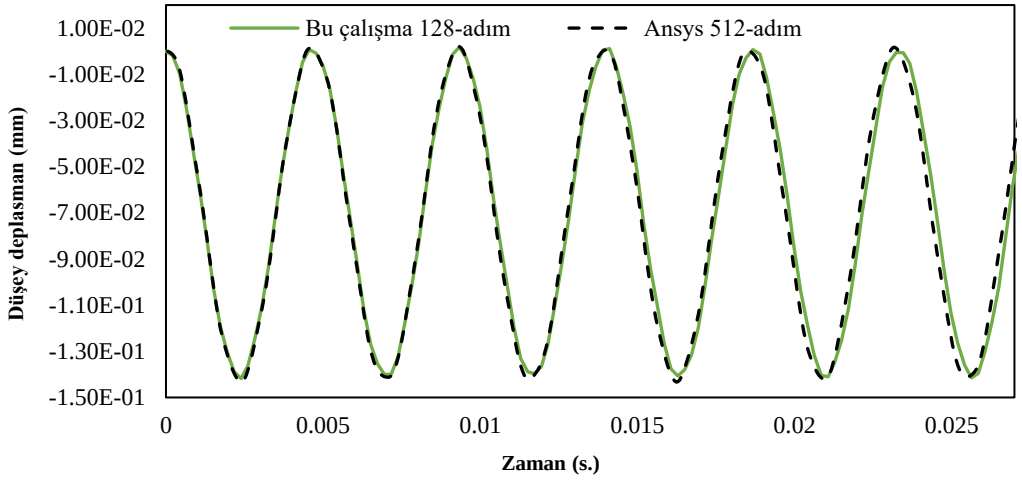
Grafik 23. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (24)'te gösterilmektedir.



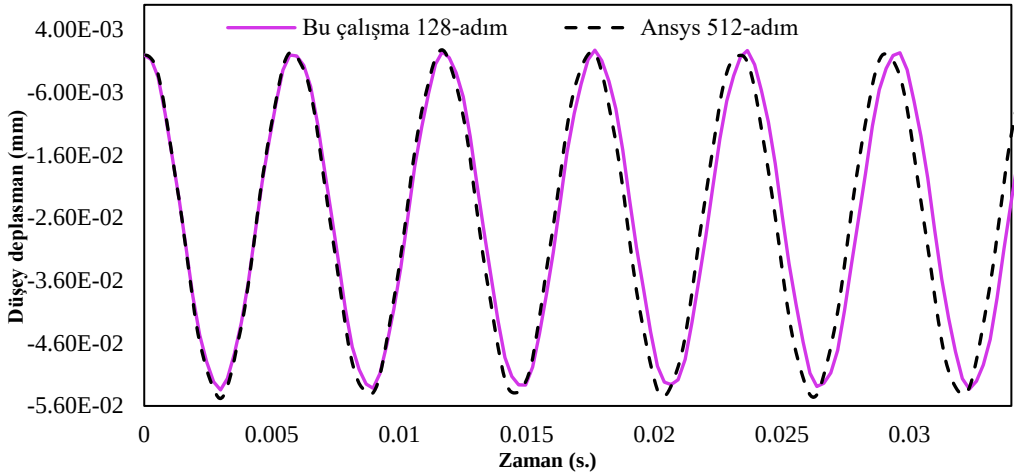
Grafik 24. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükü için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (25)'te gösterilmektedir.



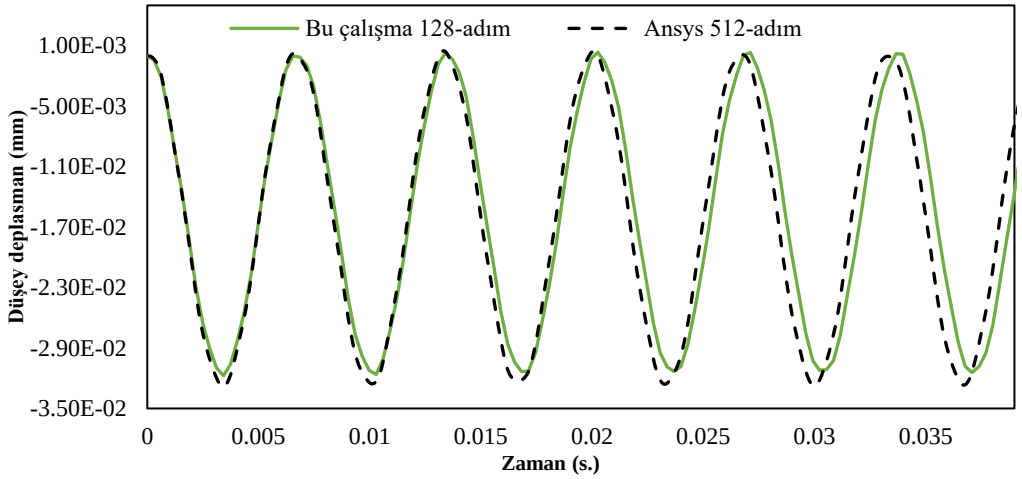
Grafik 25. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (26)'da gösterilmektedir.



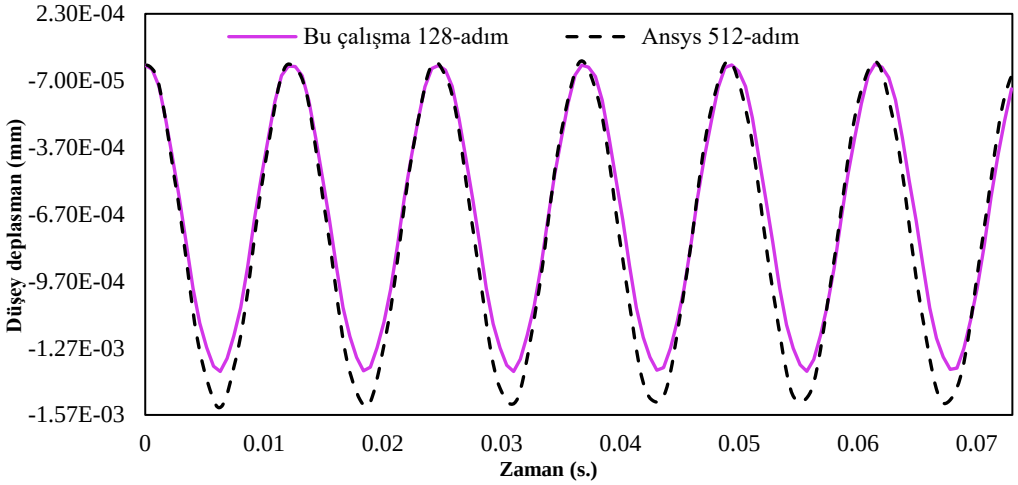
Grafik 26. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (27)'de gösterilmektedir.



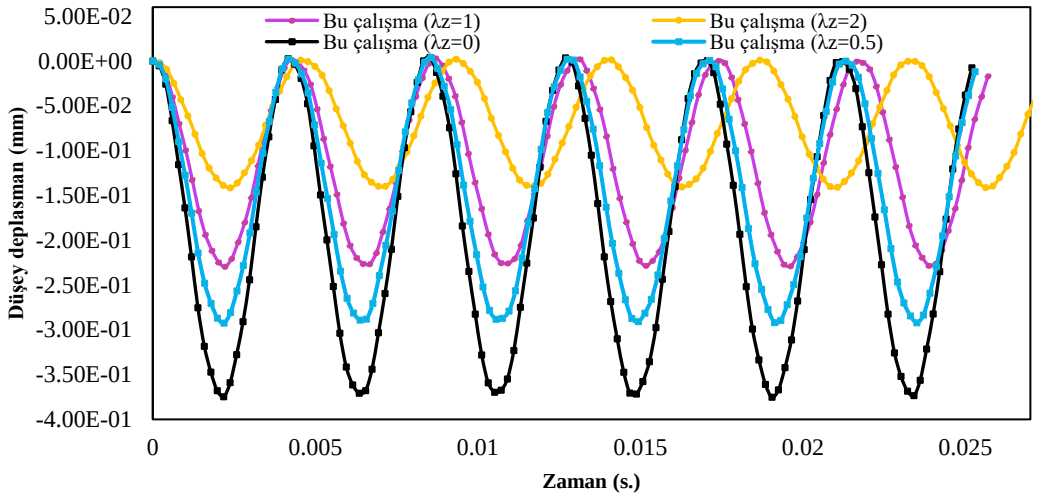
Grafik 27. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükü için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnet izotropik dairesel plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (28)'de gösterilmektedir.



Grafik 28. Kayıcı mesnetli dairesel plağın SEY ve ANSYS adım tipi yükleme için maksimum düşey yer değiştirmenin karşılaştırılması

Kayıcı mesnetli dairesel plakların, maksimum düşey deplasmanı, farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar elastik durum (g=0.0) için Grafik (29)'da gösterilmektedir.



Grafik 29. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması.

Anakstre mesentli plak durumuna benzer şekilde kayıcı mesnetli dairesel plakta da λ_z=2 için deplasman sonuçları en küçük değerleri alırken homojen iztropik dairesel plak ise en fazla yer değiştirmelere maruz kalmaktadır. Dairesel plağın (29) sonuçları

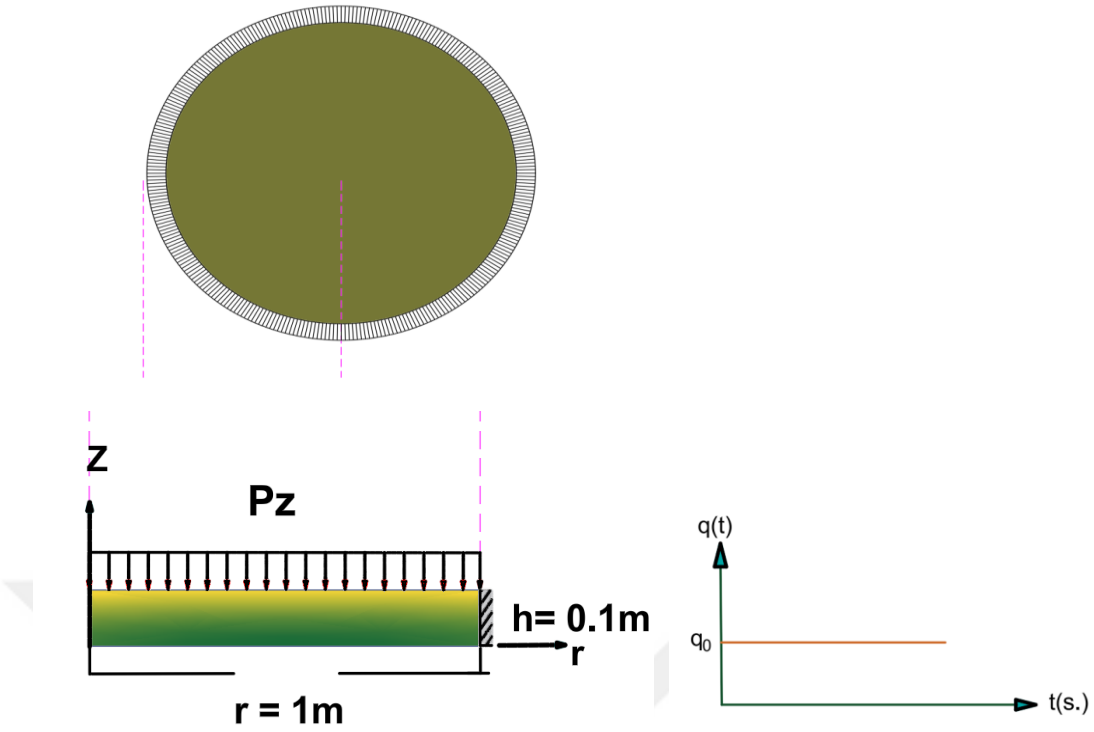
karşılaştırıldığında, ankastre mesnetli modelin maksimum deplasman değerleri kayıcı mesnetli (21) modelden daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani sınırdaki kısıtlamalar artarsa doğal frekanslar artığını görülmüştür. Bu da literatürde bulunan bazı çalışmalardaki, mesnet davranışları ile uyumlu olduğunu sağlamıştır.

3.3.2. Dairesel plağın elastik ve viskoelasik analizi

3.3.2.1. Uygulama1- ankastre mesnetli (h=0.1m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi

Yapı mühendisliğinde, kuvvet titreşimleriyle adım tipi yük testi, bir yapıya ani ve büyük bir kuvvet uygulanmasını ve bu kuvvete ne kadar tepki verdiğini incelemeyi içerir. Bu tür testler genellikle gerçekçi yükleme koşulları altında binaların, köprülerin ve diğer altyapıların yapısal bütünlüğünü, esnekliğini ve dinamik davranışını değerlendirmek için kullanılır. Mühendisler, bir yapının deprem veya ağır makinelerin yarattığı dinamik kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davrandığını anlayabilmek için, bu tür analizler yapılmaktadır.

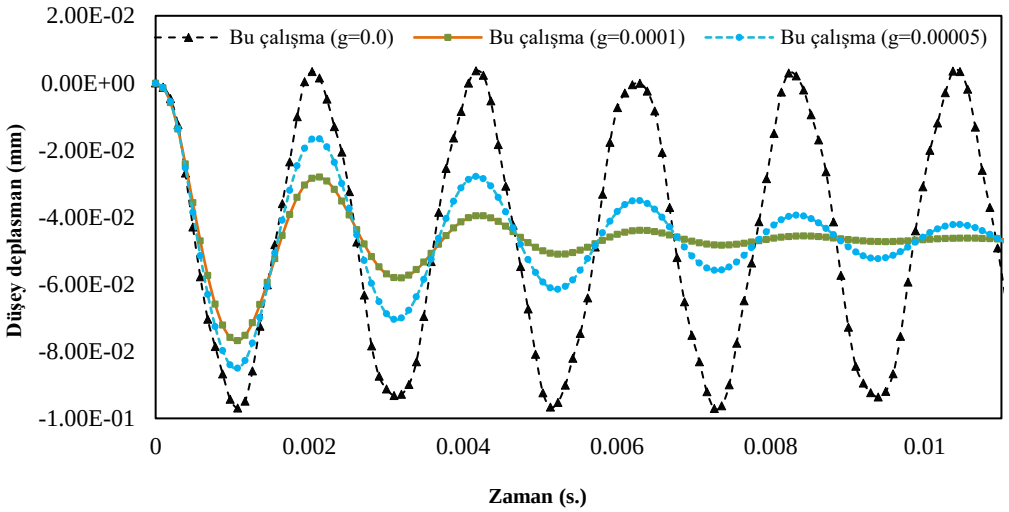
Bu bölümde, Adım tipi yüklemeye maruz kalan, ankastre mesnetli dairesel plakların davranışı araştırılmıştır. Ankastre mesnetli (r=1m) ve (h = 0.1m) kalınlıkta olan dairesel plakların viskoelastik düşey yer değiştirmesinin karşılaştırılması ler (29–35)'te göstermektedir.



a) Adım tipi yük

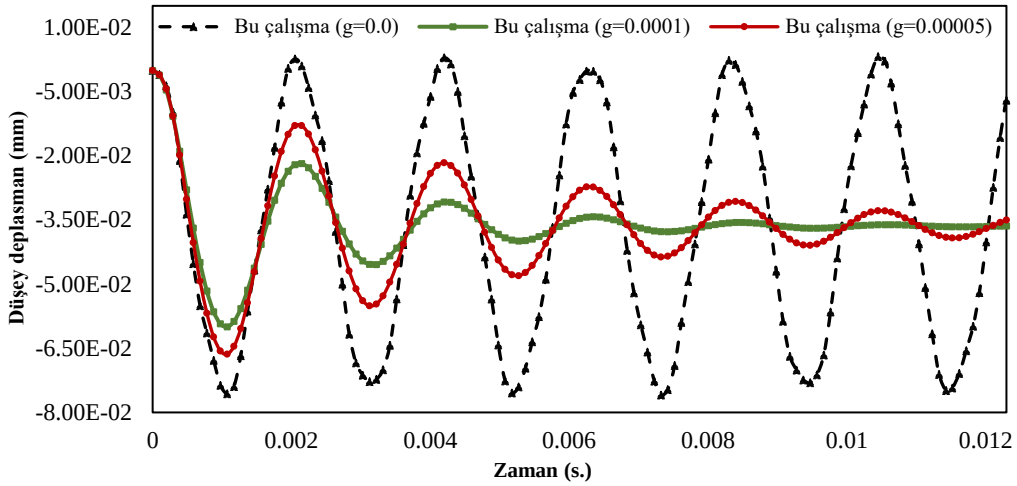
Şekil 8. Ankastre mesnetli dairesel plağın geometrisi ve dinamik yük

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (30)'da gösterilmektedir.



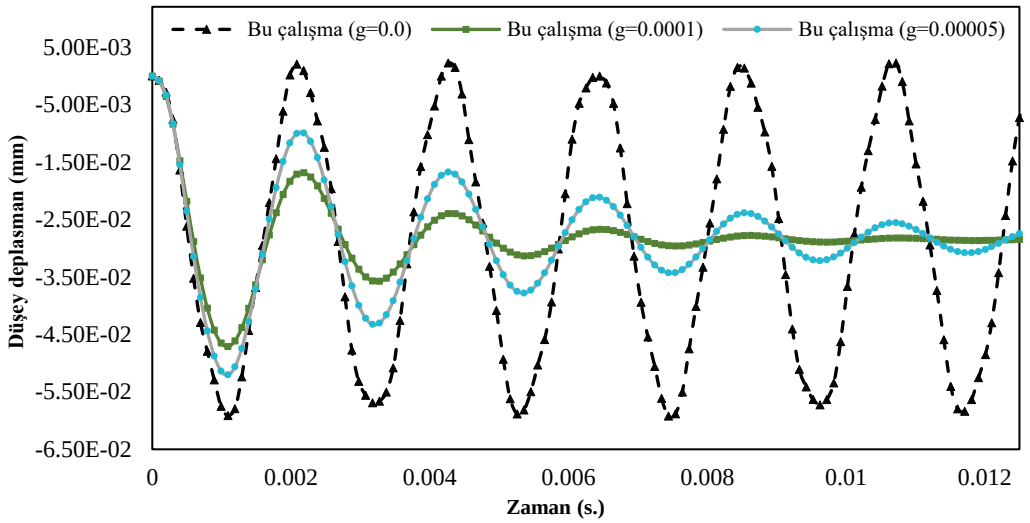
Grafik 30. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0.5) için Grafik (31)'de gösterilmektedir.



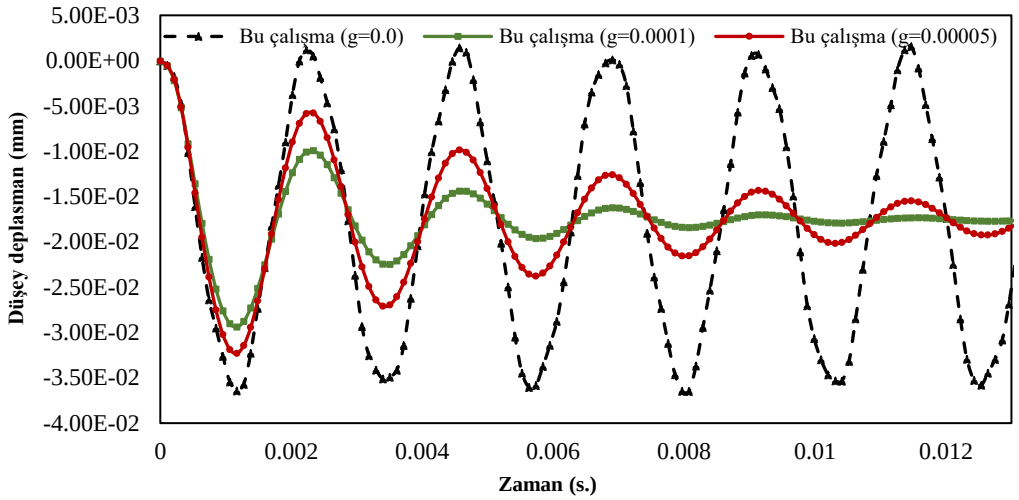
Grafik 31. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (32)'de gösterilmektedir.



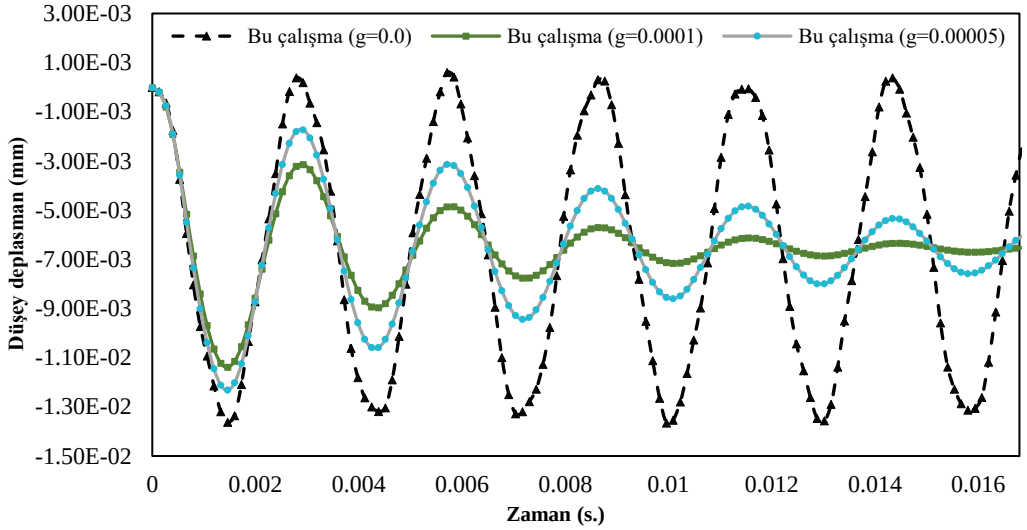
Grafik 32. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (33)'te gösterilmektedir.



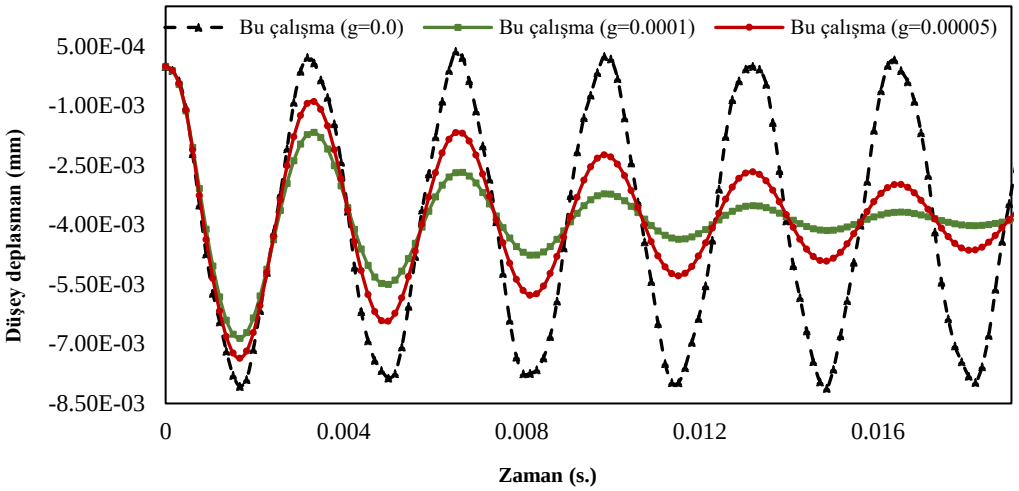
Grafik 33. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (34)'te gösterilmektedir.



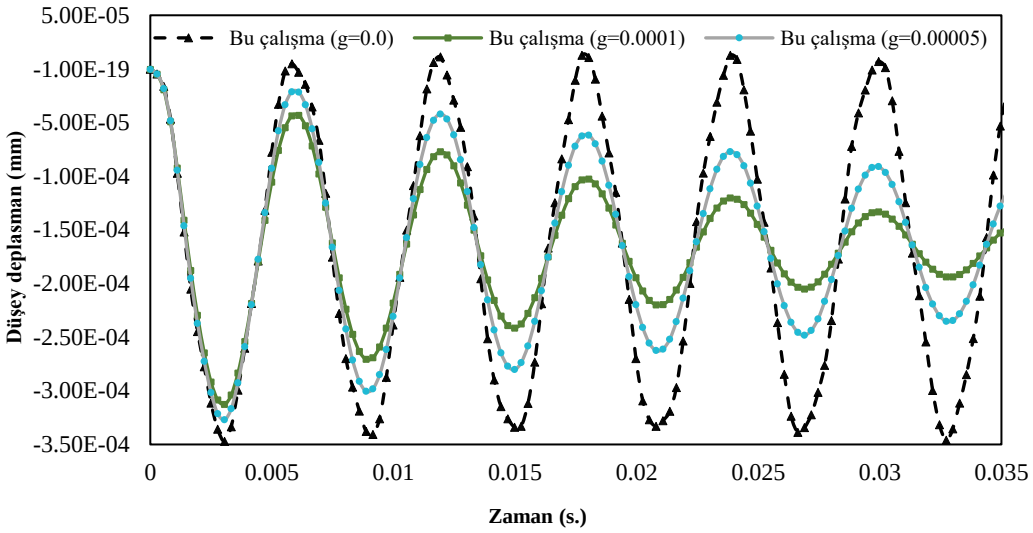
Grafik 34. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (35)'te gösterilmektedir.



Grafik 35. Adım tipi yükleme için dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (36)'da gösterilmektedir.



Grafik 36. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

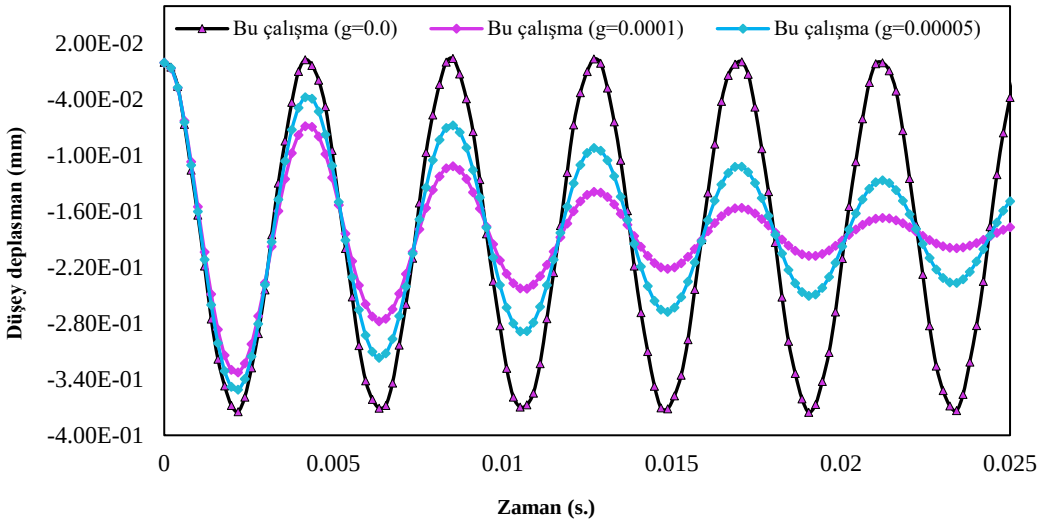
Bu bölümden önceki çalışmada, dairesel plağın elastik durumda değerlendirilmesi yapılmıştır. lerde görünen salanım genliği zamanla sabit kaldığı görülmüştür. Bunun

yanında, yukardakı lerden dairesel plağın viskoelastik durumu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, viskoelastik durumda beklendiği gibi düşey deplasmanlara ait salınımlar zaman arttıkça, statik değere yaklaştıp azalmaktadır. Bu çalışma kısmında, farklı sönüm oranları için analiz edilmiştir (g=0.0001ve g= 0.00005). Buna göre, sönüm oranları arttıkça titreşim genlikleri statik değere daha hızlı bir şekilde yaklaşmaktadır. Elde edilen grafiklerden bu kanıtlanmıştır.

3.3.2.2 Uygulama2- kayıcı mesnetli (h=0.1m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi

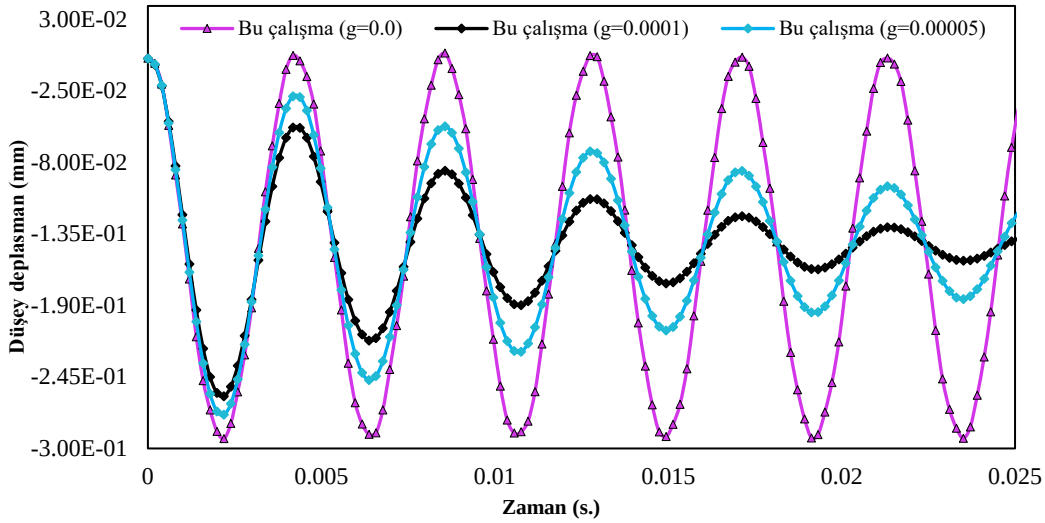
kayıcı mesnetli (h = 0.1m) kalınlıkta olan dairesel plakların viskoelastik düşey yer değiştirmesinin karşılaştırılması Grafik (36-42)de göstermektedir.

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (37)'de gösterilmektedir.



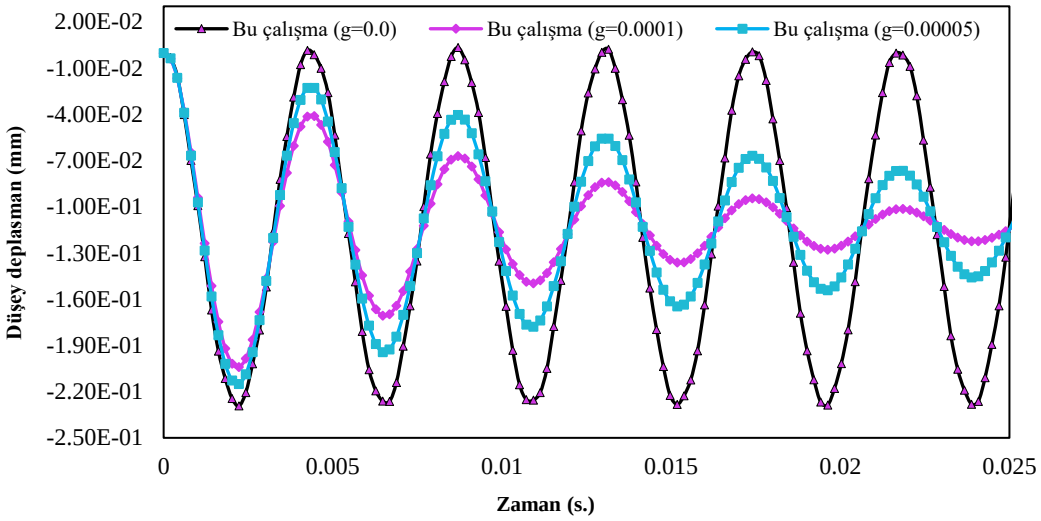
Grafik 37. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0.5) için Grafik (38)'de gösterilmektedir.



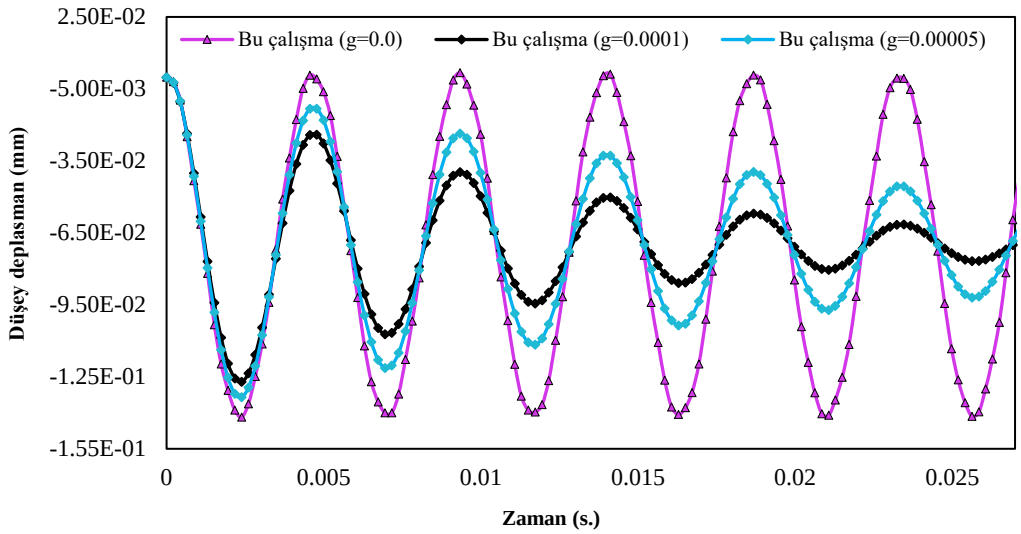
Grafik 38. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (39)'da gösterilmektedir.



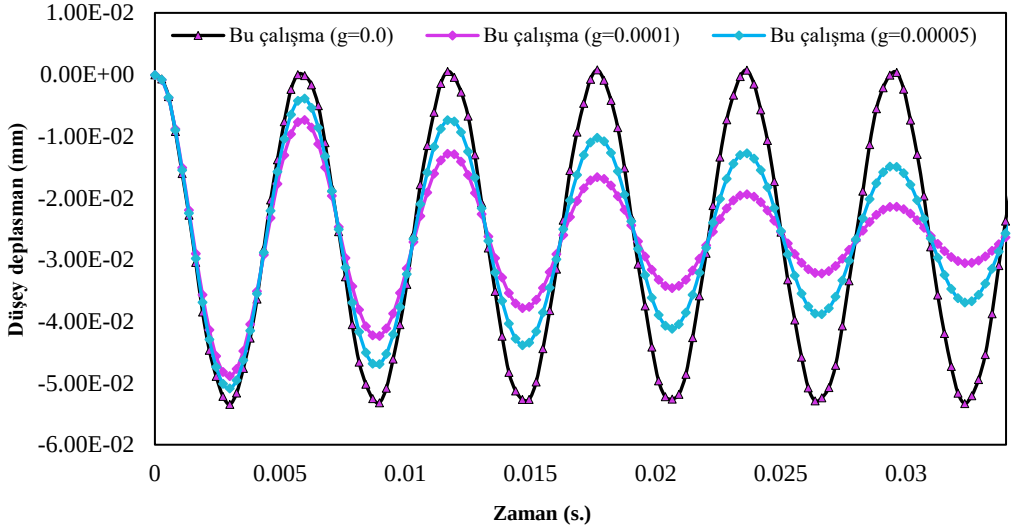
Grafik 39. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (40)'ta gösterilmektedir.



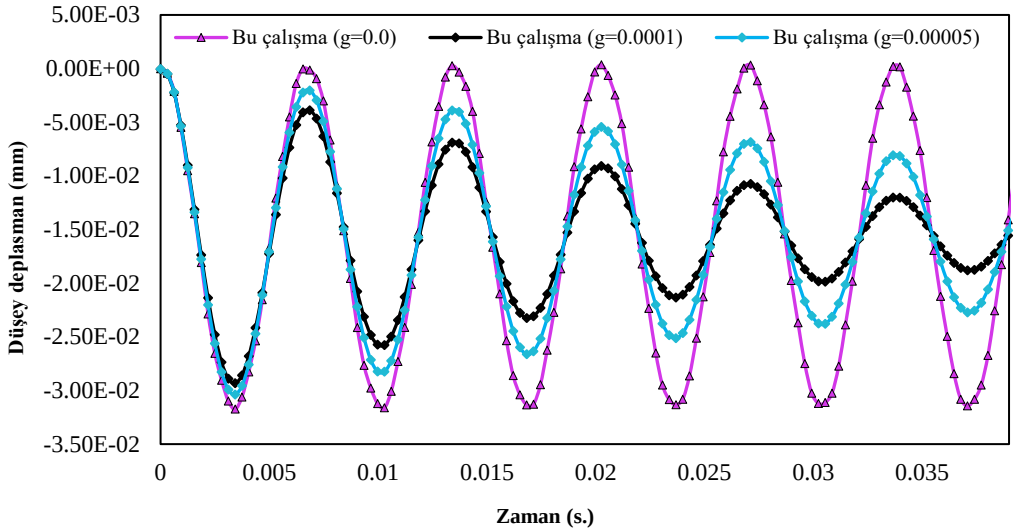
Grafik 40. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (41)'de gösterilmektedir.



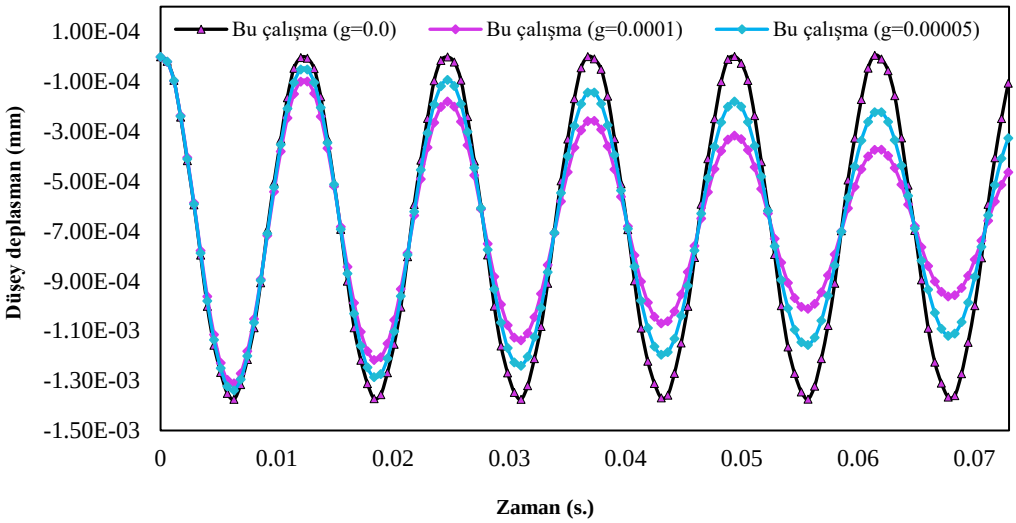
Grafik 41. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (41)'de gösterilmektedir.



Grafik 42. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (43)'te gösterilmektedir.

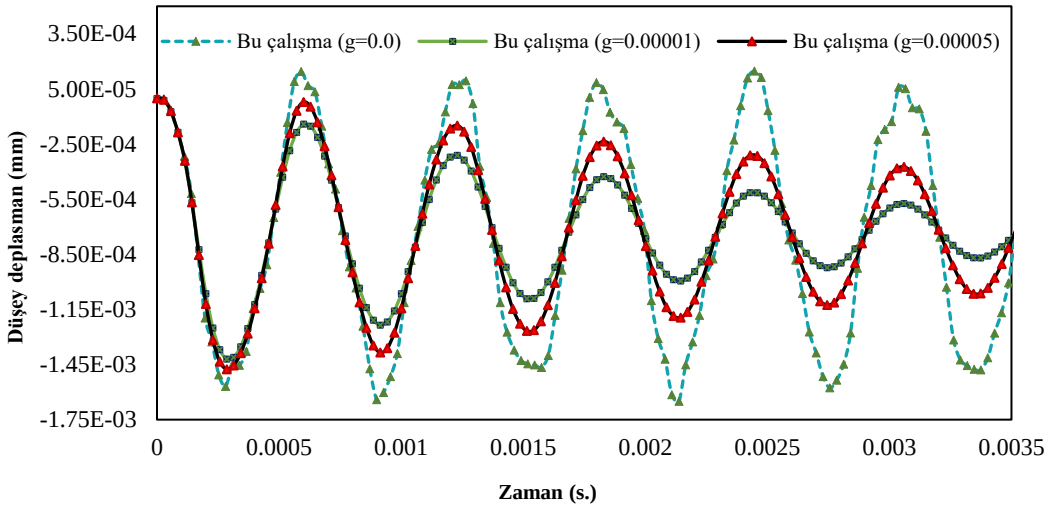


Grafik 43. Adım tipi yükleme için kayıcı mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

3.3.2.3 Uygulama3- ankastre mesnetli (h=0.5m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi

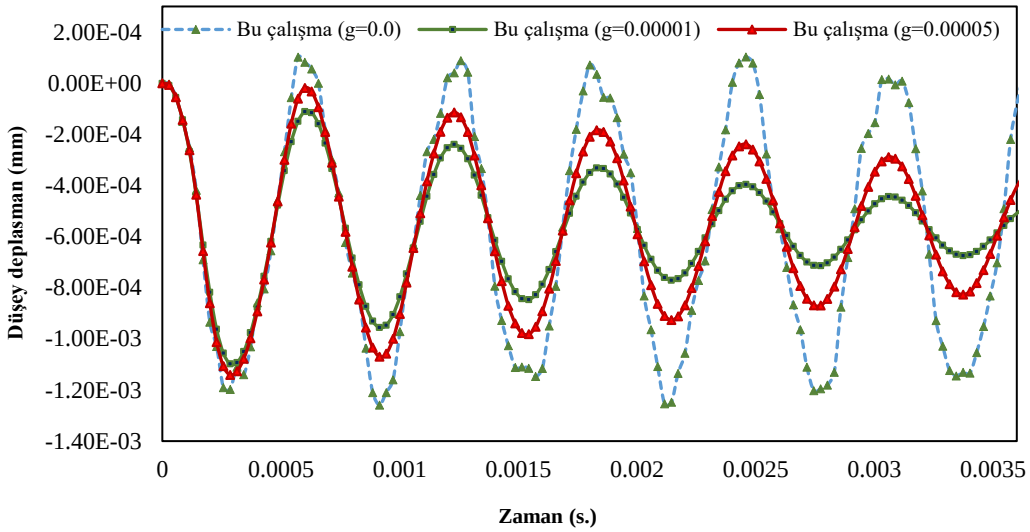
Ankastre mesnetli (h = 0.5m) kalınlıkta olan dairesel plakların viskoelastik düşey yer değiştirmesinin karşılaştırılması "Grafik 44-50"de göstermektedir.

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (44)'te gösterilmektedir.



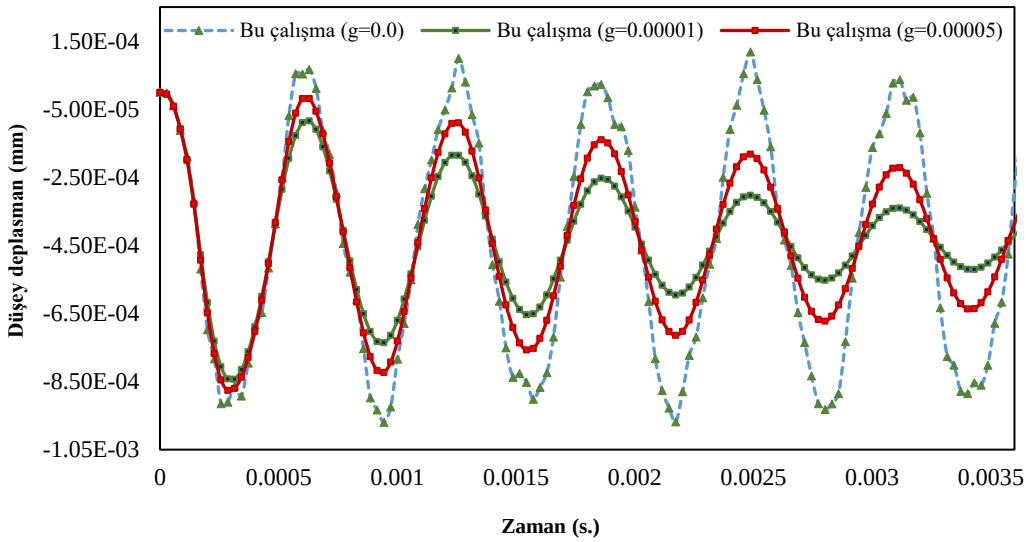
Grafik 44. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0.5) için Grafik (45)'te gösterilmektedir.



