

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**WINKLER ELASTİK ZEMİNE OTURAN VE KAYMA  
GERİLMELERİ İÇEREN HOMOJEN OLMAYAN  
ORTOTROPİK DİKDÖRTGEN PLAKLARIN STABİLİTESİ**

**Ali Nadi KAPLAN**

**Danışman  
Prof. Dr. Abdullah AVEY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2015**

© 2015 [Ali Nadi KAPLAN]

## TEZ ONAYI

**Ali Nadi KAPLAN** tarafından hazırlanan "**Winkler Elastik Zemine Oturan ve Kayma Gerilmeleri İçeren Homojen Olmayan Ortotropik Dikdörtgen Plakların Stabilitesi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**                      **Prof. Dr. Abdullah AVEY**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**Jüri Üyesi**                      **Doç. Dr. Fethi KADIOĞLU**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyesi**                      **Doç. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**Enstitü Müdür V.**    **Doç. Dr. Yasin TUNCER**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Ali Nadi KAPLAN**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                         | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                                                                       | i     |
| ÖZET .....                                                                                                                                              | ii    |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                          | iii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                                                                          | iv    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                                                                                   | v     |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                                                                                 | vii   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                                                                                    | ix    |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                                                          | 1     |
| 1.1. Tezin Önemi .....                                                                                                                                  | 2     |
| 1.2. Tezin Amacı .....                                                                                                                                  | 5     |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....                                                                                                                                | 7     |
| 2.1. Elastik Zemin Modelleri İle İlgili Çalışma Özetleri .....                                                                                          | 7     |
| 2.2. Homojen Olmayan Yapı Elemanlarının KPT Çerçevesinde Davranışları İle İlgili Çalışmaların Özetleri .....                                            | 10    |
| 2.3. Kayma Deformasyonlu Plak Teorisi İle İlgili Çalışmaların Özetleri .....                                                                            | 14    |
| 2.4. Homojen Ortotrop Plakların KDPT Çerçevesinde Stabilite ve Titreşim Davranışları İle İlgili Çalışmaların Özetleri .....                             | 20    |
| 2.5. Homojen Olmayan İzotrop veya Ortotrop Plakların KDPT Çerçevesinde Stabilite ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri .....           | 25    |
| 2.6. Elastik Zemine Oturan Homojen Ortotrop Plakların KPT ve KDPT Çerçevesindeki Stabilite ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri ..... | 32    |
| 2.7. Elastik Zemine Oturan Homojen Olmayan Plakların KPT ve KDPT Çerçevesinde Stabilite ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri .....    | 35    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                                                                                             | 43    |
| 3.1. Problemin Formülasyonu .....                                                                                                                       | 43    |
| 3.2. Elastik Zemine Oturan Homojen Olmayan Ortotrop Plağa Etkiyen Kuvvetlerin Modellenmesi .....                                                        | 44    |
| 3.3. Homojen Olmayan Ortotrop Malzeme Özelliklerinin Analitik Modellenmesi .....                                                                        | 45    |
| 3.4. KDPT Çerçevesinde Homojen Olmayan Ortotrop Plakların Temel Bağınıtlarının Oluşturulması .....                                                      | 51    |
| 3.5. KDPT Çerçevesinde Temel Denklemlerin Türetilmesi .....                                                                                             | 59    |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....                                                                                                                            | 62    |
| 4.1. Temel Denklemlerin Çözümü .....                                                                                                                    | 62    |
| 4.2. Karşılaştırmalar .....                                                                                                                             | 68    |
| 4.3. Sayısal Hesaplar ve Analiz .....                                                                                                                   | 72    |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....                                                                                                                           | 126   |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                                         | 132   |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                          | 140   |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### WINKLER ELASTİK ZEMİNE OTURAN VE KAYMA GERİLMELERİ İÇEREN HOMOJEN OLMAYAN ORTOTROPİK DİKDÖRTGEN PLAKLARIN STABİLİTESİ

Ali Nadi KAPLAN

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

Tez çalışmasında, Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın basınç yükleri etkisi altında stabilite problemi KDPT çerçevesinde ele alınmaktadır. Önce, Winkler elastik zemin etkisi dikkate alınarak homojen olmayan ortotrop plağın temel bağıntı ve stabilite denklemleri KDPT çerçevesinde türetilmektedir. Homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın tüm kenarları basit mesnetli sınır koşullarına tabi tutulmaktadır. Söz konusu sınır koşulları altında stabilite problemi çözülerek, Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın kritik yük ifadeleri KDPT ve KPT temelinde bulunmaktadır. Kritik yüklerin minimum değerini bulmak için elde edilen ifadeler dalga sayılarına göre minimize edilmektedir. Bu ifadelerden, Winkler elastik zemine oturan, homojen ortotrop dikdörtgen plakların KDPT ve KPT temelinde kritik yük ifadeleri özel olarak elde edilmektedir. Ayrıca, bu ifadelerden elastik zemin etkisi dikkate alınmayan homojen olmayan ve homojen ortotrop dikdörtgen plaklar için kritik yük ifadeleri, KDPT ve KPT çerçevesinde özel olarak elde edilmektedir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, literatürdeki uygun çözümlerle karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmektedir. Son olarak kayma gerilmelerinin, homojen olmamanın, malzeme ortotropisinin, plağın değişik geometrik ölçülerinin ve Winkler elastik zeminin kritik yüklere etkileri detaylı olarak incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Homojen olmayan malzeme, ortotrop dikdörtgen plak, Winkler elastik zemini, kayma deformasyonlu plak teorisi, basınç yükleri, kritik yükler.

2015, 141 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **STABILITY OF HETEROGENEOUS ORTHOTROPIC RECTANGULAR PLATES INCLUDING SHEAR STRESSES AND RESTING ON THE WINKLER ELASTIC FOUNDATION**

**Ali Nadi KAPLAN**

**Suleyman Demirel University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AVEY**

In this thesis, the stability of heterogeneous orthotropic rectangular plates subjected to in-plane loads and resting on the Winkler elastic foundation are discussed on the basis of shear deformation plate theory (SDPT). First, the basic equations of heterogeneous orthotropic rectangular plates on the Winkler elastic foundation are derived in the framework of the SDPT. All edges of the heterogeneous orthotropic rectangular plates under simply supported boundary conditions. The basic equations are solved and the expressions for critical loads of heterogeneous orthotropic rectangular plates resting on the Winkler elastic foundation are obtained in the framework of SDPT and classical plate theory (CPT). To find the minimum values of the critical loads these expressions are minimized according to the wave numbers. In a special case, the expressions for critical loads of homogeneous orthotropic rectangular plates on the Winkler elastic foundation are obtained on the basis of SDPT and CPT. Furthermore; the expressions for critical loads of heterogeneous and homogeneous orthotropic rectangular plates without an elastic foundation are obtained in the framework of SDPT and CPT. For the accuracy of this study, the current results are compared with the results in the literature. Finally, the effects of shear stresses, Winkler elastic foundation, heterogeneity, orthotropy and plate characteristics on the critical loads are studied in detail.

**Keywords:** Heterogeneous material, orthotropic rectangular plates, Winkler elastic foundation, shear deformation plate theory, compressive loads, critical loads.

**2015, 141 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasını sürdürdüğüm dönemde, bana daima destek olan, çalışma disiplini aşılayan, fedakârlıktan kaçınmayan, yapıcı öneri ve düzenlemeleriyle çalışmanın içerik ve sunumundaki zenginliğine büyük katkıda bulunan tez yöneticisi, saygıdeğer danışman hocam, Sayın **Prof. Dr. Abdullah AVEY**'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

113M399 No'lu TÜBİTAK projesinde vermiş oldukları burs destekleri için TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ali Nadi KAPLAN  
ISPARTA, 2015

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1.1. Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak ve koordinat sistemi .....                                                                                                                                                   | 43    |
| Şekil 3.2.1. Winkler zemine oturan dikdörtgen plak x eksenine doğrultusunda $P_1$ üniform basınç yükü etkisi altında .....                                                                                                                               | 44    |
| Şekil 3.2.2. Winkler zemine oturan dikdörtgen plak x ve y eksenleri doğrultusunda üniform basınç yükleri etkisi altında.....                                                                                                                             | 45    |
| Şekil 3.3.1. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = 0.5$ için üstel olarak değişimi .....                                                                                                                | 47    |
| Şekil 3.3.2. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = -0.5$ için üstel olarak değişimi .....                                                                                                               | 48    |
| Şekil 3.3.3. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = 0.5$ için doğrusal değişimi.....                                                                                                                     | 48    |
| Şekil 3.3.4. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = -0.5$ için doğrusal değişimi.....                                                                                                                    | 49    |
| Şekil 3.3.5. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = 0.5$ için kuadratik değişimi .....                                                                                                                   | 49    |
| Şekil 3.3.6. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = -0.5$ için kuadratik değişimi.....                                                                                                                   | 50    |
| Şekil 3.3.7. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = 0.5$ için kübik değişimi .....                                                                                                                       | 50    |
| Şekil 3.3.8. Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin $\mu_1 = -0.5$ için kübik değişimi.....                                                                                                                       | 51    |
| Şekil 3.4.1. Dikdörtgen plakta koordinat sistemi ve notasyonlar .....                                                                                                                                                                                    | 53    |
| Şekil 3.4.2. Dikdörtgen plaktaki kuvvet ve moment bileşenleri .....                                                                                                                                                                                      | 55    |
| Şekil 4.1.1. Basit mesnetli dikdörtgen plak eksenel basınç yükleri etkisi altında.....                                                                                                                                                                   | 62    |
| Şekil 4.3.1. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/h$ oranına bağlı dağılımı .....             | 81    |
| Şekil 4.3.2. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/h$ oranına bağlı dağılımı .....             | 82    |
| Şekil 4.3.3. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/h$ oranına bağlı dağılımı... | 83    |
| Şekil 4.3.4. Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların tek eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/b$ oranına bağlı değişimi.....                      | 91    |

|               |                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.3.5.  | Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/b$ oranına bağlı değişimi.....                             | 92  |
| Şekil 4.3.6.  | Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $a/b$ oranına bağlı değişimi .....             | 93  |
| Şekil 4.3.7.  | Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların tek eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $E_x/E_y$ oranına bağlı dağılımı.....                 | 102 |
| Şekil 4.3.8.  | Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $E_x/E_y$ oranına bağlı dağılımı.....                 | 103 |
| Şekil 4.3.9.  | Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin $E_x/E_y$ oranına bağlı dağılımı ..... | 104 |
| Şekil 4.3.10. | Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin $\beta_0$ değerine bağlı dağılımı .....                                   | 111 |
| Şekil 4.3.11. | KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin $\bar{k}_w$ boyutsuz zemin katsayısına bağlı dağılımı .....                                                                  | 118 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                                                                         | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 4.1. Zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen izotrop plaklar için KDPT temelinde tek eksenli boyutsuz kritik burkulma yükü ( $\bar{P}_{1kr}^{KDPT}$ ) değerlerinin Akhavan vd. (2009) çalışma sonuçları ile karşılaştırılması.....                           | 69    |
| Çizelge 4.2. Winkler elastik zemine oturan ve zemin etkisi dikkate alınmayan, ince, homojen, kare plağın kritik burkulma yükünün $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} [= P_{1krw}^{KDPT} a^2 / (D_0 \pi^2)]$ karşılaştırması.....                                                     | 71    |
| Çizelge 4.3. Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen ortotrop plaklar için KDPT ve KPT temelinde, tek eksenli boyutsuz kritik burkulma yükü ( $\bar{P}_{1kr}^{KDPT}$ ) değerlerinin Ambartsumyan (1964) çalışma sonuçları ile karşılaştırılması.....                | 72    |
| Çizelge 4.4. Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $a/h$ oranına bağlı dağılımı.....           | 79    |
| Çizelge 4.5. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $a/h$ oranına bağlı dağılımı.....     | 80    |
| Çizelge 4.6. Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $a/b$ oranına bağlı değişimi .....          | 89    |
| Çizelge 4.7. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $a/b$ oranına bağlı değişimi .....    | 90    |
| Çizelge 4.8. Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $E_x/E_y$ oranına bağlı dağılımı.....       | 100   |
| Çizelge 4.9. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $E_x/E_y$ oranına bağlı dağılımı..... | 101   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.10. Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen dalga sayılarının $\beta_0$ değerine bağlı değişimi .....      | 110 |
| Çizelge 4.11. KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının $\bar{k}_w$ boyutsuz Winkler zemin katsayısına bağlı dağılımı.....                                | 117 |
| Çizelge 4.12. Zemin etkisi dikkate alınmadığında KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yük değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının değişik kayma gerilme fonksiyonları için dağılımı.....   | 124 |
| Çizelge 4.13. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının değişik kayma gerilme fonksiyonları için dağılımı ..... | 125 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                                            |                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$                                        | Plağın uzunluğu                                                                                                                                                                                |
| $b$                                        | Plağın eni                                                                                                                                                                                     |
| $b_{ij} (i = 1,2,3; j = 1,2,...,8)$        | Homojen olmayan ortotrop plağın malzeme sabitlerini içeren semboller                                                                                                                           |
| $B_{ij} (i, j = 1,2,3,4)$                  | Ortotrop malzeme özelliklerine ve plak ölçülerine bağlı olan katsayılar                                                                                                                        |
| $c_{ij} (i = 1,2,3, j = 1,2,...,8)$        | Homojen olmayan ortotrop plağın mekanik özelliklerini karakterize eden semboller                                                                                                               |
| $D_0$                                      | Plağın silindirik sertlik katsayısı                                                                                                                                                            |
| $E_x, E_y$                                 | Sırasıyla x ve y doğrultularında homojen olmayan ortotrop malzemenin Young modülleri                                                                                                           |
| $E_{0x}, E_{0y}$                           | Sırasıyla x ve y doğrultularında homojen ortotrop malzemenin Young modülleri                                                                                                                   |
| $f_1, f_2, f_3, f_4$                       | Bilinmeyen genlikler                                                                                                                                                                           |
| $f(z)$                                     | Kayma gerilmeleri veya deformasyonları karakterize eden fonksiyon                                                                                                                              |
| $G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$                   | Homojen olmayan ortotrop malzemenin kayma modülleri                                                                                                                                            |
| $G_{0xy}, G_{0xz}, G_{0yz}$                | Homojen ortotrop malzemenin kayma modülleri                                                                                                                                                    |
| $h$                                        | Plağın kalınlığı                                                                                                                                                                               |
| $H$                                        | Homojen ifadesinin kısaltması                                                                                                                                                                  |
| $HO$                                       | Homojen olmayan ifadesinin kısaltması                                                                                                                                                          |
| $k_w$                                      | Winkler elastik zemin katsayısı                                                                                                                                                                |
| $\bar{k}_{w1}, \bar{k}_w$                  | Winkler elastik zemin katsayısının boyutsuz şekilleri                                                                                                                                          |
| $k_{ij} (i = 1,2; j = 1,2,5,8)$            | Homojen olmayan ortotrop malzeme ve plak özelliklerine bağlı parametreler                                                                                                                      |
| $k_{0j} (j = 1,2,3)$                       | Ortotrop malzeme özelliklerinin oranları                                                                                                                                                       |
| KDPT veya KDT                              | Kayma deformasyonlu plak teorisinin kısaltmaları                                                                                                                                               |
| KPT                                        | Klasik plak teorisinin kısaltması                                                                                                                                                              |
| $L_{ij} (i = 1,2,3, j = 1,2,...,8)$        | Diferansiyel operatörler                                                                                                                                                                       |
| $m$                                        | Boyuna doğrultudaki yarım dalga sayısı                                                                                                                                                         |
| $M_x, M_y, M_{xy}$                         | Eğilme ve burulma momentleri                                                                                                                                                                   |
| $n$                                        | Enine doğrultudaki yarım dalga sayısı                                                                                                                                                          |
| $Ox, Oy, Oz$                               | Koordinat eksenleri                                                                                                                                                                            |
| $Oxyz$                                     | Kartezyen koordinat sistemi                                                                                                                                                                    |
| $P_1, P_2$                                 | x ve y doğrultularındaki basınç yükleri                                                                                                                                                        |
| $P_{12krw}^{KDPT}, \bar{P}_{12krw}^{KDPT}$ | KDPT çerçevesinde sırasıyla, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için hem x, hem de y doğrultularındaki bir arada etkiyen boyutlu ve boyutsuz kritik basınç yükleri |