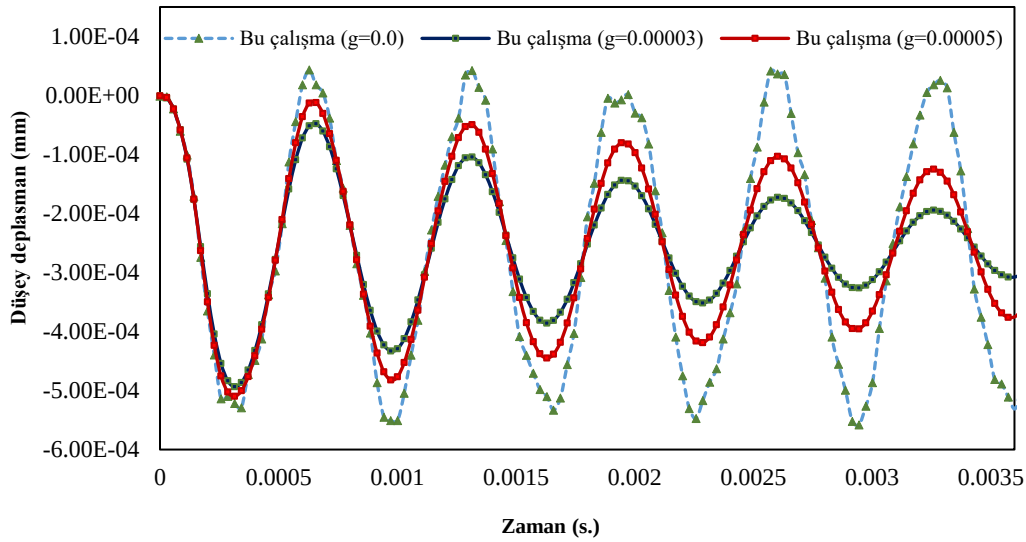
Grafik 45. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (46)'da gösterilmektedir.



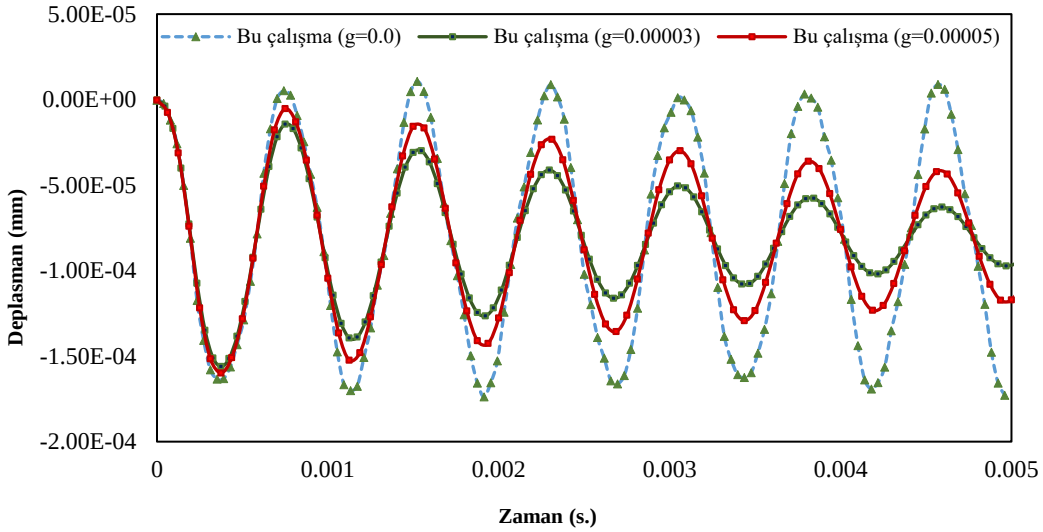
Grafik 46. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (47)'de gösterilmektedir.



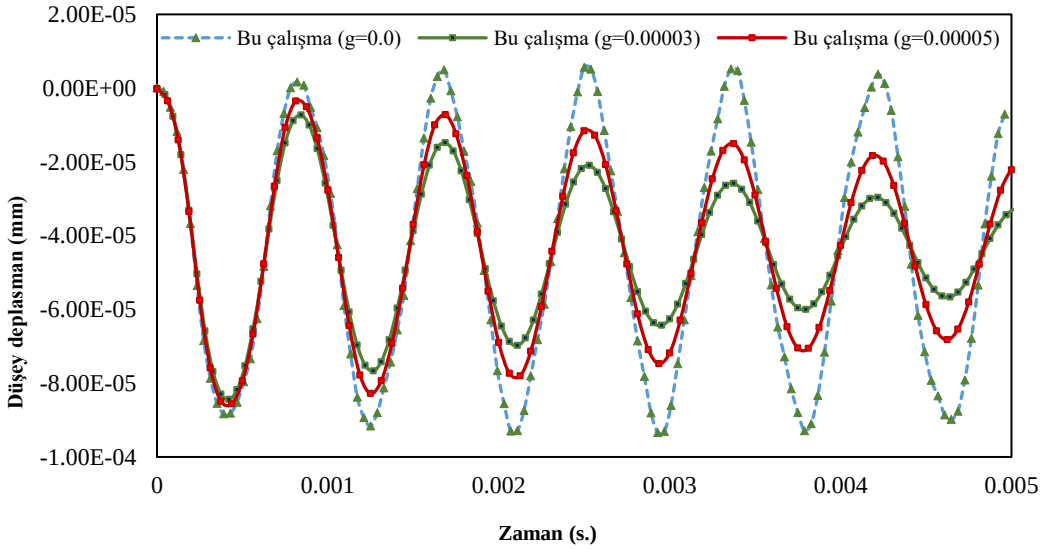
Grafik 47. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (48)'de gösterilmektedir.



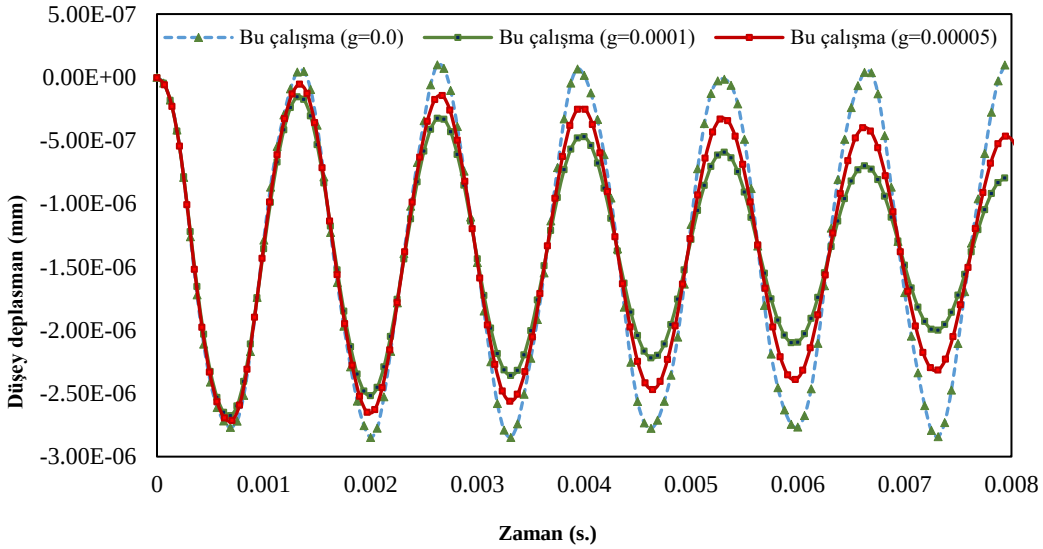
Grafik 48. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (49)'da gösterilmektedir.



Grafik 49. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

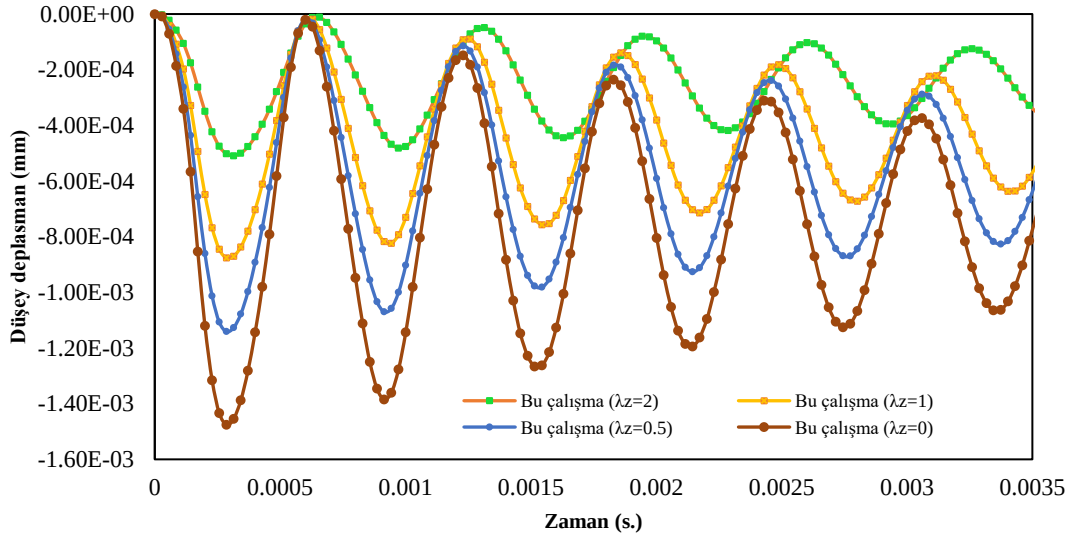
Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (50)'de gösterilmektedir.



Grafik 50. Adım tipi yükleme için ankastre mesnetli dairesel plağın elastik ve viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Bu bölümdeki yapılan çalışmanın sonuçları, Ankastre mesnetli (h= 0.5m) kalınlıkta olan dairesel plakların farklı sönüm oranları için karşılaştırılmıştır. lerde açıklanan sonuçlara göre, sönüm oranının artması durumda, dinamik davranış genliğinde bir azalmaya neden olduğunu göstermektedir.

Ankastre mesnetli, (g=0.00005), (h = 0.5m) kalınlıkta olan dairesel plağın maksimum düşey deplasman farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması Grafik (51)'de sunulmaktadır.



Grafik 51. Ankastre mesnetli dairesel plağın maksimum düşey yer değiştirmenin farklı malzeme katsayılar için karşılaştırılması.

Bu bölümdeki yapılan çalışmanın sonuçları, farklı malzeme katsayısı için Grafik (51)'de karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, malzeme katsayısı arttıkça salanım genliğinde bir düşüş meydana geldiği gözlenmiştir.

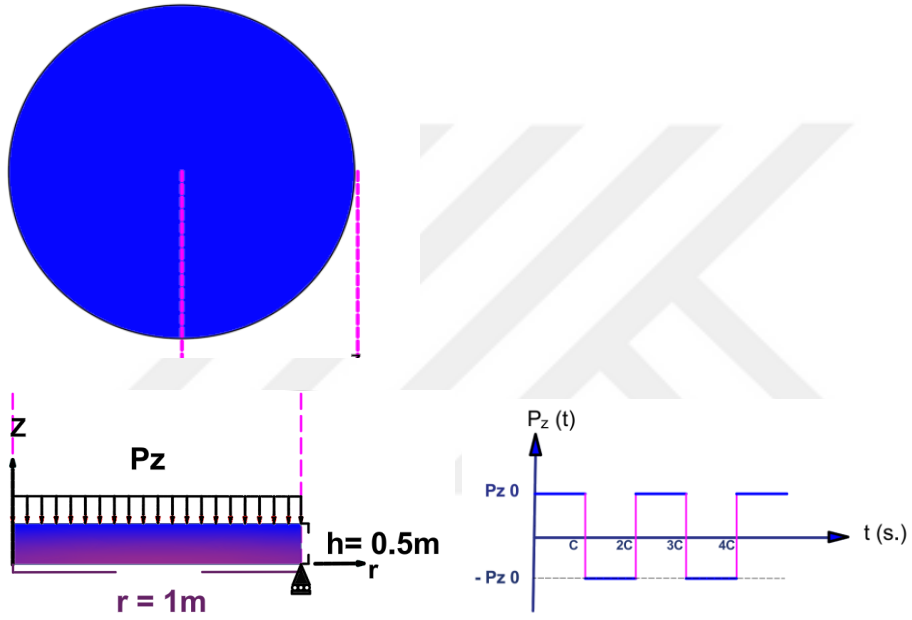
3.3.2.4 Uygulama4- kayıcı mesnetli (h=0.5m) kalınlıkta olan dairesel plağın dinamik analizi

Bir yapının dinamik davranışını, çeşitli dalga yükünün uygulanmasıyla analiz edilebilir. Bu, yapının ani ve sürekli yükleme koşulları altında deformasyon, titreşim ve enerji dağıtımını incelemesine yardımcı olmaktadır.

Kare dalga tipi yükünün spesifik uygulamasının analiz veya testin hedeflerine bağlı olacağını unutmamak önemlidir. Yapıların güvenlik ve performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmasını sağlamak için bir dizi yükleme modeli kullanılmaktadır. Kare dalga yükü, deprem sırasında yer ivmesini modellemek için sismik mühendislikte kullanılabilir. Bu tür yükleme, mühendislerin yapıların sismik performansını değerlendirmesine yardımcı olur ve bunları depremden kaynaklanan kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlanmaktadır.

Öte yandan, yükteki hızlı değişiklikler, kare dalgadakiler yük gibi, bir yapı üzerinde yorulma yüklemesine neden olabilir. Eğer yapı sık sık yük değişimini kaldıracak

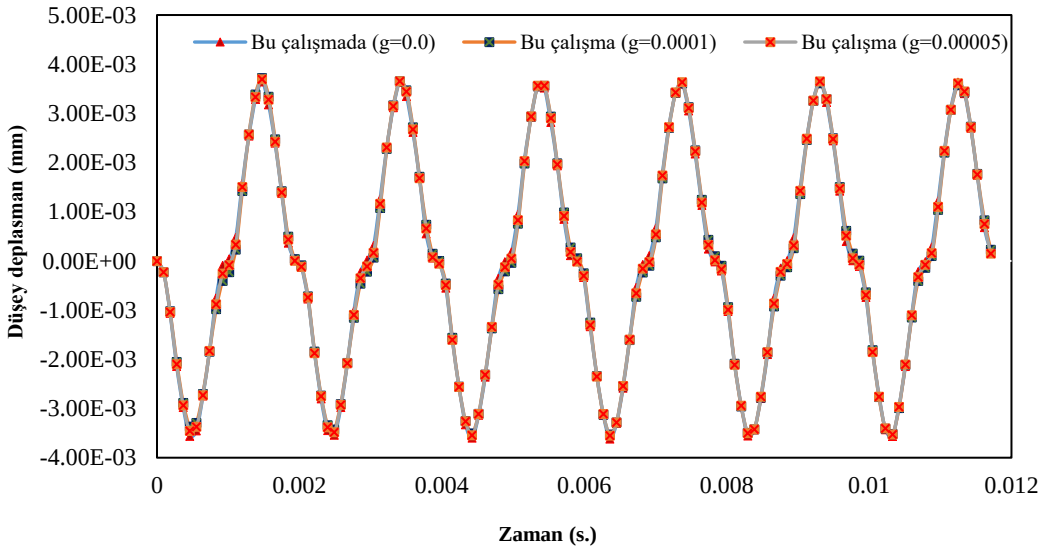
şekilde tasarlanmadıysa, zamanla yorulma arızası yaşanabilir. Dolayısıyla, yukarıdaki nedenlerden dolayı bu yükün güvenli bir yöntem kullanarak tasarlanması önemlidir. Bu kısımda, kare dalga yüklemeye maruz kalan, kenarı kayıcı mesnetli dairesel plaklar için dinamik davranışı incelenmiştir. Şekil (9)'da yük ve plağın geometrisi açıklanmıştır. Farklı sönüm oranı için, maksimum düşey deplasmanın karşılaştırılması Grafik (52 - 54)'te sunulmaktadır. Bu örnekte (pz =100 kN/m^2) ve (c = 0.00049) saniye olarak alınmıştır. (h=0.5) kalınlıkta olan dairesel plağın, yarı çapı (r=1m) olarak dikkate alınmıştır.



Kare dalga yük fonksiyonu

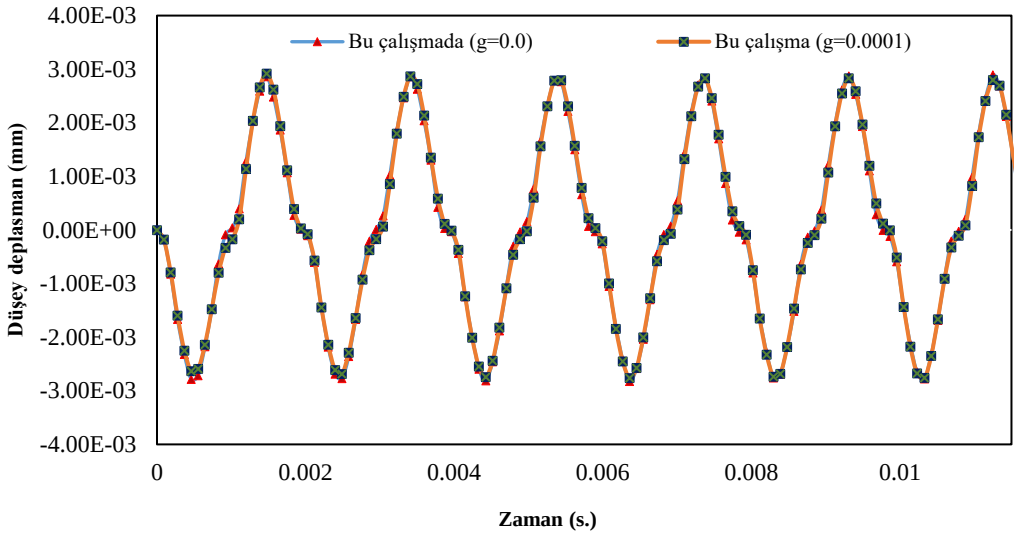
Şekil 9. Kayıcı mesnetli dairesel plakğın geometrisi ve dinamik yük

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (52) 'de gösterilmektedir.



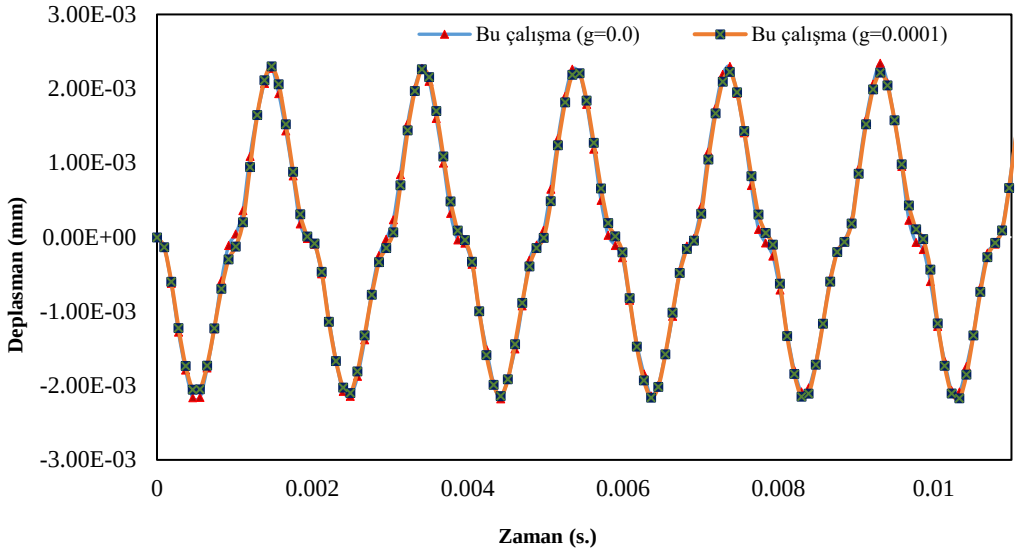
Grafik 52. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0.5) için Grafik (53) 'te gösterilmektedir.



Grafik 53. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi

Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (54) 'te gösterilmektedir.



Grafik 54. Kayıcı mesnetli dairesel plağın maksimum düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=0, 0.5 ve 1 için plağın doğal titreşim periyotları uygulanan yükün periyodundan (0.00098 s) uzak olduğu için bu durumlarda herhangi bir vuruş olayı gerçekleşmemiştir. Grafik (52-54) incelendiğinde λ_z değeri artıkça salınım genliklerin düşütüğü gözlemlenmiştir.

3.4. Halka Plağın Zorlanmış Titreşim Analizi

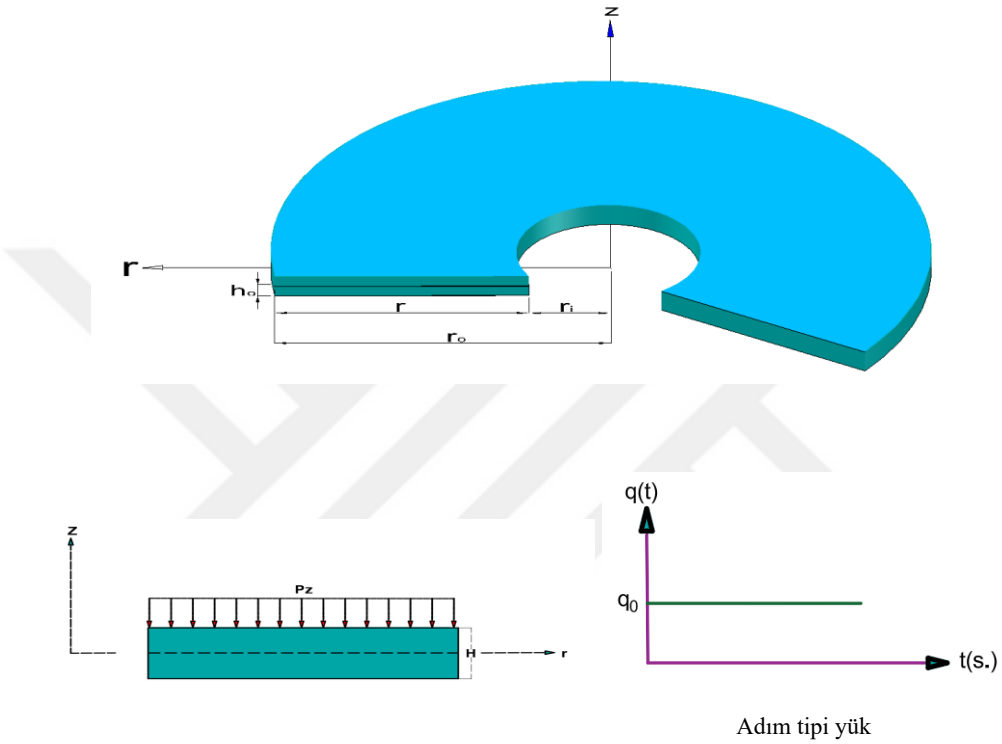
3.4.1. Halka plak için önerilen yöntemin TFY ile verifikasyonu

Yapı mühendisliğinde, bir yapının esnekliğini ve gücünü test ederken, mühendisler yapıya ani bir yük uygulayabilir ve davranışlarını gözlemleyebilir. Bu, çevresel koşullarda ani değişiklikler veya beklenmedik kuvvetler gibi olayların bir benzerini yapabilir. Deprem gibi olayların replikasyonunu yapabilmektedir. Bu çalışma aşamasında, dinamik yüke maruz kalan halka bir plak araştırılmıştır.

Bu çalışmada, önerilen yaklaşımı doğrulamak için, halka bir plak ele alınmıştır (Şekil 10). Bu çalışmada sağlanan yöntem, adım tipi yükleme (64 adım) için yapılmıştır. Halka plağın kalınlığı (h=1m), iç yarıçapı (r_i=1m) ve dış yarıçapı (r_o=5m) olarak kabul edilmiştir. İki malzemeden, metal ve seramikten oluşan dairesel plağın malzeme

özellikleri Tablo (1)'de verilmiştir. Mekanik özelliklerinin denklemleri (3-6)'in güç yasasıyla tanımlanmıştır.

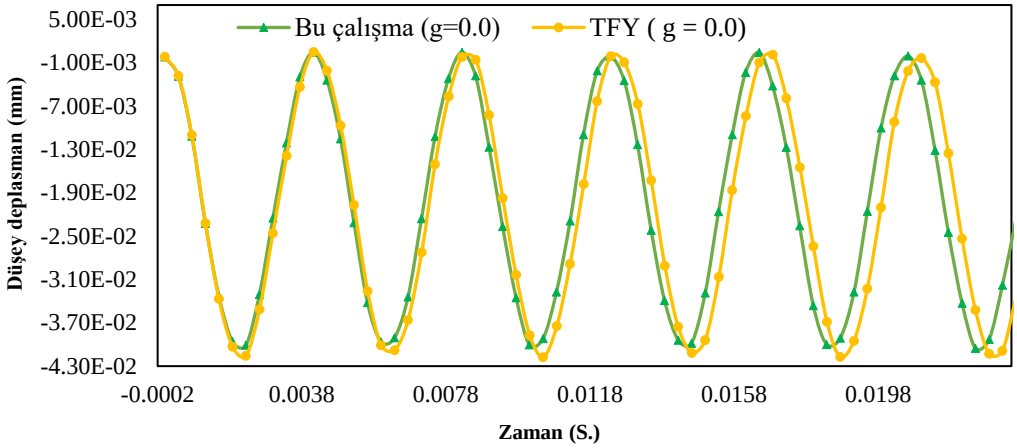
Karşılaştırmak için tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi (TFY) kullanarak, elastik ve çeşitli viskoz sönüm oranları için (g =0.0001) ve (g =0.00005) halka plağın analizi yapılmıştır. Yük değeri bir önceki örnek ile aynıdır.



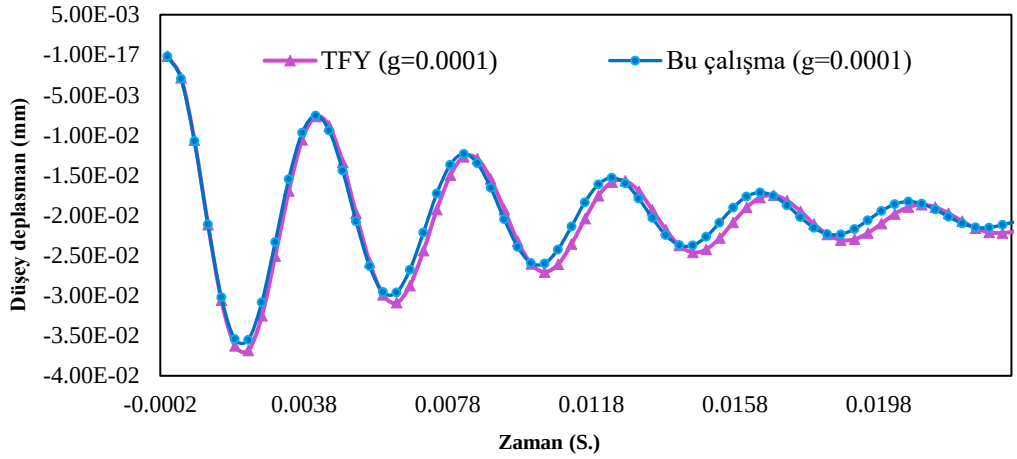
Şekil 10. (3D)-Halka Plağın geometrisi ve adım tipi yük

Bu çalışmada önerilen yaklaşımı doğrulamak için, aynı kalınlıkta (*h*= 1m) olan halka plak ele alınmıştır. TFY kullanarak sayısal olarak çözülmüş olan plağın, bu çalışmada kullanılan SEY ile karşılaştırılmıştır. Aynı sınır koşulu (ankastre mesnetli) için analiz edilmiştir. İki yöntemdede aynı malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Analiz (64 adım) için gerçekleştirilmiştir. Düşey deplasmanın zamanla değişimi Grafik (55-63) 'te verilmiştir. Dinamik problemlerin çözümü hem TFY hem de sonlu elemanlar yöntemi ile yapılırken zamana bağlı denklemler Laplace uzayında çözülmüş olup sonuçlar modifiye edilmiş ters Laplace dönüşümü ile zaman uzayına transfer edilmiştir.

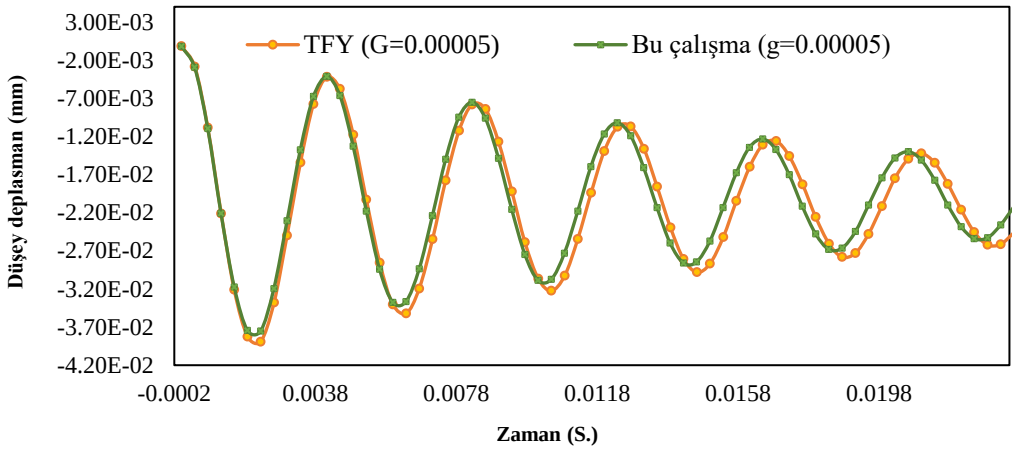
Bu çalışmada, ankastre-ankastre (A-A) mesnetli olan halka plağın (λ_z=0), elastik ve viskoelastik sönüm oranı için maksimum düşey deplasmanı TFY ile karşılaştırılması Grafik (55-57)'de gösterilmektedir (Noori 2019).



Grafik 55. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki elastik deplasman karşılaştırması

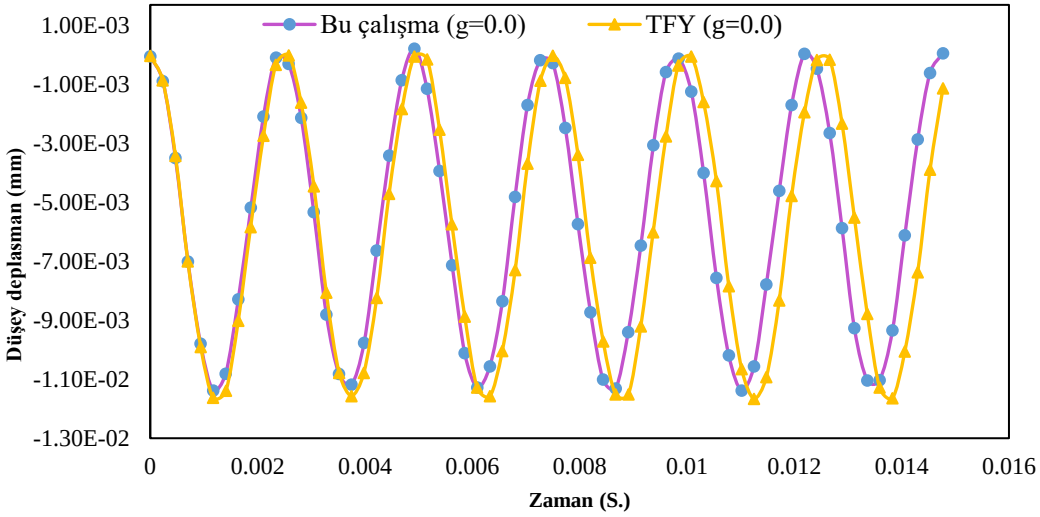


Grafik 56. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması

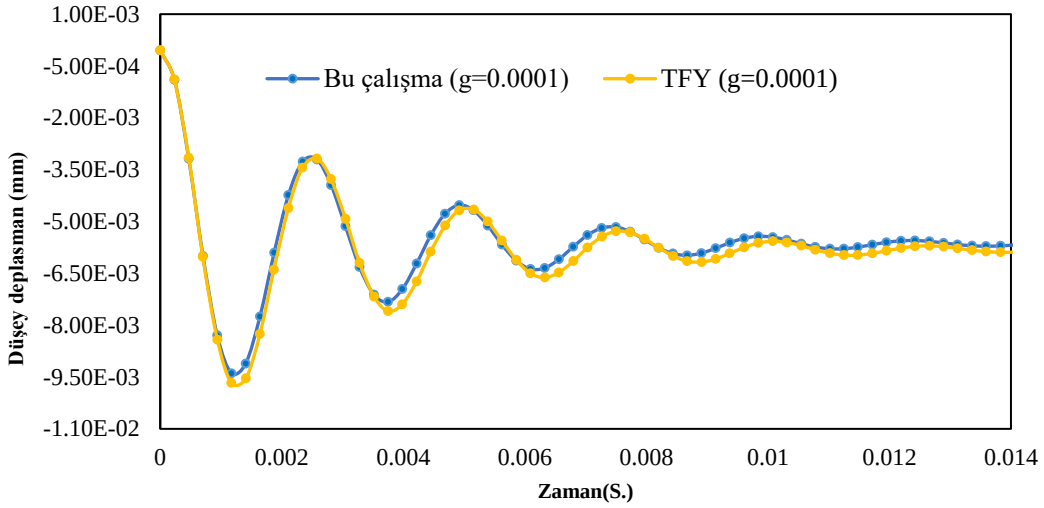


Grafik 57. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması

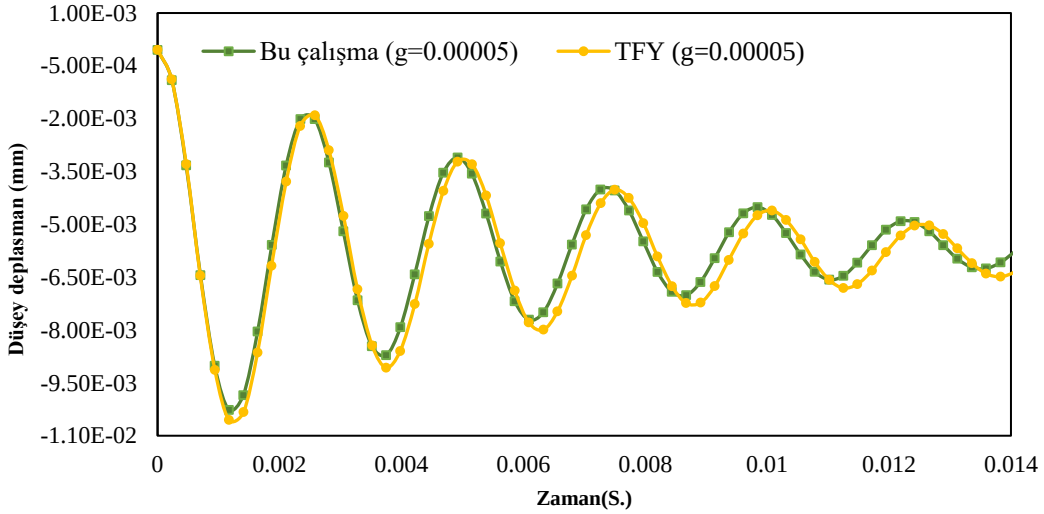
Bu çalışmada ankastre mesnetli olan halka plağın λ_z=2, elastik ve viskoelastik sönüm oranı için maksimum düşey deplasmanı TFY ile karşılaştırılması Grafik (58-60)'ta gösterilmektedir.



Grafik 58. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki elastik deplasman karşılaştırması

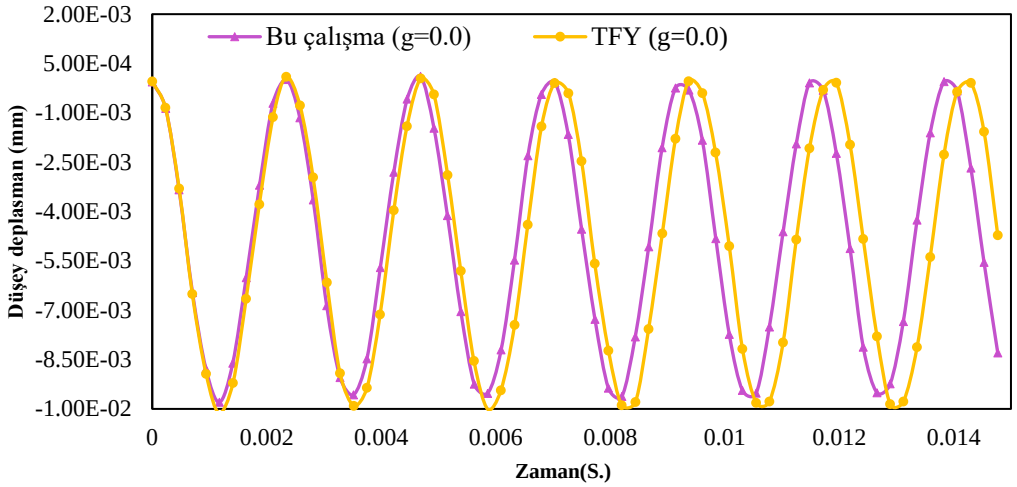


Grafik 59. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması

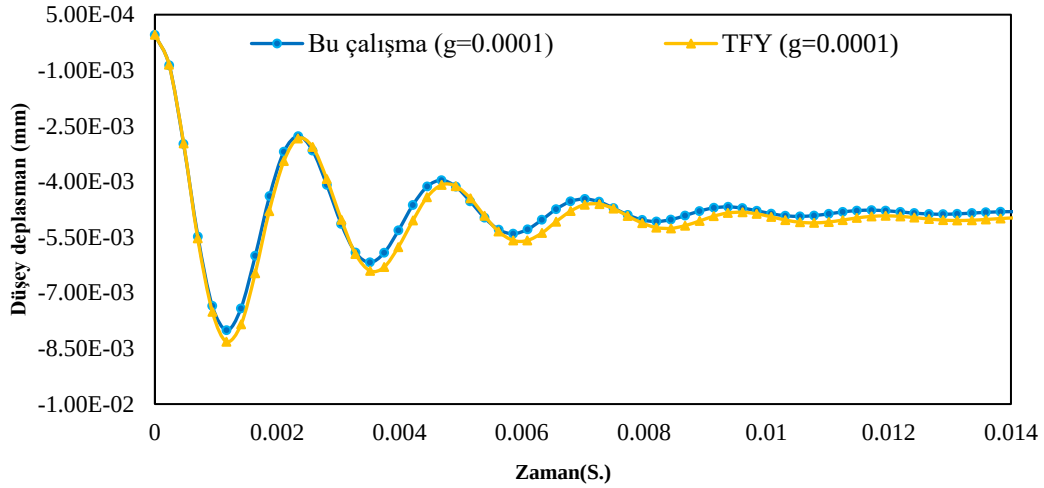


Grafik 60. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması

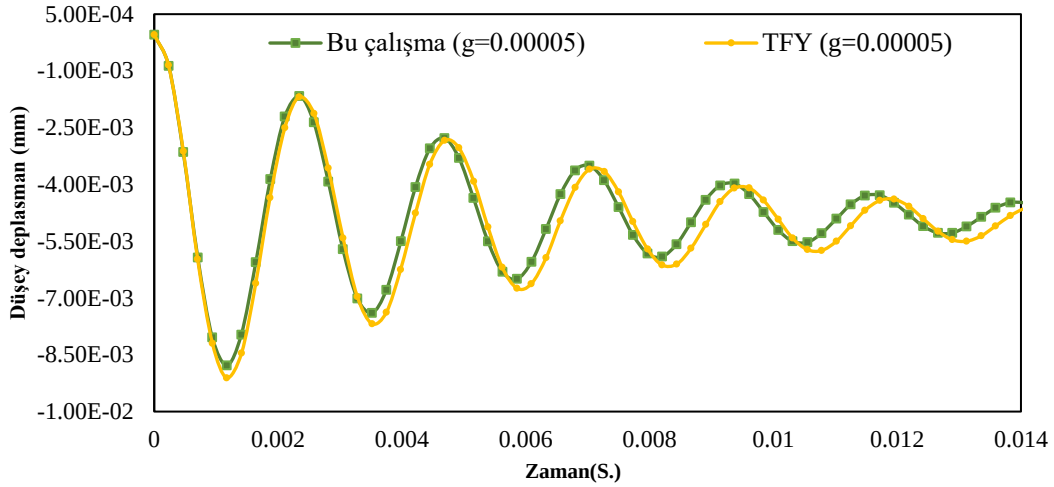
Bu çalışmada ankastre mesnetli olan halka plağın λ_z=4, elastik ve viskoelastik sönüm oranı için maksimum düşey deplasmanı TFY yöntem ile karşılaştırılması Grafik (61-63)'te gösterilmektedir.



Grafik 61. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması



Grafik 62. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması



Grafik 63. Adım tipi yükleme için halka plağın kalınlığının ortasındaki viskoelastik deplasman karşılaştırması

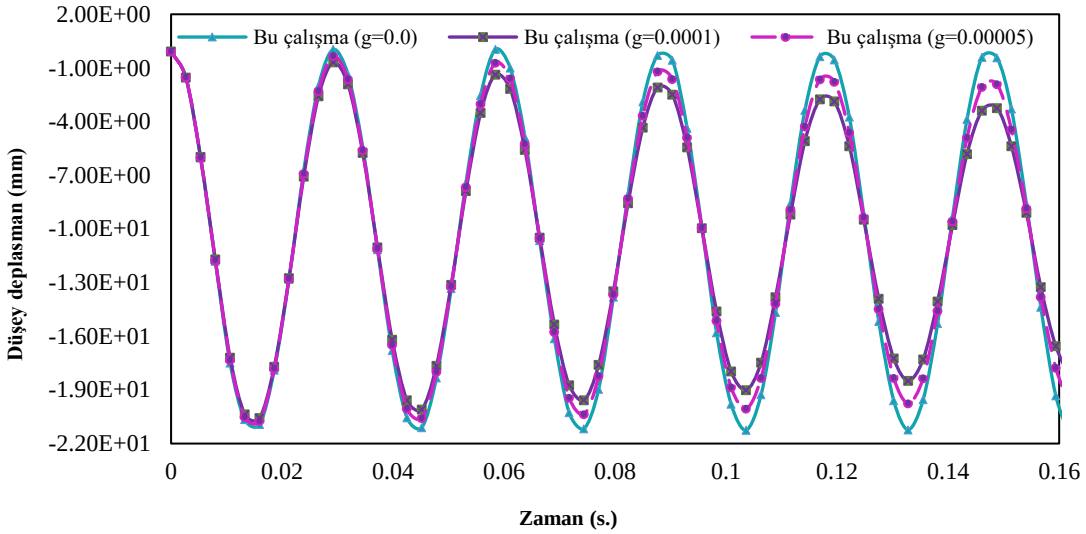
Grafik (55-63) incelendiğinde TFY ve SEY ile Laplace uzayında elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür. Malzeme değişim katsayısının artmasıyla sonuçlar arasındaki artmamakta olup ancak zaman artıkça sonuçların birbirinden uzaklaştığı görülmektedir. Bunun temel sebebi TFY ile çözüm yapılırken birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı plak teorisinin kullanılması ve SEY ile çözüm yapılırken kuadratik dörtgen elemanın kullanılmış olmasıdır. Yani çözümlerde kullanılan teorilerin ve kabullerin farklı olması bu sonuçların üst üst örtüşmemesin sebebidir.

3.4.2. Halka plağın adım tipi yük fonksiyonu için çözüm

Bu bölüm çalışmasında, farklı kalınlıkta halka plak ele alınmıştır. Önerilen yöntem adım tipi yükleme, (64 adım) için uygulanmıştır. Halka plağın kalınlığı (h=0.1m), iç yarıçapı (r_i=1m) ve dış yarıçapı (r_o=5m) olarak varsayılmaktadır. Düzgün yayılı yük (p_z =100 kN/m^2) plağa uygulanmıştır.

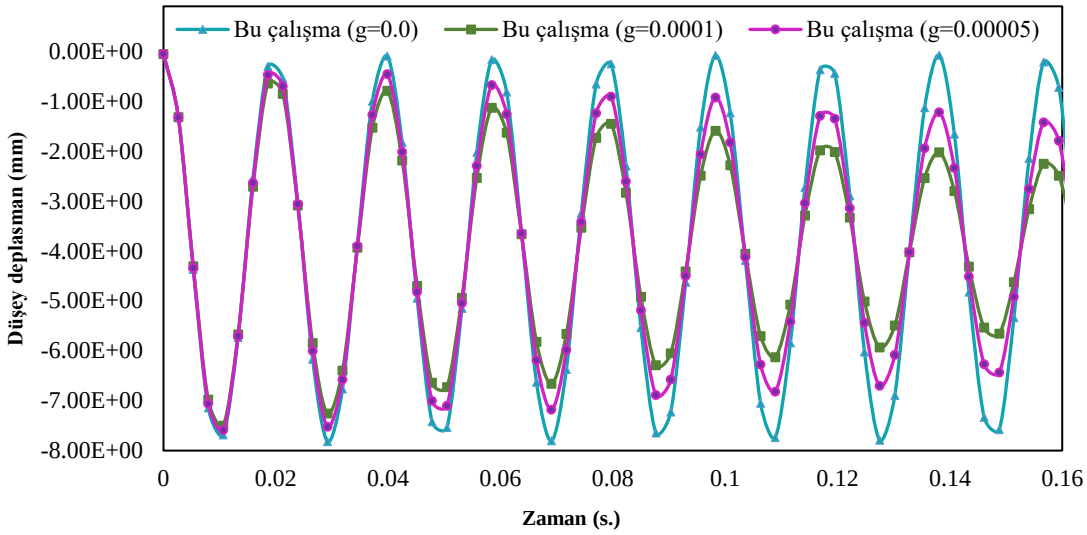
Ankastre-ankastre (A-A) mesnetli, (h=0.1m) kalınlıkta olan halka plağın zorlanmış titreşimi analizi gerçekleştirilmiştir, elastik ve viskoelastik için maksimum düşey deplasman sonuçları “Grafik 64-69” da karşılaştırılmıştır. Ankastre-ankastre (A-A)

izotropik halka plakların maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (64)'te gösterilmektedir.



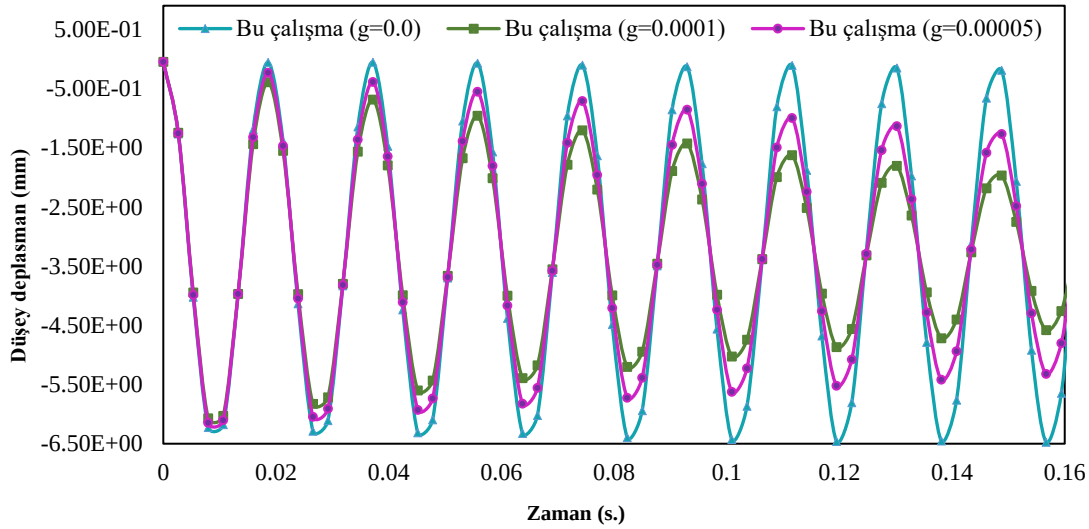
Grafik 64. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-ankastre (A-A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (65)'te gösterilmektedir.



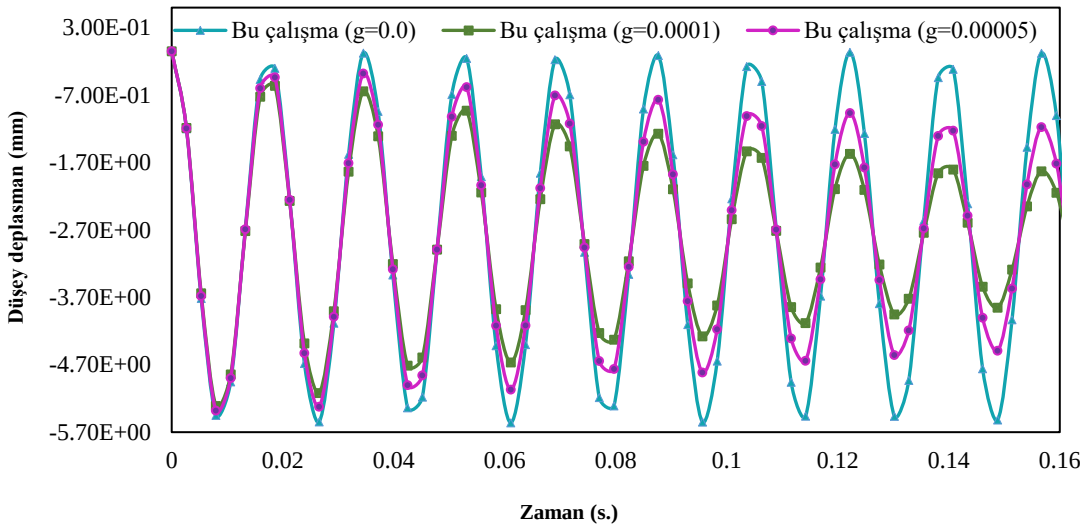
Grafik 65. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-ankastre (A-A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (66)' da gösterilmektedir.



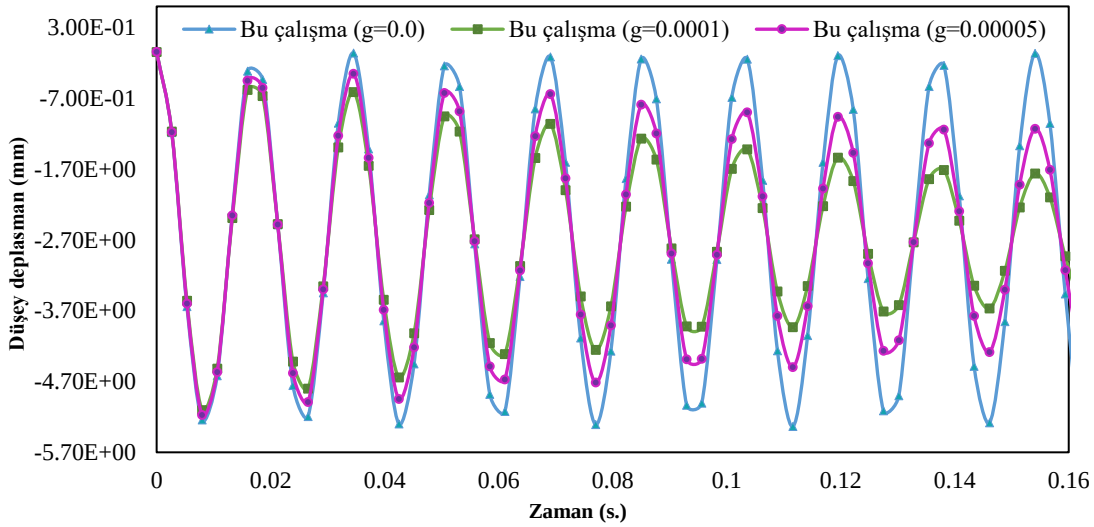
Grafik 66. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-ankastre (A-A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (67)'de gösterilmektedir.



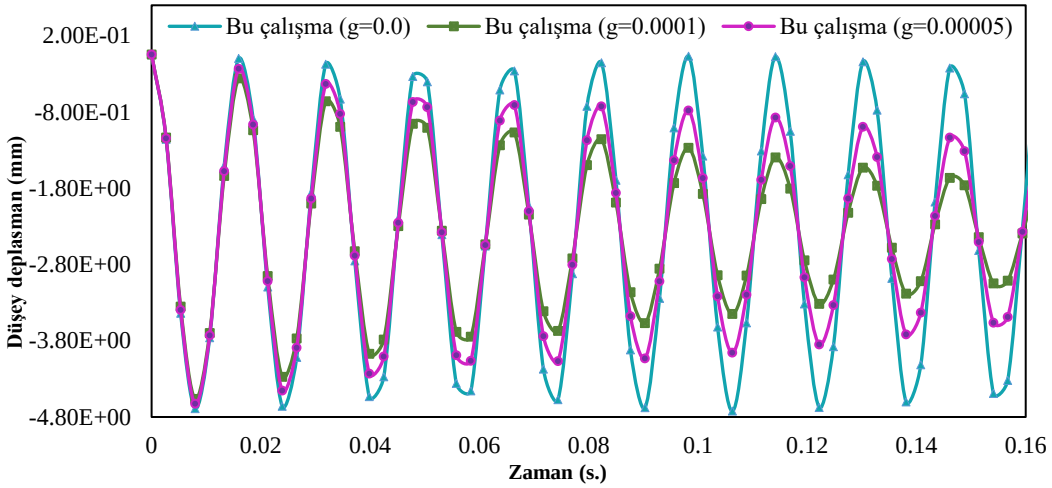
Grafik 67. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-ankastre (A-A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (68)'de gösterilmektedir.



Grafik 68. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

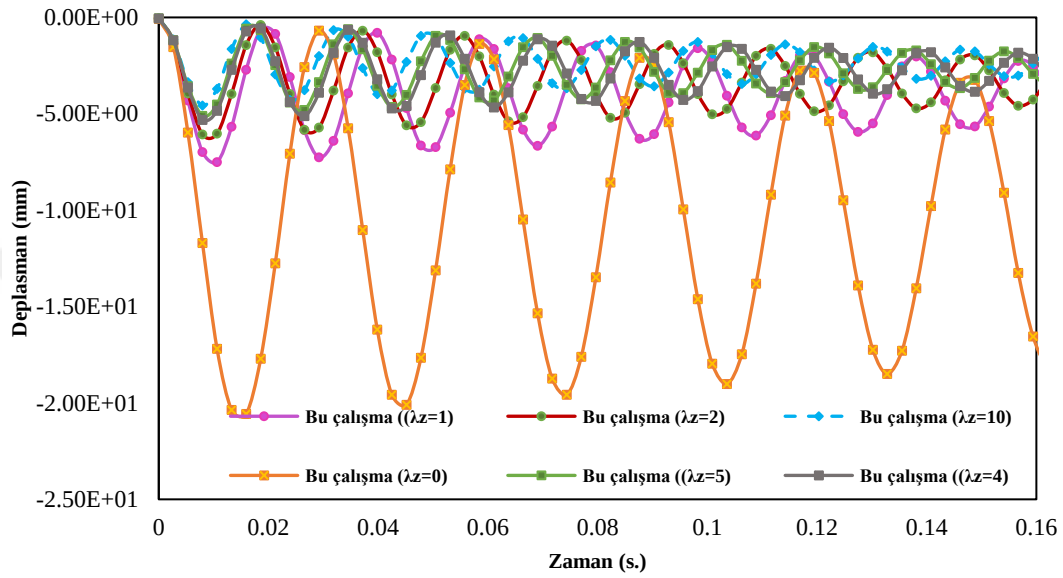
Ankastre-ankastre (A-A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (69)'da gösterilmektedir.



Grafik 69. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Grafik (64-69)'ten de görüldüğü gibi viskoelastik durumda sönüm oranı arttıkça salınım genlikleri daha hızlı bir biçimde elastik deplasmana yaklaşmaktadır. Bunun yanı sıra malzeme değişim katsayısının yüksek olduğu durumlarda sönüm oranın etkisi daha belirgindir.

Farklı malzeme katsayısı için (g=0.0001), (h=0.1m) kalınlıkta olan halka plağın düşey deplasmanın zamanla değişimi Grafik (70)'te verilmiştir.

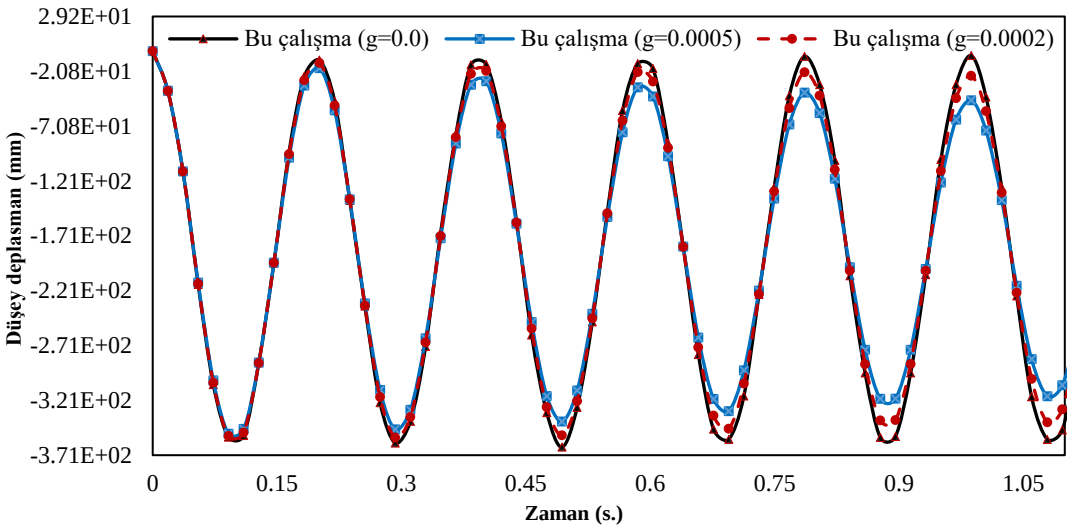


Grafik 70. Farklı malzeme katsayısı için halka plağın düşey deplasmanın zamanla değişimi

Grafik 70'ten de anlaşılacağı gibi malzeme katsayısı arttıkça salınım genliği küçülmektedir ve periyotlar de azalmaktadır.

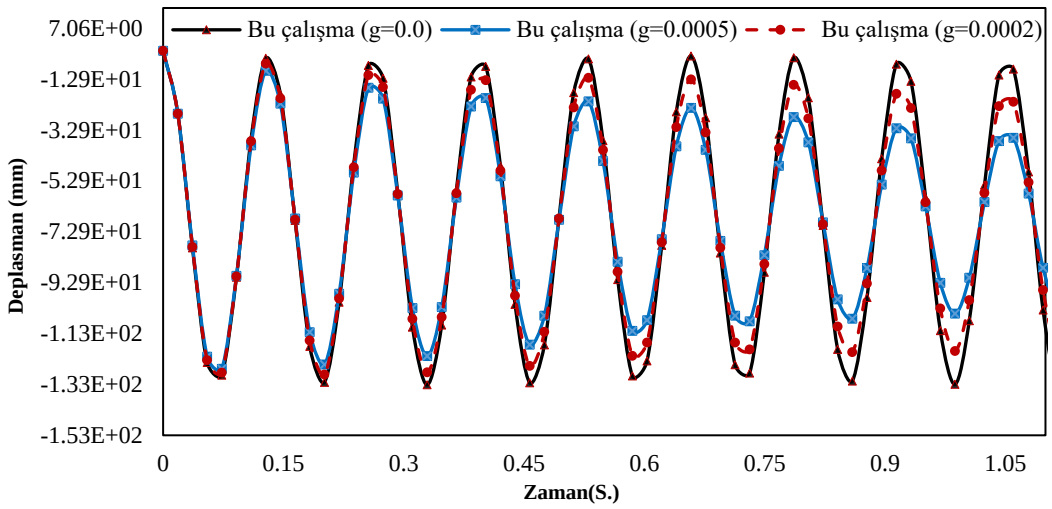
Bir sonraki örnekte ankastre- serbest model (A – S), (h = 0.1m) kalınlıkta olan halka plağın analizi gerçekleştirilmiştir, elastik ve viskoelastik için maksimum düşey deplasmanın sonuçları Grafik (71-76)'da karşılaştırılmıştır.

Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (71)'de gösterilmektedir.



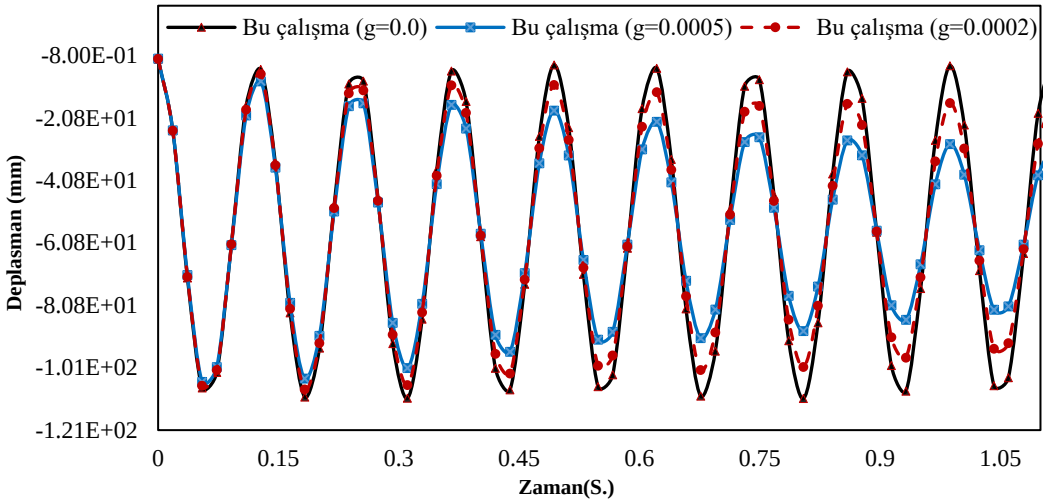
Grafik 71. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (72)'de gösterilmektedir.



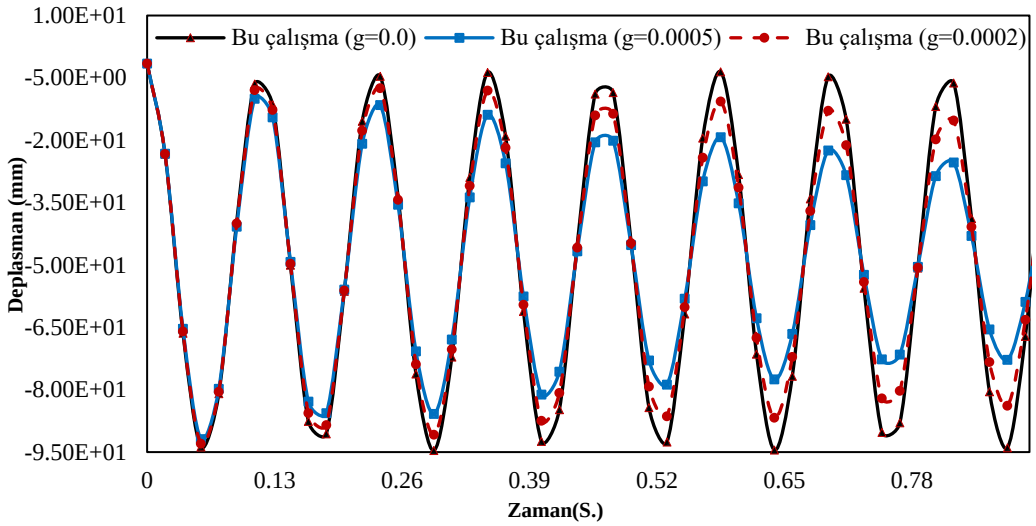
Grafik 72. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (73)'te gösterilmektedir.



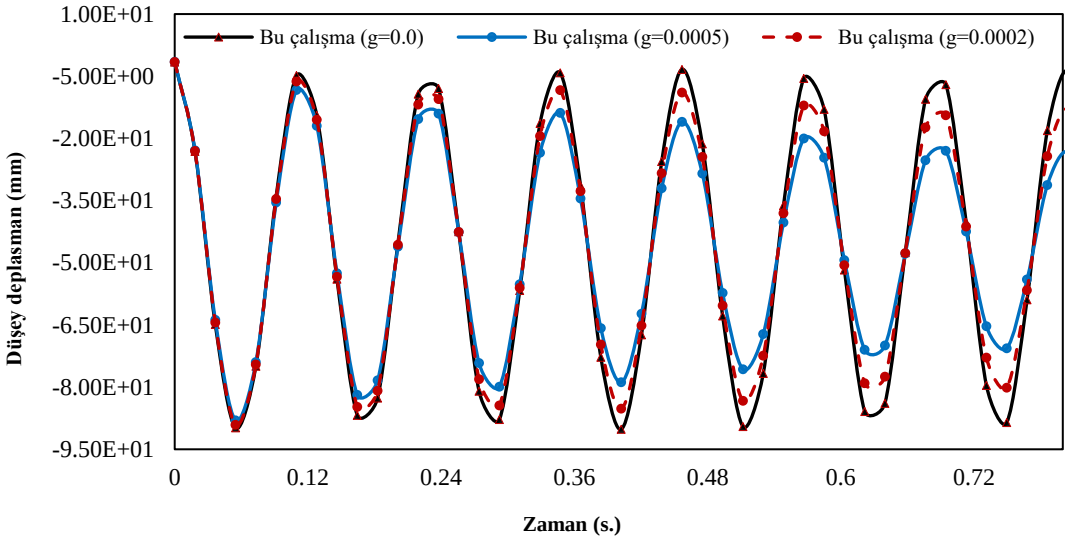
Grafik 73. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (74)'te gösterilmektedir.



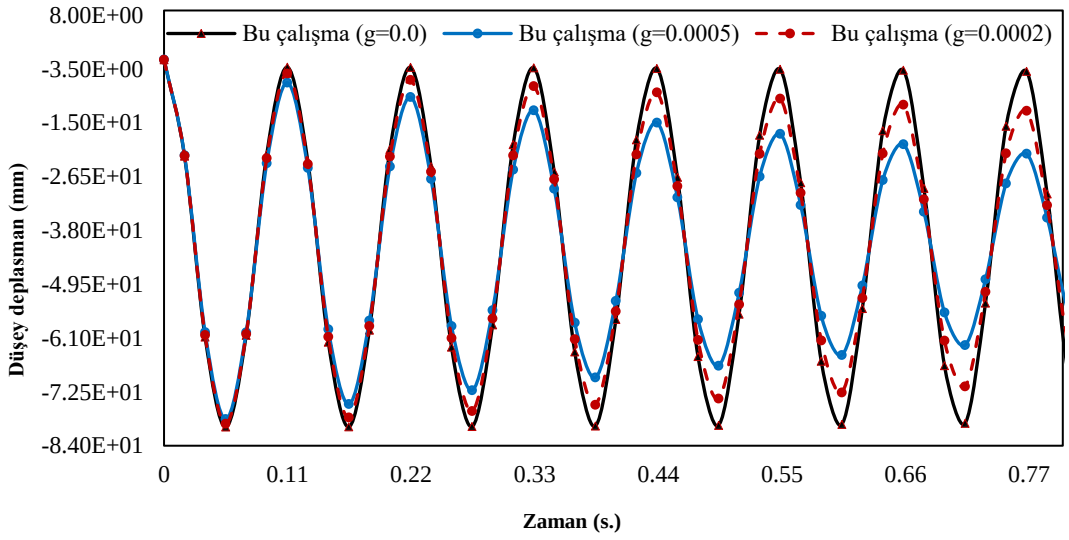
Grafik 74. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (75)'te gösterilmektedir.



Grafik 75. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

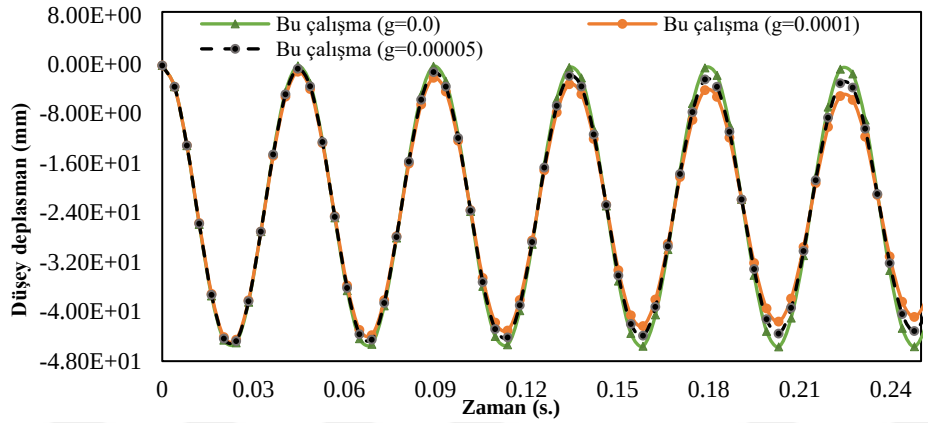
Ankastre-serbest (A – S) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (76)'da gösterilmektedir.



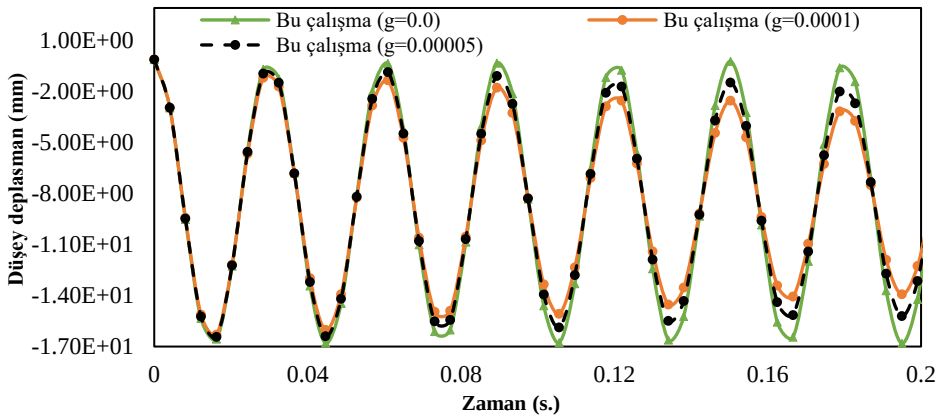
Grafik 76. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Bu örnekte de önceki örneklerde olduğu gibi sönüm ektisi yorumlanabilir. Benzer yorumlar olmasına rağmen bu tür sonuçların sunulmasının temel amacı paramtrik çalışmalarının ve bu konuda çalışan araştırmacıların faydalanacabileceği örneklerin sayısını artırmaktır.

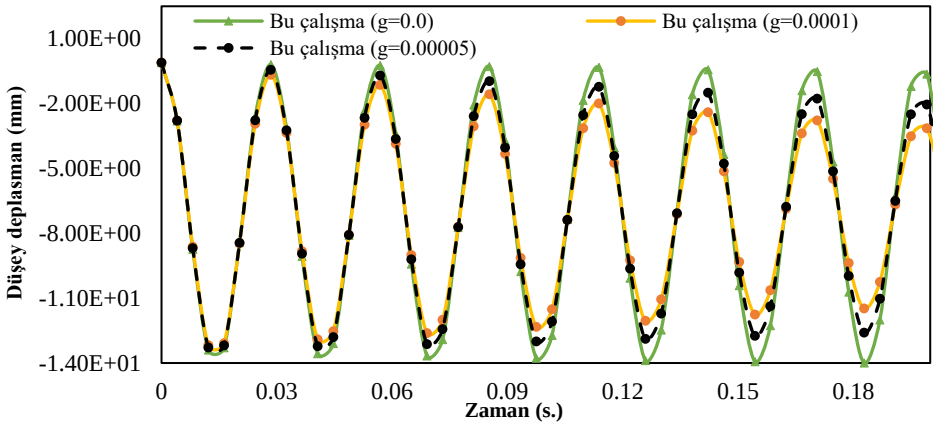
Tezin bu bölümünde ankastre- kayıcı mesnetli (A – K), ve kalınlığı (h= 0.1m) olan halka plağın sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim analizi yapılmıştır. A – K mesnetli izotropik heterojen halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0,1/2,1,2,4,5 ve 10) için sırasıyla Grafik (77-82)'de gösterilmektedir.



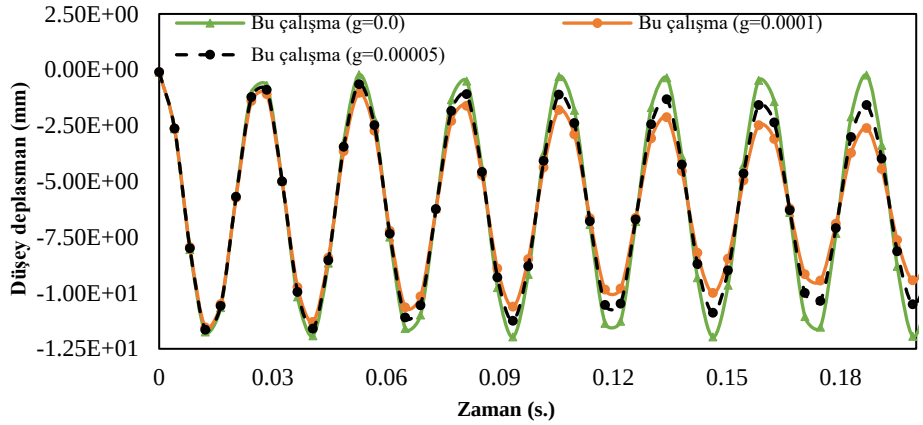
Grafik 77. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi



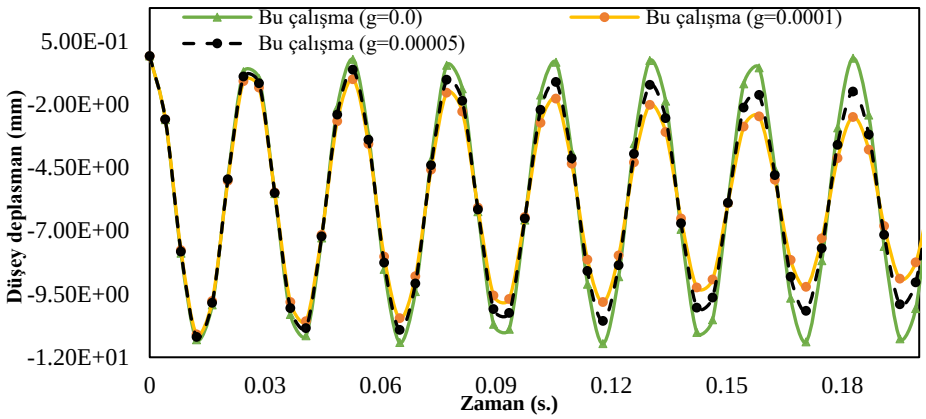
Grafik 78. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi



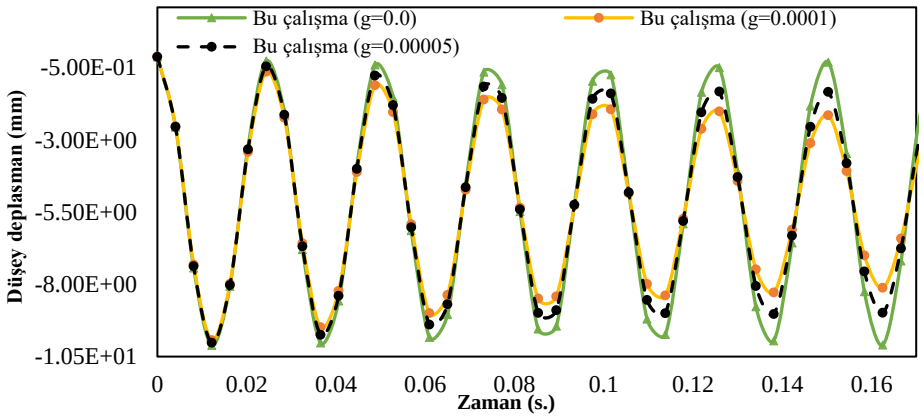
Grafik 79. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi



Grafik 80. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi



Grafik 81. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

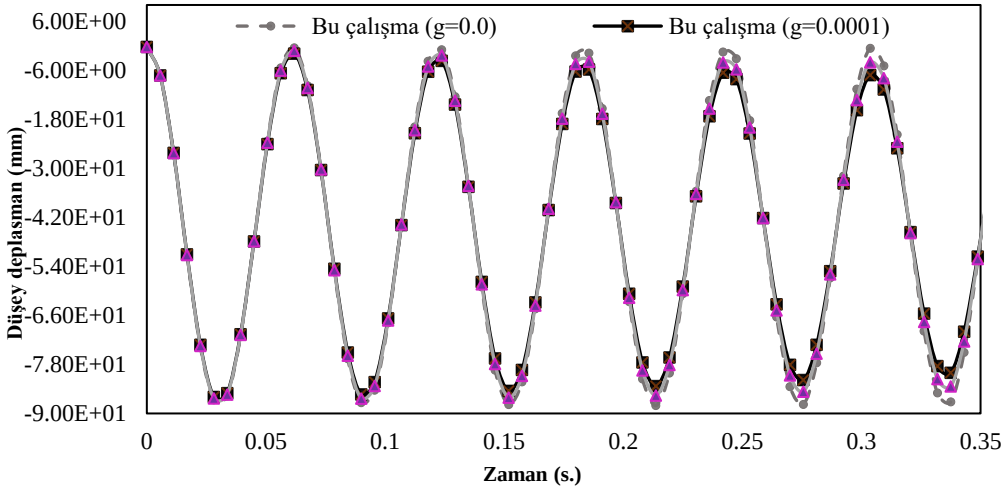


Grafik 82. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Grafik (77-82) incelendiğinde diğer mesnet durumlarında olduğu gibi A-K sınır koşulunda da malzeme değişim katsayısı ve sönüm oranı zorlanmış titreşim davranışı önemli ölçüde etkilemektedir.

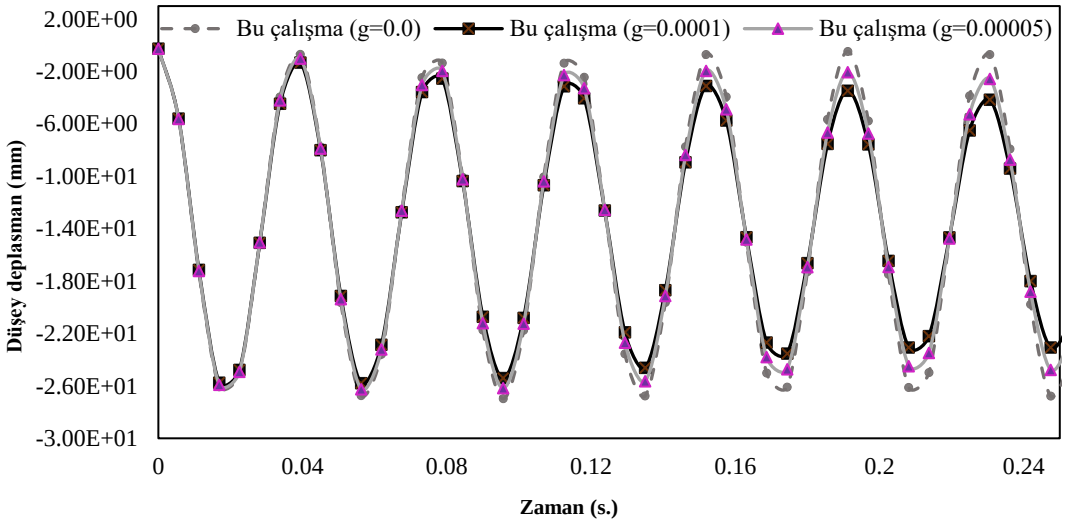
Son olarak kayıcı - kayıcı (K– K) mesnetli, (h = 0.1m) kalınlıkta olan halka plağın dinamik analizi gerçekleştirilmiştir, sonuçlar Grafik (83- 86)'da gösterildiği gibi elastik ve viskoelastik için maksimum düşey deplasmanı karşılaştırılmıştır.

K-K mesentli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (83)'te gösterilmektedir.



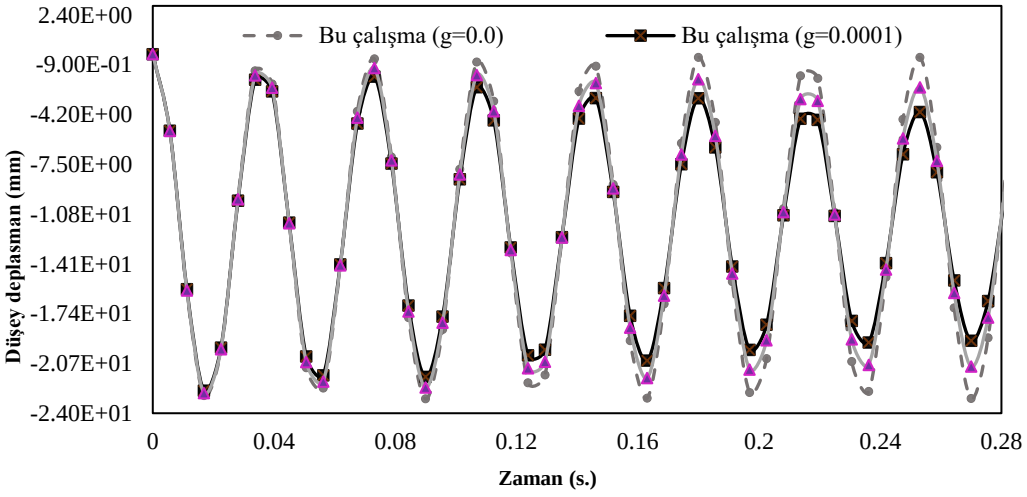
Grafik 83. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesentli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (84)'te gösterilmektedir.



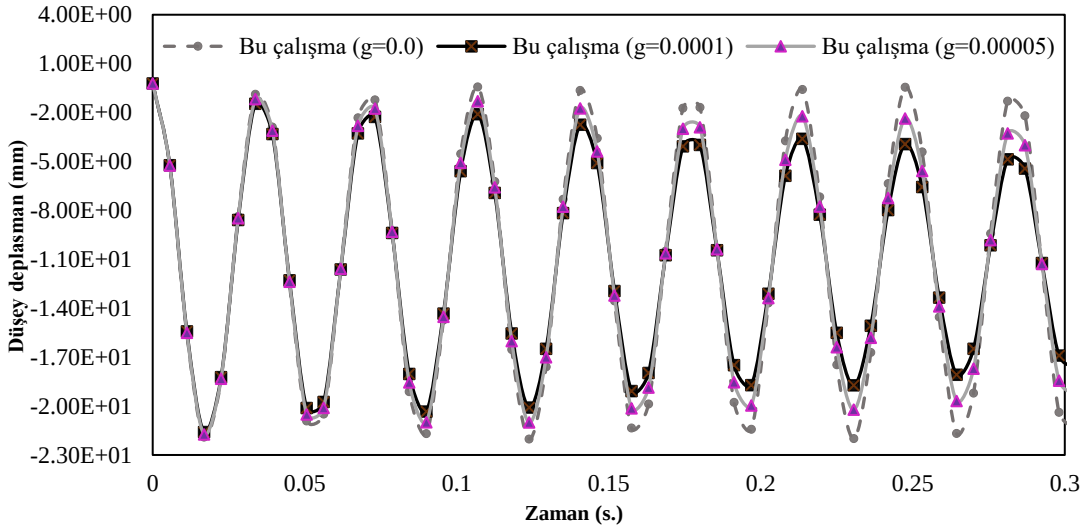
Grafik 84. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesentli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (85)'te gösterilmektedir.



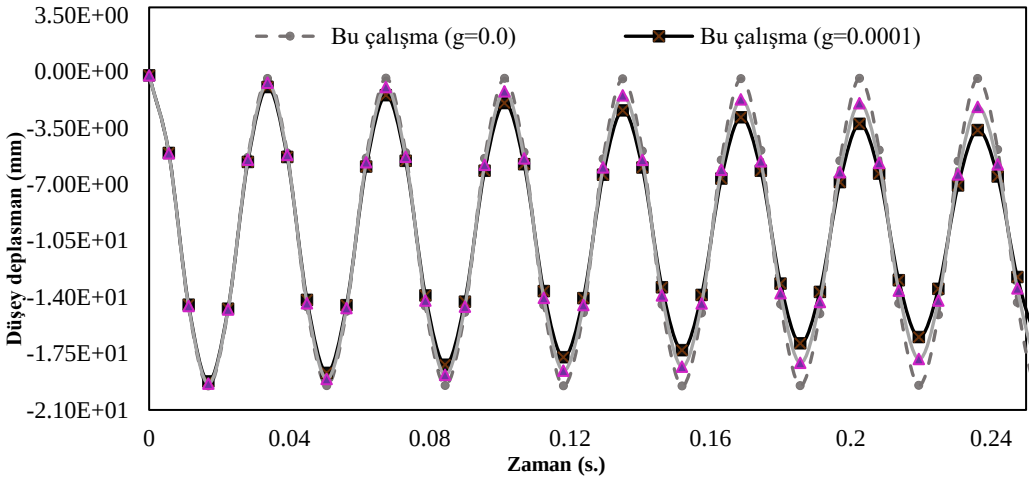
Grafik 85. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesentli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (86)'da gösterilmektedir.



Grafik 86. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

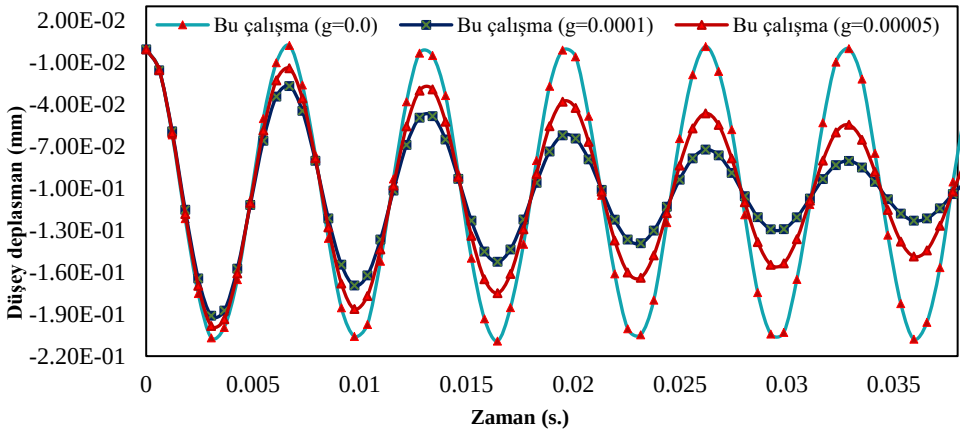
K-K mesentli mesnet izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (87)'de gösterilmektedir.



Grafik 87. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

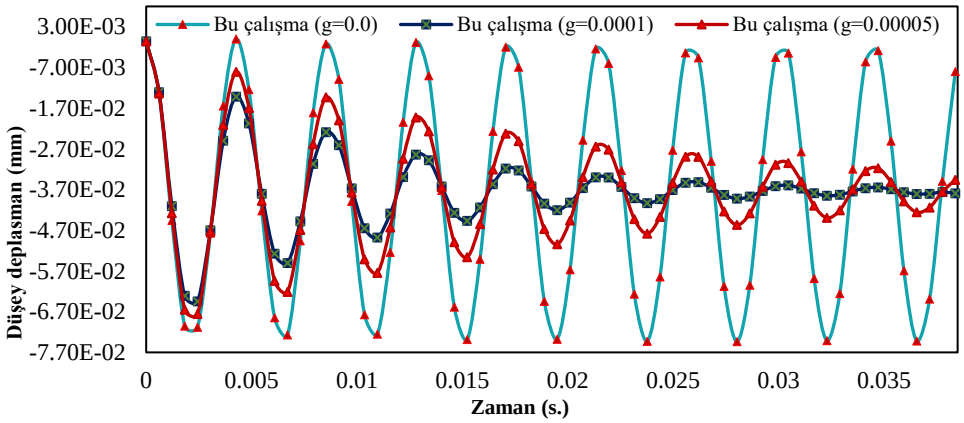
Grafik (83-87) incelendiğinde diğer mesnet durumlarında olduğu gibi K-K sınır koşulunda da malzeme değişim katsayısı ve sönüm oranı zorlanmış titreşim davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. Sunulan çalışmalar bu konuyla ilgili bilim insanları tarafından kullanılması açısından verilmiştir.

Tezin bu bölümünde (h = 0. 5 m) kalınlığı olan halk biçiminde FDM halka pağın sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışı ele alınmıştır. A-A mesnetli plak için sonuçları Grafik (88-93)'te verilmiştir. Ankastre-ankastre (A– A) izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=0) için Grafik (88)'de gösterilmektedir.