$P_{1krw}^{KDPT}, P_{2krw}^{KDPT}$

$\bar{P}_{1krw}^{KDPT}, \bar{P}_{2krw}^{KDPT}$

$P_{12krw}^{KPT}, \bar{P}_{12krw}^{KPT}$

$P_{1krw}^{KPT}, P_{2krw}^{KPT}$

$\bar{P}_{1krw}^{KPT}, \bar{P}_{2krw}^{KPT}$

$q$

$Q_x, Q_y$

$Q_{ij}(Z)(i, j = 1, 2, 6)$

$R_1$

$T_x, T_y$

$T_{xy}$

$T_x^0, T_y^0$

$U_{ij}^{k_1} (k_1 = 0, 1, 2)$

$w$

$X_{ij}, Y_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$

$Z = z / h$

$\beta$

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$

$\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \gamma_{0xy}$

$\lambda, \eta$

$\mu_1$

$\mu_1 = 0$

KDPT çerçevesinde, sırasıyla Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için x ve y doğrultularındaki boyutlu kritik basınç yükleri

KDPT çerçevesinde, sırasıyla Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için x ve y doğrultularındaki boyutsuz kritik basınç yükleri

KPT çerçevesinde sırasıyla, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın x ve y doğrultularındaki boyutlu ve boyutsuz kritik basınç yükleri

KPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın sırasıyla x ve y doğrultularındaki boyutlu kritik basınç yükleri

KPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın sırasıyla x ve y doğrultularındaki boyutsuz kritik basınç yükleri

Kuvvet üssü olup pozitif tam sayı

Enine kesme kuvvetleri

Homojen olmayan ortotrop plağın malzeme özelliklerine bağlı nicelikler

Winkler zeminin tepki kuvveti

Plağın birim alanına etkiyen normal kuvvetler

Kayma kuvveti

Momentsiz durumda x ve y doğrultularında zar kuvvetleri

Homojen olmayan ortotrop malzeme ve plak özelliklerine bağlı parametreler

Düzlem normalinin pozitif doğrultusundaki çökme

Ortotrop malzeme özellikleri ve plak ölçülerine bağlı olan katsayılar

Boyutsuz kalınlık koordinatı

Pozitif bir sayı

Homojen olmayan ortotrop plağın  $O_{xy}, O_{xz}, O_{yz}$  düzlemlerindeki kayma deformasyonları

Homojen olmayan ortotrop plağın x ve y doğrultularındaki deformasyon bileşenleri

Homojen olmayan ortotrop plağın referans yüzeyindeki deformasyonlar

Dalga sayılarına ve plak boyutlarına bağlı parametreler

Heterojenlik veya homojen olmama katsayı

Homojen durum

$v_{xy}, v_{yx}$

$\sigma_x, \sigma_y$

$\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$

$\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$

$\Phi_{\min}$

$\Psi$

Poisson oranları

Homojen olmayan ortotrop plağın x ve y doğrultularındaki gerilme bileşenleri

Homojen olmayan ortotrop plağın  $O_{xy}, O_{xz}, O_{yz}$  düzlemlerindeki kayma gerilmeleri

Dönme açıları

a / b oranına göre tek eksenli boyutsuz kritik yükün en küçük değeri

Airy gerilme fonksiyonu

## 1. GİRİŞ

Anizotrop plaklar, havacılık endüstrisinde, gemi ve trenlerin yapımında ve inşaat yapılarında değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Kullanım yerine bağlı olarak anizotrop plaklar, değişik elastik ortamlarla temas halinde olabilir. Bu durumlarda, plakların davranışlarına elastik zemin etkisinin dikkate alınması zorunlu olur. Elastik zemine oturan plakların basınç yükleri altındaki stabilite davranışlarının incelenmesi ile ilgili çalışmalar eskiye dayanır ve tüm dönemlerde bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Eski çalışmalarda, elastik zemine oturan veya zemin etkisi dikkate alınmayan anizotrop plakların stabilite davranışları klasik plak teorisi (KPT) temel alınarak formüle edilmiştir. Bilim ve teknolojinin gelişimi, kompozit plakların stabilite problemlerinin çözümünde elde edilen sonuçların gerçeği tümüyle yansıtmadığını ortaya koymuştur. Bu eksiklik, anizotrop ve kompozit malzemelerden oluşan yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesinde kayma deformasyonlu plak teorisinin (KDPT) geliştirilmesini sağlamıştır. KDPT'nin kullanılması, anizotrop plaklar için daha güvenilir hesapların elde edilmesini sağlamaktadır.

Günümüzde yeni teknolojilerin gelişimi, homojen malzemelerin yanı sıra homojen olmayan malzemelerin üretimini de kolaylaştırmıştır. Özellikle son 15 yıl içinde malzeme bilimcileri yeni yöntemler kullanarak homojen olmayan veya fonksiyonel değişimli (FD) izotrop ve anizotrop malzemelerin üretimini kolaylaştırmıştır. Bu ise gemicilik, demiryolu, uzay ve havacılık, makine ve inşaat alanlarında homojen olmayan malzemelerin daha yaygın kullanımını sağlamış ve tasarımcı mühendislerin dikkatini çekmiştir. Malzemelerin homojen olmaması çeşitli nedenlerden olabilir, örneğin, üretim teknikleri, yüzey ve termal cilalama yöntemleri, ısı ve radyasyon etkileri vs. malzemenin homojen olmamasını meydana getiren nedenlerden bazılarıdır. Homojen olmayan malzemeler, değişik yapı elemanlarında kullanıldığında onların gerçek davranışının hesaba katılması gereklidir. Homojen olmayan malzemelerin mekanik özellikleri nokta koordinatlarının sürekli fonksiyonu şeklinde ifade edilebilir.

Son yıllarda, elastik zemine oturan yapı veya yapı elemanlarında homojen olmayan anizotrop malzemelerin kullanılmasında önemli bir artış olduğu gözlenmektedir.

Elastik zemine oturan plaklar, birçok mühendislik alanlarında, örneğin; inşaat ve makine mühendisliği alanlarında, temel ve zemin mühendisliğinde kullanılmaktadır. Literatürde değişik elastik zemin modelleri mevcuttur. Bu çalışmada Winkler zemin modeli kullanılacaktır. Elastik zemine oturan homojen olmayan anizotrop plakların kullanımı onların stabilite davranışlarının yeniden gözden geçirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tez çalışmasında, Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plakların düzlemsel basınç yükleri etkisi alındaki stabilite davranışı incelenmektedir.