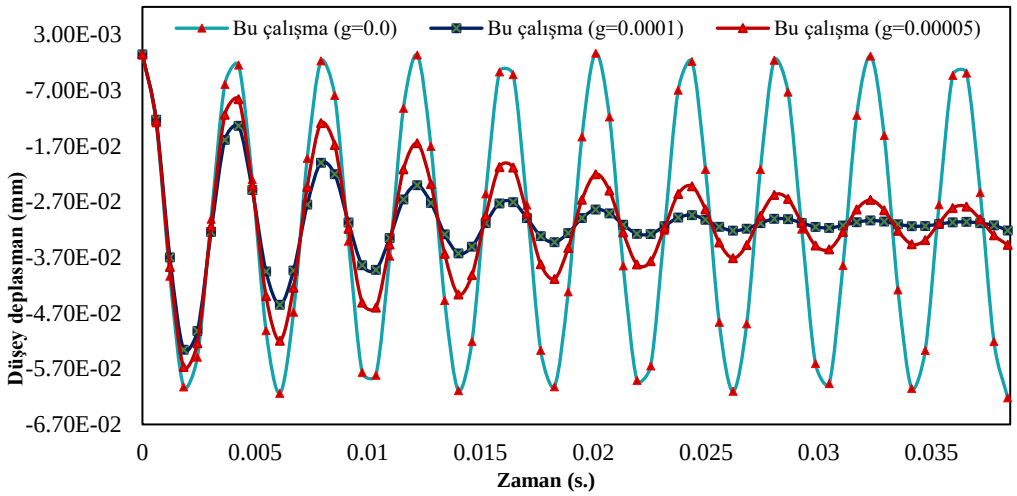
Grafik 88. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=1) için Grafik (89)'da gösterilmektedir.



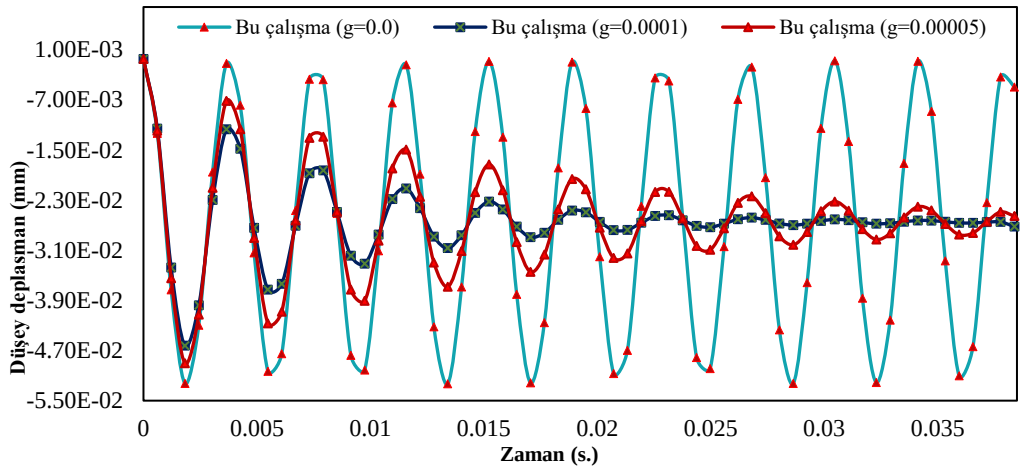
Grafik 89. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=2) için Grafik (90)'da gösterilmektedir.



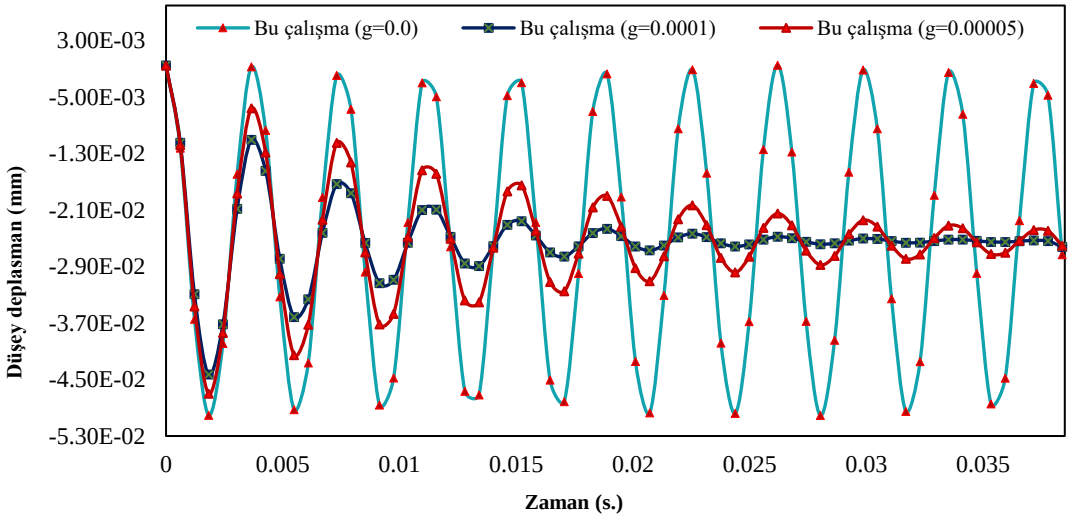
Grafik 90. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=4) için Grafik (91)'de gösterilmektedir.



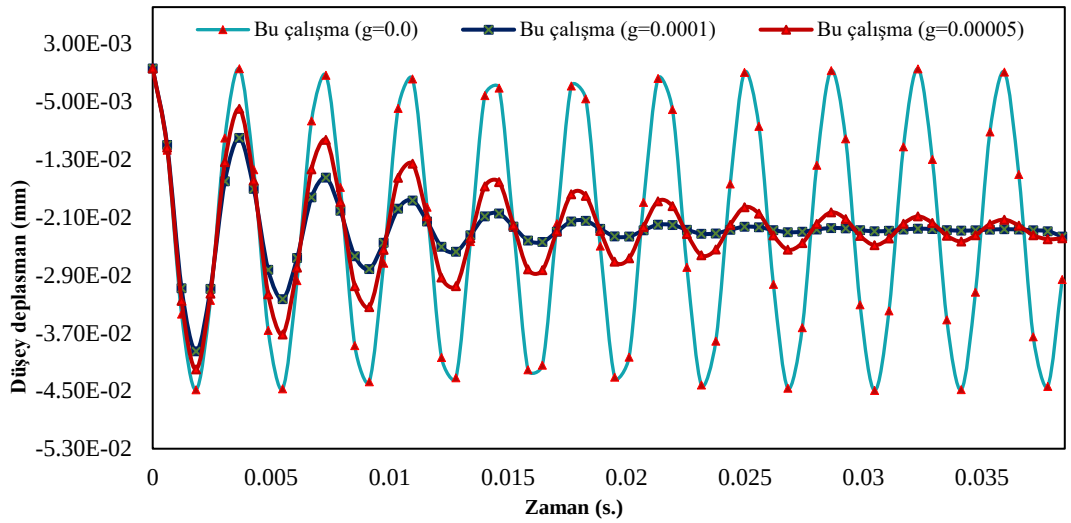
Grafik 91. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=5) için Grafik (92)'de gösterilmektedir.



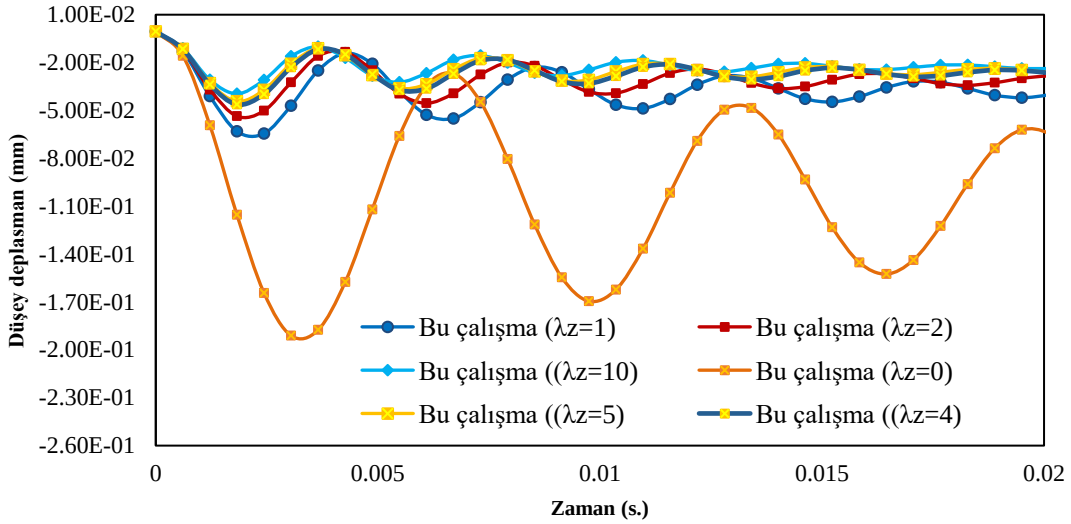
Grafik 92. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, (λ_z=10) için Grafik (93)'te gösterilmektedir.



Grafik 93. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– A mesnetli izotropik (h =0. 5m) kalınlıkta olan halka plağın (g=0.0001) sönüm oranı için, maksimum düşey deplasmanı, farklı malzeme katsayısı için Grafik (94)'te gösterilmektedir.

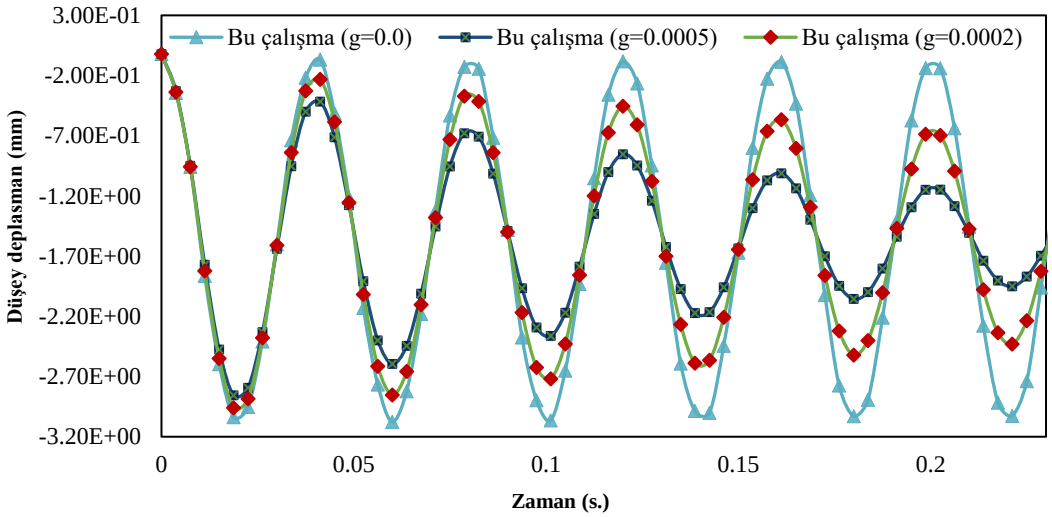


Grafik 94. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki farklı malzeme katsayısı için viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Grafik (94)'den elde edilen sonuçlara göre, farklı malzeme katsayısı (λ_z=0, 1, 2, 4, 5, 10) için zorlanmış titreşim davranışı incelenmiştir. Malzeme katsayısı arttıkça düşey deplasman değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da elastisite mödülüne bağlı olarak davranışını etkilediğini göstermektedir. Sönüm oranının yüksek λ_z değerlerine etkisi daha belirgindir.

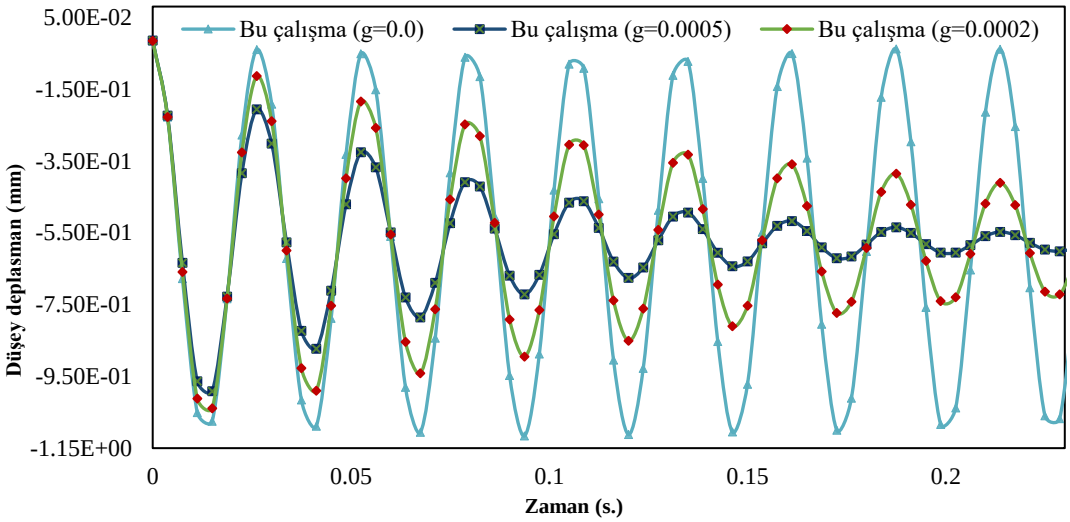
Bir sonraki uygulamada Ankastre- Serbest (A– S), Ankastre Kayıcı (A-K), Kayıcı - Kayıcı (K-K) mesnetli halka plak için dinamik analiz gerçekleştirilmiştir, sonuçlar sırasıyla Grafikler (95-100)'de, Grafik (101-106)'da ve Grafik(107-112)'de sunulmuştur.

λ_z=0 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanı, Grafik (95)'te gösterilmektedir.



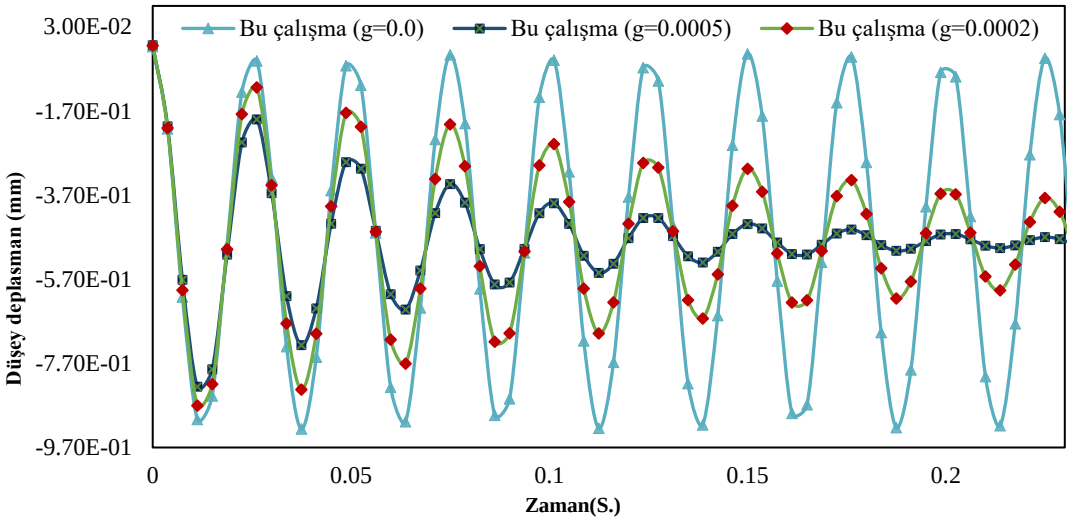
Grafik 95. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=1 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanı Grafik (96)'da gösterilmektedir.



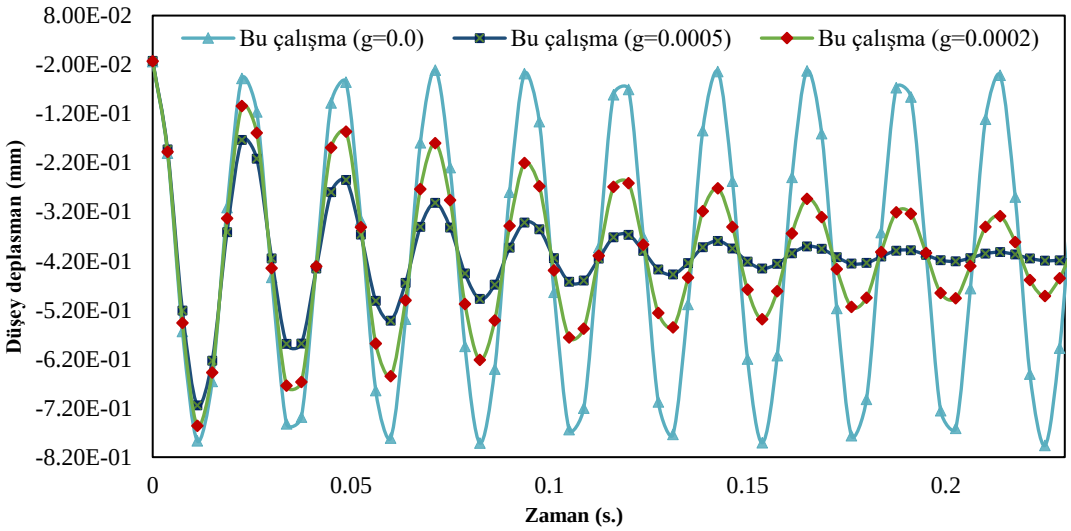
Grafik 96. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=2 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanı Grafik (97)'de gösterilmektedir.



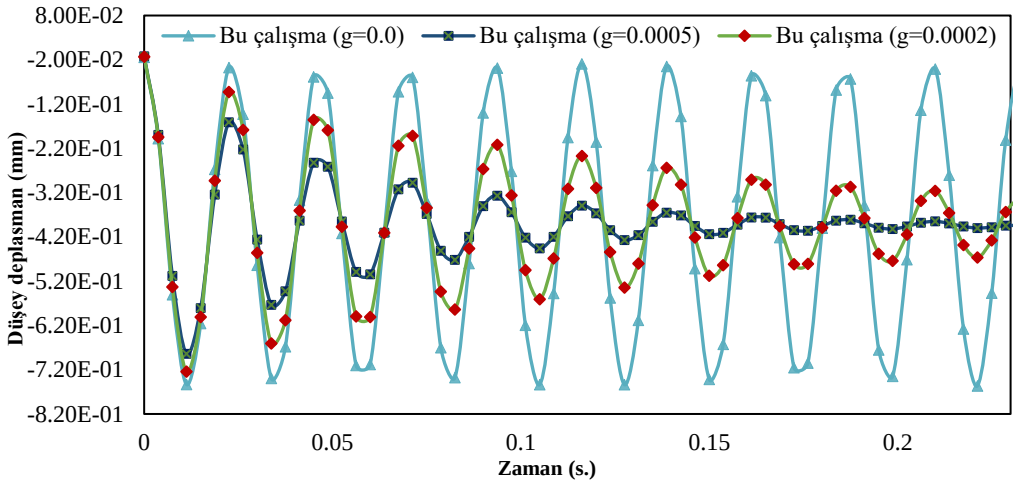
Grafik 97. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=4 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanı Grafik (98)'de gösterilmektedir.



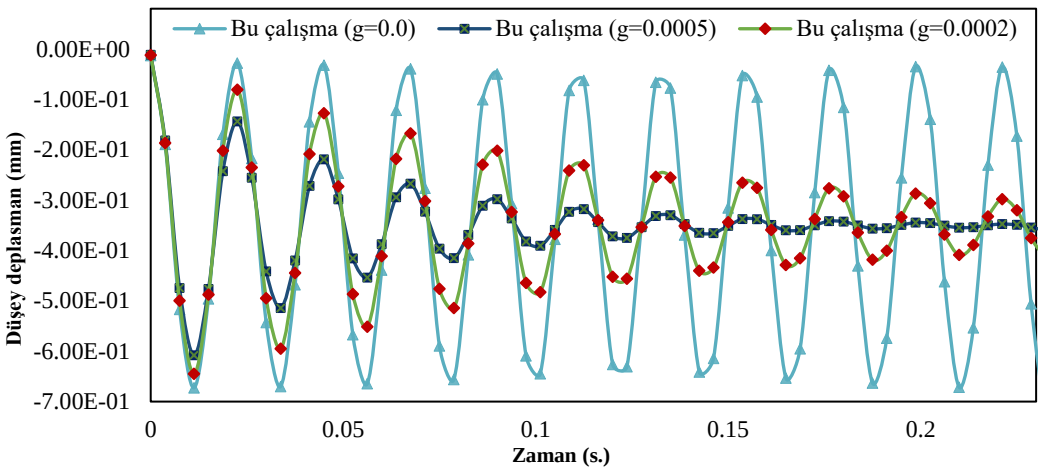
Grafik 98. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=5 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanı Grafik (98)'de gösterilmektedir.



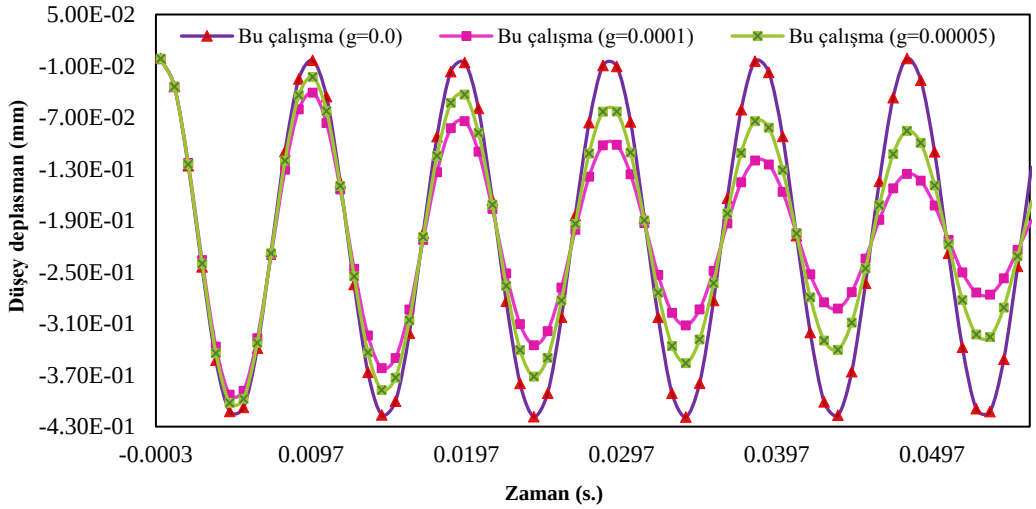
Grafik 99. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

λ_z=10 değeri için A– S mesnetli halka plağın maksimum düşey deplasmanıiçin Grafik (100)'de gösterilmektedir.



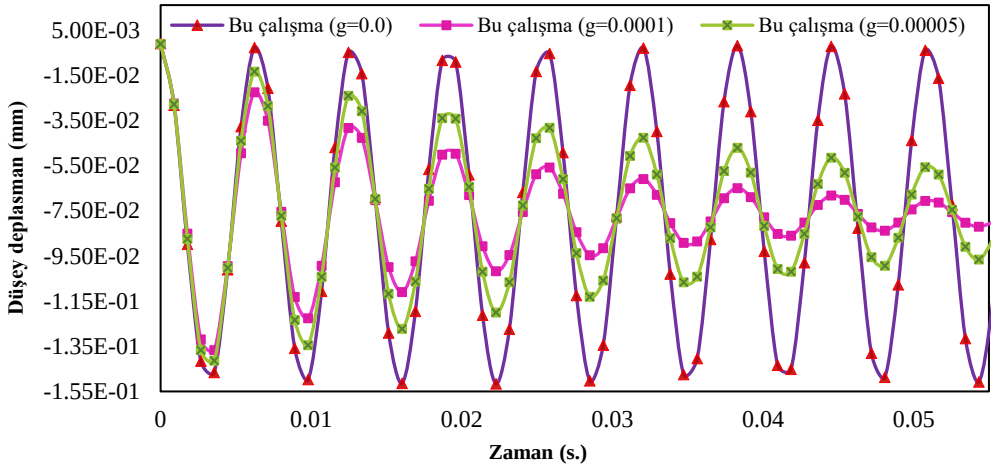
Grafik 100. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=0 için Grafik (101)'de gösterilmektedir.



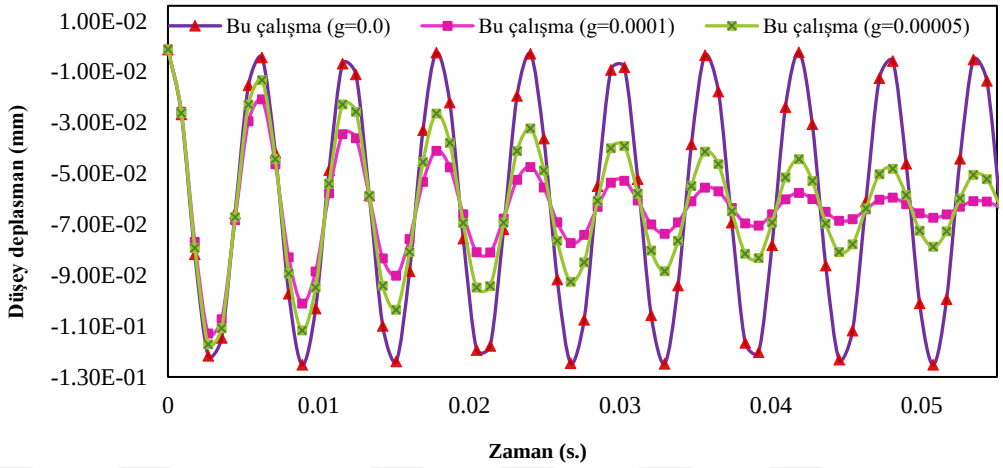
Grafik 101. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=1 için Grafik (102)'de gösterilmektedir.



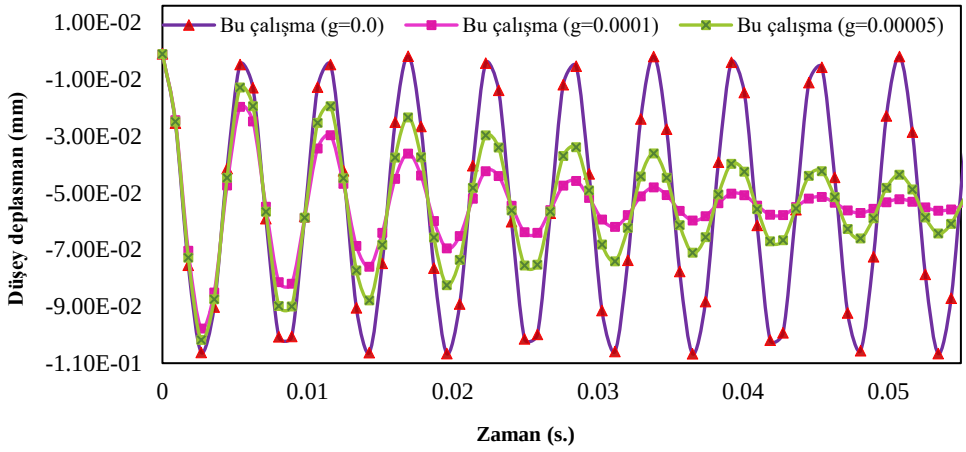
Grafik 102. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=2 için Grafik (103)'te gösterilmektedir.



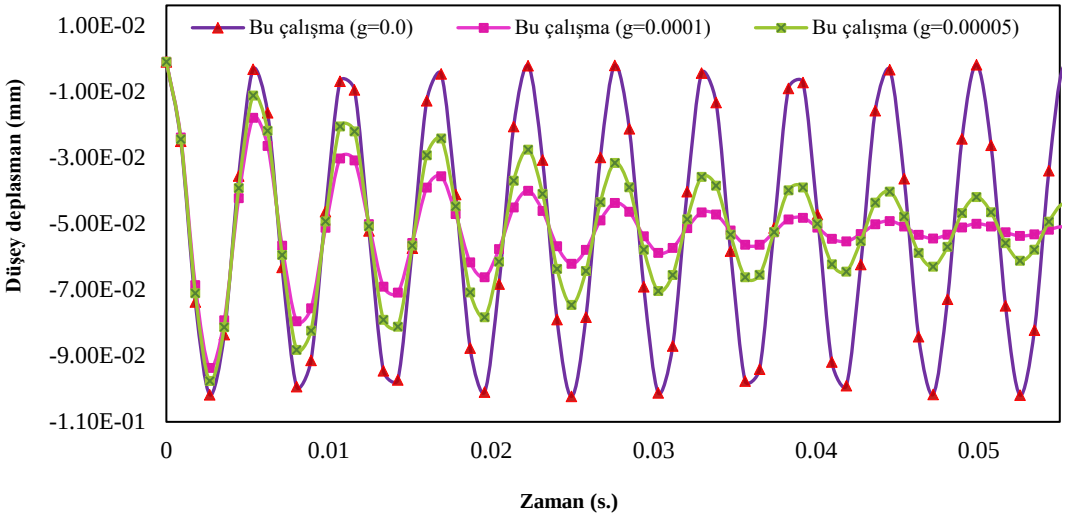
Grafik 103. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=4 için Grafik (104)'te gösterilmektedir.



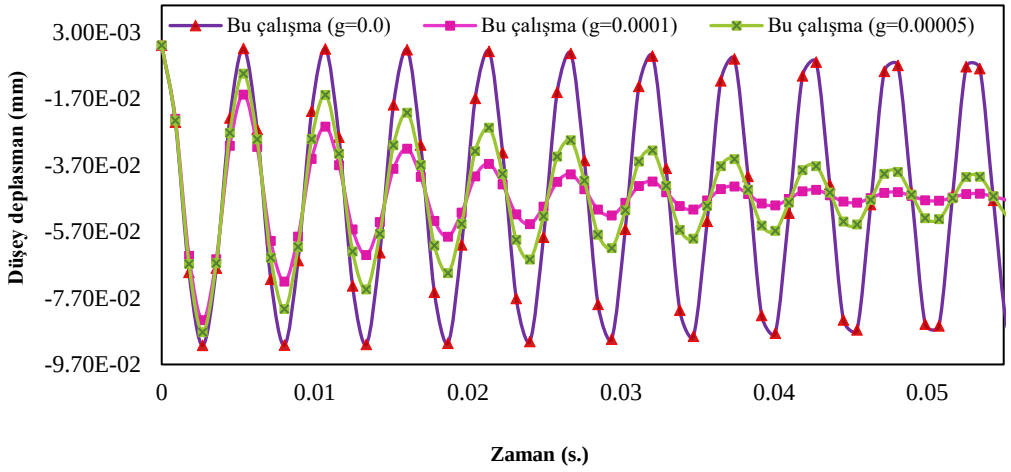
Grafik 104. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (105)'te gösterilmektedir.



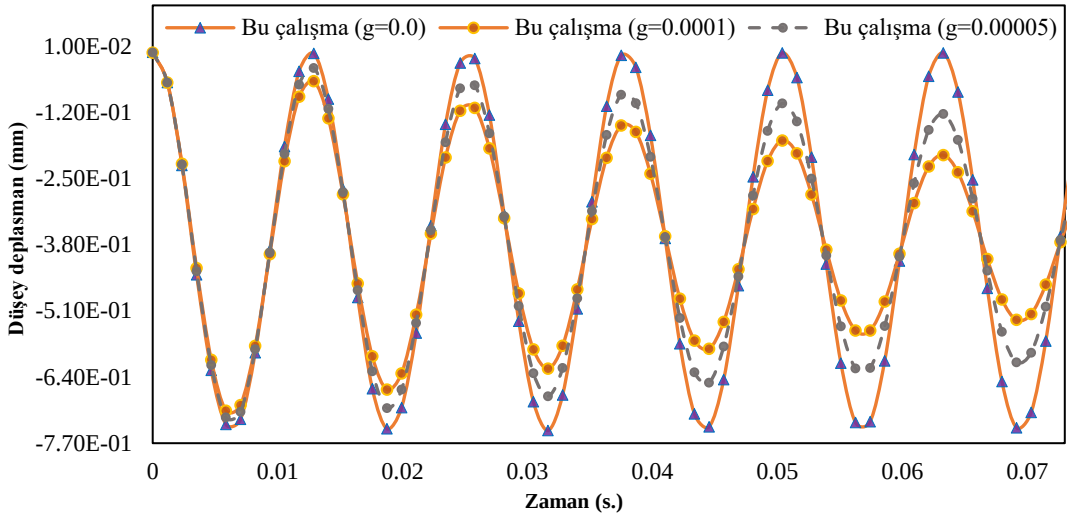
Grafik 105. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A– K mesnetli izotropik halka plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (106)'da gösterilmektedir.



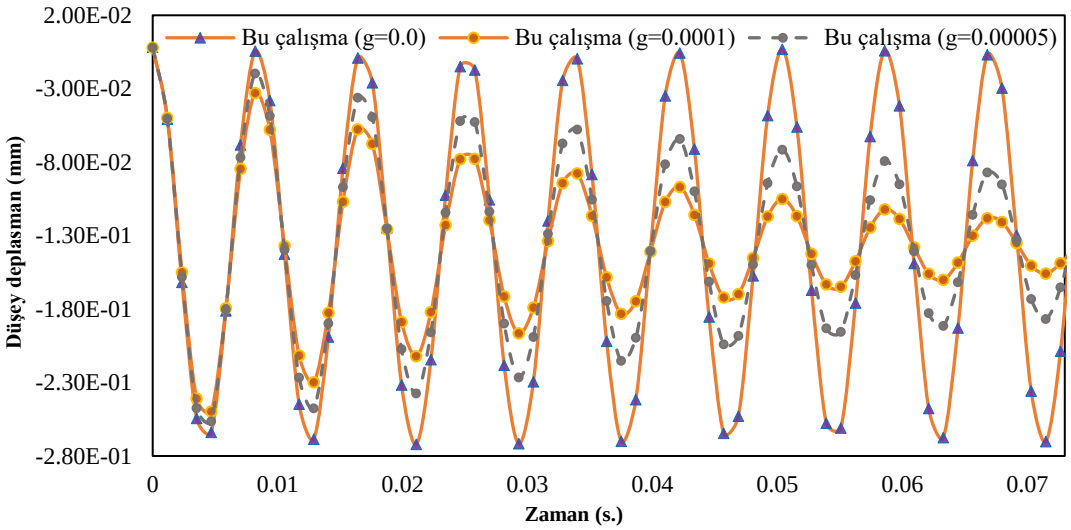
Grafik 106. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=0 için Grafik (107)'de gösterilmektedir.



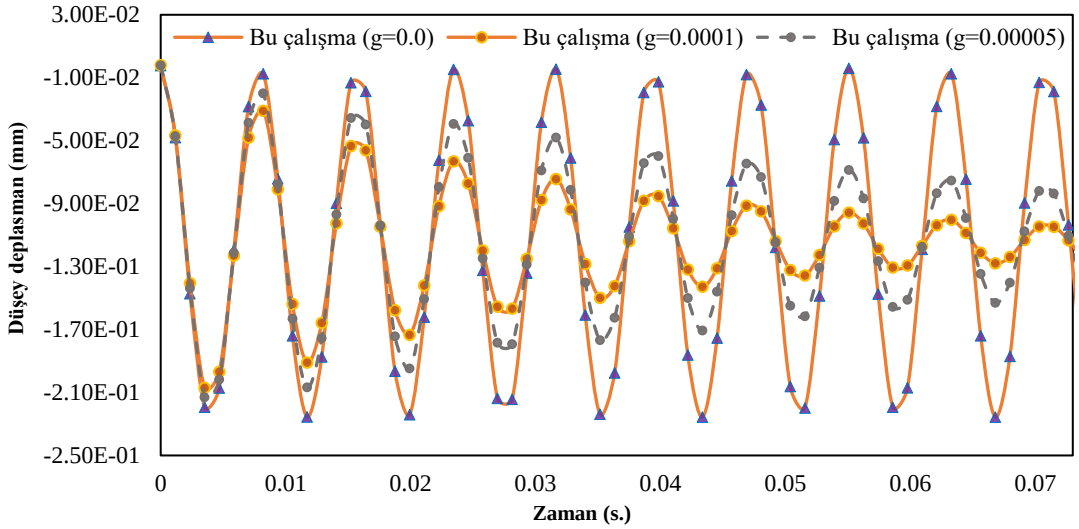
Grafik 107. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=1 için Grafik (108)'de gösterilmektedir.



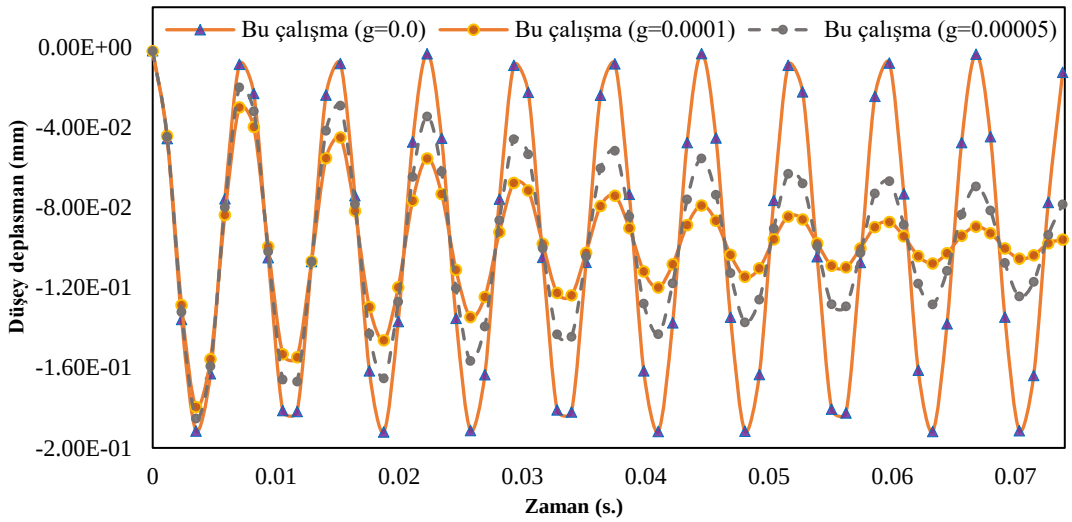
Grafik 108. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=2 için Grafik (109)'da gösterilmektedir.



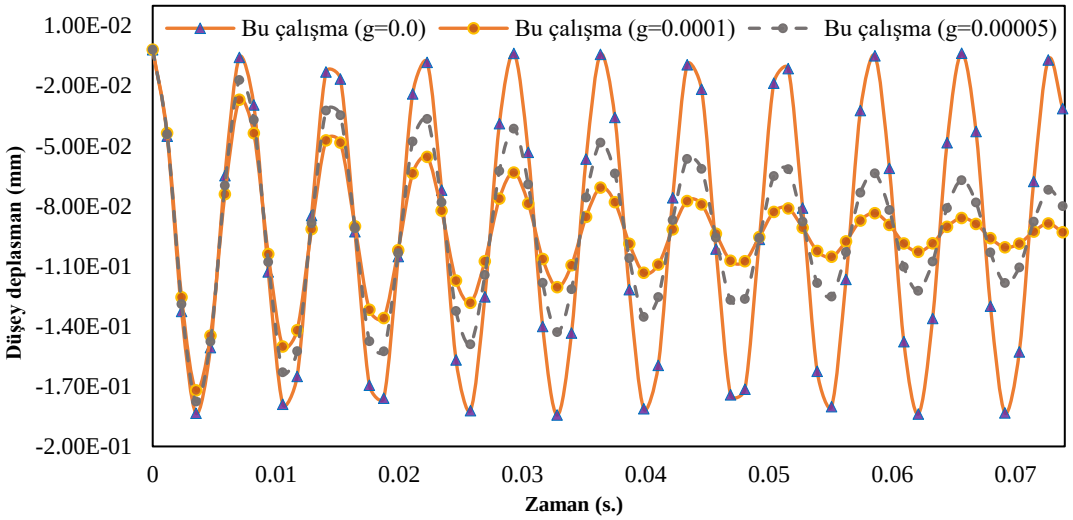
Grafik 109. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=4 için Grafik (110)'da gösterilmektedir.



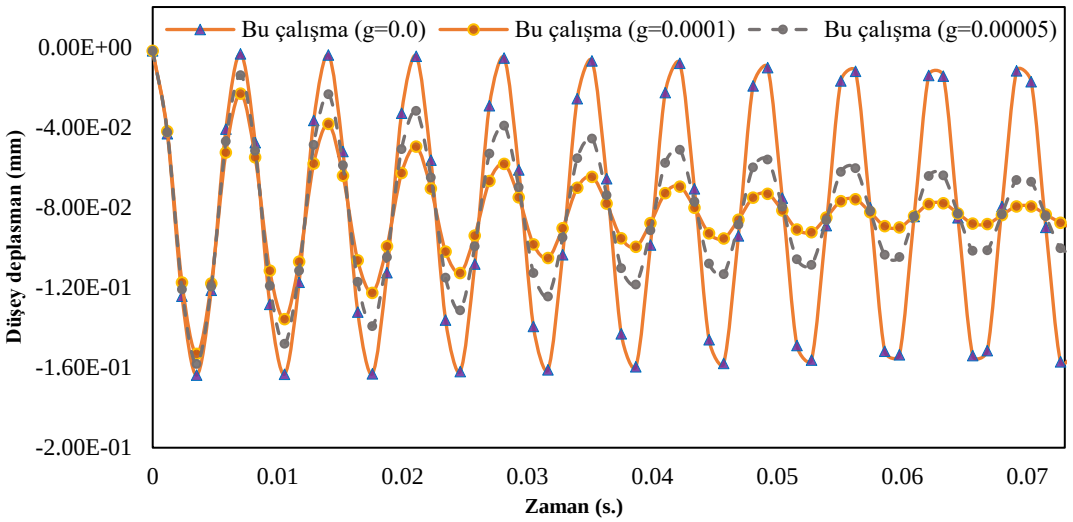
Grafik 110. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li mesnet izotropik halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (111)'de gösterilmektedir.



Grafik 111. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

K-K mesnetli FDM'li izotropik halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (112)'de gösterilmektedir.

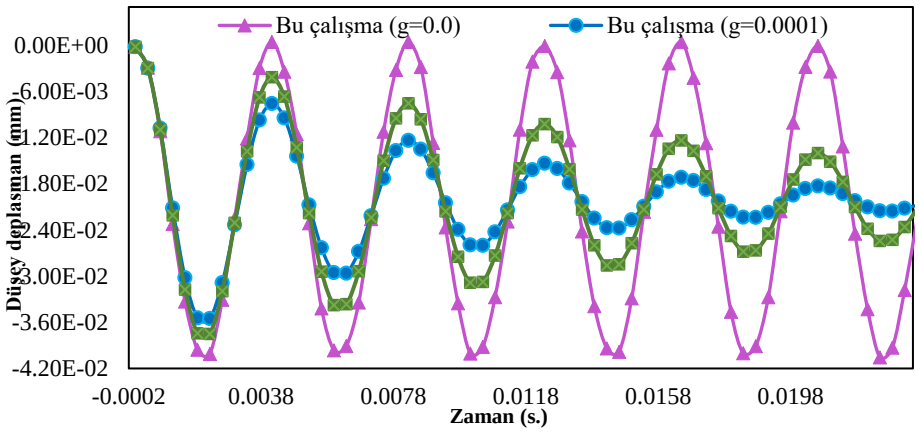


Grafik 112. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Bu bölümde, aynı malzeme özelliklerine sahip halka plağın zorlanmış titreşimini analiz etmek için farklı geometriler kullanılmaktadır. Bu amaçla daha kalın bir plak (h=1 m) kalınlıkta olan halka plağın zorlanmış titreşimini incelemektedir.

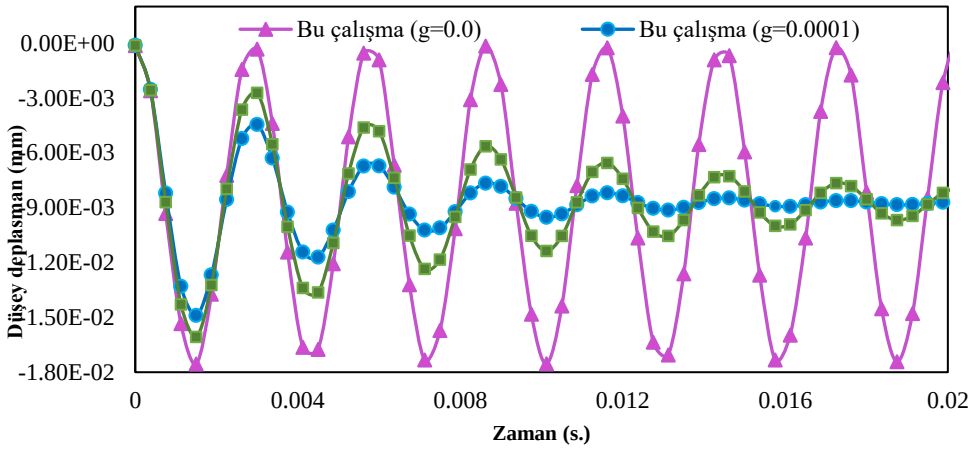
A – A mesnetli kayıcı halka FD plak için analizler yapılmıştır, sonuçlar Grafikler (113- 119)'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durum için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=0) için Grafik (113)'te gösterilmektedir.



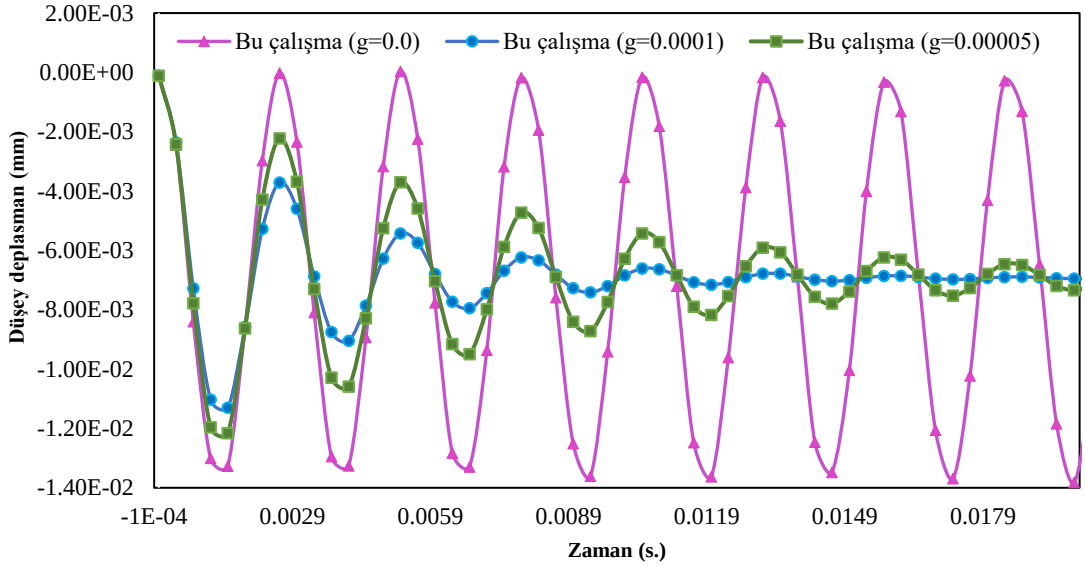
Grafik 113. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=0.5) için Grafik (114)'te gösterilmektedir.



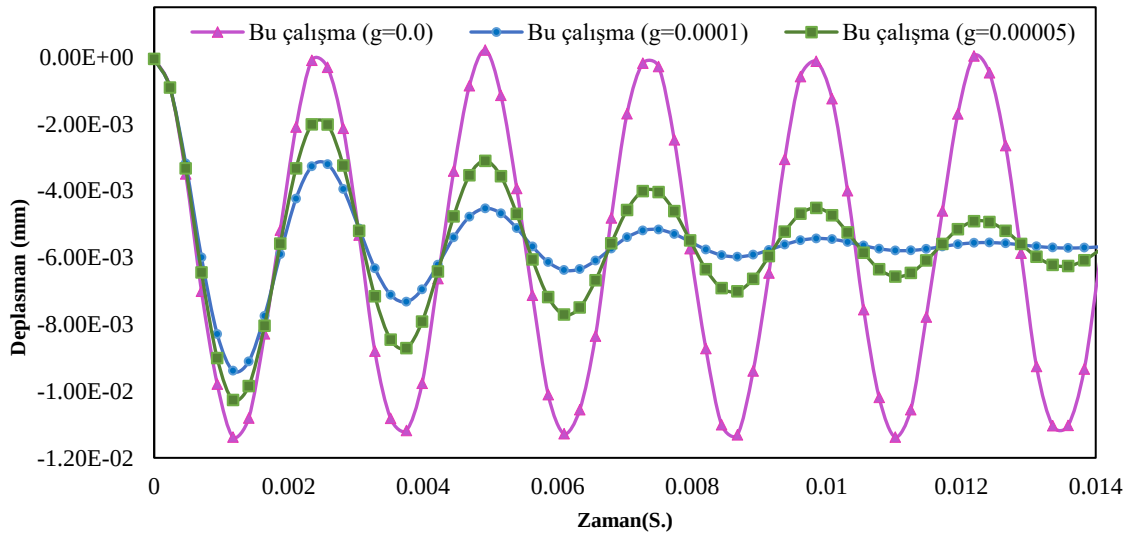
Grafik 114. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=1) için Grafik (115)'te gösterilmektedir.



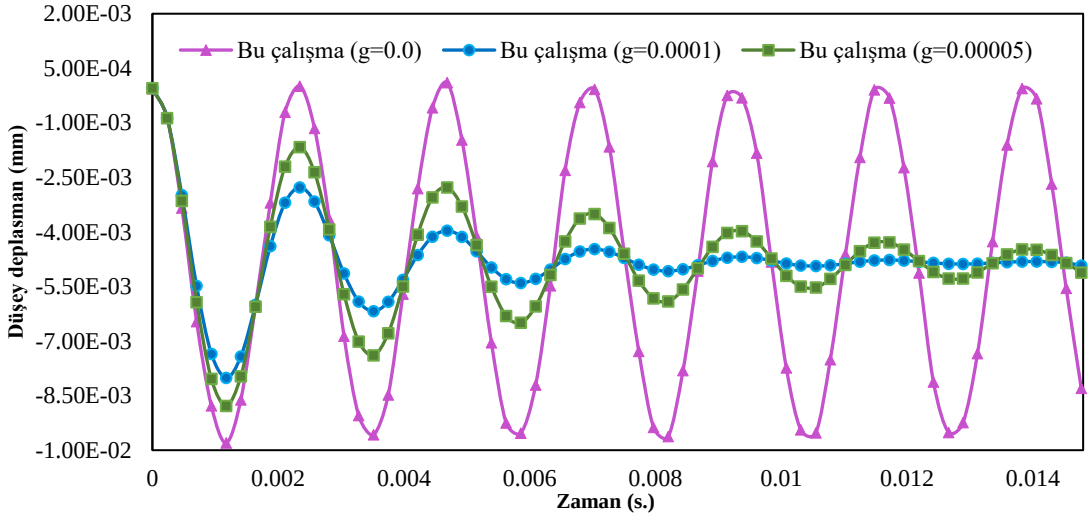
Grafik 115. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=2) için Grafik (116)'te gösterilmektedir.



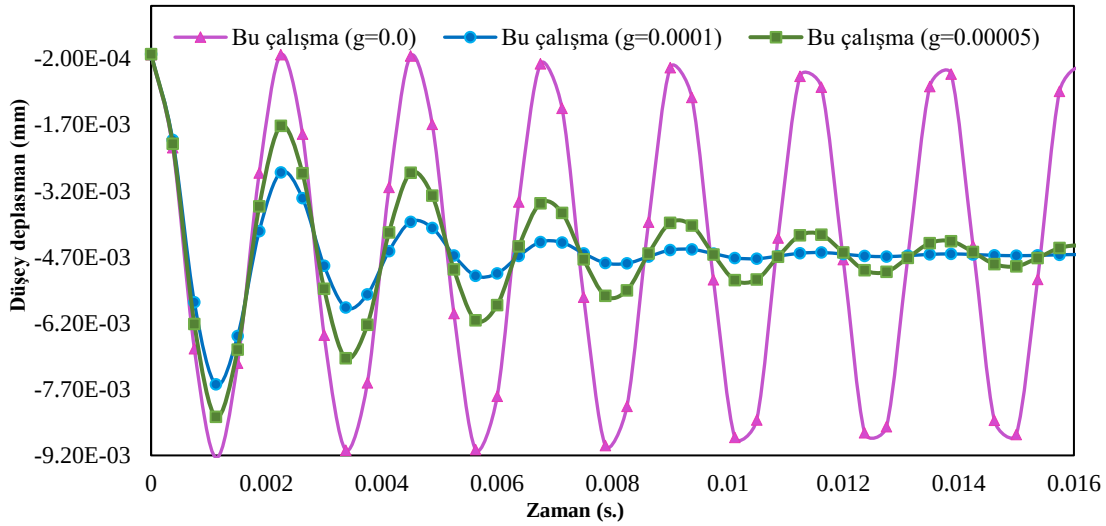
Grafik 116. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=4) için Grafik (117)'de gösterilmektedir.



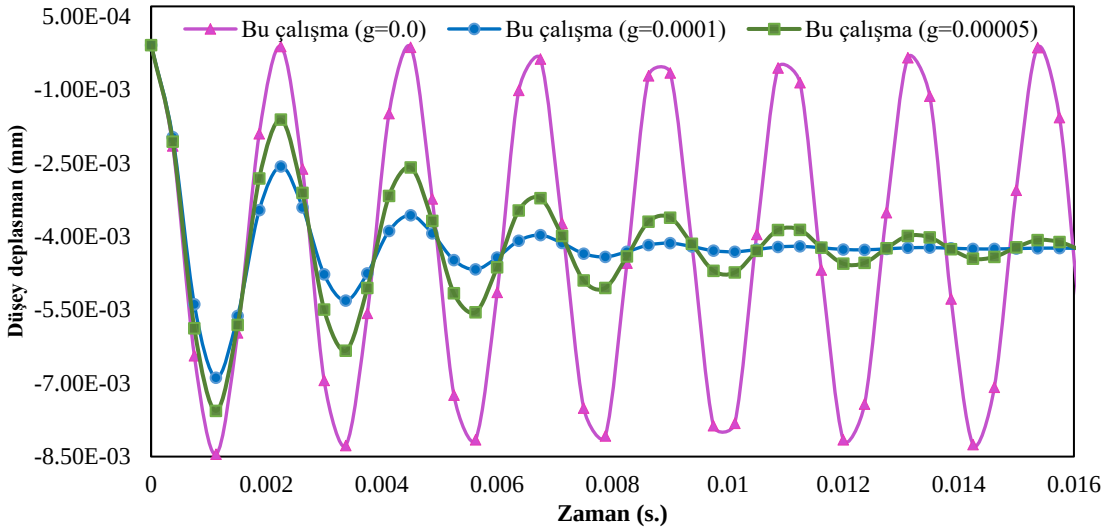
Grafik 117. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=5) için Grafik (118)'te gösterilmektedir.



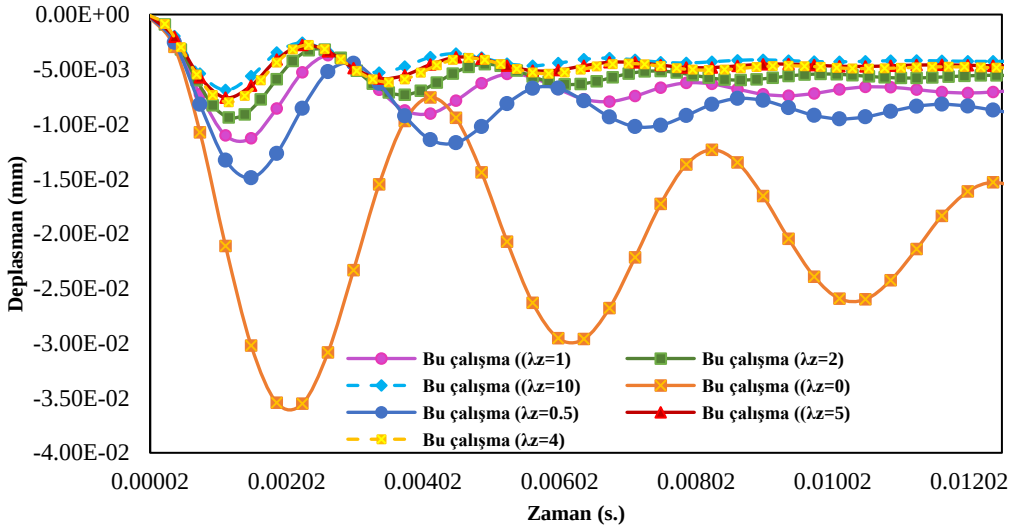
Grafik 118. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri (λ_z=10) için Grafik (119)'da gösterilmektedir.



Grafik 119. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A mesnetli FDM'li (h=1 m) kalınlıkta olan halka plakların viskoelastik durumu için maksimum düşey yer değiştirme değerleri farklı malzeme katsayılarına göre Grafik (120)'de gösterilmektedir. Bu örnekte sönüm oranı (g=0.0001) olarak alınmıştır.

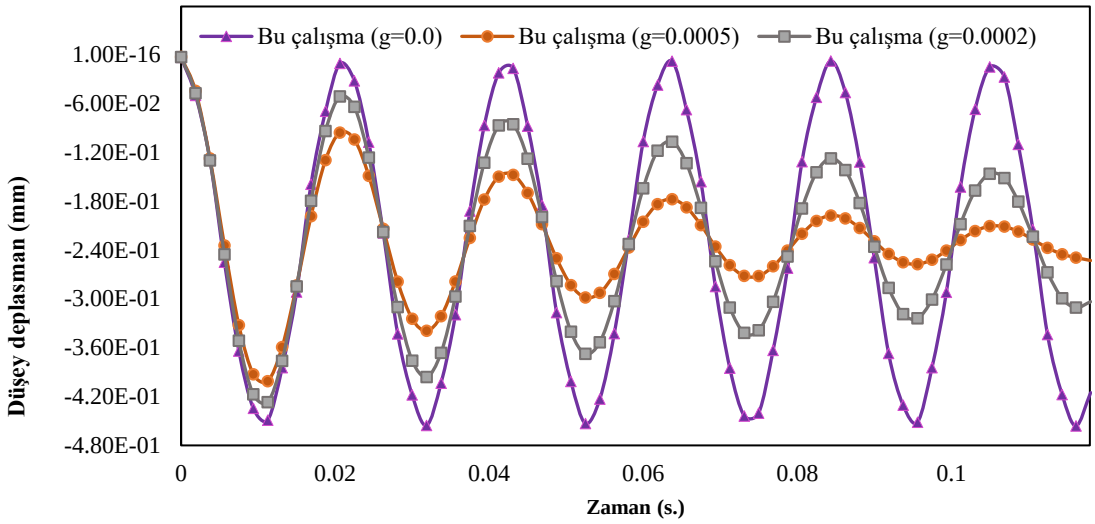


Grafik 120. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki farklı malzeme katsayısı için viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

Ele alınan bu durum için de önceki örneklerde olduğu gibi yorum yapılabilir. Şöyle ki; malzeme değişim katsayısı arttıkça deplasmanlar ve periyotlar küçülmektedir. Viskoelastik durumda ise yüksek malzeme değişim katsayılı malzemelerde sönüm oranının etkisi daha büyüktür.

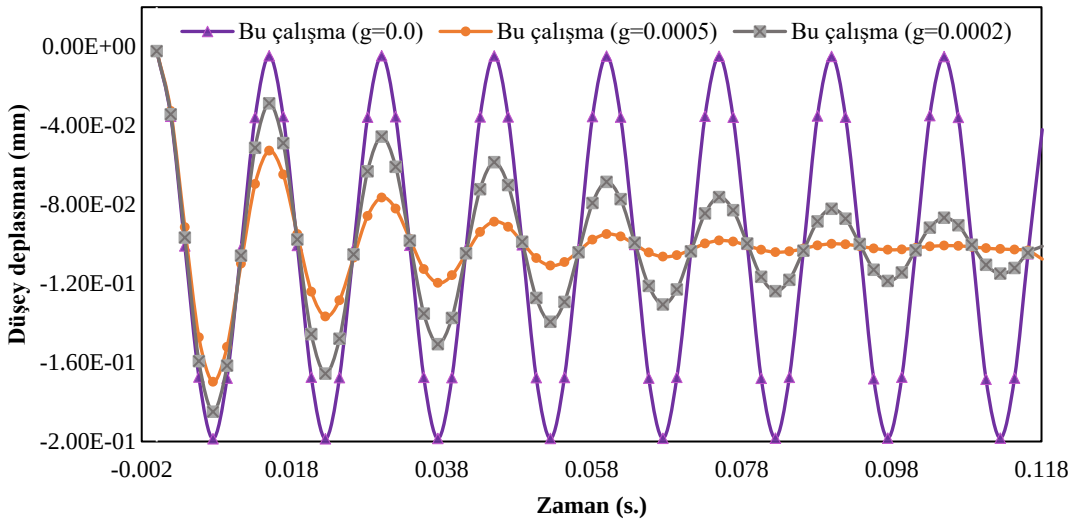
A– S için elastik ve viksoelastik dinamik analiz gerçekleştirilmiştir, sonuçlar Grafik (120-126)'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=0 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (121)'de çizilmiştir.



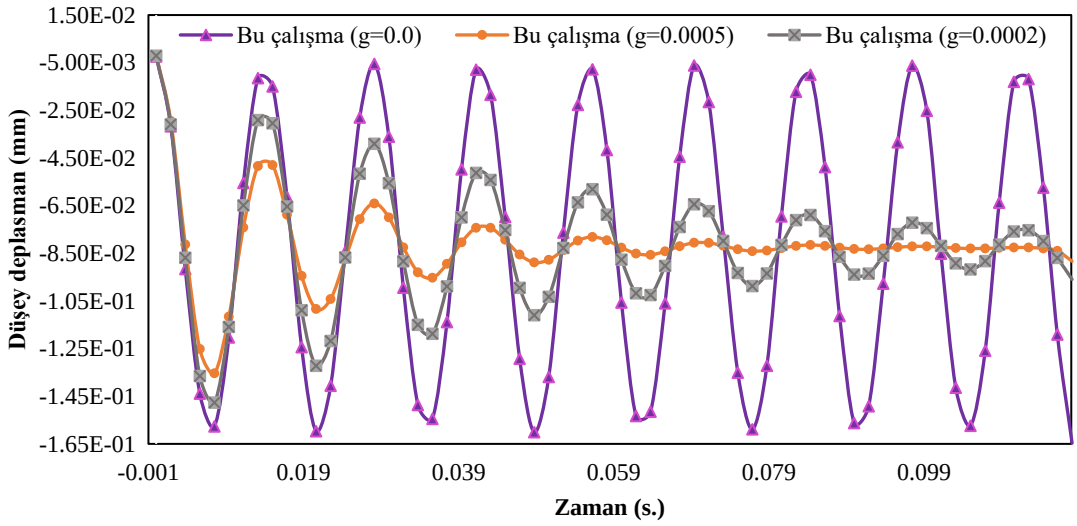
Grafik 121. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=0.5 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (122)'de çizilmiştir.



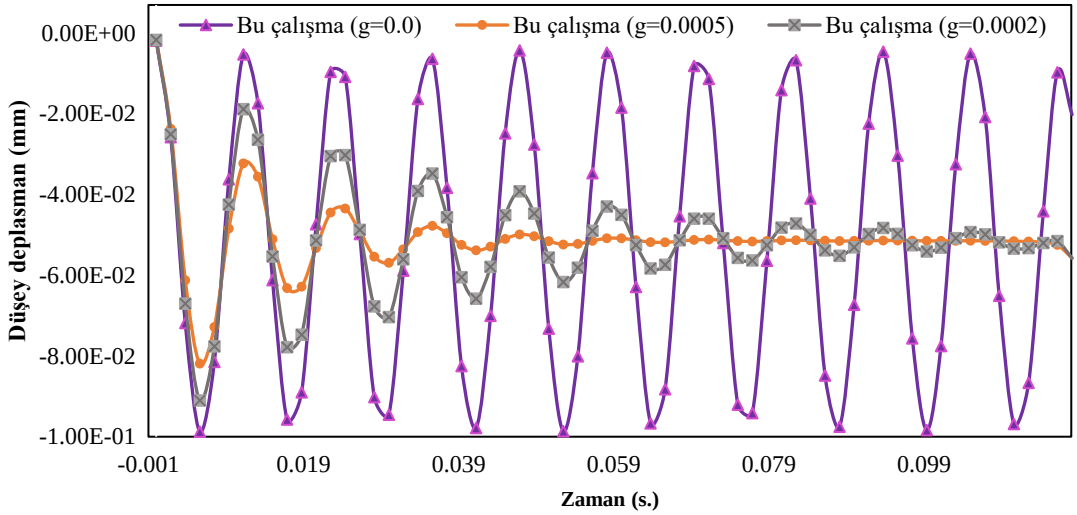
Grafik 122. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=1 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (123)'te çizilmiştir.



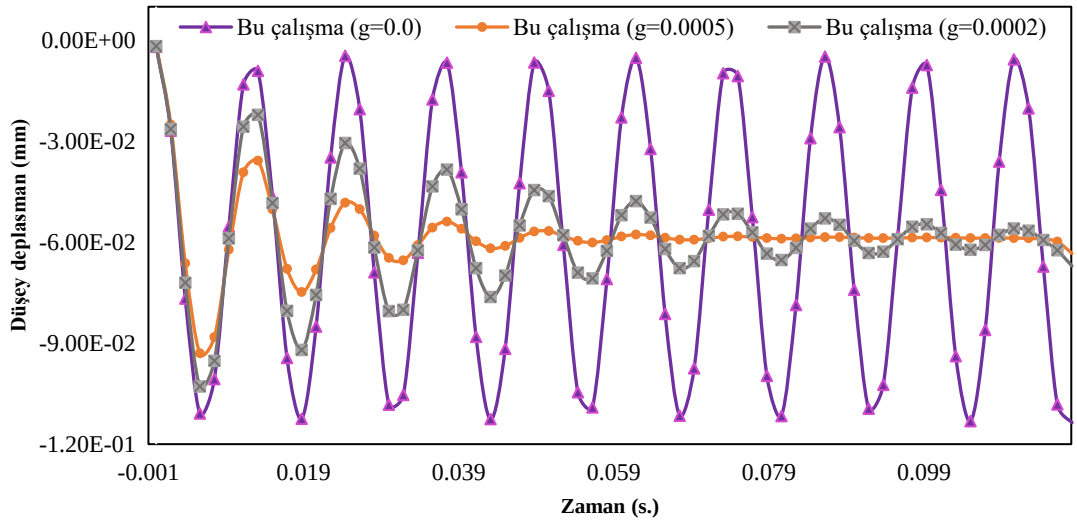
Grafik 123. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=2 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (124)'te çizilmiştir.



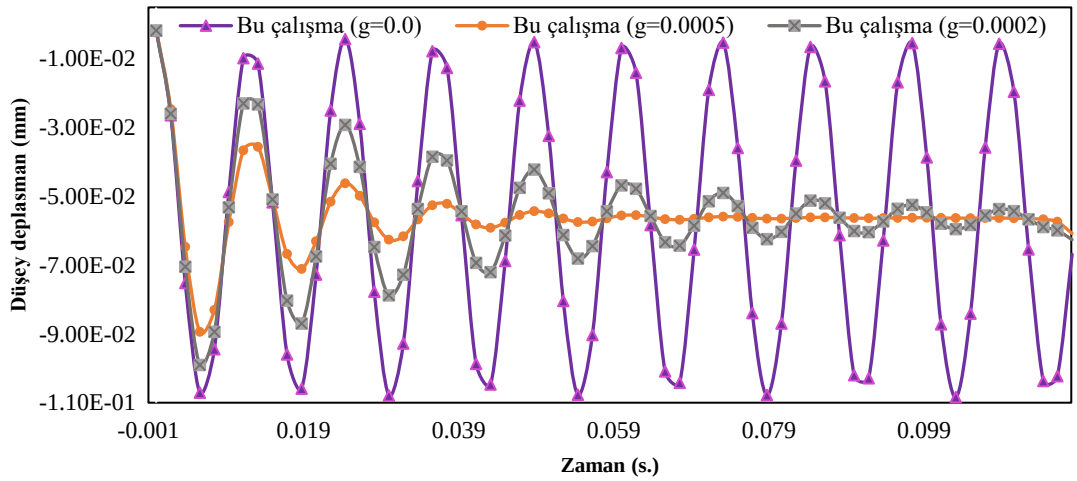
Grafik 124. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=4 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (125)'te çizilmiştir.



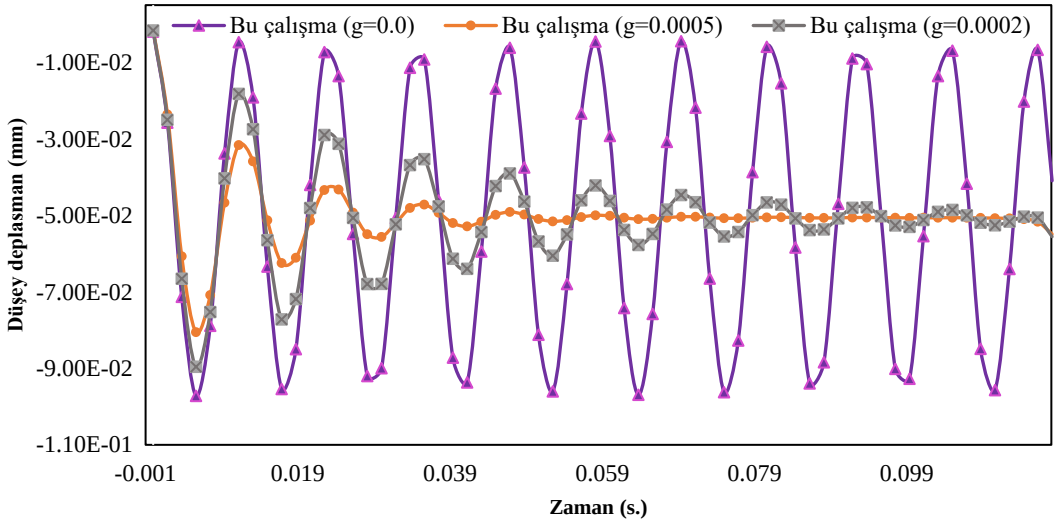
Grafik 125. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=5 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (126)'da çizilmiştir.



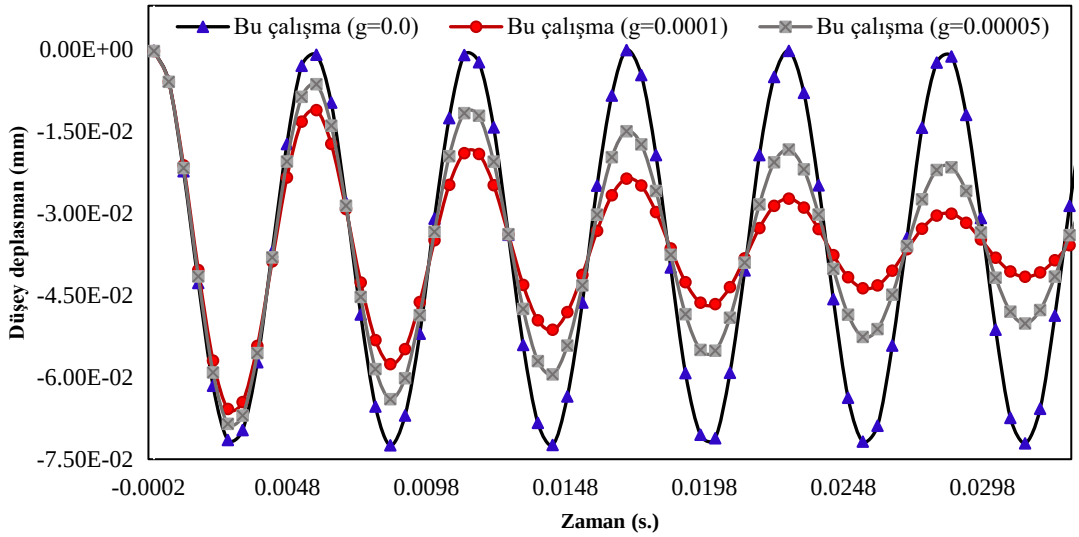
Grafik 126. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A-S, FD malzemeli halka plakların zorlanmış titreşim analizi yapılmış olup λ_z=10 malzeme değişim katsayısı için maksimum düşey deplasman değerleri Grafik (127)'de çizilmiştir.

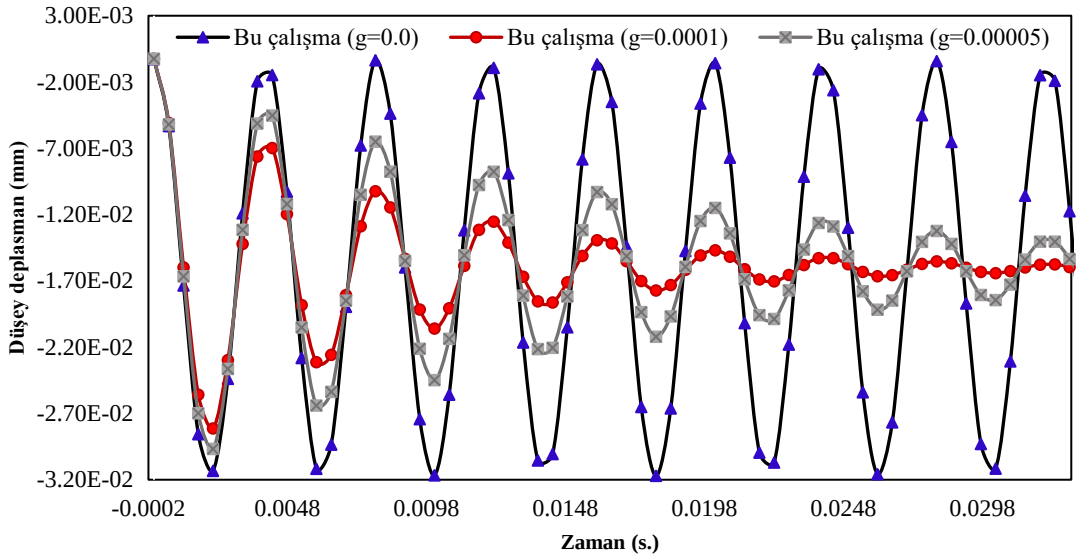


Grafik 127. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

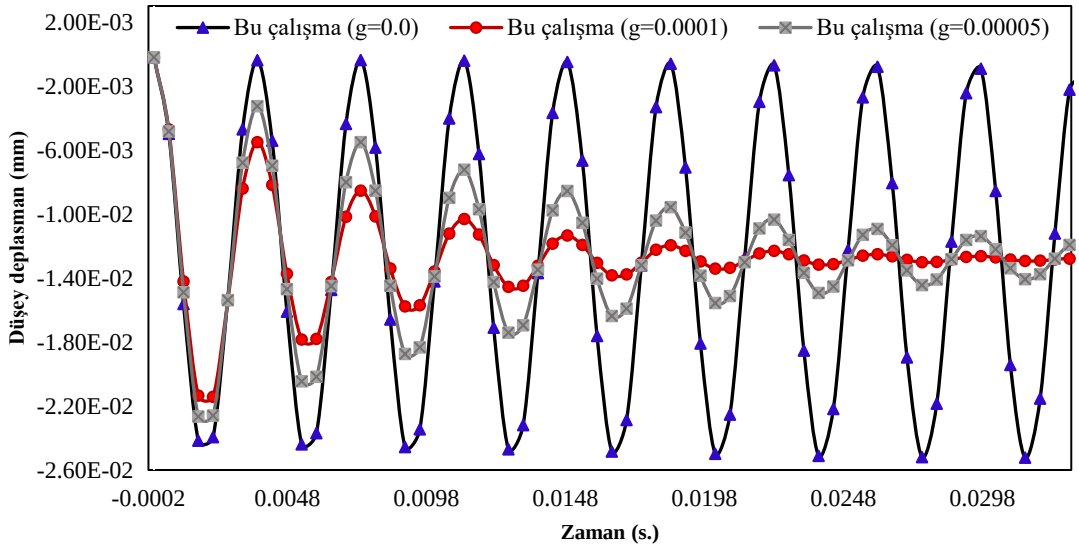
A– K için analiz gerçekleştirilmiştir, sonuçlar şekiller (128-134)'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.



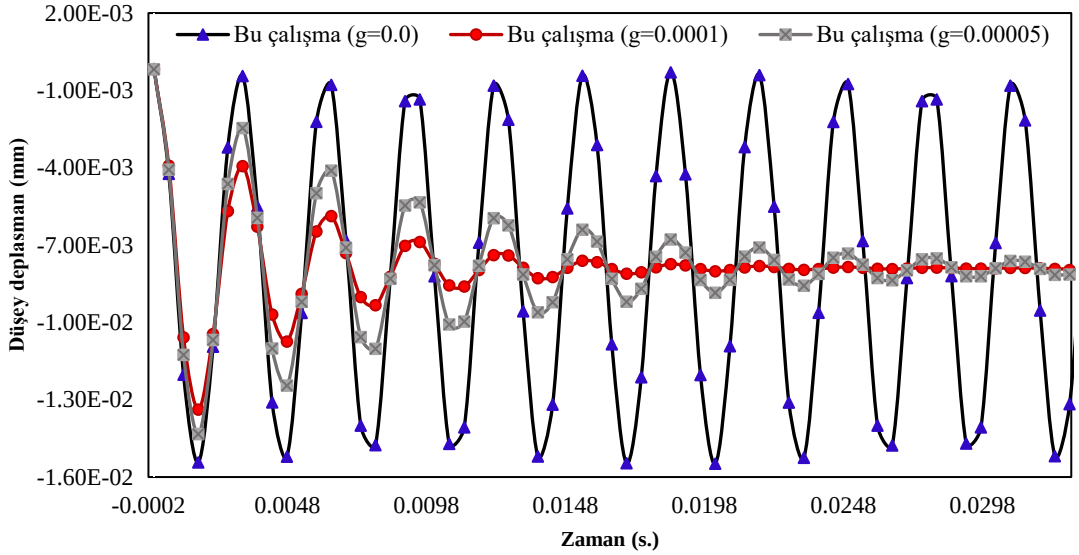
Grafik 128. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=0)



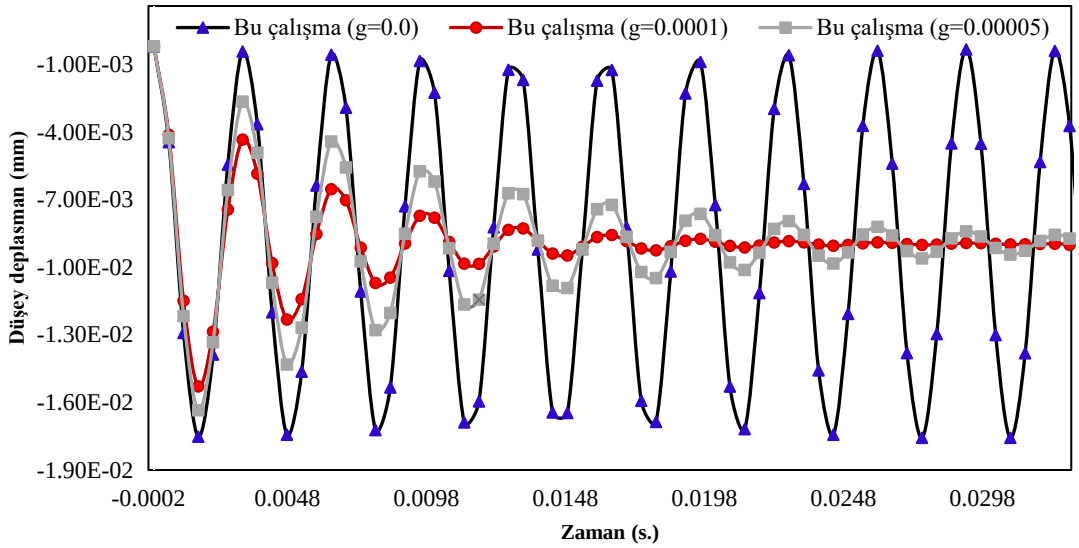
Grafik 129. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=0.5)



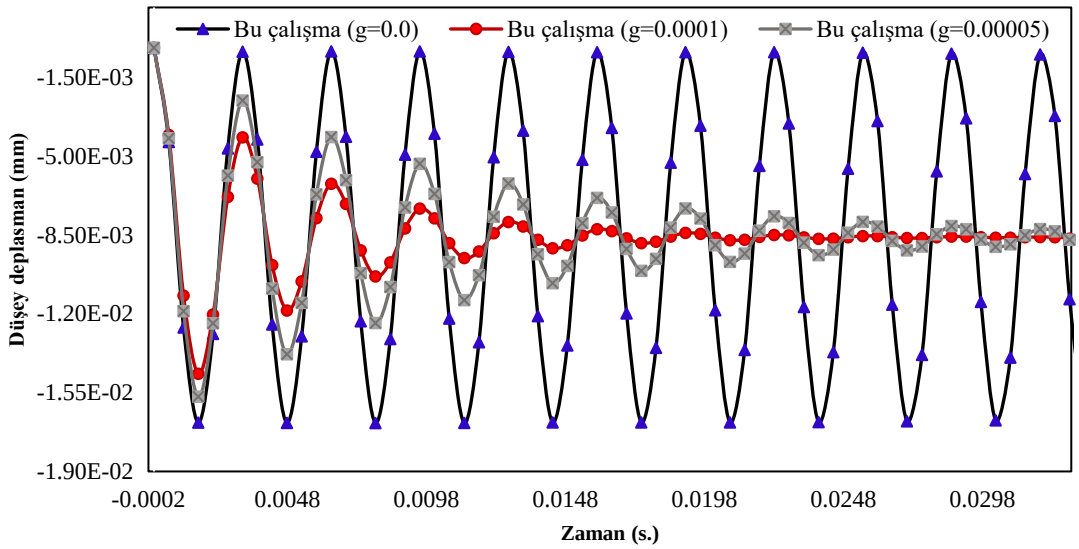
Grafik 130. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=1)



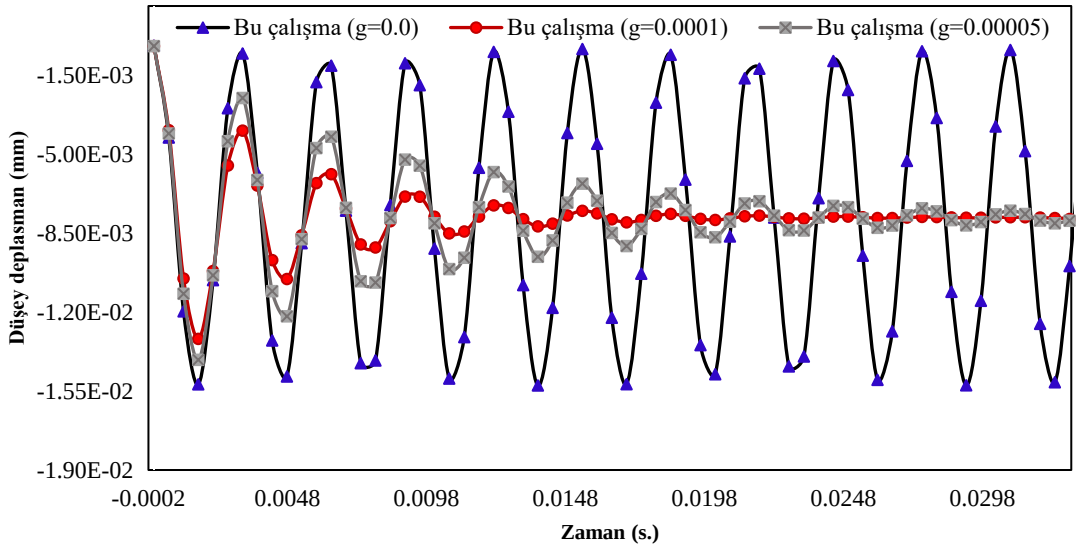
Grafik 131. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=2)



Grafik 132. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=2)

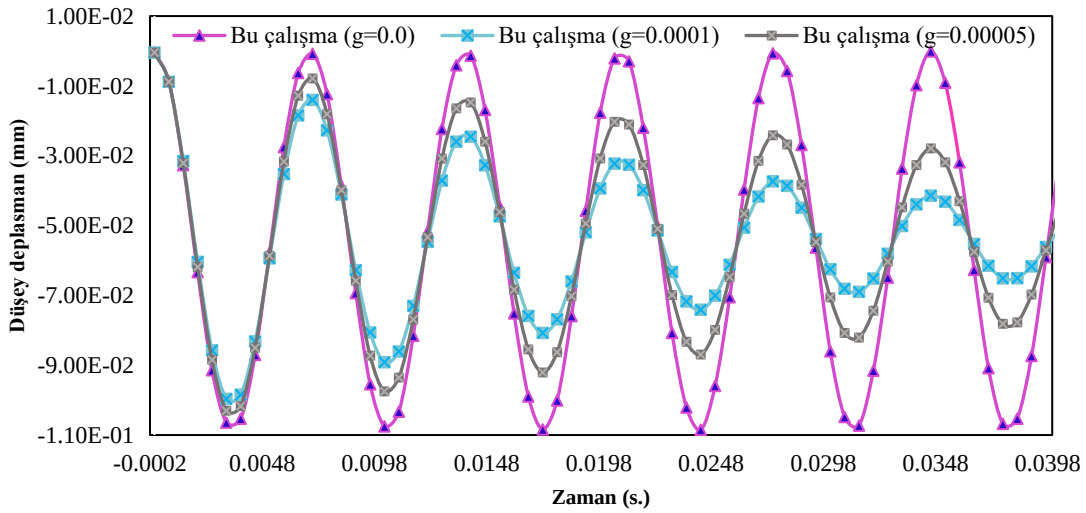


Grafik 133. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=5)



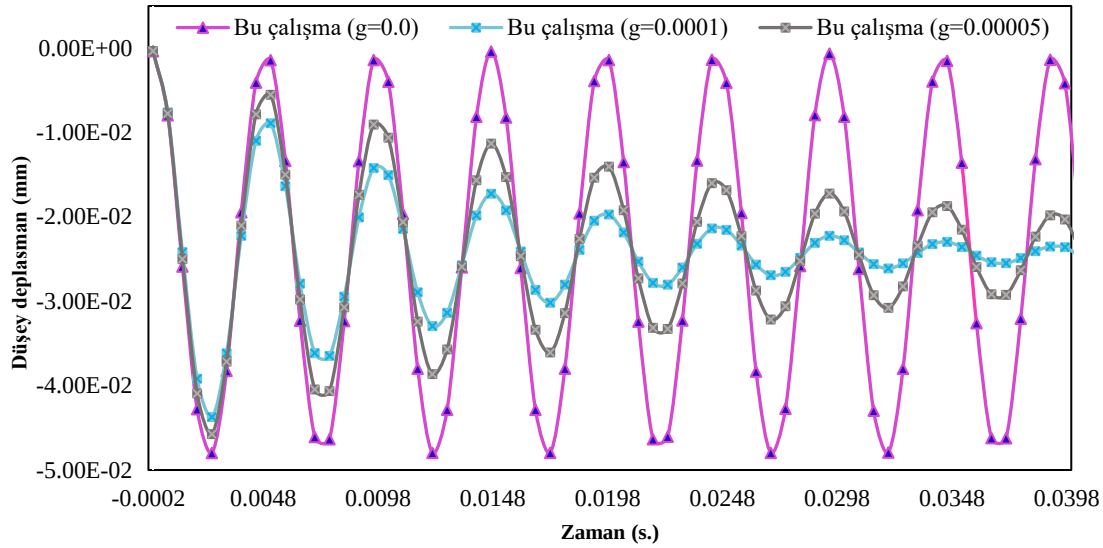
Grafik 134. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=10)

K– K için analiz gerçekleştirilmiştir, sonuçlar şekiller (135-141)'de gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır.