### **1.1. Tezin Önemi**

Kompozit plaklar değişik mühendislik alanlarında özellikle de inşaat, makine, uzay ve denizcilikte yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Değişik malzemelerden oluşan kompozit plaklar, mühendislik alanlarında kullanıldığında elastik ortamla temas halinde olduğundan dolayı daha geniş kullanım alanına sahiptirler. Örneğin; inşaat mühendisliğinde (karayolları, demiryolu, havaalanları ve yüzme havuzlarının temelinde, temel ve zemin mühendisliğinde), makine mühendisliğinde (çeşitli makinelerin zemine sabitlenmesinde, nükleer enerji santrallerinde), askeri alanlarda (füze ve roket rampaları olarak), uzay ve havacılıkta (sesten hızlı uçakların inebileceği uçak hangarlarında), diş hekimliği ve biyomekanikte vs. kullanılmaktadır (Gorbunov-Possadov vd., 1984; Paliwal ve Singh 1999; Tsudik, 2012). Günümüzde, kullanım şartlarına bağlı olarak çeşitli özelliklere sahip zeminlerle temas halinde olan geleneksel ve yeni nesil kompozit malzemelerden oluşan plakların burkulmaya çok elverişli olması nedeniyle onların tasarımında hesaplarının yeniden gözden geçirilmesi önem kazanmıştır. Bu anlamda, yüksek maliyetli, kapsamlı ve stratejik öneme sahip yapılarda kullanılan yüksek özgül modül ve dayanıma sahip olan kompozit plakların değişik yükleme durumları için burkulma analizlerinde elastik ortam etkisinin dikkate alınması çok önemlidir. Matematiksel olarak, bu tür problemler hem formülasyon hem de çözüm olarak karmaşıktır. Bu tür problemler ele alındığında, elastisite teorisi ve değişik plak teorilerinin kullanılması, elastik ortamın formülasyonu ve temas koşullarının belirlenmesi, kayma gerilme fonksiyonlarının tanımlanması, çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi gibi değişik

faktörlerin bir arada dikkate alınması gerekir. Bir yapı elemanı ile onu çevreleyen sürekli ortamın modellenmesi için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Örneğin; kumlu toprak ve sıvılar Winkler modeli ile, bazı toprak çeşitleri Pasternak ve Vlasov modelleri ve vizko-elastik ortamlar Kerr modeli ile ifade edilmektedir (Kerr, 1964; Hetenyi, 1966; Vlasov ve Leontev, 1966; Gorbunov-Possadov vd., 1984; Pronk, 1993; Tsudik, 2012). Bu modellerde önemli husus elastik zeminin yapı elemanına etkisinin nasıl dikkate alınacağıdır. Örneğin, Winkler modelinde yükün uygulandığı noktada çökme olduğu ve çökmenin yük ile orantılı olduğu varsayılmaktadır. Winkler zemin modeli aralarında etkileşim olmayan bir dizi yaylardan oluşmaktadır.

Günümüzde, gelişen teknolojiler homojen olmayan anizotrop malzemelerin üretimini kolaylaştırmış ve kullanım alanını genişletmiştir. Bu da değişik yükleme durumu ve ortamlarda kullanılan yapı elemanlarının stabilite problemlerinin formülasyonunda malzemenin homojen olmamasının göz önüne alınması ve burkulma karakteristiklerine etkilerinin incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Homojen olmamanın oluşumu çok değişik nedenlerden ortaya çıkabilir. Örneğin, üretim tekniği, radyasyon etkisi, termik ve yüzeysel cilalamalar vs. malzemenin homojenliğini bozan faktörlerden bazılarıdır. Ayrıca, çok yüksek ısı etkisi altında yapı elemanının herhangi bir kısmındaki malzemenin homojenliği bozulabilir. Değişik etkiler sonucu malzemenin mekanik özellikleri noktadan noktaya sürekli olarak değişir ve nokta koordinatlarının sürekli fonksiyonu olur (Grigorenko ve Grigorenko, 2013). Bunların yanı sıra, yeni teknolojik fırınlarda değişik yöntemlerle yeni nesil homojen olmayan malzemeler, yani fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) üretilmektedir. Homojen olmayan veya fonksiyonel değişimli (FD) ortotrop malzemelerle ilgili ilk çalışmalardan biri Pan (2003) tarafından sunulmuştur.

Bu çalışmaların ardından, homojen olmayan veya FD izotrop ve ortotrop malzemelerden oluşan yapı elemanlarının davranışı ile ilgili bazı çalışmalar yayımlandı (Tomar vd., 1982; Gadjev ve Sofiyev, 1988; Sladek vd., 2005; Sofiyev vd., 2009; Kumar ve Lal, 2011; Wosu vd., 2012; Lal ve Kumar, 2013; Sofiyev vd., 2014).

Son yıllarda, elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop yapı elemanlarının burkulma ve titreşim davranışlarına ilgi artmaktadır (Lal ve Dhanapati, 2009; Lal ve

Kumar, 2011; Peng ve Li, 2012; Sofiyev vd., 2012; Najafov vd., 2013 ve Najafov vd., 2014a; Sofiyev vd., 2014). Bu çalışmaların tümünde klasik plak teorisi kullanılmıştır.

Homojen ve homojen olmayan anizotrop plakların titreşim ve burkulma problemlerinde kayma deformasyonu etkisinin hesaba katılmaması, frekans ve burkulma yükleri için ciddiye alınacak hatalara yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle, kayma deformasyonlu plak teorisi (KDPT) ile yapılan hesap ve analizler klasik plak teorisine (KPT) kıyasla daha gerçekçidir. KDPT ilk olarak, Reissner tarafından önerilmiştir (Reissner, 1945). Bu çalışmanın ardından plak ve kabukların titreşim ve burkulma analizi için çeşitli kayma deformasyon teorileri geliştirilmiş ve bu teorilerin kullanımı daha doğru ve güvenilir sonuçların elde edilmesine olanak sağlamıştır (Ambartsumian, 1964; Murthy, 1981; Touratier, 1991; Soldatos 1992; Karama vd., 2003; Shi, 2007; Fares ve Elmaghany, 2008; Aydoğdu, 2009; Liu, 2011; Grover vd., 2013; Sayyad and Ghugal, 2014).

Homojen anizotrop plak ve kabukların davranışlarının KPT, birinci mertebe ve yüksek mertebe kayma deformasyon teorileri kullanılarak incelenmesi ile ilgili en kapsamlı bilgi ve kaynaklar Volmir (1967), Wang vd. (2005) ve Reddy (2007) çalışmalarında sunulmaktadır. Bu teorilerden bazıları kullanılarak homojen ortotrop plakların stabilite ve titreşimi ile ilgili çok sayıda yayın yapılmıştır (Wang and Dawe, 1999; Matsunaga, 2001; Sheikh vd., 2002; Hong and Jane, 2003; Bhaskar ve Kaushik, 2004; Xiao vd., 2008; Hong, 2009; Kshirsagar ve Bhaskar, 2009; Ferreira vd., 2011; Asadi ve Qatu, 2012; Thai ve Choi, 2013; Thai ve Thuc, 2013; Papkov ve Banarjee, 2015).

Çeşitli zemin modelleri kullanılarak, homojen ortotrop yapı elemanlarının statik ve dinamik analizleri KPT ve KDPT temelinde 1996-2007 yılları arasında yapılmıştır (Eisenberger vd., 1987; Shen, 1995; Liew vd., 1996; Omurtag ve Kadioğlu, 1998; Doğruoğlu ve Omurtag, 2000; Lam vd., 2000; Paliwal and Pandey, 2001; Civalek, 2007; Akhavan vd., 2009).