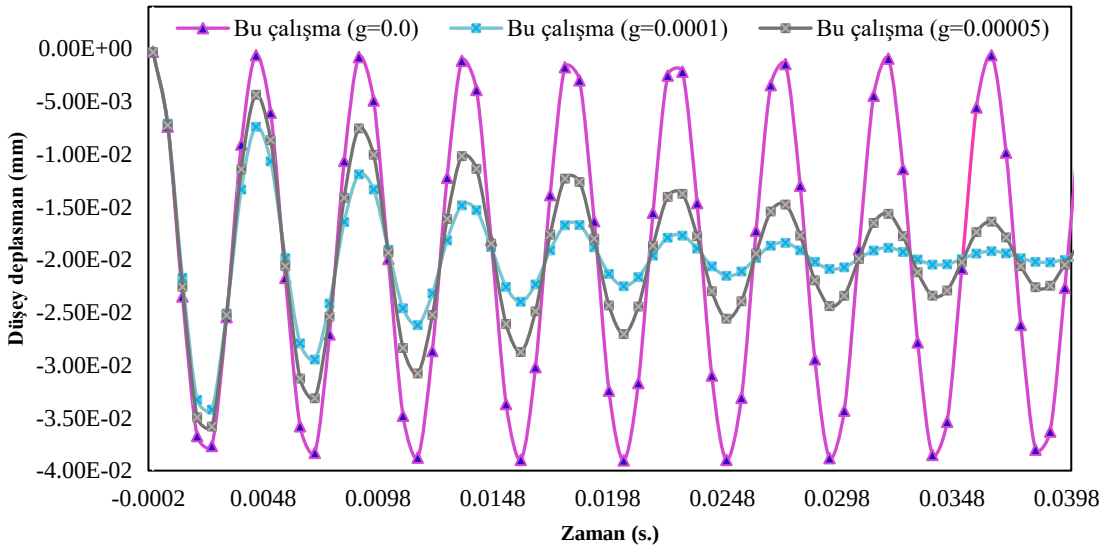


Grafik 135. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=0)

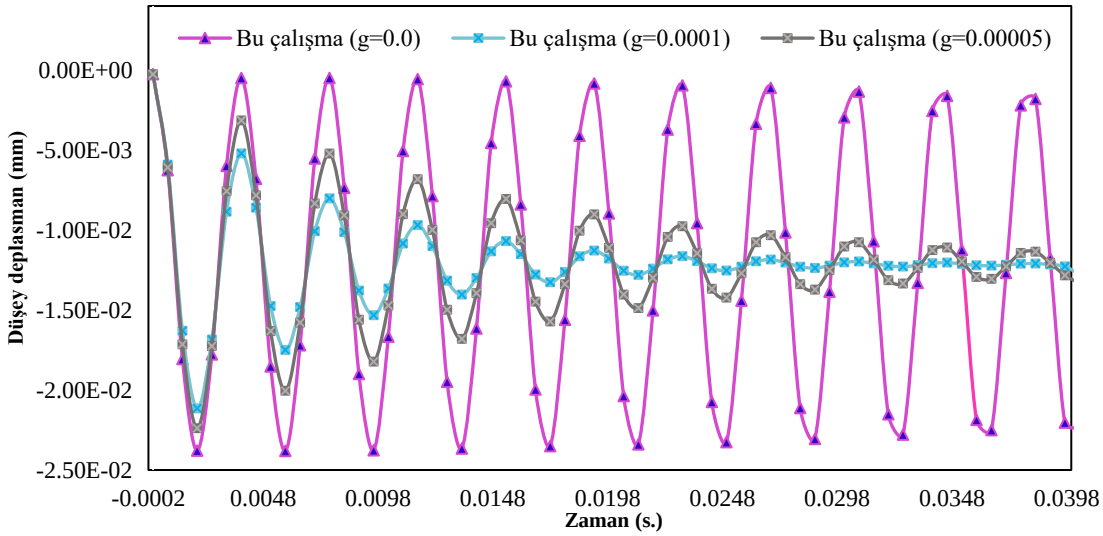
Bir sonraki uygulmada ise kayıcı mesnet - kayıcı mesnet (A– K) FD halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=0.5 için Grafik (136)'da gösterilmektedir.



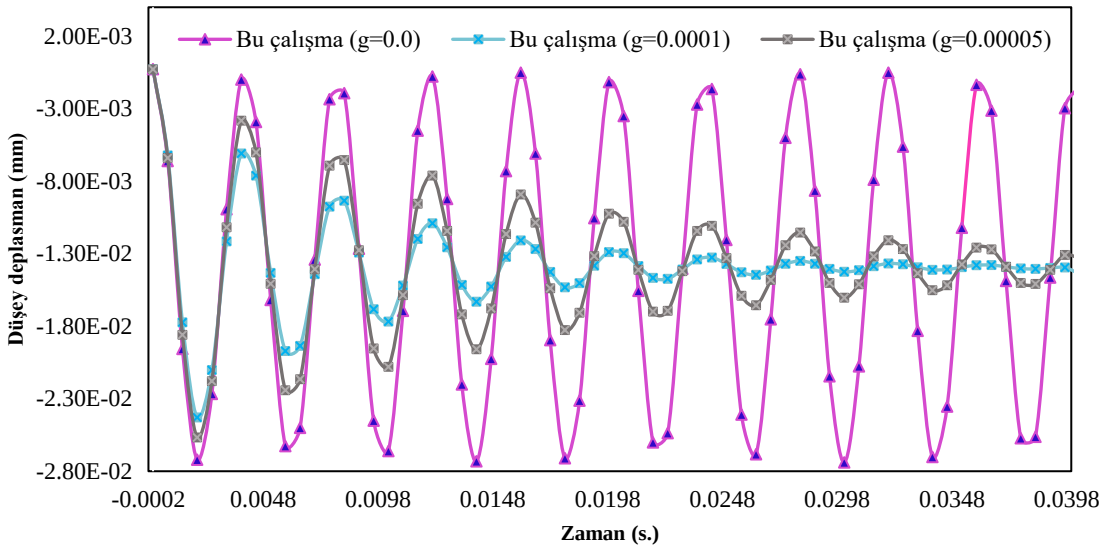
Grafik 136. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=0.5)



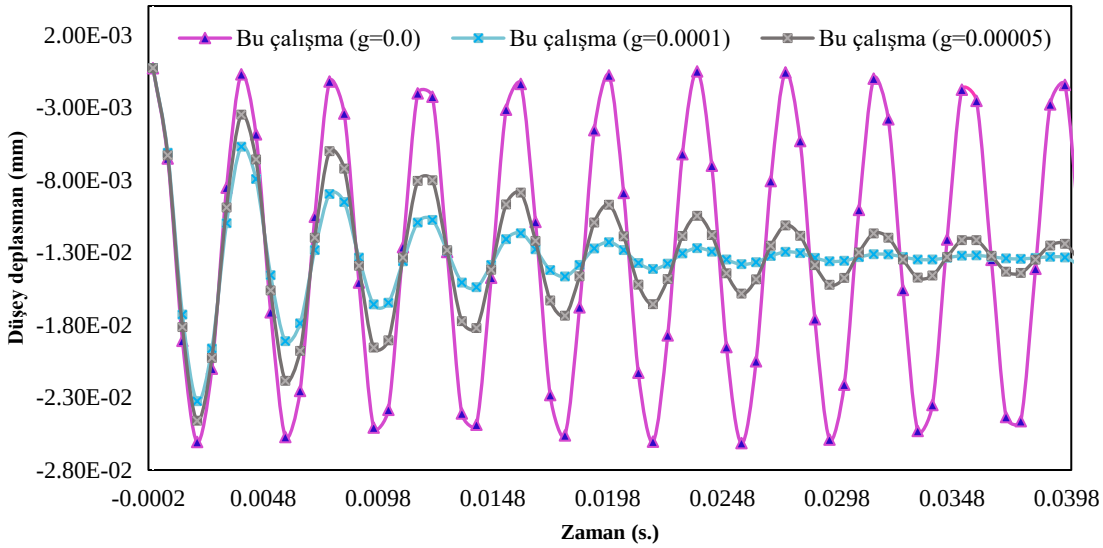
Grafik 137. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=1)



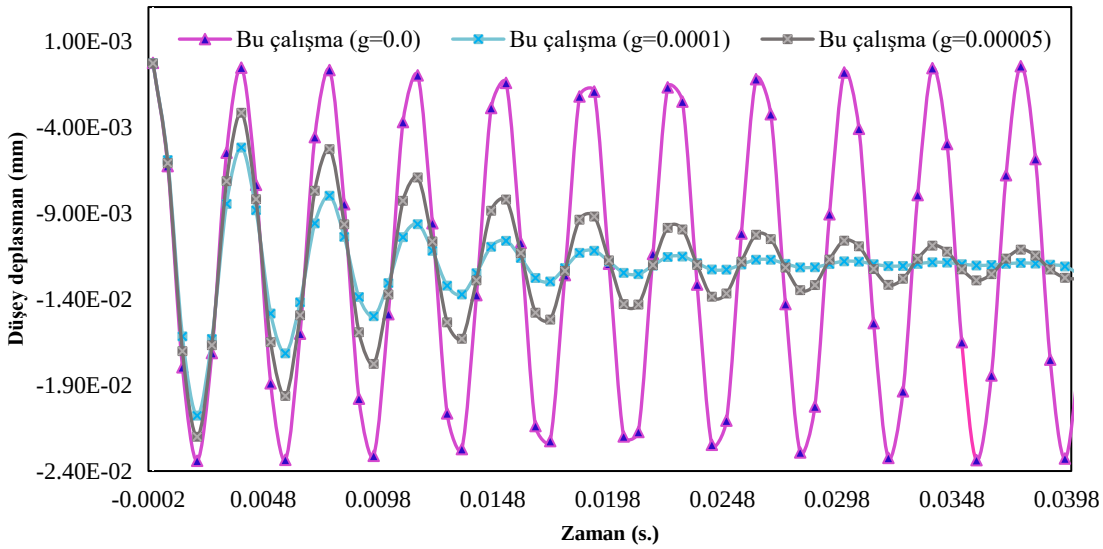
Grafik 138. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=2)



Grafik 139. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=4)



Grafik 140. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=5)



Grafik 141. Adım tipi yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi (λ_z=10)

Adım tipi yükleme durumu için yapılan analizlerler incelendiğinde (Grafik 68 – 141) şu önemli sonuçlar ortaya çıkmıştır.

- Tüm mesnet durumları için malzeme değişim katsayısı artıkça düşey yer değiştirme salınım genlikleri azalmaktadır.

- Benzer şekilde ele alınan tüm sınır koşullarında malzeme değişim katsayısının artmasıyla titreşim periyotlarında da azalma gözlemlenmiştir.
- İzotropik homojen malzeme durumunda yer değiştirme değerleri ve salınım periyotları maksimum değerleri almaktadır.
- Tüm sınır koşulları ve malzeme değişim katsayıları için sönüm oranı artıkça salınım periyotların genlikleri statik değerlere yaklaşmaktadır.
- *h*/*r* oranı artıkça yer değiştirme salınım genliklerinin azaldığın ve periyotların da azaldığı gözlemlenmiştir.
- Sınır koşulları da maksimum yer değiştirme genliklerine etki etkmektedir. Tutulan serbestlik derecesi sayısı artıkça yer değiştirme salınınm değerli azalmakta ve periyotlar da düşmektedir.

3.4.3. İmpulsif dik üçgen yük fonksiyonu için dinamik analizlerin yapılması

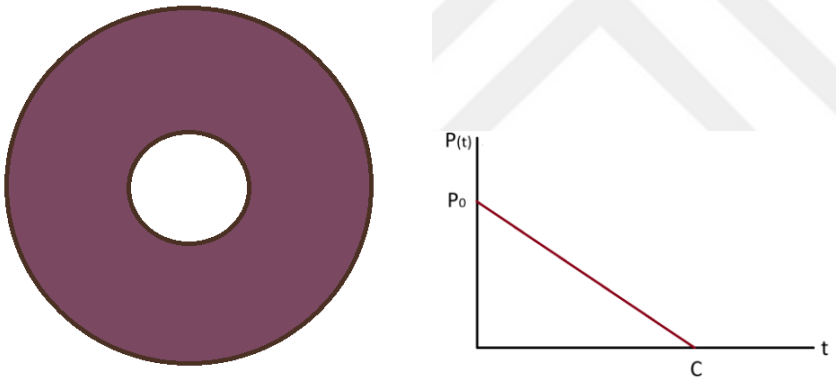
Dinamik analizde sistemler üzerine uygulanan kuvvetlerin çeşitli yönlerdeki parçalarını belirlemek çok önemlidir. Eğik kuvvetler, dik üçgenler tarafından yatay ve dikey bileşenlere ayrılır. Bu, yapı üzerindeki kuvvetlerin etkilerini daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Impulsif dik üçgen yükler, mühendislik analizinde ani ve geçici kuvvetlerin etkilerini anlamak için önemli bir araçtır ve çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Impulsif dik üçgen yük, mühendislik ve yapısal analizde sıklıkla karşılaşılan bir yük türüdür. Yapısal dinamik analizler, yapıların anlık ve geçici yükler tarafından nasıl etkilendiğini incelemek için bu tip yük kullanılmaktadır. Özellikle patlama, deprem veya darbe gibi olayların modellenmesinde önemlidir. Bununla birlikte makine mühendisliği analizlerinde sıkılıkla kullanılmaktadır. Ani kuvvetlere ve darbelere karşı dayanıklılığını test etmek için makine elemanlarına impulsif yükler uygulanır.

İmpulsif dik üçgen yükler, geçici ve ani kuvvetlerin etkilerini gerçek dünya koşullarında modellemek için oldukça faydalıdır. Bu tür yükler, sistemlerin veya yapıların bu tür olaylara karşı nasıl davranacağını anlamak için çok önemli bir katkı sağlamaktadır.

İmpulsif yüklerin analizi, genellikle daha karmaşık matematiksel ve bilgisayarlı analiz teknikleri gerektirir. Zamanla değişen bu tür yüklerin etkilerini doğru bir şekilde modellemek için doğru veri ve dikkatli analiz gerekmektedir.
Bu yük tipi, tipik olarak kısa bir sürede uygulanan ve daha sonra hızla sıfıra düşen bir kuvvettir. Zamana Bağlı Değişimi, yük belirli bir süre boyunca artar ve sonunda sıfıra düşmektedir. Grafikte bu, dik bir üçgen olarak gösterilmektedir. Kısa süreli uygulamada ise, impulsif yükler tipik olarak çok kısa bir sürede uygulanır. Bu, ani bir kuvvet veya bir darbe gibi düşünülebilir.

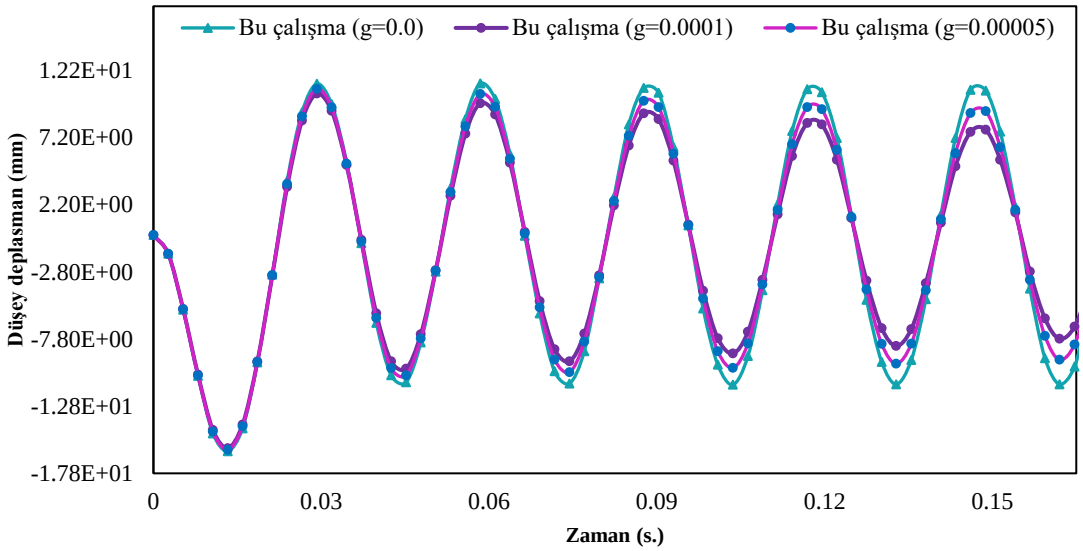
Tezin bu kısmında, impulsif dik üçgen yükün halka plağın üzerinde etkisi araştırılmıştır. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek için FORTRAN dilinde bir kod yazılmıştır. Farklı malzeme katsayısı için, sınır koşulları ankastre - ankastre (A-A) olan halka bir plak ele alınmıştır. Şekil (11)'de halka geometrisi ve uygulanan yük açıklanmaktadır. Verilen yükün Laplace dönüşümü Denklem (91)'de verilmektedir. P_0 değeri ise 100 kN/m^2 olarak alınmıştır.



a) Halka plağın geometresi b) İmpulsif dik üçgen yük

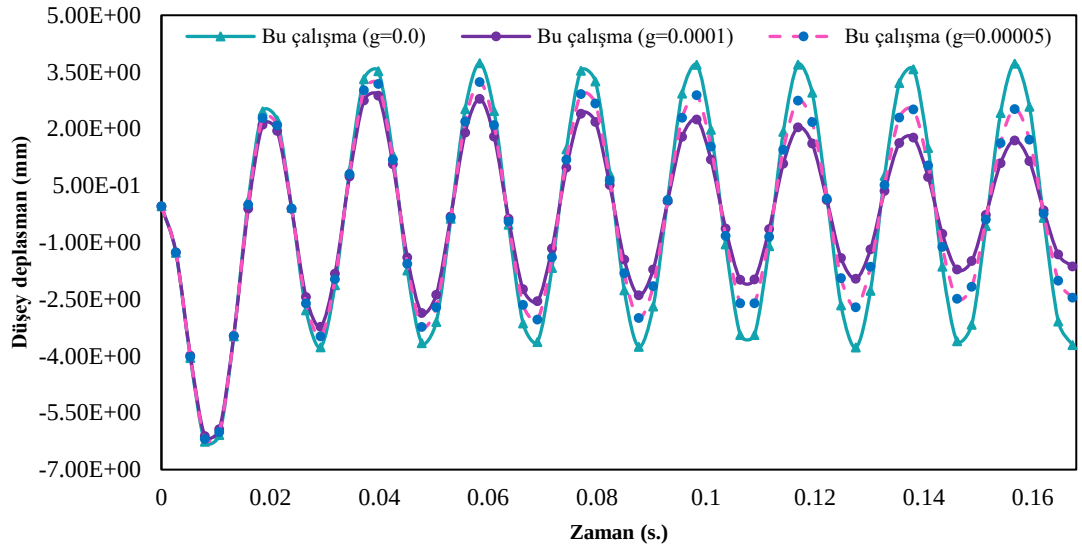
Şekil 11. (2D)- Halka plağın geometrisi ve impulsif dik üçgen yük

A – A mesnetli , (h=0.1m) FDM halka plak için dinamik anlaiz yapılmış olup sonuçlar Grafik (142-147)'da verilmiştir. A-A izotropik halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=0 için Grafik (142)'de gösterilmektedir.



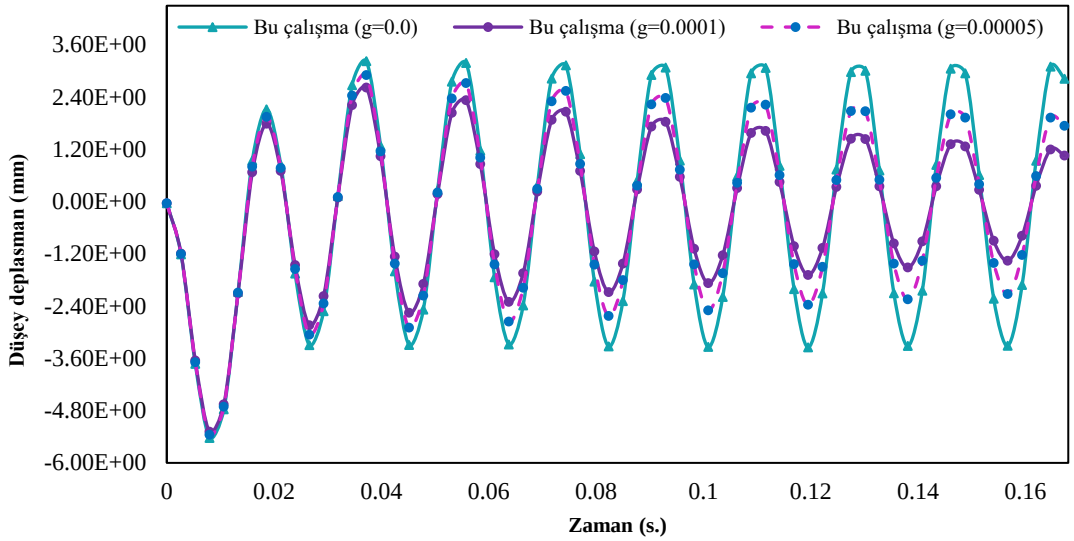
Grafik 142. İmpulsif dik üçgen yükleme durumu için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=1 için Grafik (143)'te gösterilmektedir.



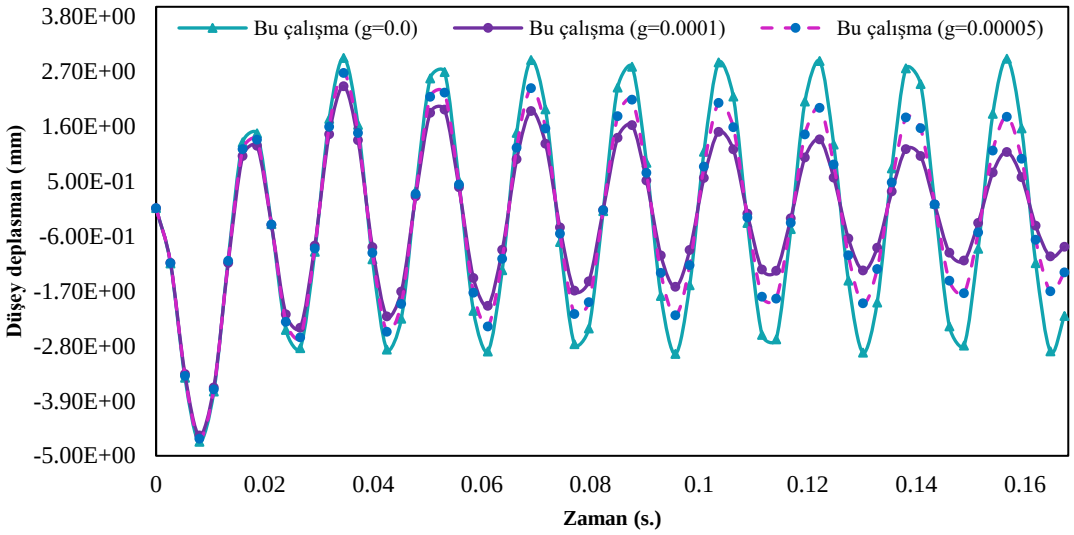
Grafik 143. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=2 için Grafik (144)'te gösterilmektedir.



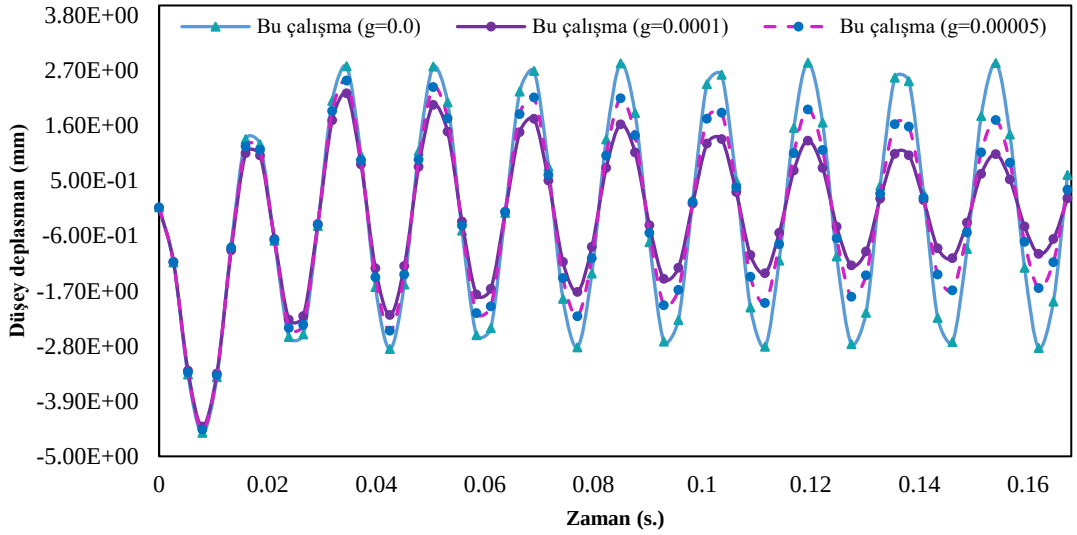
Grafik 144. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=4 için Grafik (145)'te gösterilmektedir.



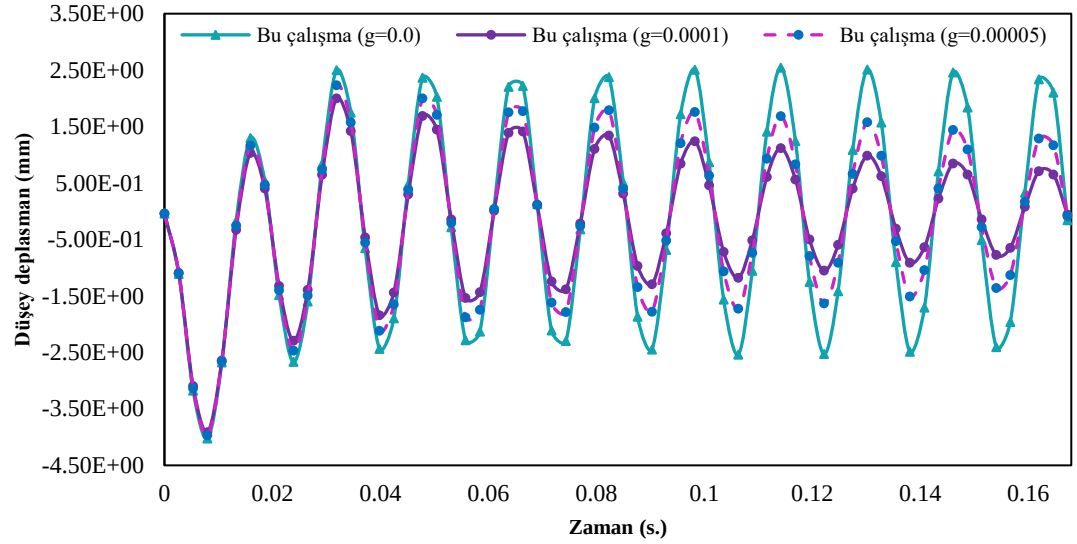
Grafik 145. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (146)'da gösterilmektedir.



Grafik 146. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – A FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (147)'de gösterilmektedir.



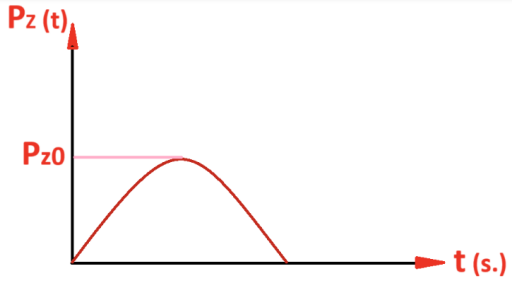
Grafik 147. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

3.4.4. İmpulsif sinüs yük fonksiyonu için çözüm

Mühendislikte, impulsif sinüs dalga tipi yükler, ani ve geçici kuvvetlerin etkilerini incelenmesi dikkate değer bir konudur. Bu tür yüklerin kullanılması, yapıların, makinelerin ve sistemlerin ani yükler karşısında nasıl davrandığını anlamak ve bu şekilde güvenli ve etkili tasarımlar yapmak için gereklidir. Darbe yüklerinin simülasyonunde, (binalar, köprüler ve diğer yapıların) anlık darbe yükleri altında nasıl davrandığını anlamak için bu tip yükler uygulanılmaktadır. Özellikle deprem veya patlama durumlarında hayati önem taşımaktadır.

Uçakların manevra sırasında maruz kaldığı anlık G kuvvetlerinin etkilerini canlandırır. Pulsif yüklerin doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi genellikle karmaşık matematiksel ve bilgisayarlı analiz yöntemleri gerektirir. Zamanla değişen bu tür yüklerin etkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek, ileri analiz ve hassas veriler gerektirmektedir.

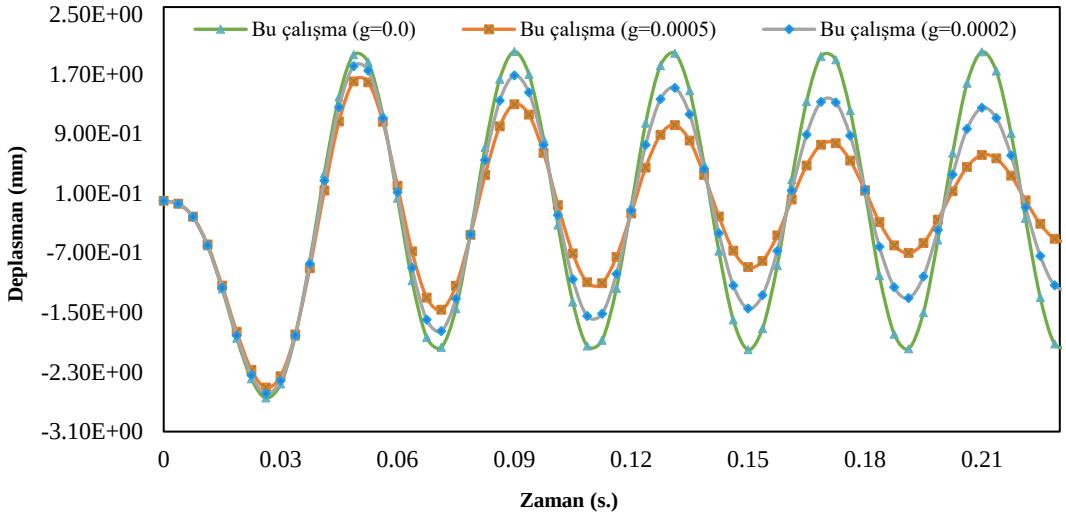
Bu çalışma bölümünde, Dalga tipi sinüs yükün halka plağın üzerinde etkisi araştırılmıştır. Kulanılan yöntem, daha hassas bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 12. İmpulsif sinüs dalga tipi yük

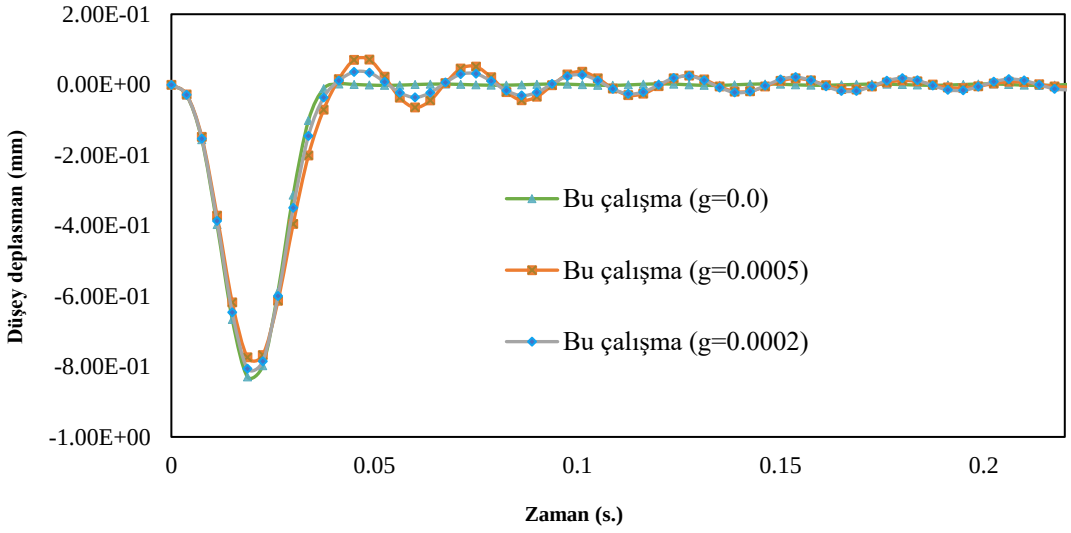
Bu bölümde ankastre- serbest model (A – S), kalınlığı (h=0.5m) olan halka için analiz gerçekleştirilmiştir, sonuçlar Grafik (148- 153)'te karşılaştırılmıştır.

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=0 için Grafik (148)'de gösterilmektedir.



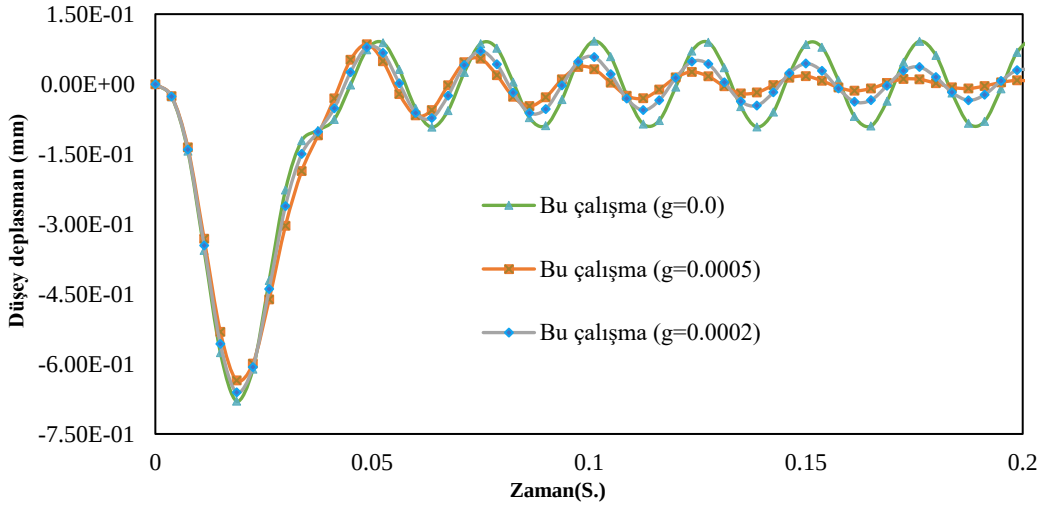
Grafik 148. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=1 için Grafik (149)'da gösterilmektedir.



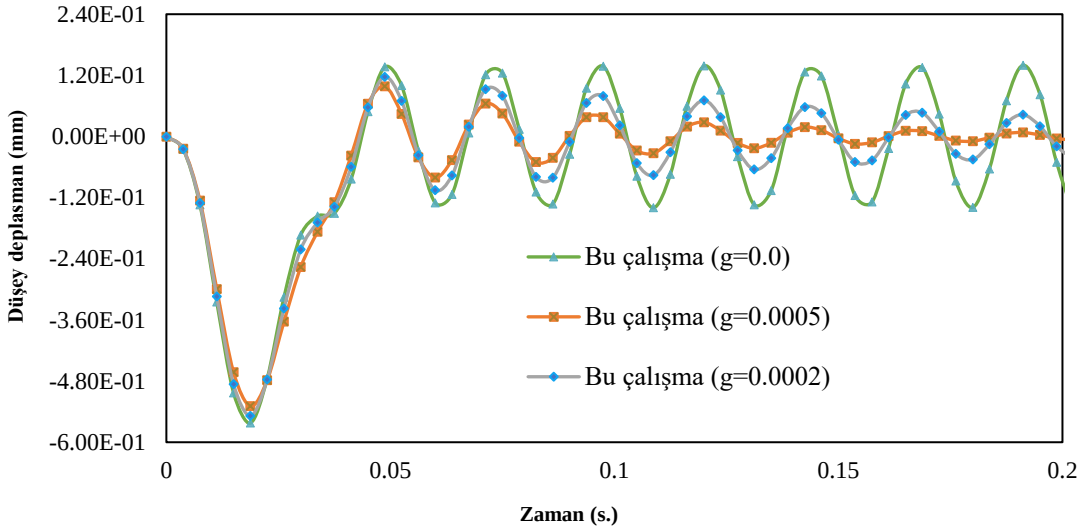
Grafik 149. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=2 için Grafik (150)'de gösterilmektedir.



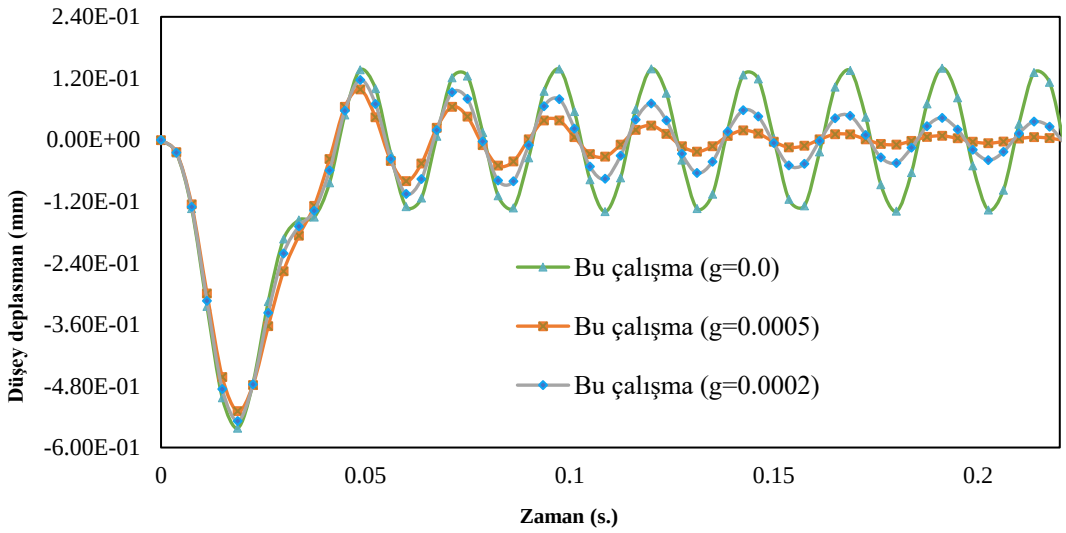
Grafik 150. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=4 için Grafik (151)'de gösterilmektedir.



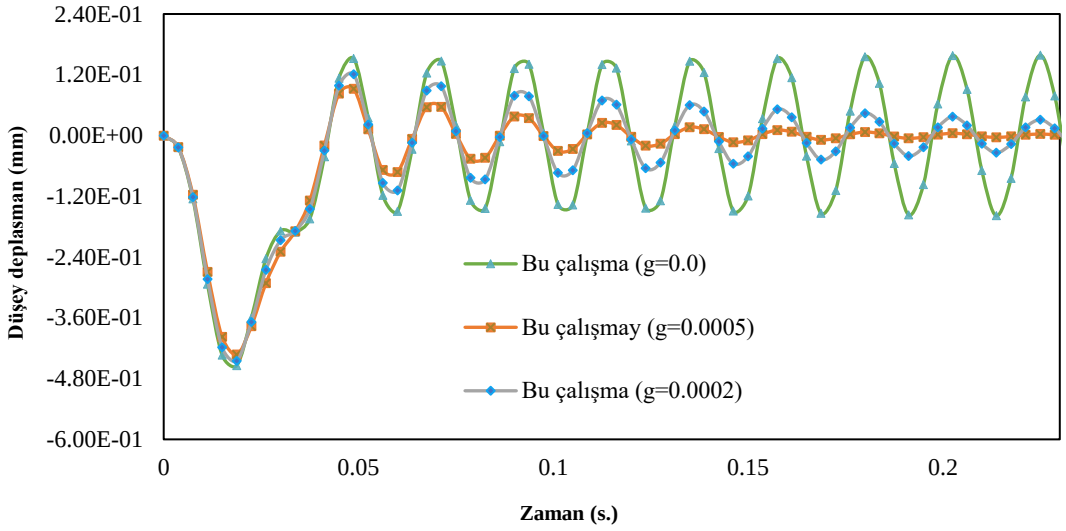
Grafik 151. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (152)'de gösterilmektedir.



Grafik 152. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – S FDM'li halka plağın maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (153)'te gösterilmektedir.



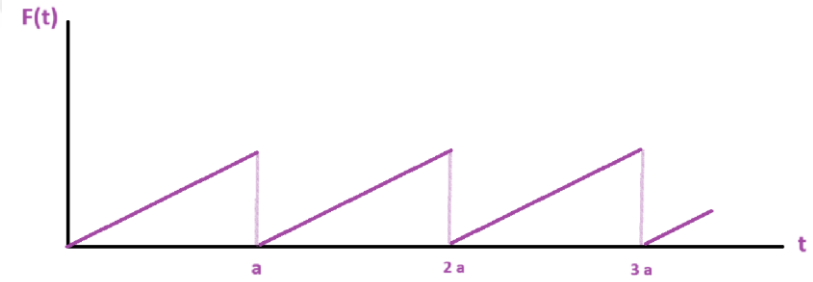
Grafik 153. İmpulsif dik üçgen yükleme için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

3.4.5. Testere yük fonksiyonu için çözüm

Mühendislikte bu dalga formu, zamana bağlı olarak doğrusal bir şekilde artan bir yükü gösterir ve sonra aniden düşmektedir. Özellikle rüzgar ve deprem gibi düzenli ve ani kuvvetlerin yapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için uygundur.

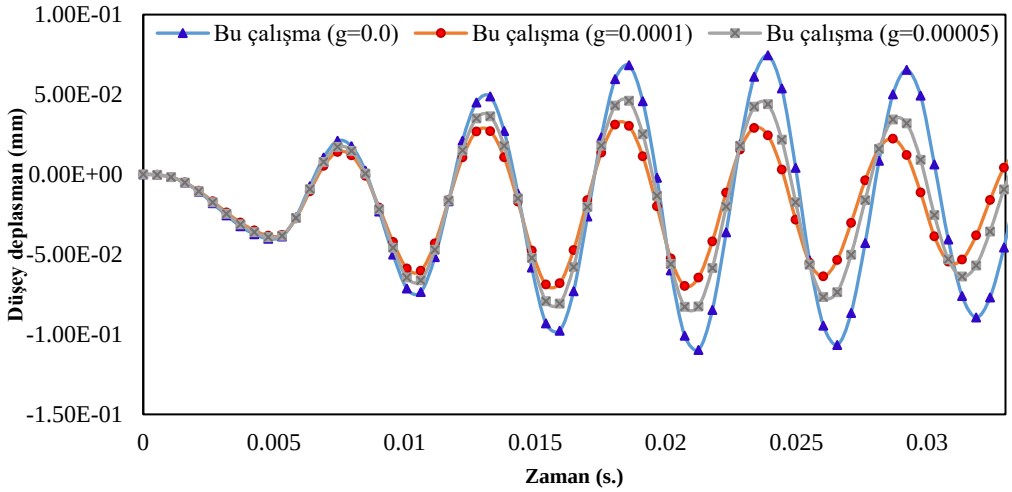
Yapıların değişen yüklere dayanıklılığını test etmek için kullanılır. Bu analizler, yapıların güvenli ve uzun ömürlü olmasını garanti etmektedir.

Bu bölümde, testere dişi dalga yük için analiz gerçekleştirilmiştir, kalınlığı h=1m olan halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı karşılaştırılmıştır. Ankastre – kayıcı mesnet (A-K) sınır koşulu bu analizde uygulanmıştır. Sonuçlar Grafik (154-159)'da sunulmuştur.



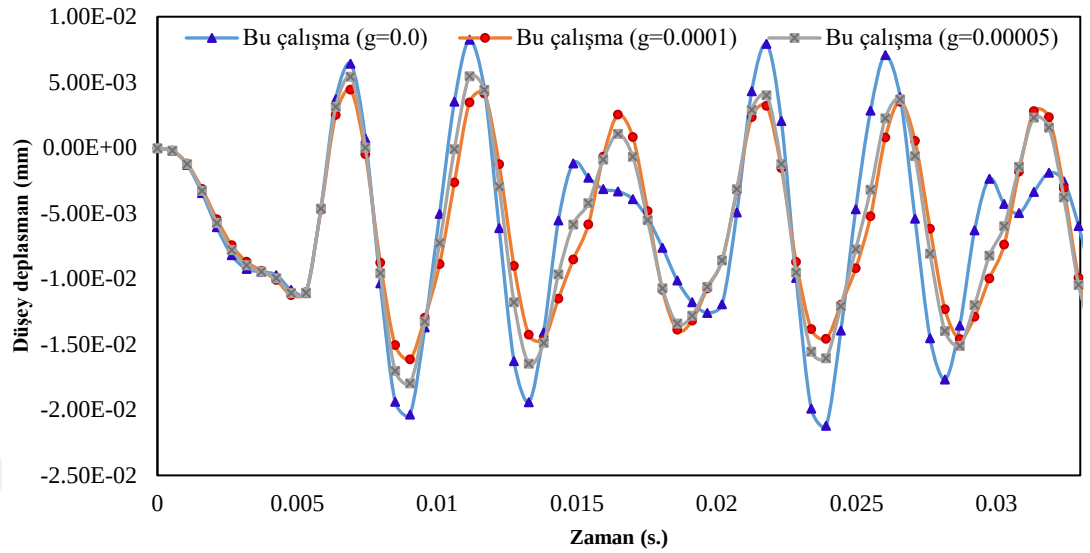
Şekil 13. Testere dişi dalga yük fonksiyonu

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=0 için Grafik (154)'te gösterilmektedir.



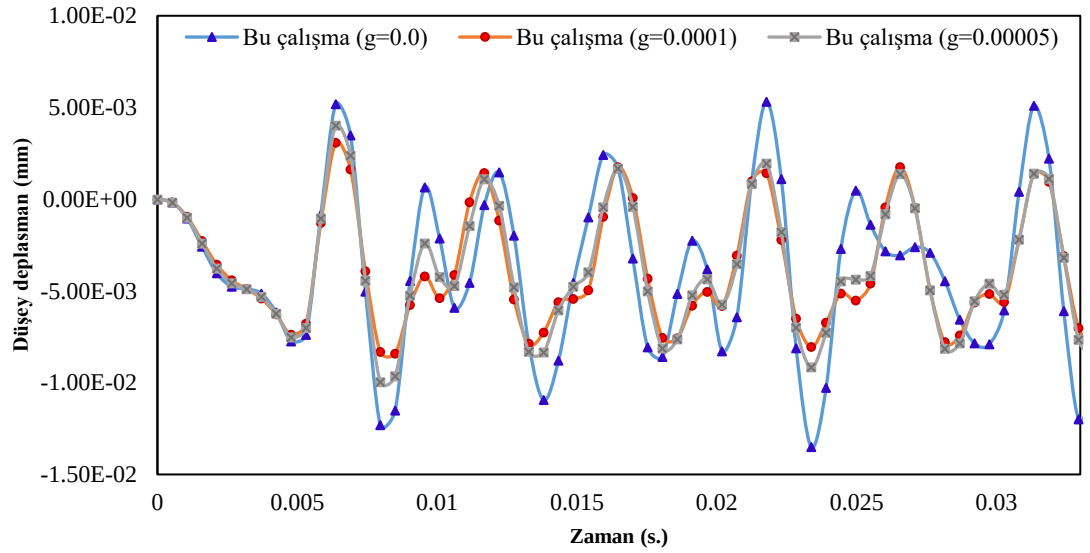
Grafik 154. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=1 için Grafik (155)'te gösterilmektedir.



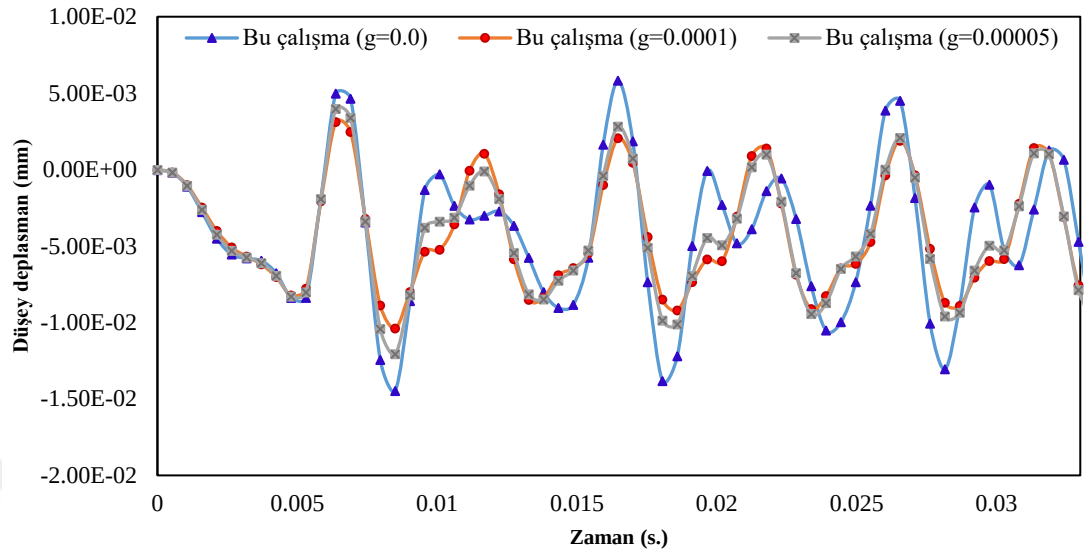
Grafik 155. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=2 için Grafik (156)'da gösterilmektedir.



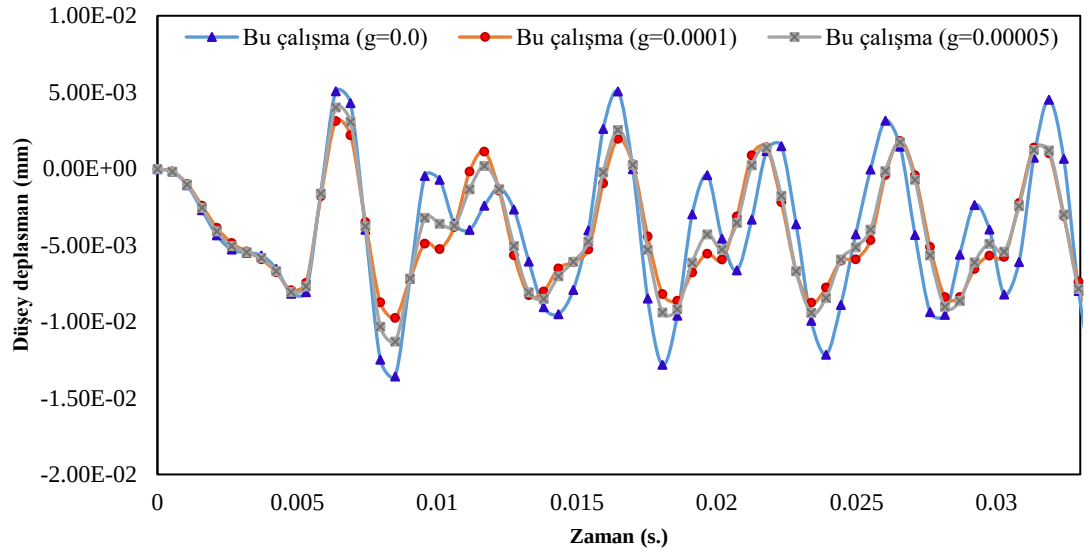
Grafik 156. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=4 için Grafik (157)'de gösterilmektedir.



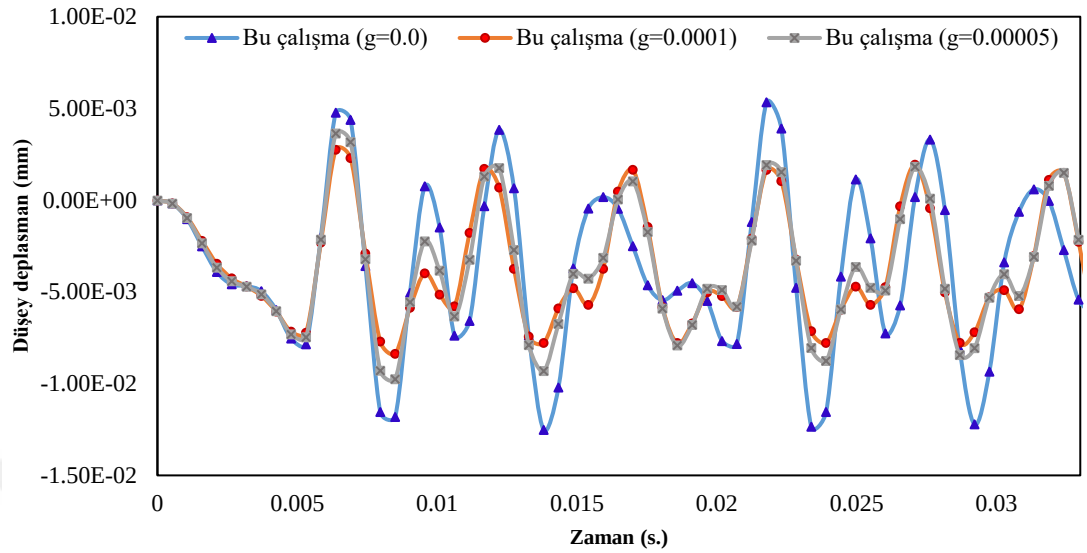
Grafik 157. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=5 için Grafik (158)'de gösterilmektedir.



Grafik 158. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

A – K FDM'li halka plakların maksimum viskoelastik düşey deplasmanı, λ_z=10 için Grafik (159)'da gösterilmektedir.



Grafik 159. Testere dişi dalga tipi yük için halka kalınlığının ortasındaki viskoelastik düşey deplasmanın zamanla değişimi

3.5. Vuruş Olayı

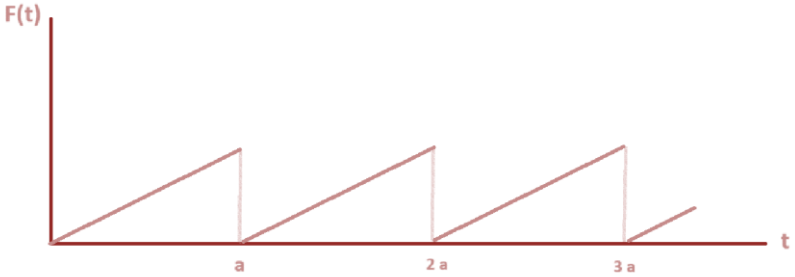
Yapılarda vuruş olayı genelde yapının doğal titreşim frekansı yükün frakansına yakın olduğu durumda maydane gelir. Bu analizde, plağın iki tip dinamik yük ve farklı sınır koşulu için vuruş olayı incelenmektedir.

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan bir teknik olan vuruş olayı inlemesi, birçok faydası vardır. Mühendisler sinüs dalgası yüklerini uygularken rezonanstan kaçınmalıdır. Güçlendirilmiş titreşimler, uygulanan kuvvetin frekansının yapının doğal frekansıyla eşleştiğinde ortaya çıkar. Bu yapıya zarar verebilir.

Dolayısıyla, vuruş olayını incelemsi yapısal düzenlemeler ve titreşim azaltma için tasarım süreçlerinde önemli bir rol oynar. Sistemlerin işlevselliğini optimize etmek için kullanılmaktadır. Vuruş olayı inlcelenmesi verilerinin kullanılması, frekans tepkilerini iyileştirmek, rezonansları önlemek ve sistemlerin daha istikrarlı hale gelmesini sağlamaktadır.

3.5.1. Halka plak

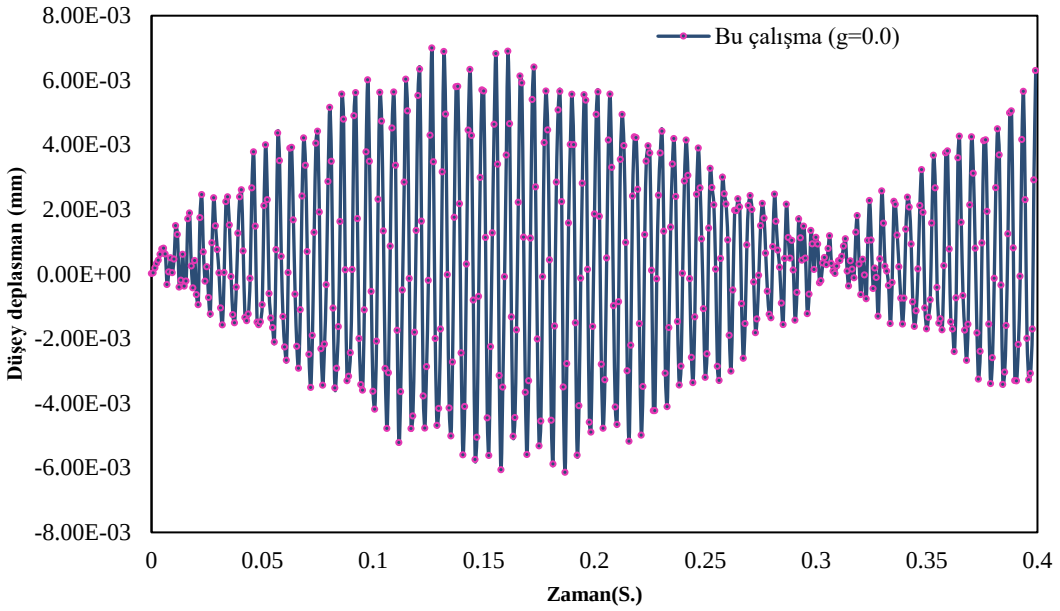
Bu bölümde, halka plağın maruz kaldığı testere yüküne ve vuruş olayını inelenmiştir. Testere yükün, (h=1m) kalınlıkta olan halka plağın üzerinde etkisi araştırılmıştır. Sınır koşulları ankastre – kayıcı mesnet (A-K) varsayılmaktadır.



Şekil 14. Testere dişi dalga yük fonksiyonu

Bu örnekte elastik durum için (λ_z=0) analiz yapılmıştır. Yükün frekansı (örn. 171.2328 Hz), dikkate alınan plağın titreşim özelliklerine yakındır (örn. 172.4137).

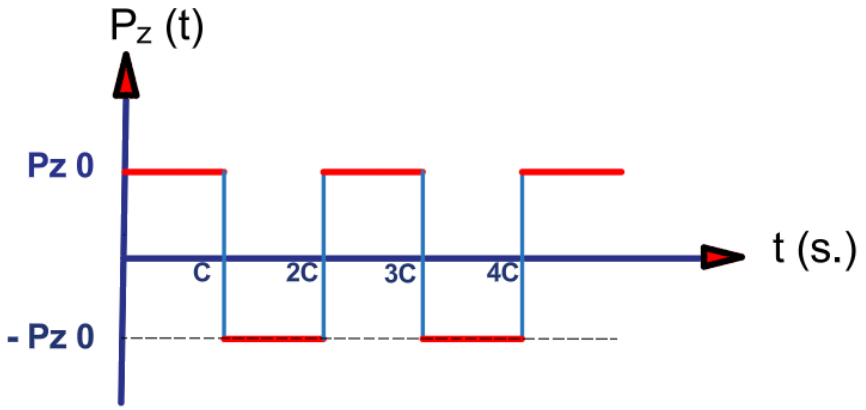
Ankastre – Kayıcı (A-K) mesnet izotropik kalınlığı (h=1m) olan halka plakların maksimum düşey deplasmanı, (g=0.0) için Grafik (160)'ta gösterilmektedir.



Grafik 160. Testere dişi dalga tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi

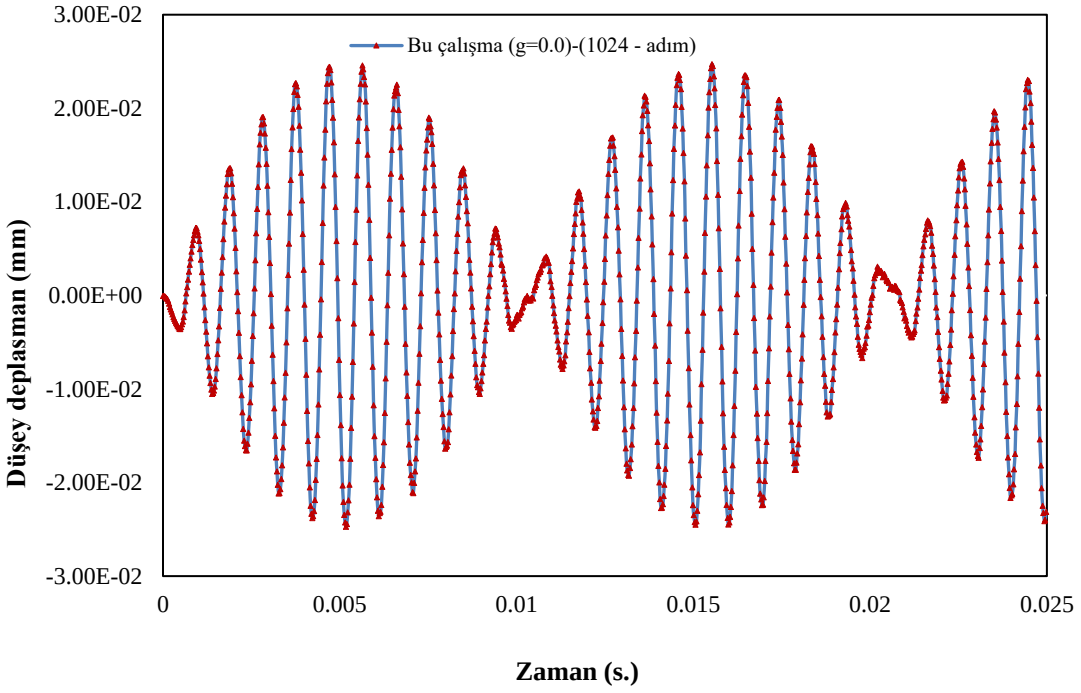
3.5.2. Dairesel plak

Bu bölümde (h=0.5) kalınlıkta dairesel plağın kare dalga yük fonksiyonuna maruz kaldığında araştırılmıştır. Şekil (15)'te dinmak yükünü göstermektedir.



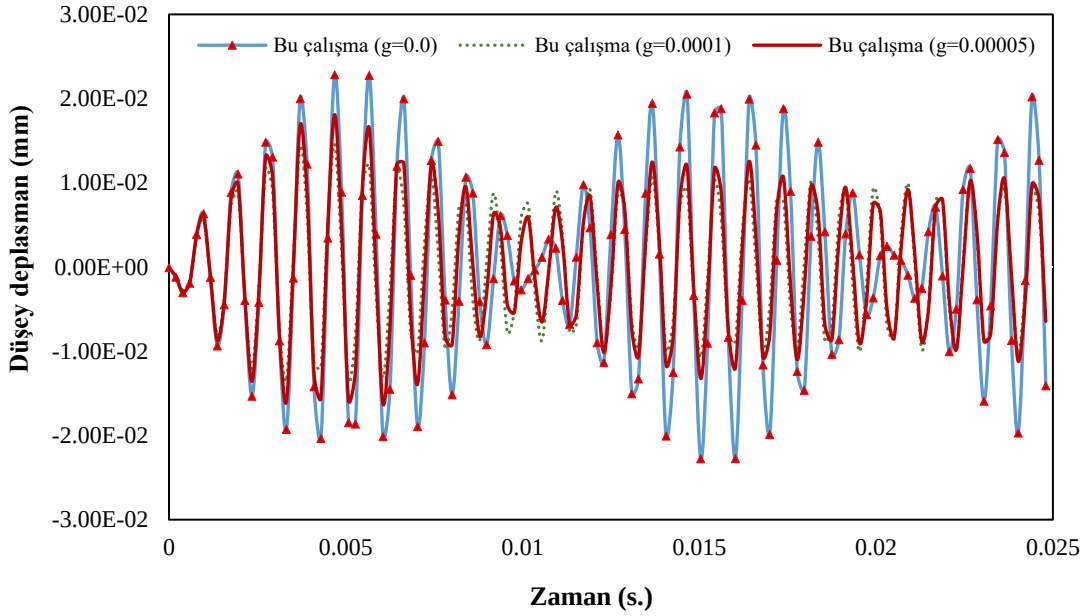
Şekil 15. Kare dalga yük fonksiyonu

Kayıcı mesnetli, (h=0.5m) dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=0 , (1024 adım) için Grafik (161)'de gösterilmektedir.



Grafik 161. Kare dalga yük tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi

Kayıcı mesnetli, (h=0.5m) dairesel plağın maksimum düşey deplasmanı, λ_z=0, (128 adım) için Grafik (162)'de gösterilmektedir.



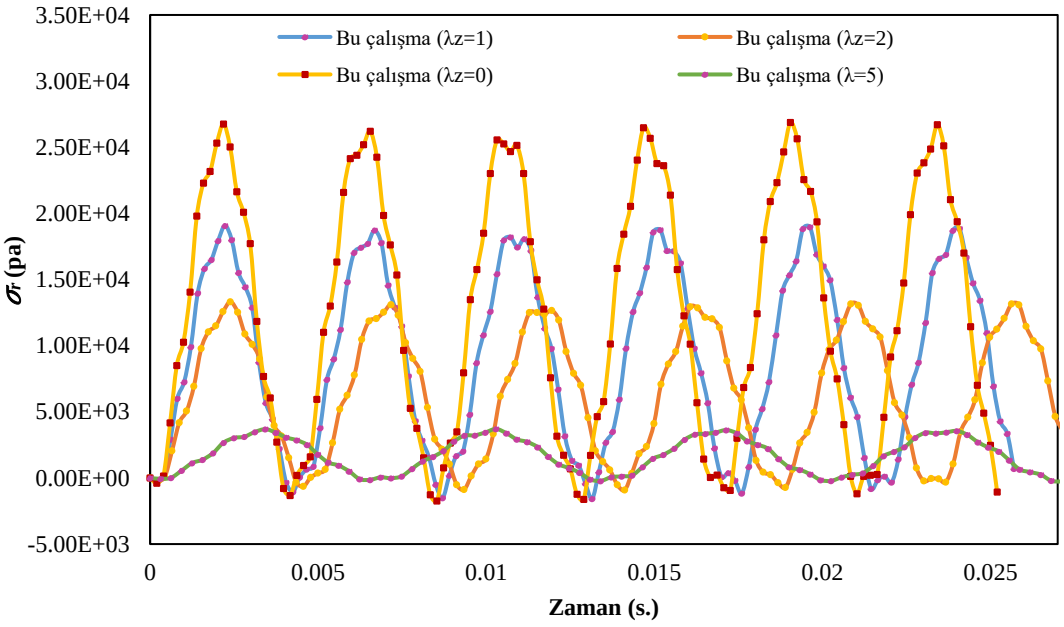
Grafik 162. Kare dalga yük tipi için yük halkanın vuruş olayın analizi

Grafik (162)'de halka plağın elastik ve viskoelastik durum sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sönüm değeri arttıkça, statik değere daha yaklaştığını görülmüştür. Öte yandan, sönüm oranı arttıkça, salanım genlikler birbirine yakın oluyor. Buna göre elastik durumda sıfırdan çok yükselip ardından sıfıra dönüp birde yükselirken, sönümlü durumda zaman arttıkça dengeli şekilde gitiğini görünmüştür.

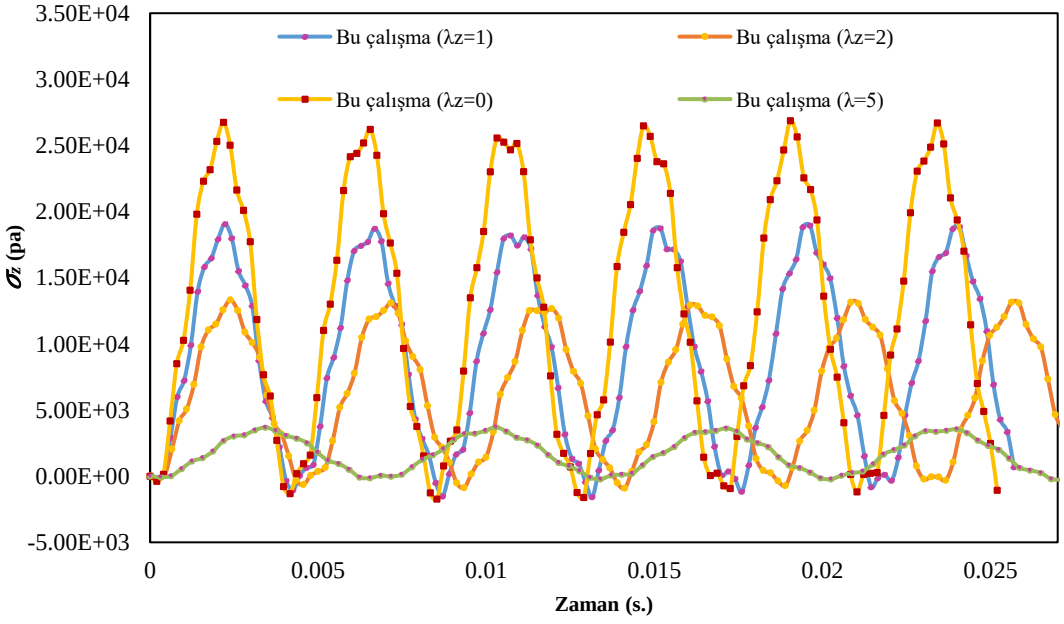
Bununla birlikte zaman ve sönüm oranı arttıkça, periyotlarda hafif kaymalar oluşmuştur.

3.6. Gerilme Analizi

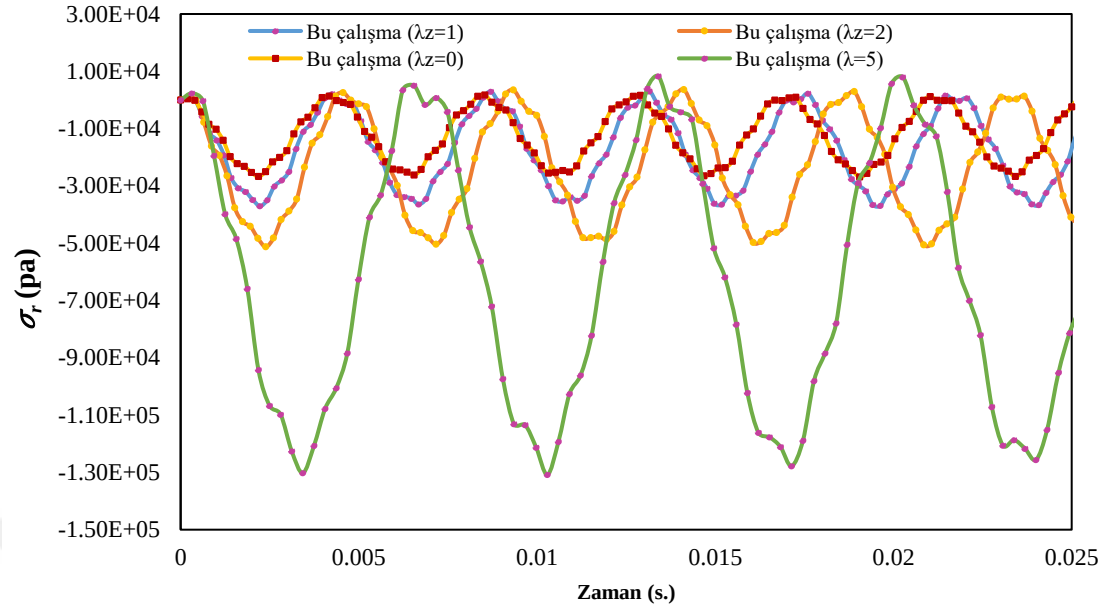
Kayıcı mesnetli, kalınlığı (h=0.1m) olan dairesel plak (128 adım), (g=0.0) için elde edilen σ_r ve σ_z gerilme değerlerinin zamanla değişimi Grafik (163-166)'da gösterilmektedir.



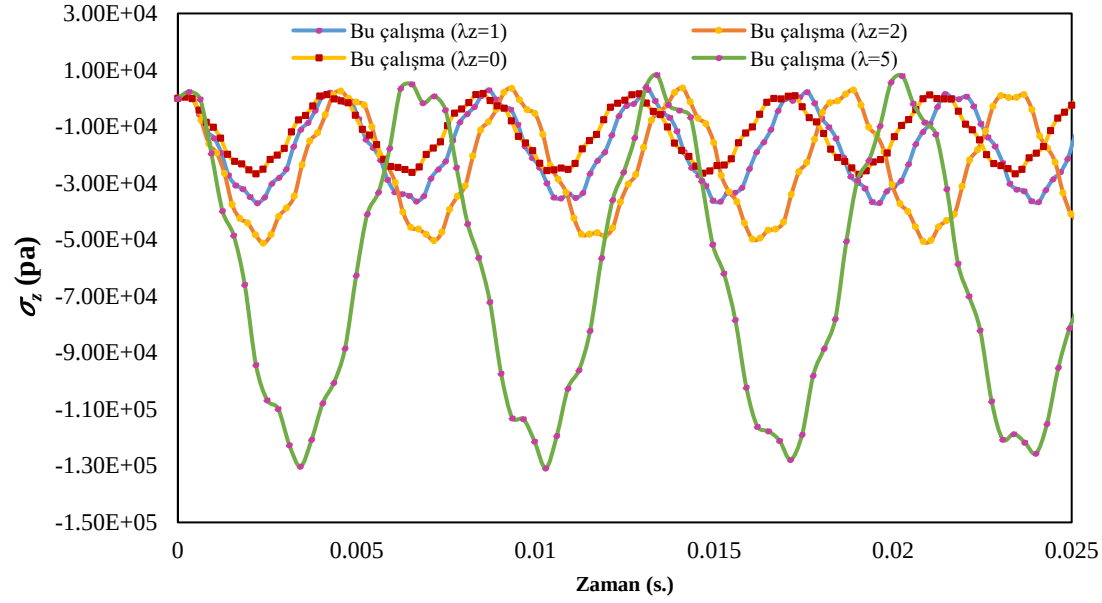
Grafik 163. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi



Grafik 164. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi



Grafik 165. Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi

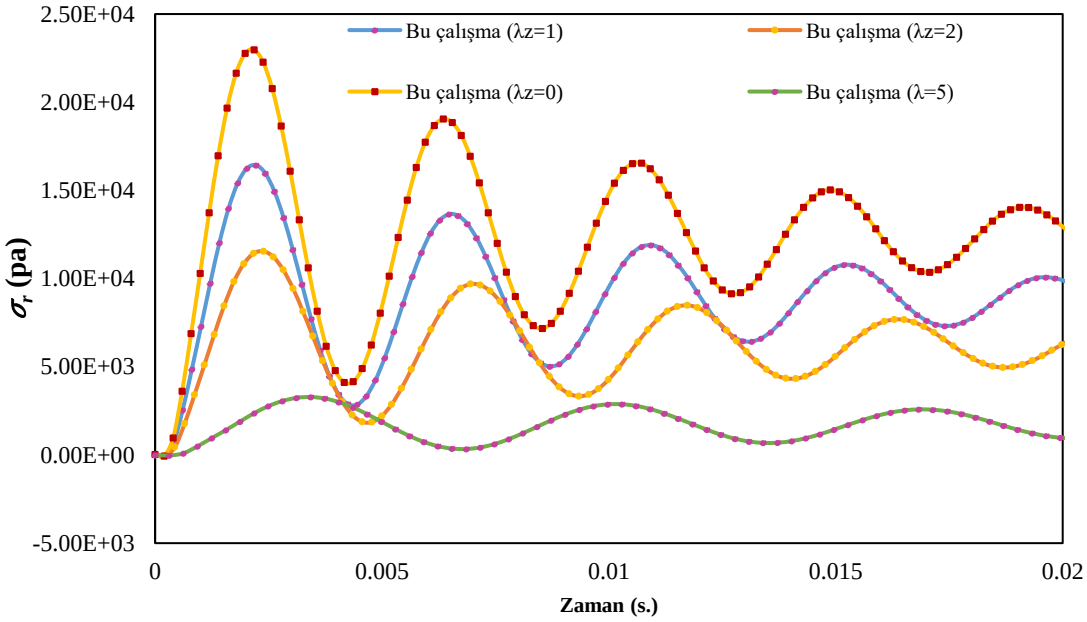


Grafik 166. Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi

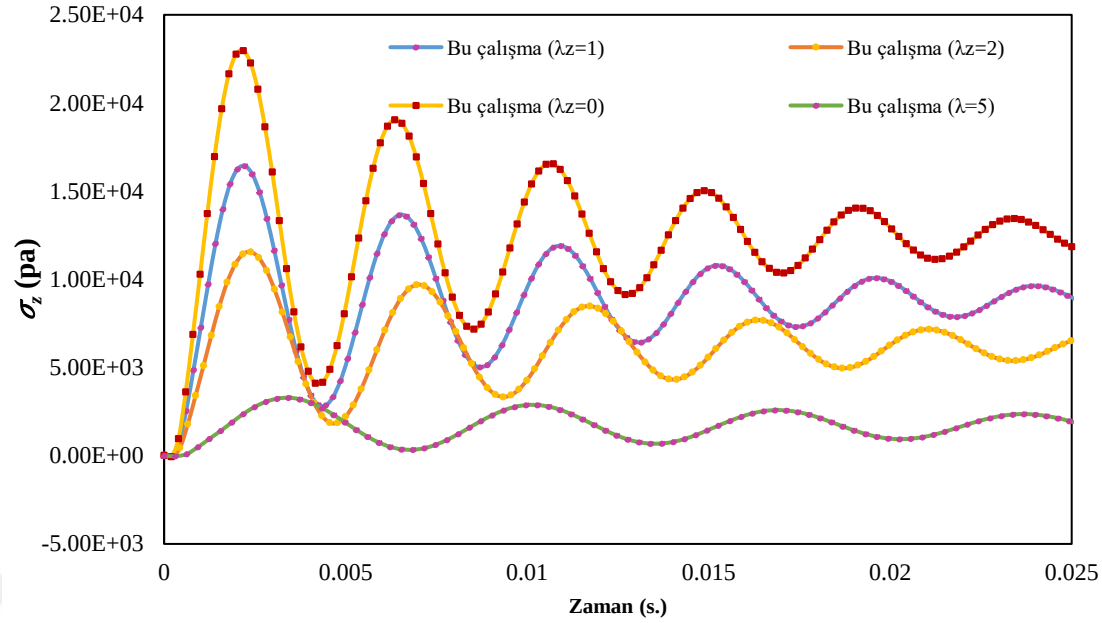
Bu kısımda, Kayıcı mesnetli ve kalınlığı (h=0.1m) olan dairesel plağın σr ve σz gerilme değerlerinin zamanla değişimi incelenmiştir. Adım tipi yük uygulanarak (128

adım) için elastik durum için analiz yapılmıştır. plağın en alt ve en üst noktalarında davranışı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en alt nokta için λ_z arttıkça salınım genliği küçülüp statik değere yaklaşmaktadır. Ayrıca, en üst nokta için yapılan analizlerde, λ_z arttıkça sıfırın altındaki kısımda salınım genliği en büyük olduğunu görülmüştür.

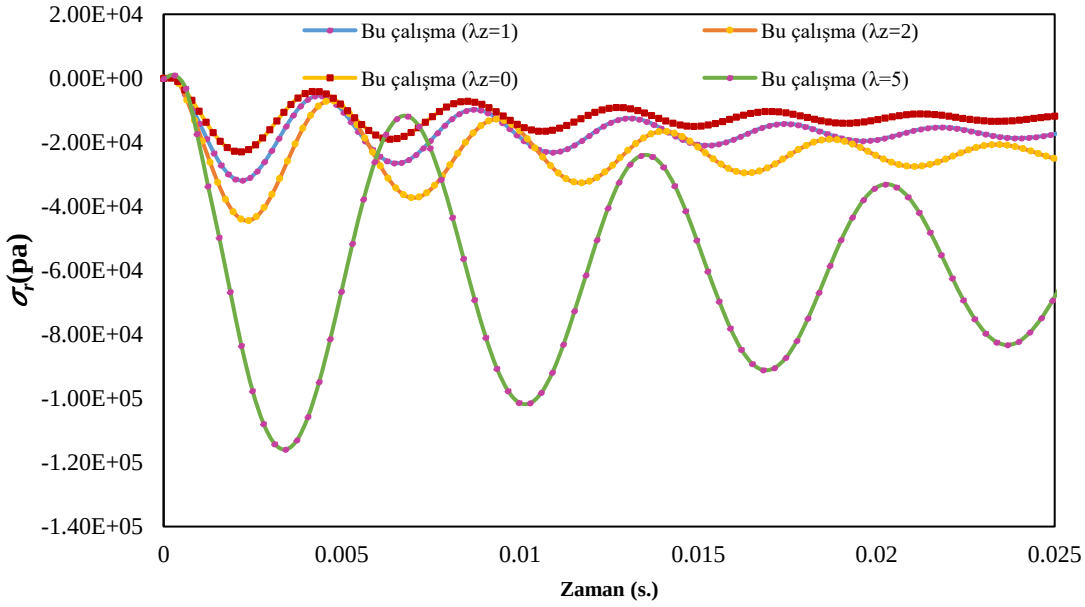
Kayıcı mesnetli, kalınlığı (h=0.1m) olan dairesel plağın (128 adım), (g=0.0001) için elde edilen σ_r ve σ_z gerilme değerlerinin zamanla değişimi Grafik (166-170)'te gösterilmektedir.



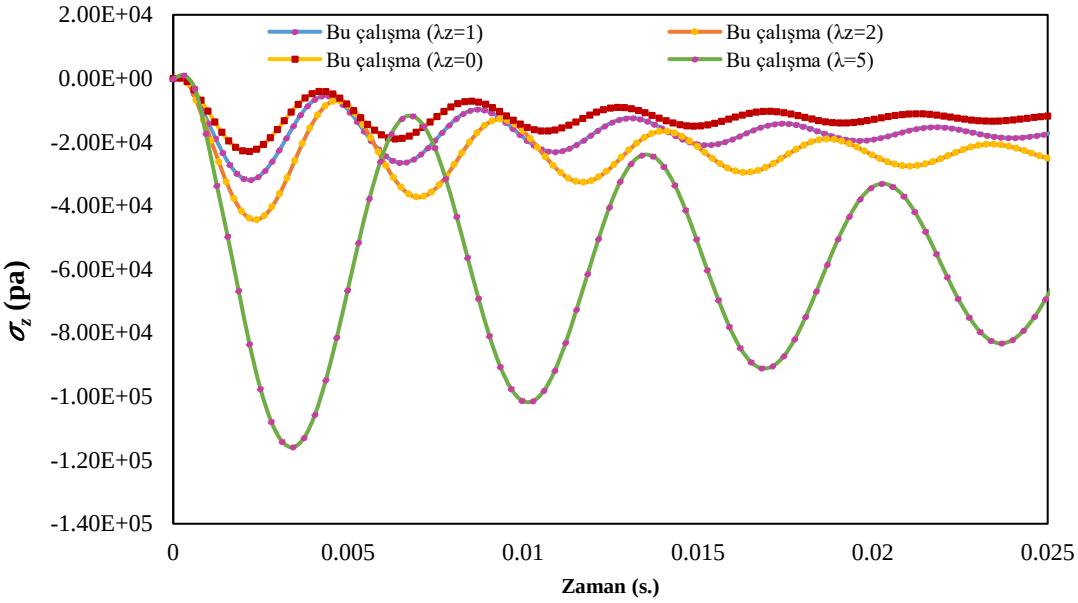
Grafik 167. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi



Grafik 168. Plak ortansının en alt kısmında oluşan (σ_z) değerlerinin zamanla değişimi



Grafik 169. Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_r) değerlerinin zamanla değişimi



Grafik 170. **(**Plak ortansının en üst kısmında oluşan (σ_z**)** değerlerinin zamanla değişimi

Bu kısımda yapılan gerilme analizinde, viskoelastik (g=0.0001) için yapılmıştır. Plağın en alt ve en üst noktalarda nasıl davrandığı incelenmiştir. Ele alınan sonuçlar, elastik durum için yapılan analizin sonuçları gibi bir davranış sergilediği görülmüştür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, heterojen malzemeli plakların eksenel simetrik eğilme, sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışı incelenmesi amaclanmıştır. Statik durumunda malzemeler fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli ve dinamik analiz durumunda ise malzemenin kalınlık boyunca fonkisyonel olarak derecelendirilmiş olduğu varsayılmıştır. Ele alınan problemlerin sonlu elemanlar modeli kuruluruken sekiz düğümlü kuadratik eleman kullanılmıştır. Statik analizde Galerkin yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Dinamik yükleme durumunda ise zamana bağlı denklemler öncelikle zaman uzayından bağımsız hale getirilerek Laplace uzayına transfer edilmiştir. Bir takım Laplace parametresi için elde edilen sonuçlar etkin bir ters dönüşümü yapabilen Durbin'in modifiye edilmiş ters Laplace metodu ile zaman uzayına transfer edilmiştir.

Statik yükleme için sunulan yaklaşımın sonuçları, FDM dairesel plakların sayısal sonuçları ile literatür arasında bir karşılaştırma yapılarak doğrulanmış ve iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. FDG dairesel plakların çeşitli kalınlık/yarıçap oranları, gözeneklilik katsayıları, üç farklı malzeme dağılımı (UMCR, MMCR, SMCR) ve iki farklı sınır koşulu için statik davranışını araştırmak için kullanılımıştır. FDG plaklarının statik çözümlerden elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki kritik noktalar vurgulanmıştır.

- Porozite katsayısı e_0 arttıkça plağın deplasmanıda artarmaktadır.
- e_0 değerleri için, üniform gözenekli malzeme türünde ölçülen maksimum yer değiştirme, diğer gözenekli malzeme türlerinden ankastre mesnetli model için 0,4 den ve kayıcı mesnetli model için 0,6 dan daha büyük olduğu görülmüştür.
- Elde edilen statik sonuçlardan *h/r* oranındaki bir artışın maksimum yer değiştirmede bir artışa yol açtığı görülmüştür.
- Ankastre mesnetli plağın *h/r* oranının maksimum yer değiştirme üzerindeki etkisi, kayıcı mesnetli FDG plaklara göre daha azdır.
- Statik yükleme sonuçlarının, FDG dairesel plaklar üzerinde gelecekteki çalışmalar için referans çözümler olarak kullanılabileceğine inanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, halka ve dairesel plakların dinamik davranışı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan plak, farklı kalınıklar için incelenmiştir. Sonuçlara göre,

- Malzeme katsayısının (λ_z) artışı, zorlanmış titreşim için deplasman genliğinde bir azalmaya yol açtığı sonucuna varılmıştır.
- Malzeme katsayısının (λ_z) arttırılmasıyla deplasmanların arttığı görülmüştür.
- Malzeme katsayısının (λ_z) arttığı durumda, deplasman genliklerinin ve yer değiştirme periyotlarının azaldığı görülmüştür.
- Plak kalınlığın artırılması ile periyotların ve salınım genliklerin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Periyodik yükleme durumunda uygulanan yükün frekansı, plağın frekansına yakın olduğu durumlarda vuruş olayı gözlemlenmiştir.
- Sınır koşullarında tutulan serbestlik derecesi artınca salınım genliklerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Vuruş olayında sönüm oranı artıkça salınım genliklerinin birbirine yaklaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tezde önerilen yöntemin ANSYS programının kullandığı Newmark (adım adım entegrasyon) yöntemine göre daha etkin olduğunu göstermiştir. Altı periyodluk salınım için ANSYS'te 512 adıma karşılık, bu çalışmada 64 adımlık ters Laplace dönüşümü yapılarak istenilen hassasiyette çözümler bulunabilmektedir. Bu çalışmada, adım adım integrasyon yöntemlerine göre çok daha etkin çözümler elde edilebildiğini, zaman ve çaba tasarrufu sağladığını o göstermektedir.

KAYNAKLAR

Akgöz, B., and Civalek, Ö. (2013). Longitudinal vibration analysis of strain gradient bars made of functionally graded materials (FGM). *Composites Part B: Engineering, 55*, 263-268.

Al-Itbi, S. K., and Noori, A. R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. 7(4), 291–301 .

Asemi, K., Babaei, M., and Kiarasi, F. (2022). Static, natural frequency and dynamic analyses of functionally graded porous annular sector plates reinforced by graphene platelets. *Mechanics Based Design of Structures and Machines,* 50(11), 3853-3881.

Aslan, T. A., Noori, A. R., and Temel, B. (2020). Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemeli Kirişlerin Sönümlü ve Sönümsüz Zorlanmış Titreşim Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 35(2), 497-510.

Babaei, M., and Asemi, K. (2022). Stress analysis of functionally graded saturated porous rotating thick truncated cone. *Mechanics Based Design of Structures and Machines,* 50(5), 1537-1564.

Babaei, M., Kiarasi, F., and Asemi, K. (2023). Torsional buckling response of FG porous thick truncated conical shell panels reinforced by GPLs supporting on Winkler elastic foundation. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 1-30.

Babaei, M., Kiarasi, F., Asemi, K., Dimitri, R., and Tornabene, F. (2022). Transient thermal stresses in FG porous rotating truncated cones reinforced by graphene platelets. *Applied Sciences* 12(8), 3932.

Babaei, M., Kiarasi, F., Hossaeini Marashi, S. M., Ebadati, M., Masoumi, F., and Asemi, K. (2021). Stress wave propagation and natural frequency analysis of functionally graded graphene platelet-reinforced porous joined conical–cylindrical–conical shell. *Waves in Random and Complex Media* 1-33 https://doi.org/10.1080/17455030.2021.2003478.

Boley, B. A., & Weiner, J. H. (2012). Theory of thermal stresses (Book). Courier Corporation.

Chaker, A., Koubaa, S., Mars, J., Vivet, A., and Dammak, F. (2021). An efficient ABAQUS solid shell element implementation for low velocity impact analysis of FGM plates. *Engineering with Computers*. 37(3), 2145–2157.

Chandrupatla, T., and Belegundu, A. (2021). Introduction to finite elements in engineering (Book). *Cambridge University Press.*

Chen, H. Y., and Li, W. (2024). Chaos and bifurcation analyses of functionally graded composite spherical shallow shells reinforced with graphene nanoplatelets. *Results in Physics*, 107461.

Dastjerdi, S., and Akgöz, B. (2018). New static and dynamic analyses of macro and nano FGM plates using exact three-dimensional elasticity in thermal environment. *Composite Structures*, *192*, 626-641.

Dhatt, G., Touzot, G,. (1984). The Finite Element Method Displayed. (Book). Kluwer, *Wiley*; 1st edition.