Homojen olmayan ortotrop yapı elemanlarının stabilite problemlerinin KDPT temelinde çözümleri zor olduğundan dolayı literatürde bulunan yayın sayısı da azdır.

Homojen olmayan ortotrop plak ve kabukların stabilite problemlerinin KDPT temelinde çözümleri ile ilgili yayın sayısı son bir kaç yılda önemli derecede artmıştır (Whitney and Pagano, 1970; Zenkour ve Fares, 1999; Chen vd., 2004; Ramirez vd., 2006; Ootao ve Tanigawa, 2007; Atmane vd., 2010; Xia vd., 2010; Meiche vd., 2011; Herkovich, 2012; Neves vd., 2013; Sheikholeslami ve Saidi, 2013; Mantari ve Soares, 2014; Mansouri ve Shariyat, 2014; Oktem, 2014; Saini ve Lal, 2014; Sofiyev ve Kuruoglu, 2014; Thai vd., 2014).

Ayrıca, elastik zemine oturan, homojen olmayan izotrop ve ortotrop plakların stabilite problemlerinin KDPT temelinde çözümleri ile ilgili literatürde bazı yayınlar bulunmaktadır (Morimoto ve Tanigawa, 2007; Altenbach, 2008; Lal vd., 2008; Kumar ve Lal, 2012; Malakzadeh vd., 2012; Thai ve Choi, 2012; Bahmyari ve Khedmati, 2013; Boudierba vd., 2013; Sobhy, 2013; Zenkour vd., 2013; Najafov vd., 2014b; Shariyat ve Asemi, 2014).

Yapılan kaynak taraması Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop plağın kayma gerilmeleri dikkate alınarak stabilite probleminin henüz yeteri kadar çalışılmadığını ortaya koymaktadır. Sunulan tez çalışmasında, elastik zemin üzerine oturan ve tüm kenarlarından basınç yüküne maruz, homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak ele alınacak ve elastik zemin modeli olarak Winkler modeli kullanılacaktır. Winkler elastik zemine oturan ve kenarlarından basınç yüküne maruz, homojen olmayan ortotrop plağın stabilite problemi incelenecektir. Söz konusu faktörler dikkate alınarak, KDPT temelinde burkulma yükü için analitik ifade bulunacak ve yeni ve güvenilir bir analiz gerçekleştirilecektir.

## **1.2. Tezin Amacı**

Tez çalışmasında, Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın basınç yükü etkisi altında burkulma problemi KDPT temelinde ele alınmaktadır. Önce, homojen olmayan ortotrop malzemelerin modelleri oluşturulacak ve grafiksel olarak sunulacaktır. Sonra homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak ve Winkler zemin modelinin matematiksel ve grafiksel modeli oluşturulmaktadır. Sonraki aşamada Winkler zemin etkisi dikkate alınarak homojen olmayan ortotrop plağın temel bağıntıları ve diferansiyel stabilite denklemleri KDPT temelinde

türetilmektedir. Homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın tüm kenarları basit mesnetli sınır koşullarına tabi tutulmaktadır. Söz konusu sınır koşulları altında stabilite problemi çözülerek, Winkler elastik zemin üzerine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın kritik yük ifadeleri KDPT ve KPT temelinde bulunmaktadır. Kritik yükün minimum değerini bulmak için elde edilen ifadeler dalga sayılarına göre minimize edilmektedir. Bu ifadelerden, Winkler elastik zemine oturan, homojen ortotrop ve izotrop dikdörtgen plaklar için KDPT ve KPT temelinde kritik yük ifadeleri özel olarak elde edilmektedir. Ayrıca, bu ifadelerden elastik zemin etkisi dikkate alınmayan homojen ve homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için kritik yük ifadeleri KDPT ve KPT temelinde özel olarak elde edilmektedir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, literatürdeki uygun çözümlerle karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmektedir. Son olarak farklı kayma gerilme fonksiyonları ele alınarak kritik yüke, homojen olmamanın, malzeme ortotropisinin, plağın değişik geometrik ölçülerinin ve Winkler zeminin etkileri incelenmektedir. Ayrıca, kritik yükün KDPT ve KPT temel alınarak elde edilen değerleri mukayese edilmektedir.

Sayısal hesaplar ve modellerin çiziminde Maple 14, grafiklerin çiziminde Excel ve şekillerin çiziminde AutoCad bilgisayar programları kullanılacaktır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Elastik Zemin Modelleri İle İlgili Çalışma Özetleri

Silindirik kabuklar, elastik ortamlar, katıyla veya sıvıyla sürekli temas halindedir. Bu gibi yapılar genellikle dinamik yüke maruzdur. Isı dönüştürücüleri ve boru hatlarındaki akış sebepli titreşimler, deniz altılardaki dalga yükü, yakıt dolu savaş uçaklarındaki yan tanklar, yeraltı veya deniz altındaki boru hatları ve sismik yüke maruz tüneller ve yeraltında bulunan yarı dairesel uçak hangarları, nükleer patlamalar ve diğer patlamalar, birçok örnekten bazılarıdır. Bu çalışmada, elastik zemin üzerinde bulunan ortotropik silindirik kabuğun serbest titreşimi ele alınmıştır (Paliwal ve Singh, 1999).

Sunulan çalışmanın amacı, zemin parametrelerinin, elastisite modülü oranı ile gösterilen malzeme ortotropisinin, eksenel dalga parametresinin ve çevresel dalga sayısının üç öz değer frekansa olan etkilerinin araştırılmasıdır. Dinamik denge denklemleri ve frekans parametreleri geliştirilmiştir ve öz frekanslar hesaplanmıştır. Zemin modülünün öncelikle radyal modu etkilediği, burulma ve uzunluk modları üzerinde hiçbir etkisi olmadığı bununla birlikte radyal mod üzerinde daha dominant bir etkiye sahip olmasına rağmen kayma modülünün titreşimin teğetsel modunun yanı sıra radyal mod üzerinde de etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Zemin modülünün benzeri şekilde, elastisite modülü oranı en çok radyal modu etkilemektedir. Kabuk, elastik Pasternak zemin üzerinde bulunduğu çevresel dalga sayısına karşı gelen alt öz frekans çok iyi bilinen bir temele sahip değildir ve eksenel dalga parametresinin tüm değerleri için çevresel dalga sayısı sıfır olduğunda minimum frekans oluşur (Paliwal ve Pandey, 2001).

Bu çalışmada, bir kayma tabakası ile birbirine bağlanmış iki yay katmanından oluşan yeni bir zemin modelinin özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, sert bir darbeye maruz kalan zeminin, klasik problemi ele alınmıştır. Gerekli mutlak minimum zemin sabitlerinin sayısını azaltmak amacıyla, Reissner'in zemin modelinde önerilen yayılı tabaka oranı üç olarak alınmış, alt ve üst yayılı tabakanın mümkün olan sabitleri seçilirken de buna özel önem verilmiştir. İlgili deneysel verilerle elde edilen basınç dağılımlarının karşılaştırılması, iki zemin sabitleri sayısını azaltarak değerlerin

kabulünü desteklemek amacı taşımaktadır. Diğer zemin modellerine kıyasla ele alınan modelin avantajları sunulmuştur (Kerr, 1964).