Doori, S. G. M., Noori, A. R., & Etemadi, A. (2024). Static Response of Functionally Graded Porous Circular Plates via Finite Element Method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-15.

Foroutan, M., Moradi-Dastjerdi, R., and Sotoodeh-Bahreini, R. (2011). Static analysis of FGM cylinders by a mesh-free method. *Steel and Composite Structures*. 12(1), 1-11.

Ghomshei, M. M., and Abbasi, V. (2013). Thermal buckling analysis of annular FGM plate having variable thickness under thermal load of arbitrary distribution by finite element method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 27(4), 1031–1039.

Gilewski, W., and Pełczynski, J(2020). Material-oriented shape functions for FGM plate finite element formulation. *Materials*. 13(3), 803 .

Ikramullah, M. J., and Maknun, I. J. (2024, February). Shear correction factor effect on Functionally Graded Material (FGM) composite beams with Discrete Shear Beam (DSB) element. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2710, No. 1). AIP Publishing.

Jadhav, P., and Bajoria, K. (2013). Stability Analysis of Piezoelectric FGM Plate Subjected to Electro-mechanical Loading Using Finite Element Method. *International Journal of Applied Science and Engineering* 11(4),375-391 .

Kaya, K., Olmuş, İ., and Dördüncü, M. (2023). Investigation of fracture behaviour of one-dimensional functionally graded plates by using peridynamic theory. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 38(1), 319–329.

Khatounabadi, M., Jafari, M., and Asemi, K. (2022). Low-velocity impact analysis of functionally graded porous circular plate reinforced with graphene platelets. *Waves in Random and Complex Media*, 1-27.

Kiarasi, F., Babaei, M., Asemi, K., Dimitri, R., and Tornabene, F. (2021). Three-dimensional buckling analysis of functionally graded saturated porous rectangular plates under combined loading conditions. *Applied Sciences*, 11(21), 10434.

Kiarasi, F., Babaei, M., Mollaei, S., Mohammadi, M., and Asemi, K. (2021). Free vibration analysis of FG porous joined truncated conical-cylindrical shell reinforced by graphene platelets. *Advances in nano research* 11(4), 361 https://doi.org/10.12989/anr.2021.11.4.361.

Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H. (2003). Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering* A. 362(1–2), 81–106.

Kulikov, G. M., and Plotnikova, S. V. (2024). Three-dimensional nonlinear stress analysis of functionally graded shells subjected to displacement-dependent loads. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-16.

Kumar, S., Roy, H., Mitra, A., and Ganguly, K. (2024). Dynamic analysis of bi-directional functionally graded beam with geometric nonlinearity. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(3), 3051-3067.

Kutlu, A., and Omurtag, M. H. (2012). Large deflection bending analysis of elliptic plates on orthotropic elastic foundation with mixed finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 65(1), 64–74.

Laureano, R. W., Mantari, J. L., Yarasca, J., Oktem, A. S., Monge, J., and Zhou, X. (2024). A unified formulation and the boundary discontinuous Fourier method for clamped functionally graded shells. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 162, 310-326.

Laureano, R. W., Mantari, J. L., Yarasca, J., Oktem, A. S., Monge, J., and Zhou, X. (2024). A unified formulation and the boundary discontinuous Fourier method for clamped functionally graded shells. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 162, 310-326.

Lee, W.-H. and S.-C.(2006). Han, Free and forced vibration analysis of laminated composite plates and shells using a 9-node assumed strain shell element. *Computational Mechanics*, 39(1): p. 41-58.

Li, K., Wu, D., and Gao, W. (2018). Spectral stochastic isogeometric analysis for static response of FGM plate with material uncertainty. *Thin-Walled Structures*. 132, 504–521.

Li, Q., Wu, D., Chen, X., Liu, L., Yu, Y., and Gao, W. (2018). Nonlinear vibration and dynamic buckling analyses of sandwich functionally graded porous plate with graphene platelet reinforcement resting on Winkler–Pasternak elastic foundation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 148, 596–610.

Liew, K. M., He, X. Q., and Kitipornchai, S. (2004). Finite element method for the feedback control of FGM shells in the frequency domain via piezoelectric sensors and actuators. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 193(3–5), 257–273 .

Liew, K. M., He, X. Q., Ng, T. Y., and Kitipornchai, S. (2003). Finite element piezothermoelasticity analysis and the active control of FGM plates with integrated piezoelectric sensors and actuators. *Computational Mechanics, 31*(3), 350-358.

Liew, K. M., He, X. Q., Ng, T. Y., and Sivashanker, S. (2001). Active control of FGM plates subjected to a temperature gradient: modelling via finite element method based on FSDT. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 52*(11), 1253-1271.

Liew, K., et al., (2003). Finite element piezothermoelasticity analysis and the active control of FGM plates with integrated piezoelectric sensors and actuators. *Computational Mechanics*, 31(3): p. 350-358.

Liu, B., Ferreira, A. J. M., Xing, Y. F., and Neves, A. M. A. (2016). Analysis of functionally graded sandwich and laminated shells using a layerwise theory and a differential quadrature finite element method. *Composite Structures*. 136, 546–553 .

Lü, C. F., Chen, W. Q., Xu, R. Q., and Lim, C. W. (2008). Semi-analytical elasticity solutions for bi-directional functionally graded beams. *International Journal of Solids and Structures, 45*(1), 258-275.

Ma, L. S., and Wang, T. J. (2004). Relationships between axisymmetric bending and buckling solutions of FGM circular plates based on third-order plate theory and classical plate theory. *International Journal of Solids and Structures*. 41(1), 85–101.

Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. L. (2012). Functionally graded material: an overview.

Mechanical APDL element reference. (2013). *Canonsburg*, PA.

Mellouli, H., Jrad, H., Wali, M., and Dammak, F. (2019). Meshfree implementation of the double director shell model for FGM shell structures analysis. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 99, 111–121.

Mesbah, A., Belabed, Z., Tounsi, A., Ghazwani, M. H., Alnujaie, A., and Aldosari, S. M. (2024). Assessment of new Quasi-3D finite element model for free vibration and stability behaviors of thick functionally graded beams. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(2), 2231-2247.

Moita, J. S., Correia, V. F., and Soares, C. M. (2024). Influence of Applied Loads on Free Vibrations of Functionally Graded Material Plate–Shell Panels. *Applied Sciences*, 14(5), 1993.

Momennia, S., & Akbarzadeh, A. H. (2011). Analysis of functionally graded rectangular and circular plates using finite element method. In *16th Int Conference on Composite Structures Iccs* (Vol. 16).

Nagesh, and Gupta, N. K. (2022). Response simulations of clamped circular steel plates under üniform impulse and effects of axisymmetric stiffener configurations. *International Journal of Impact Engineering*. 159, 104049.

Narayanan, N. I.(2024). Banerjee, Sauvik. Free and Forced Vibration Analysis of FGM Plates with and Without Cutouts Using Heterosis Finite Element Method. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12.2: 2129-2145.

Nguyen, T. H., Nguyen, T. T., Tran, T. T., and Pham, Q. H. (2023). Research on the mechanical behaviour of functionally graded porous sandwich plates using a new C1 finite element procedure. *Results in Engineering* 17, 100817.

Nguyen-Xuan, H., Tran, L. V., Thai, C. H., and Nguyen-Thoi, T. (2012). Analysis of functionally graded plates by an efficient finite element method with node-based strain smoothing. *Thin-Walled Structures*, 54, 1-18.

Nie, G. J., Zhong, Z., and Chen, S. (2013). Analytical solution for a functionally graded beam with arbitrary graded material properties. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 274-282.

Noori, A. R. (2019). Axisymmetric bending and flexural vibration analysis of heterogeneous (FGM) circular plates. (Doktora tezi, Çukurova University, Adana).

Noori, A. R., and Temel, B. (2021). A powerful numerical approach for the axisymmetric bending response of shear deformable two-directional functionally graded (2D-FG) plates with variable thickness. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(22), 6370–6387 .

Noori, A. R., and YILDIRIM, S. (2022). Effect of the finite element modeling techniques on the dynamic analysis of beams. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *9*(18), 581-590.

Noori, A. R., Aslan, T. A, and 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., Aslan, T. A. and Temel, B. (2018). Damped transient response of inplane and out-of-plane loaded stepped curved rods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 28.

Noori, A. R., Aslan, T. A., and Temel, B. (2019). dairesel plakların sonlu elemanlar yöntemi ile laplace uzayında dinamik analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. , 8(1), 193-205. https://doi.org/10.28948/ngumuh.516874.

Özakça, M., Tayşi, N., and Kolcu, F. (2003). Buckling analysis and shape optimization of elastic variable thickness circular and annular plates-I. Finite element

formulation. *Engineering Structures*. 25(2), 181–192.

Pham, Q. H., Tran, T. T., and Nguyen, P. C. (2023). Dynamic response of functionally graded porous-core sandwich plates subjected to blast load using ES-MITC3 element. *Composite Structures*. 309, 116722.

Pham, Q. H., Tran, T. T., and Nguyen, P. C. (2024). Free and forced vibration analyses of unsymmetrical functionally graded porous folded sandwich plates using MITC3 elements. *Ain Shams Engineering Journal*, 102640.

Prakash, T., Singha, M. K., and Ganapathi, M. (2012). A finite element study on the large amplitude flexural vibration characteristics of FGM plates under aerodynamic load. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, *47*(5), 439-447.

Ray, M. C., and Sachade, H. M. (2006). Finite element analysis of smart functionally graded plates. *International Journal of Solids and Structures*, *43*(18-19), 5468-5484.

Reddy, J. N., Wang, C. M., and Kitipornchai, S. (1999). Axisymmetric bending of functionally graded circular and annular plates. *European Journal of Mechanics-A/Solid*, 18, 185–199.

Saidi, A. R., Rasouli, A., and Sahraee, S. (2009). Axisymmetric bending and buckling analysis of thick functionally graded circular plates using unconstrained third-order shear deformation plate theory. *Compos Struct* 2009; 89, 110–119.

Salawu, S. A., Sobamowo, G. M., and Sadiq, O. M. (2020). Forced vibration analysis of isotropic thin circular plate resting on nonlinear viscoelastic foundation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *44*, 277-288.

Shafiei, N., Mirjavadi, S. S., MohaselAfshari, B., Rabby, S., and Kazemi, M. (2017). Vibration of two-dimensional imperfect functionally graded (2D-FG) porous nano-/micro-beams. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 322, 615–632.

Shariyat, M., and Asemi, K. (2014). Three-dimensional non-linear elasticity-based 3D cubic B-spline finite element shear buckling analysis of rectangular orthotropic FGM plates surrounded by elastic foundations. *Composites Part B: Engineering.* 56, 934–947 .

Sina, S. A., Navazi, H. M., and Haddadpour, H. (2009). An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams. *Materials & Design*, *30*(3), 741-747.

Spiegel, M. R,.(1965) Laplace transforms (Book). *New York: McGraw-Hill*.

Talha, M., and Singh, B. N. (2014). Stochastic perturbation-based finite element for

buckling statistics of FGM plates with uncertain material properties in thermal environments. *Composite Structures*. 108(1), 823–833.

Talha, M., and Singh, B. N.(2010). Static response and free vibration analysis of FGM plates using higher order shear deformation theory. *Applied Mathematical Modelling*. 34(12), 3991–4011.

Temel, B., and Noori, A. R. (2020). A unified solution for the vibration analysis of two-directional functionally graded axisymmetric Mindlin–Reissner plates with variable thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*. 174, 105471.

Noori, A. R., & Temel, B. (2021). A powerful numerical approach for the axisymmetric bending response of shear deformable two-directional functionally graded (2D-FG) plates with variable thickness. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(22), 6370-6387.

Tran, T. T., Pham, Q. H., and Nguyen-Thoi, T. (2020). An Edge-Based Smoothed Finite Element for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Porous (FGP) Plates on Elastic Foundation Taking into Mass (EFTIM). *Mathematical Problems in Engineering*. 1-17.

Tran, T. T., Pham. Q. H., and Nguyen-Thoi, T. (2021). Static and free vibration analyses of functionally graded porous variable-thickness plates using an edge-based smoothed finite element method. *Defence Technology*. 17(3), 971–986.

Turan, M., and Adiyaman, G. (2023). Free vibration and buckling analysis of porous two-directional functionally graded beams using a higher-order finite element model. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 1-20 https://doi.org/10.1007/s42417-023-00898-5.

Turan, M., and Adiyaman, G. (2024). Free vibration and buckling analysis of porous two-directional functionally graded beams using a higher-order finite element model. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(1), 1133-1152.

Udupa, G., Rao, S. S., and Gangadharan, K. V. (2014). Functionally Graded Composite Materials: An Overview. *Procedia Materials Science*. 5, 1291–1299.

Vasiraja, N., and Nagaraj, P. (2019). The effect of material gradient on the static and dynamic response of layered functionally graded material plate using finite element method. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 827-838.

Wattanasakulpong, N., and Eiadtrong, S. (2023). Transient Responses of Sandwich Plates with a Functionally Graded Porous Core: Jacobi–Ritz Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 23(04), 2350039

Wattanasakulpong, N., Prusty, G. B., and Kelly, D. W. (2013). Free and forced vibration analysis using improved third-order shear deformation theory for functionally graded plates under high temperature loading. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, *15*(5), 583-606.

Weiwei, X. I. A. O., Siqi, L. I. U., HUANG, X., Xiaojun, W. U., and Xusheng, Y. U. A. N. (2024). Vibration Analysis of Porous Functionally Graded Material Truncated Conical Shells in Axial Motion. *Mechanics*, 30(2), 123-134.

Weiwei, X. I. A. O., Siqi, L. I. U., HUANG, X., Xiaojun, W. U., and Xusheng, Y. U. A. N. (2024). Vibration Analysis of Porous Functionally Graded Material Truncated Conical Shells in Axial Motion. *Mechanics*, 30(2), 123-134.

Wu, D., Liu, A., Huang, Y., Huang, Y., Pi., Y., and Gao, W. (2018). Dynamic analysis of functionally graded porous structures through finite element analysis. *Engineering Structures*. 165, 287–301.

Xia, L., Wang, R., Chen, G., Asemi, K., and Tounsi, A. (2023). The finite element method for dynamics of FG porous truncated conical panels reinforced with graphene platelets based on the 3-D elasticity. *Advances in nano research* 14(4), 375-389 https://doi.org/10.12989/anr.2023.14.4.375; 10.22059/jcamech.2023.352182.784

Ye, C., and Wang, Y. Q. (2021). Nonlinear forced vibration of functionally graded graphene platelet-reinforced metal foam cylindrical shells: internal resonances. *Nonlinear Dynamics*, *104*(3), 2051-2069.

Yoo, S. W., Lee, C. M., and Kim, D-H. (2023). Effect of functionally graded material (FGM) interlayer in metal additive manufacturing of inconel-stainless bimetallic structure by Laser Melting Deposition (LMD) and Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*. 16(2), 535.

Zafarmand, H., and Kadkhodayan, M. (2014). Three-dimensional static analysis of thick functionally graded plates using graded finite element method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 228(8), 1275–1285 .

Zhong, Z., and Yu, T. (2007). Analytical solution of a cantilever functionally graded beam. *Composites Science and Technology*, 67(3-4), 481-488.

Zhou, Z., Wang, Y., Zhang, S., Dimitri, R., Tornabene, F., and Asemi, K. (2023). Numerical study on the buckling behavior of FG porous spherical caps reinforced by graphene platelets. *Nanomaterials*, 13(7), 1205.

EKLER

EK 1: Paket Programı, Düzlemsel Elastisite Problemlerinin Statik Analizi

FORTRAN dilinde bir bilgisayar programı oluşturuldu ve statik yükleme hali için kullanıldı. Düzlem gerilme, şekil değiştirme ve eksenel dönel simetrik halleri, program tarafından ayrı ayrı göz önüne alınabilir. Her üç durum için sonlu eleman rijitlik matrisi ve yük vektörleri oluşturulurken, sistem için bant tipinde rijitlik matrisi ve yük vektörü oluşturulmaktadır. Veri dosyalarındaki veriler serbest formatta okunur ve program tüm işlemleri çift hassasiyette gerçekleştirir. **DUZES**, statik yükleme altında düzlemsel elastisite sorunlarını çözmek için sekiz düğümlü kuadratik sonlu elemanın kullanıldığı bir bilgisayar programıdır. Sonlu eleman rijitlik matrisi hesabı için gerekli integraller, bilgisayar programında Gauss sayısal integral yöntemi kullanılarak yapılabilir.

DUZES PROGRAMI İÇİN VERİ HAZIRLAMA KILAVUZU

Not: Altı çizilmiş bulunan satırlar veri dosyasına yazılmaktadır.

DATA BÖLÜMÜ NO: 1

İSİM

Çıktı dosyasında problemi tanıtmak içindir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 2 Kontrol bilgileri

NELP IDS IPSN

NELP: Toplam sonlu eleman sayısı

IDS : Toplam düğüm sayısı

IPSN = 0, Eksenel dönel simetrik hal için

= 1, Düzlem gerilme hali için

= 2, Düzlem şekil değiştirme hali için, olarak verilmelidir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 3 Malzeme bilgileri

MCS

ID ELAS(ID) RO(ID) ANU(ID) TP(ID) (ID =1,MCS)

MCS	: Malzeme çeşidi sayısı
ID	: Malzeme çeşidi no.
ELAS (ID)	: Elastisite modülü
RO (ID)	: Kütlesel yoğunluk (Ağırlık yükünden çözüm yapılcaksa)
ANU (ID)	: Poisson oranı
TP (ID)	: Kalınlık

Not : Yukarıdaki bilgiler malzeme çeşidi sayısı kadar alt alta verilmelidir!

DATA BÖLÜMÜ NO: 4 Sınır şartları

ILK IU IV (Sınır şartları tek tek tanımlanacaksa)

ve/veya

ILK ISON IART IU IV (Türetme yapılacaksa)

:

ILK	: İlk düğüm no.
ISON	: Son düğüm no.
IART	: Düğüm noktaları artım miktarı
IU	: Yatay yer değiştirme (Serbest ise, IU=1, tutuluyor ise, IU=0)
IV	: Viskoelastik düşey yer değiştirme (Serbest ise, IV=1, tutuluyor ise, IV=0)
:	: Yukarıdaki bilgiler sınır şartları bitinceye kadar tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

Not : Önce tüm düğümlerde deplasmanlar serbestmiş gibi anımlanmalı ve sonra da tutulan düğümler tarif edilmelidir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 5 Eşleştirme bilgileri (Eşleştirme gerekmiyorsa bu bölümü atlayınız!)

ILK IDU IDV (Eşleştirmeler tek tek tarif edilecekse)

ve/veya

ILK ISON IART IDU IDV (Türetme yapılacaksa)

:

ILK : İlk düğüm no.

ISON : Son düğüm no.

IART : Düğüm noktaları artım miktarı

IDU : Yatay yer değiştirme için eşleştirilmek istenen düğüm no.

IDV : Düşey yer değiştirme için eşleştirilmek istenen düğüm no.

: : Yukarıdaki satır, eşleştirme bilgileri bitinceye kadar tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

Not : Eşleştirilmesi gerekmeyen doğrultudaki deplasmana 0 (sıfır) yazılmalıdır!

DATA BÖLÜMÜ NO: 6 SONLU eleman bilgileri

Sonlu elemanların tarifleri bir satırda bulunan bilgi sayısına göre yapılmaktadır.

6a) Mevcut satırda 14 bilgi varsa (türetme yapılacaksa):

ILK NBS N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 NBX NBY ML MG

6b) Mevcut satırda 6 bilgi varsa (malzemesi geometrisi farklı olan bölge için yeniden türetme):

ILK NBS NBX NBY ML MG

6c) Mevcut satırda 11 bilgi varsa (sonlu elemanlar tek tek tanımlanacaksa):

ILK N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 ML MG

:

şeklinde yapılmalıdır.

ILK	: Bölgedeki ilk eleman no.
NBS	: Bölgedeki son eleman no.
N1,...,N8	: Sonlu eleman tarifi (Şekil ….. ye veya Şekil …….. ye bakınız).
NBX	: x- yönünde bölme sayısı
NBY	: y- yönünde bölme sayısı
ML	: Malzeme çeşidi no.
MG	: Geometri no. (Sonlu elemanlarda, MG, 1 verilmelidir. MG=-1 verilirse çözüm bölgesinde bulunan boşluklar çıkarılmış veya bu boşlukların sistem matrisine katkısı yapılmamış olur. Boşluk içinde olan bölgedeki düğümlerin deplasmanları da tutulu olarak tanımlanmalıdır!)
:	: Sonlu elemanların tarifleri ile ilgili bilgiler bitinceye kadar yukarıdaki satırlar (6a, 6b ve 6c nin sırası değişebilir) tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

DATA BÖLÜMÜ NO: 7 Düğüm koordinatları satırı

NDAIRE NDOGRU

7a) Eğer NDAIRE=0 ise, bu kısmı atlayınız!

Dairesel bir bölge üzerinde türetme ile koordinat rarifi:

ILK NBS NBX NBY XAI YAI XAS YAS XUS YUS XUI YUI

Dairesel bir çizgi üzerinde koordinat tarifi (tek tek yada türetme ile):

I X Y

I X Y KR

:

7b) Eğer NDOGRU=0 ise, bu kısmı atlayınız!

ILK NBS NBX NBY XAI YAI XAS YAS XUS YUS XUI YUI

Dikdörtgen bir bölge üzerinde türetme ile koordinat tarifi:

Doğrusal bir çizgi üzerinde koordinat tarifi (tek tek yada türetme ile):

I X Y

I X Y KR

:

NDAIRE : Dairesel koordinat tarifleri yapılacaksa NDAIRE=1, yapılmayacaksa, NDAIRE=0 yazılmalı

NDOGRU : Doğrusal koordinat tarifleri yapılacaksa NDOGRU=1, yapılmayacaksa, NDOGRU=0 yazılmalı

Dairesel veya doğrusal bölgede koordinat türetimi için değişkenler:

ILK	: Türetme yapılacak bölgede ilk elemanın no. (bölge içinde sol alt köşede)
NBS	: Türetme yapılacak bölgede son elemanın no. (bölge içinde sağ üst köşede)
NBX	: Sağa doğru bölme sayısı
NBY	: İleriye doğru bölme sayısı
XAI	: Bölgede sol alt köşenin x- koordinatı
YAI	: Bölgede sol alt köşenin y- koordinatı
XAS	: Bölgede sağ alt köşenin x- koordinatı
YAS	: Bölgede sağ alt köşenin y- koordinatı
XUS	: Bölgede sağ üst köşenin x- koordinatı
YUS	: Bölgede sağ üst köşenin y- koordinatı
XUI	: Bölgede sol üst köşenin x- koordinatı
YUI	: Bölgede sol üst köşenin y- koordinatı

Çizgisel türetme halinde koordinat tarifi için değişkenler:

I	: Düğüm no.
X	: Düğümün x- koordinatı
Y	: Düğümün y- koordinatı
KR	: Türetme olması halinde düğüm no. artım miktarı
Not	: Türetme yapılması halinde KR değişkeni bulunmayan satır ilk düğüm nosunu, diğeri son düğüm nosunu göstermektedir.
:	: Koordinat tarifleri ile ilgili bilgiler bitinceye kadar yukarıdaki satırlar (sırası değişebilir) tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, "**:**" konmalıdır !

DATA BÖLÜMÜ NO: 8 Arananlar(istenenler) ile ilgili bilgiler

ILKDN ISONDN IDART

IELN ISONEL IEART IG

Aranan deplasmanlar ile ilgili değişkenler:

ILKDN	: İlk düğüm no.
ISONDN	: Son düğüm no.
IDART	: Düğüm noktaları artım miktarı
	Aranan gerilmeler ile ilgili değişkenler:
IELN	: İlk eleman no.
ISONEL	: Son eleman no.
IEART	: Eleman noktaları artım miktarı
IG	: Gerilmeler, elemanların düğüm noktalarında hesaplanacaksa IG=1, Gauss noktalarında hesaplanacaksa IG=0 yazılmalıdır.

DATA BÖLÜMÜ NO: 9 Yükleme bilgileri

NTYS NYPS

NTYS =0 ise, bu satırı atlayınız!

ITYDN (I) XFX (I) XFY (I) (I=1,NTYS)

NYPS =0 ise, bu satırı atlayınız!

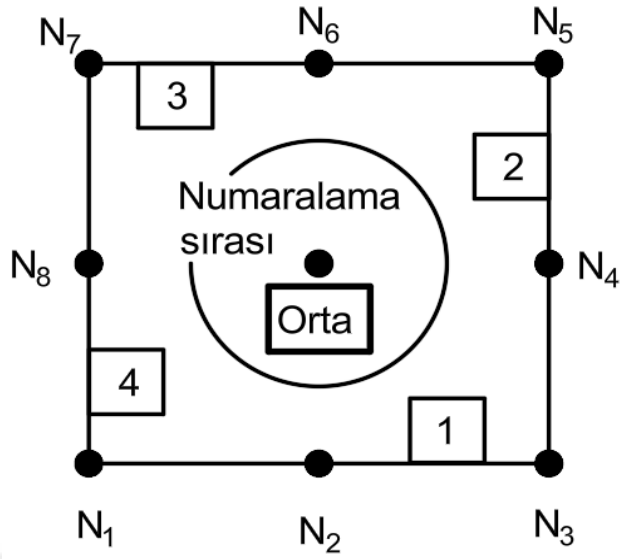
IYPN(ID) IKN(ID) FN(ID,1) FN(ID,2) FN(ID,3) FN(ID,4) FN(ID,5) FN(ID,6)

(ID=1,NYPS)

NTYS	: Tekil yük bulunan düğüm sayısı
NYPS	: Kenarında yayılı yük bulunan sonlu eleman sayısı
	Düğümlere etkiyen tekil yük durumu:
ITYDN(I)	: Tekil yük bulunan düğüm no.
XFX(I)	: Tekil yükün yatay bileşeni
XFY(I)	: Tekil yükün viskoelastik düşey bileşeni

Sonlu eleman kenarlarındaki yayılı yük durumu:

IYPN(ID)	: Kenarında yayılı yük bulunan sonlu eleman no.
IKN(ID)	: Yayılı yük bulunan sonlu elemanın kenar numarası (Şekil EK1.1a bakınız.).
FN(ID,1)	: Elemanda yayılı yük (gerilme) bulunan kenara ait
FN(ID,2)	düğümlerdeki yükün (gerilmenin) normal bileşenleridir. Bunlar,
FN(ID,3)	saat akrebi tersi yönünde bir sıra ile tarif edilmeli ve yükün normal bileşenlerinin etkime yönü eleman kenarına doğru ise, "+" alınmalıdır.
FN(ID,4)	: Elemanda yayılı yük (gerilme) bulunan kenara ait
FN(ID,5)	düğümlerdeki yükün (gerilmenin) teğetsel bileşenleridir.
FN(ID,6)	Bunlar, saat akrebi tersi yönünde bir sıra ile tarif edilmeli ve yükün teğetsel bileşenlerinin etkime yönü eleman numaralama yönünde ise, işareti "+" alınmalıdır.



Şekil Ek-1.1 Sonlu elemanda düğüm numaralama sırası

Gerilme bileşkeleri, çıktılarda tablodaki sıraya göre verilmektedir (Şekil Ek-1.1 bakınız).

	Düzlem gerilme/şekil değiştirme hali			Eksenel dönel simetrik hali			
Düğüm no:	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	σ_θ	τ_{xy}
N_1	1	2	3	1	2	3	4
N_8	4	5	6	5	6	7	8
N_7	7	8	9	9	10	11	12
N_2	10	11	12	13	14	15	16
Orta noktada	13	14	15	17	18	19	20
N_6	16	17	18	21	22	23	24
N_3	19	20	21	25	26	27	28
N_4	22	23	24	29	30	31	32
N_5	25	26	27	33	34	35	36

Ek 2: Paket Programı: Düzlemsel Elastisite Problemlerinin Dinamik Analizi

FORTRAN dilinde dinamik yükleme hali için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Düzlem gerilme, şekil değiştirme ve eksenel dönel simetrik halleri program tarafından

ayrı ayrı göz önüne alınabilir. Her üç durum için sonlu eleman rijitlik matrisi ve yük vektörleri oluşturulurken, sistem için bant tipinde rijitlik matrisi ve yük vektörü oluşturulmaktadır. Veri dosyalarındaki veriler serbest formatta okunur ve program tüm işlemleri çift hassasiyette gerçekleştirir.

DUZESV, zamanla değişen dinamik yükleme durumunda düzlemsel elastisite sorunlarını çözmek için sekiz düğümlü kuadratik sonlu elemanın kullanıldığı bir bilgisayar programıdır. "Gauss Quadrature" sayısal integral yöntemi, Eleman rijitliği ve kütle matrislerinin hesabı için gerekli integralleri yapmak için kullanılır. Laplace dönüşüm uzayında çözümler yapılmaktadır. Bir malzemenin bünyesi homojen, izotrop, lineer elastik veya viskoelastiktir. Elastikviskoelastik analoji, viskoelastik malzemelerin sabitlerini Laplace uzayında kompleks karşıtları ile değiştirir. Durbin'in sayısal ters Laplace dönüşüm tekniği kullanılarak elde edilen çözümler zaman uzayına dönüştürülür.

DUZES PROGRAMI İÇİN VERİ HAZIRLAMA KILAVUZU

Not: Altı çizilmiş bulunan satırlar veri dosyasına yazılmaktadır.

DATA BÖLÜMÜ NO: 1

İSİM

Çıktı dosyasında problemi tanıtmak içindir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 2 Kontrol bilgileri

NELP IDS IPSN

NELP: Toplam sonlu eleman sayısı

IDS : Toplam düğüm sayısı

IPSN = 0, Eksenel dönel simetrik hal için

= 1, Düzlem gerilme hali için

= 2, Düzlem şekil değiştirme hali için, olarak verilmelidir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 3 Malzeme bilgileri

MCS

ID ELAS(ID) RO(ID) ANU(ID) TP(ID) (ID =1,MCS)

MCS	: Malzeme çeşidi sayısı
ID	: Malzeme çeşidi no.
ELAS (ID)	: Elastisite modülü
RO (ID)	: Kütlesel yoğunluk (Ağırlık yükünden çözüm yapılcaksa)
ANU (ID)	: Poisson oranı
TP (ID)	: Kalınlık
SV(ID)	: Viskoz sönum oranı

Not : Yukarıdaki bilgiler malzeme çeşidi sayısı kadar alt alta verilmelidir!

DATA BÖLÜMÜ NO: 4 Sınır şartları

ILK IU IV (Sınır şartları tek tek tanımlanacaksa)

ve/veya

ILK ISON IART IU IV (Türetme yapılacaksa)

:

ILK	: İlk düğüm no.
ISON	: Son düğüm no.
IART	: Düğüm noktaları artım miktarı
IU	: Yatay yer değiştirme (Serbest ise, IU=1, tutuluyor ise, IU=0)
IV	: Düşey yer değiştirme (Serbest ise, IV=1, tutuluyor ise, IV=0)
:	: Yukarıdaki bilgiler sınır şartları bitinceye kadar tekrarlanmalı

ve

bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

Not : Önce tüm düğümlerde deplasmanlar serbestmiş gibi anımlanmalı ve sonra da tutulan düğümler tarif edilmelidir.

DATA BÖLÜMÜ NO: 5 Eşleştirme bilgileri (Eşleştirme gerekmiyorsa bu bölümü atlayınız!)

ILK IDU IDV (Eşleştirmeler tek tek tarif edilecekse)

ve/veya

ILK ISON IART IDU IDV (Türetme yapılacaksa)

:

ILK : İlk düğüm no.

ISON : Son düğüm no.

IART : Düğüm noktaları artım miktarı

IDU : Yatay yer değiştirme için eşleştirilmek istenen düğüm no.

IDV : Düşey yer değiştirme için eşleştirilmek istenen düğüm no.

: : Yukarıdaki satır, eşleştirme bilgileri bitinceye kadar tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

Not : Eşleştirilmesi gerekmeyen doğrultudaki deplasmana 0 (sıfır) yazılmalıdır!

DATA BÖLÜMÜ NO: 6 SONLU eleman bilgileri

Sonlu elemanların tarifleri bir satırda bulunan bilgi sayısına göre yapılmaktadır.

6a) Mevcut satırda 14 bilgi varsa (türetme yapılacaksa):

ILK NBS N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 NBX NBY ML MG

6b) Mevcut satırda 6 bilgi varsa (malzemesi geometrisi farklı olan bölge için yeniden türetme):

ILK NBS NBX NBY ML MG

6c) Mevcut satırda 11 bilgi varsa (sonlu elemanlar tek tek tanımlanacaksa):

ILK N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 ML MG

:

şeklinde yapılmalıdır.

ILK	: Bölgedeki ilk eleman no.
NBS	: Bölgedeki son eleman no.
N1,...,N8	: Sonlu eleman tarifi (Şekil ….. ye veya Şekil …….. ye bakınız).
NBX	: x- yönünde bölme sayısı
NBY	: y- yönünde bölme sayısı
ML	: Malzeme çeşidi no.
MG	: Geometri no. (Sonlu elemanlarda, MG, 1 verilmelidir. MG=-1 verilirse çözüm bölgesinde bulunan boşluklar çıkarılmış veya bu boşlukların sistem matrisine katkısı yapılmamış olur. Boşluk içinde olan bölgedeki düğümlerin deplasmanları da tutulu olarak tanımlanmalıdır!)
:	: Sonlu elemanların tarifleri ile ilgili bilgiler bitinceye kadar yukarıdaki satırlar (6a, 6b ve 6c nin sırası değişebilir) tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, ":" konmalıdır!

DATA BÖLÜMÜ NO: 7 Düğüm koordinatları satırı

NDAIRE NDOGRU

7a) Eğer NDAIRE=0 ise, bu kısmı atlayınız!

Dairesel bir bölge üzerinde türetme ile koordinat rarifi:

ILK NBS NBX NBY XAI YAI XAS YAS XUS YUS XUI YUI

Dairesel bir çizgi üzerinde koordinat tarifi (tek tek yada türetme ile):

I X Y

I X Y KR

:

7b) Eğer NDOGRU=0 ise, bu kısmı atlayınız!

ILK NBS NBX NBY XAI YAI XAS YAS XUS YUS XUI YUI

Dikdörtgen bir bölge üzerinde türetme ile koordinat tarifi:

Doğrusal bir çizgi üzerinde koordinat tarifi (tek tek yada türetme ile):

I X Y

I X Y KR

:

NDAIRE : Dairesel koordinat tarifleri yapılacaksa NDAIRE=1, yapılmayacaksa, NDAIRE=0 yazılmalı

NDOGRU : Doğrusal koordinat tarifleri yapılacaksa NDOGRU=1, yapılmayacaksa, NDOGRU=0 yazılmalı

Dairesel veya doğrusal bölgede koordinat türetimi için değişkenler:

ILK	: Türetme yapılacak bölgede ilk elemanın no. (bölge içinde sol alt köşede)
NBS	: Türetme yapılacak bölgede son elemanın no. (bölge içinde sağ üst köşede)
NBX	: Sağa doğru bölme sayısı
NBY	: İleriye doğru bölme sayısı
XAI	: Bölgede sol alt köşenin x- koordinatı
YAI	: Bölgede sol alt köşenin y- koordinatı
XAS	: Bölgede sağ alt köşenin x- koordinatı
YAS	: Bölgede sağ alt köşenin y- koordinatı
XUS	: Bölgede sağ üst köşenin x- koordinatı
YUS	: Bölgede sağ üst köşenin y- koordinatı
XUI	: Bölgede sol üst köşenin x- koordinatı
YUI	: Bölgede sol üst köşenin y- koordinatı

Çizgisel türetme halinde koordinat tarifi için değişkenler:

I	: Düğüm no.
X	: Düğümün x- koordinatı
Y	: Düğümün y- koordinatı
KR	: Türetme olması halinde düğüm no. artım miktarı
Not	: Türetme yapılması halinde KR değişkeni bulunmayan satır ilk düğüm nosunu, diğeri son düğüm nosunu göstermektedir.
:	: Koordinat tarifleri ile ilgili bilgiler bitinceye kadar yukarıdaki satırlar (sırası değişebilir) tekrarlanmalı ve bittikten sonra da bir alt satırın başına, "**:**" konmalıdır !

DATA BÖLÜMÜ NO: 8 Arananlar(istenenler) ile ilgili bilgiler

NCDS

IDN

IPSAY NUC IG

IELP(IP) KUC(IP,I) (IP=1,IPSAY), (I=1,NUC)

NCDS	: Çıktı deplasmanları için düğüm sayısı
IDN	: Düğüm no/noktalarıarı, alt alta yazılmalı!
IPSAY	: Gerilme hesabı için sonlu eleman sayısı
NUC	: Her bir elemanda hesaplanması istenilen gerilme bileşkesi sayısı
IG	: Gerilmeler, elemanların düğüm noktalarında hesaplanacaksa IG=1, Gauss noktalarında hesaplanacaksa IG=0 yazılmalıdır.
IELP(IP)	: Gerilme hesabı istenilen eleman no/noktalarıarı
KUC(IP,I)	: İlgili elemanda gerilme bileşkesi noktalarıarı

DATA BÖLÜMÜ NO: 9 Yükleme bilgileri

NTYS NYPS

NTYS =0 ise, bu satırı atlayınız!

ITYDN (I) XFX (I) XFY (I) (I=1,NTYS)

NYPS =0 ise, bu satırı atlayınız!

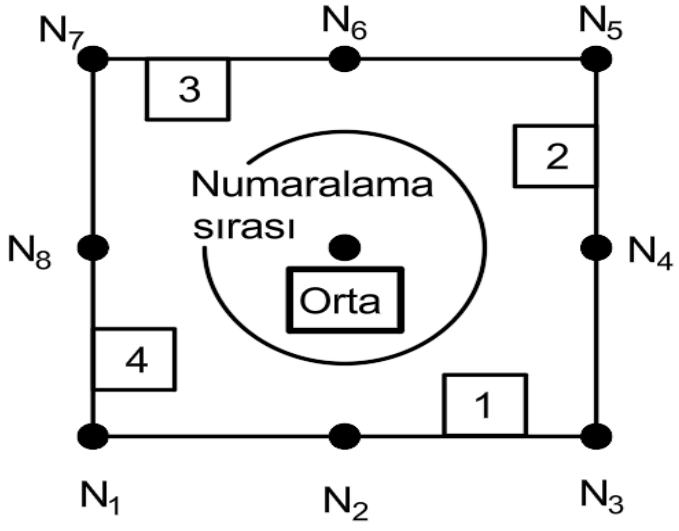
IYPN(ID) IKN(ID) FN(ID,1) FN(ID,2) FN(ID,3) FN(ID,4) FN(ID,5) FN(ID,6)

(ID=1,NYPS)

NTYS	: Tekil yük bulunan düğüm sayısı
NYPS	: Kenarında yayılı yük bulunan sonlu eleman sayısı
	Düğümlere etkiyen tekil yük durumu:
ITYDN(I)	: Tekil yük bulunan düğüm no.
XFX(I)	: Tekil yükün yatay bileşeni
XFY(I)	: Tekil yükün viskoelastik düşey bileşeni

Sonlu eleman kenarlarındaki yayılı yük durumu:

IYPN(ID)	: Kenarında yayılı yük bulunan sonlu eleman no.
IKN(ID)	: Yayılı yük bulunan sonlu elemanın kenar numarası (Şekil 2.1a bakınız.)
FN(ID,1)	: Elemanda yayılı yük (gerilme) bulunan kenara ait
FN(ID,2)	düğümlerdeki yükün (gerilmenin) normal bileşenleridir. Bunlar,
FN(ID,3)	saat akrebi tersi yönünde bir sıra ile tarif edilmeli ve yükün normal bileşenlerinin etkime yönü eleman kenarına doğru ise, "+" alınmalıdır.
FN(ID,4)	: Elemanda yayılı yük (gerilme) bulunan kenara ait
FN(ID,5)	düğümlerdeki yükün (gerilmenin) teğetsel bileşenleridir.
FN(ID,6)	Bunlar, saat akrebi tersi yönünde bir sıra ile tarif edilmeli ve yükün teğetsel bileşenlerinin etkime yönü eleman numaralama yönünde ise, işareti "+" alınmalıdır.



Şekil Ek-2.1 Sonlu elemanda düğüm numaralama sırası

Eleman düğüm noktalarında hangi gerilme bileşke/bileşkeleri hesaplanacaksa, Şekil

Ek-2.1 deki düğüm numaralarına göre aşağıdaki tablodan seçilmelidir.

	Düzlem gerilme/şekil değiştirme hali			Eksenel dönel simetrik hali			
Düğüm no:	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	σ_θ	τ_{xy}
N_1	1	2	3	1	2	3	4
N_8	4	5	6	5	6	7	8
N_7	7	8	9	9	10	11	12
N_2	10	11	12	13	14	15	16
Orta noktada	13	14	15	17	18	19	20
N_6	16	17	18	21	22	23	24
N_3	19	20	21	25	26	27	28
N_4	22	23	24	29	30	31	32
N_5	25	26	27	33	34	35	36

DATA BÖLÜMÜ NO: 10 Dinamik yükler ile ilgili bilgiler bölümü

IYUKT

IYUKT=1,2,3,4,5,6 ise, aşağıdaki değişkenleri yazınız.

(IYUKT=7 ise, bu satırı atlayınız!)

TSUR TSON

IYUKT=7 ise, aşağıdaki değişkenleri yazınız.

(IYUKT=1,2,3,4,5,6 ise, bu satırları atlayınız!)

NG

T(I) F(I) (I=1,NG)

MT aT

Değişkenlerin tarifleri şöyledir:

IYUKT :Yükleme tipleri, IYUKT=1,2,3,4,5,6 olması hallerinde aşağıdaki Tabloda

ilk 6 satırda, iki zaman aralığında doğrusal değişen yükleme için, IYUKT=7 olması halinde, Tabloda 7. satırda verilmektedir.

TSUR : İmpulsif şeklindeki yüklemelerde, impulsif yükün bittiği zamandır.

TSON : Toplam işlem süresidir.

NG : Toplam işlem süresi içinde, iki nokta arasında doğrusal değişen yüklemede nokta sayısı

T(I) F(I) **:** Zaman değeri ve bu zamana karşılık gelen yükün şiddetidir. Bu satır NG Sayısı kadar alt alta yazılmalıdır!

MT : Terim sayısı olan 2^M ifadesindeki M dir.

aT : Ters Laplace dönüşümü için, $5. \leq aT \leq 10.$ aralığında bir parametredir.
Bu çalışmada genellikle aT=6 alınmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Ad Soyadı:	Silda Ghazi Mohammed DOORI
Uyruk :	Iraklı

EĞİTİM

Derece	Ad/İl/ İlçe	Bitirme Yılı
Lise :	Kerkük kız lisesi	2002-2003
Üniversite :	Teknoloji Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü-Yapı Bilimdalı/ Bağhdat	2006-2007
YüksekLisans :	Selçuk Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ İnşaat Mühendisliği Bölümü-Geoteknik Bilim Dalı	2019-2020
Doktora :	İstanbul gelişim üniversitesi/ Mimarlik ve Mühendislik Fakültesi/ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	2020-2024

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2009-2010	Sulamaniyah Senter İnşaat Firması	İnşaat Mühendisi
2011-2013	Teknik Üniversitesi/ Kerkük	İnşaat Mühendisi

2011-2013	Teknik Üniversitesi/ Kerkük	Öğretim görevlisi
2014-2016	El Kalem El Camia Üniversitesi	Öğretim görevlisi

UZMANLIK ALANI : Geoteknik Mühendisliği – Yapı mekaniği – Depram alanı

YABANCI DİLLER : İngilizce, Arapça, Türkmence

YAYINLAR

Tip	Kurum	Adı	Yıl
Sempozyum	ISESER (Uluslararası Çevre Bilimi ve Mühendisliği Araştırmaları Sempozyumu) / Konya/ Türkiye	Plastik Limit Belirlemesinde Operatör Etkisinin Araştirilmasi	2019
Yüksek Lisans Tez	Selçuk Üniversitesi / Konya / Türkiye	Plastik limit belirleme yöntemlerinin karşılaştırması ve yeni bir yaklaşım geliştirilmesi	2020
Makale	İstanbul gelişim üniversitesi	Finite element approach for the bending analysis of castellated steel beams with various web openings	2021
Makale	İstanbul gelişim üniversitesi	Static Response of Functionally Graded Porous Circular Plates via Finite Element Method	2024

Makale	İstanbul gelişim üniversitesi	UNDAMPED FORCED VIBRATION ANALYSIS OF CASTELLATED STEEL BEAM WITH CIRCULAR, SQUARE AND PENTAGONAL WEB OPENINGS	2024