Sunulan kitabın orijinalı rusça olup ingilizceye çevrilmiştir. Kitap, elastik zemine oturan kiriş, plak ve kabuklar ile ilgili temel bilgiler içermektedir. Elastik zemin üzerindeki üç boyutlu kompleks yapılar, varolan yöntemlerle analiz edilememişlerdir. Bu kitapta yarı sonsuz boşluklu bir elastik izotropiğin varsayımı doğal bir zeminin fiziksel özellikleri olarak tanımlanmıştır. Yüksek oranda doğruluğu elde edebilmek için zeminin elastik-plastik deformasyonu göz önünde bulundurulmuş ve yeni teori önerilmiştir. Önerilen teorinin pratik önemi, birçok problemin çözümünün, integralleri tablolardan bulunabilen basit diferansiyel denklemlerin çözümüne indirgenmesidir. Sunulan teori kullanılarak elastik zemin üzerindeki kiriş ve plakların temel problemlerinin yanı sıra çeşitli kompleks problemlerin de çözülebileceği belirtilmiştir. Örneğin; temel zemin deformasyonu ve eklentili enine yüklerin hesaba katılarak elastik zemin üzerindeki yapıların dinamik ve stabilite problemlerini incelemek için de kullanılabilir. Ayrıca, sunulan teori yatay ya da eğik, tekil ve çoklu tabakalardaki gerilmeleri belirlemek için uygulanabilir. Kitapta, yapılan teorik ve sayısal çalışmalarda elde edilen bulguların mühendislik problemlerinde ve ileri araştırmalarda kullanılabilir olduğu görüşüne varılmıştır (Vlasov ve Leont'ev, 1966).

Hetenyi (1955) çalışması, elastik zemine oturan kirişler hakkındaki ilk kitaplardan biri olup elastik kirişlerin analizlerini içermektedir. Elastik mesnet, kirişlerin uzunluğu boyunca sürekli olarak dağılmış ve zemin olarak adlandırılan bir yük taşıyıcı ortam tarafından desteklenmiştir. Bu problemlerden bazıları, kiriş ve zeminin benzerliği, mevcut zemin yapılarında olduğu gibi veya demiryolu hatlarında olduğu gibi kolayca belirlenebilir. Diğer problemler, bu teorinin uygulamasının en verimli alanını oluşturmaktadır. Bu kitabın matematiksel gösterimi, küçük bir sapma hiperbolik fonksiyonlar için önemli başlangıç belgelerindeki var olan uygulamalardan oluşturulmuştur. Bu çözümlerin genellikle uzun olamsı, bazen de detrigonometrik ve hiperbolik fonksiyonların kombinasyonlarının karışık görünmesi ihtiyacından doğmuştur. Bu yüzden, bu iki tip fonksiyonlar arası gösterimlerdeki farklılığın üzerinde durulmuştur.

Gorbunov-Posadov vd. (1984) kitabında, küçük ve büyük deformasyonlarda yarı uzay veya tabaka üzerinde bulunan yapıların en önemli tiplerinin hesabı için pratik öneriler ve tablolar sunulmuştur. Kitap, incelenen yapının durumunun kısaca değerlendirilmesine ve tasarımcıların uygun hesaplama yönteminin seçilmesine olanak sağlar. Büyük açıklıklı temellerin analizi için mevcut bilgisayar programları hakkında temel bilgiler içermektedir. Doğrusal olmayan zemin ve doğrusal olmayan davranışa sahip yapı malzemeleri için gelişen hesaplama teknikleri sunulmaktadır. Bu baskı, yeni veri ve teorik sonuçlar içermekte ve güvenlik faktörleri düzenlenmiştir.

Tsudik (2012) elastik zemin üzerindeki yapılarının analizleri kitabında, elastik zemin üzerindeki farklı zeminlerin analizlerindeki basit ve doğru sonuçlara vurgu yapılarak mühendislerin uygulamaları için pratik çözümler üzerinde durulmuştur. Bu konu teorik bir konu olup daha önceden birkaç kitapta basit çözümleri bulunmaktadır. Bu çalışma, özel zemin türleri de dahil olmak üzere çeşitli zemin türleri ve koşullarını kapsamaktadır. Elastik zemin üzerindeki yapıların analizi kitabı 10 bölümden ibarettir. Bölüm 1: Zemin ve zemin modelleri. Bölüm 2: Winkler zemini üzerindeki kirişlerin analizindeki klasik analitik yöntemleri. Bölüm 3: Winkler zemini üzerindeki kiriş ve çerçevelerin basit analizi. Bölüm 4: Elastik yarım uzaydaki kirişlerin analizi. Bölüm 5: Elastik yarım uzaydaki kirişlerin analizi, düzlemsel şekil değiştirme analizi. Bölüm 6: Elastik yarım uzayda mesnetli kirişlerin sayısal analizi Bölüm 7: Radye temellerin basitleştirilmiş analizi. Bölüm 8: Radye temellerin sayısal analizi. Bölüm 9: Elastik zemin üzerindeki dairesel plakların analizi. Bölüm 10: Elastik zemin üzerindeki özel yapılar.

Bu makalede, Pasternak zemin modeli tanımlanmış ve iki parametrelili modelde zemin tepkisi, dikey yay sabiti  $K_w$  ile dikey yayların yatay bağlantısı şeklinde tanımlanan  $K_p$  parametresinin kombinasyonu ile belirlenmektedir. Zemin etkisindeki  $K_p$  sabitinin oranı, Burmister modelindeki Poisson oranının etkisine kıyasla daha büyüktür. Bu fark, yapının davranışının incelenmesinde sunulan modelin esnekliğini arttırır. Hankel-Bessel dönüşümleri kullanılarak, Pasternak ve Westergaard modellerindeki çökme ve gerilmeler hesaplanmıştır. Sadece iç yükleme durumları dikkate alınarak sürtünmesiz zemin üzerinde bulunan ince plağın maksimum eğilme gerilmesi ve çökmeleri için çözümler sunulmuştur. Diğer tip yük dağılımları ve alt

zemin tepkilerini hesaplamak için Hankel-Bessel dönüşümleri özetlenmiştir. Pasternak tipi zemin modeli ile olası zemin tepkilerinin geniş aralığının simüle edilebileceği tespit edilmiştir. Söz konusu aralık,  $K_p = 0$  durumunun yanı sıra, alt zemin tepkisi doğrusal elastik yarım uzay olarak varsayılan Hoog/Jeufröy modelini yani Westergaard teorisinin genişletilmiş durumunu da içermektedir. İki parametrelili bu basit model, esnekliğinden dolayı, Pasternak tipi zemin, Winkler tipi zemin modellerine bir alternatif oluşturmaktadır. Makalenin son kısmında, çeşitli zemin çeşitleri için çökme ölçümlerinin hesabı tartışılmıştır (Pronk, 1993).

## **2.2. Homojen Olmayan Yapı Elemanlarının KPT Çerçevesinde Davranışları İle İlgili Çalışmaların Özetleri**

Volmir (1967) kitabı çok kapsamlı olup 27 bölümden oluşur ve çeşitli çubuk, plak ve kabukların stabilite, titreşim ve eğilme teorilerini kapsamaktadır. Kitapta, endüstri, özellikle uçak üretimi ve yapıların gereksinimlerine karşılayabilecek çok sayıda problemin çözümü sunulmaktadır. Bunlara ek olarak, elastik sistemlerin dinamik stabilitesi, çeşitli şekillere sahip kabukların doğrusal ve doğrusal olmayan burkulması üzerine teorik ve deneysel çalışmalar sunulmuştur. Kitapta sunulan sayısal hesaplar, grafik ve tablolar pratik hesaplamalarda doğrudan kullanılabilir ve karşılaştırmalar için çok elverişlidir.

Bu çalışmada, elastik zemine oturan iki parametrelili ve hidrostatik basınç altında homojen olmayan, ortotrop ve ince duvarlı dairesel silindirik ve konik kabukların serbest titreşimi ve burkulma özelliklerinin belirlenmesi için bir teorik analiz sunulmuştur. Kalınlık doğrultusunda sürekli olarak değişen ortotrop kesik konik kabuğun young modülü ve yoğunluğu için temel bağıntılar elde edilmiştir. Galerkin yöntemi uygulanarak, elastik zemine oturan ve zeminsiz, homojen ve homojen olmayan ortotrop kesik konik kabukların boyutsuz frekans parametresi ve kritik hidrostatik basınç yükü için ifadeler elde edilmiştir. Son olarak, Winkler ve Pasternak tipi elastik zeminlerin, homojen olmama ve ortotropinin ve kabuk karakteristikleri değişimlerinin kritik parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve sayısal hesaplar şekil ve tablolar halinde sunulmuştur (Sofiyev vd., 2012).

Bu çalışma, homojen olmayan değişken kalınlıklı plakların titreşimi ile ilgili ilk çalışmalardan biridir. Homojen olmayan izotrop malzemeden oluşan plağın Young modülü ve yoğunluğu uzunluk koordinatına bağlı olarak üstel fonksiyon şeklinde, değişmektedir. Homojen olmama fonksiyonu üstel olarak değiştiğinde, farklı geometriye sahip ve değişken kalınlıklı izotrop plakların dinamik davranış analizi incelenmektedir (Tomar vd., 1982).

Young modülü ve Poisson oranı kalınlık koordinatına bağlı sürekli olarak değişen izotrop silindirin dinamik tepkisi ile ilgili ilk çalışmalardan biri olan bu makale Gadjiev ve Sofiyev (1988) tarafından sunulmaktadır. Silindir eksenel basınç, iç basınç ve halka şekilli basınç yükleri etkisi altındadır. Hareket denklemi türetildikten sonra statik ve dinamik çökmeler bulunarak dinamik faktör için ifadeler elde edilmiştir. Sayısal analizler kısmında, çeşitli yükler etkisi altındaki silindirin dinamiklik katsayısına homojen olmamanın etkisini incelemek için sayısal analizler yapılmış ve homojen olmamanın kritik parametrelere etkisinin önemli olduğu teyit edilmiştir.

Bu çalışmada, sürekli değişen malzeme özelliklerine sahip iki boyutlu, izotrop olmayan doğrusal elastik/viskoelastik katı cisimlerin gerilme analizi için Petrov-Galerkin yaklaşımına dayanan bir meshless yöntemi önerilmiştir. Zaman ve uzay koordinatlarına ayrılabilen gevşeme modülüne sahip homojen olmayan, anizotrop, doğrusal viskoelastik katı cisimler için karşılıklılık ilkesi uygulanmıştır. Temel denklemlerde, eylemsiz dinamik durum dikkate alınmış ve birim basamak fonksiyonu kısmi zayıf formda bir test fonksiyonu gibi kullanılmıştır. Bu da, kısmi sınır integral denklemlerine yol açar (KSİD). Hareket en küçük kareler (HKK) yöntemi, KSİD'deki fiziksel nicelik yaklaşımına adapte edilmiştir. Zamana bağlı problemler için, Laplace dönüşümü tekniği kullanılmıştır. Bazı sayısal örnekler, önerilen yöntemin etkinliği ve doğruluğunu kanıtlamak için sunulmuştur (Sladek vd., 2005).

Sofiyev ve Karaca (2009) bu makalede, yanal ve hidrostatik basınç yükleri etkisi altındaki tabakalı homojen ve heterojen ortotrop kesik konik kabukların serbest titreşim ve burkulma analizleri yapılmıştır. Önce, koni kabuğun tabakalarındaki ortotrop malzemenin Young modülleri ve yoğunluk kalınlık doğrultusunda parçalı

sürekli değiştiğinde temel bağıntılar, değiştirilmiş Donnell tip dinamik stabilite ve uygunluk denklemleri türetilmiştir. Sonra, kısmi diferansiyel denklemlere süperpozisyon ve Galerkin yöntemleri uygulanarak, tabakalı homojen ve heterojen ortotrop konik kabukların kritik yanal ve kritik hidrostatik basınç yükü ve boyutsuz frekans parametreleri için analitik ifadeler elde edilmiştir. Homojen veya heterojen ortotrop ve izotrop malzemelerden oluşan tek tabakalı veya tabakalı silindirik kabuklar için uygun ifadeler özel olarak elde edilmiştir. Son olarak, tabaka dizilişi ve sayısının, kabuk karakteristiklerinin değişimi, Young modülleri ve yoğunlukların birlikte ve ayrı ayrı değişimlerinin, kritik yanal, hidrostatik basınç yüklerine ve frekans parametresine olan etkileri değişik dalga sayıları için bulunmuş ve sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, kalınlığı bir doğrultu boyunca doğrusal olarak değişen ince dikdörtgen plakların serbest enine titreşimi iki boyutlu sınır karakteristik ortogonal polinomları kullanılarak ve Rayleigh-Ritz yöntemi ile araştırılmıştır. Plağı oluşturan malzemenin Young modülü ve yoğunluğunun düzlem içi koordinatlara bağlı olarak doğrusal değiştiği varsayılmıştır. Ankastre, basit ve serbest kenarların dört farklı kombinasyonu için heterojen plağın ilk üç frekans değerleri hesaplanmıştır. Kalınlık değişiminin, homojen olmamanın ve en-boy oranı değişiminin frekanslara etkileri bir arada incelenmiştir. Ayrıca, ele alınan heterojen plaklar için mod şekilleri sunulmuştur (Lal ve Kumar, 2013).

Bu çalışmada, bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu aracı kullanılarak yüksek gerilme oranlı penetrasyon yüklemesine grafit-epoksi tabakalı kompozitlerin tepkilerinin sıcaklık ve nem etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, aşırı sıcaklık, nem ve nem ile sıcaklığın birleşik koşulları altında, kalınlık doğrultusunda, basınç dayanımı, elasite modülü, ve enerjinin üssel olarak emilmesinin azaldığını göstermektedir. Şekil değiştirme hatası ve yer değiştirme, parçacık hızı sıcaklığı doğrusal olarak artan sıcaklık ve nem ile doğrusal olarak arttığı halde nem içeriğinden bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Hasar süreci, sıcaklık ve nemin birlikte etkisinde, sıcaklık veya nemin tek başına etkisinden daha belirgin olmaktadır. Aynı darbe enerjisinde sonuçlar, düşük sıcaklıkta gerilme oranı ile doğrusal olarak artan enerji ve yüksek sıcaklıkta nispeten sabit kalarak sönümlenen gerilme oranına duyarlı olan hataları göstermektedir. Basınç akma dayanımı düşük olup şekil değiştirme oranı arttıkça

artmakta ve yüksek sıcaklıkta maksimum dayanım gerilme oranı biraz azalmaktadır (Wosu vd., 2012).

Bu çalışmada, klasik ve geliştirilmiş problem durumları kullanılarak gerçekleştirilen karmaşık şekilli izotrop ve anizotrop elastik kabukların statik ve dinamik deformasyonları ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir. İki boyutlu sınır değerleri problemleri ve özdeğer problemlerini çözmek için kullanılan değişken katsayılı kısmi türevli diferansiyel denklemlerin bilinmeyen fonksiyonlarının şerit yaklaşımına dayalı geleneksel olmayan bir ayrık süreklilik yaklaşımı kullanılmıştır. Bu, orijinal problemin, ayrık ortogonalleştirme yöntemi ile çözülen tek boyutlu problemler sistemine indirgenmesine olanak sağlamaktadır. Yükleme ve sınır koşullarına, cismin geometrik ve mekanik özelliklerine bağlı olarak dinamik özellikler, gerilme ve yer değiştirme alanlarının dağılımı için sayısal analiz yapılmıştır. Sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir (Grigorenko ve Grigorenko, 2013).

Bu makalede, klasik plak teorisi temel alınarak Rayleigh-Ritz yönteminde iki boyutlu sınır karakteristik ortogonal polinomları kullanan ortotrop homojen olmayan dikdörtgen plağın ankastre/basit mesnetli karşılıklı iki kenarına düzgün dağılımlı düzlem içi yükleme etkidiği durumdaki burkulması ve enine titreşimi için bir analiz ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Ortogonal polinomları elde etmek için Gram-Schmidt yöntemi kullanılmıştır. Plağın homojen olmamasının düzlem içi koordinatlarda plak malzemesinin elastik özellikleri ve yoğunluğunun doğrusal değişimlerinden kaynaklandığı varsayılmıştır. İki boyutlu kalınlık değişimi, plağın kesişen iki kenarı doğrultusunda doğrusal değişimlerin Dekart çarpımı olarak dikkate alınmıştır. Ankastre, basit mesnetli ve serbest kenarların dört değişik kombinasyonu için, titreşimin ilk üç modunda homojen olmama parametrelerinin, kalınlık değişimi ile birlikte en-boy oranının ve düzlem içi yükün doğal frekanslara olan etkileri dört haneye yuvarlanarak gösterilmiştir. Dört sınır koşulunda, belirlenmiş plak için üç boyutlu mod şekilleri çizilmiştir. Frekans sıfıra yaklaştırılarak, plak parametrelerinin çeşitli değerleri için basınç durumunda kritik burkulma yükleri altı haneye yuvarlanarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Kumar ve Lal, 2011).

### 2.3. Kayma Deformasyonlu Plak Teorisi İle İlgili Çalışmaların Özetleri

Sayısal yöntemlere bağlı olan burkulma yüklerinin araştırılması, yapısal eleman tasarımında önemli olmuştur. Yapısal elemanların burkulma problemlerinin kesin çözümlerin bulunması için sayısal yöntemlerin yanı sıra analitik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu okuyucuların, sayısal yöntemlerle elde edilen çözümlerin güvenilirliğini ve doğruluğunu değerlendirmesine olanak sağlamaktadır. Wang vd. (2005) çalışmasında, mühendisler ve araştırmacılara kolaylık sağlamak için tek bölümde burkulmanın mümkün olduğunca çok sayıda kesin çözümleri sunulmaktadır. Bu çalışma kolonlar, kirişler, kemerler, halka plaklar ve kabukların burkulma çözümlerindeki sayısal yöntemlerin ve çözümlerin geçerliliği, yakınsama ve doğruluğunu kontrol etmek için referans olmaktadır.

Bu çalışmada, elastik plakların küçük eğilmelerde üç boyutlu teorisinden Kirchhoff dördüncü dereceden formülasyonuna dayanarak yaklaşık iki boyutlu teoriye geçilmiştir. Üç boyutlu problemin çeşitli değişimsel ifadeleri tartışıldıktan sonra, enine kayma deformasyon etkisi dikkate alınarak Bolle, Hencky, Mindlin ve Reissner iki-boyutlu altıncı dereceden teorilerinin gelişimi sunulmaktadır. Ayrıca, altıncı mertebe teorisinin doğrudan iki boyutlu formülasyonu, tabakalı plakların eğilme ve uzamanın temel eşleşmesi, birinci mertebe enine kayma deformasyon etkilerini içeren dördüncü mertebe çözümleri ve kenar bölgenin ikinci mertebe sıralı determinant çözümüne katkılarını gösteren altıncı mertebe teorisinin asimptotik analizleri Levy'nin ilk analizleri ile raporlanmıştır (Reissner, 1945).

Bu kitapta, klasik teoride temel hipotez olan şekli bozulmayan normaller hipotezinden bağımsız anizotrop plaklar için yeni bir teori geliştirmiştir. Plagın orta düzleminde enine gerilme etkilerinin göz önüne alınması için yeni yaklaşım sunularak, geliştirilmiş teorisinin versiyonları düşünülmüştür. Klasik plak teorisine temel bir düzeltme sunulmuştur ve bu düzeltmenin önemi, Young modülünün kayma modüllerine oranının artışı ile birlikte artmıştır ve daha yüksek anizotropluğa sahip plaklar için önemli olmuştur. Kitap dört bölümden oluşur. Birinci ve ikinci bölümler, anizotrop cismin elastisite teorisi hakkında genel bilgiler ve anizotrop cismin elastisite teorisinin temel bağıntılarına dayanan anizotrop plakların küçük ve büyük yer değiştirmelerde iki gelişmiş teorisini sunar. Üçüncü bölümde, çeşitli yükler etkisi

altında farklı yapıya sahip anizotrop plak türlerinin şekil değiştirme ve gerilmeleri ile ilgili çok sayıda problemin çözümü sunulmuştur. Dördüncü bölüm, plakların titreşim ve stabilite problemlerine adanmıştır ve çeşitli izotrop veya anizotrop plakların sesten hızlı titreşimleri, dinamik ve statik stabiliteleri, serbest ve zorunlu titreşimleri ele alınmıştır (Ambartsumyan, 1964).

Makalede, plağın alt ve üst ara yüzleri üzerindeki kosinüs kayma gerilmesi için serbest sınır koşulları olan yeni bir standart plak teorisi sunulmuştur. Bu teori, birinci dereceden KDT ile benzer derecede karmaşıktır fakat kayma düzeltme faktörleri kullanılmaz ve bazı yüksek plak teorileri ve birinci dereceden kayma deformasyonu teorisinden daha yeterlidir. Teori, kesin sinüs eğrisi şeklindeki fonksiyon ile sunulan kaymanın kinematik yaklaşımına dayandırılmış ve sınır değer problemi sanal iş prensibine dayanmaktadır. Önerilen teorinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla; eğilme, serbest ve sönümsüz titreşim ve üç katmanlı burkulma (sandviç ve tabakalı), simetrik çapraz kat, tüm kenarları boyunca basit mesnetli kare veya dikdörtgen plak, dalga yayılımı, dikdörtgen plağın burulması gibi bazı önemli problemler incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda kesin üç boyutlu elastiklik teorisi ve bazı iyi bilinen yaklaşımlı teorilerinden elde edilen sayısal sonuçlar kullanılmıştır. Sunulan teori, bu yüzden gerçek bir standart oluşturmuştur (Touratier, 1991).

Bu çalışmada, homojen, monoklinik, lineer elastik malzemeden yapılmış, enine kayma deformasyonlu bir plağın yanal düzlemlerde kayma çekmesine maruz statik veya dinamik analizi için genel iki boyutlu bir teori sunulmuştur. Lagrange çarpınları yöntemi ile birlikte, Hamilton prensibine dayanarak geliştirilen, kalınlık boyunca yer değiştirme dağılımlarıyla sınırsız sayıda hesaba katılan yeni teori, bağımsız yer değiştirme bileşenlerden (bir kayma deformasyon teorisi için beş tane) mümkün olan en küçük bir sayı ile başlarken istenilen başka yüksek serbestlik dereceleri için de kullanılabilir. Beş serbestlik derecesi ile çalışan teorinin özel durumu için yer değiştirme açılımının simetrik üretimine, kalınlık boyunca enine kayma şekil değiştirmesi dağılımlarına özel önem verilmektedir. Özel ortotrop plak probleminin silindirik eğilmesi için beş serbestlik dereceli teorinin ana denklemleri çözülür ve kalınlık boyunca enine kayma deformasyonun üç farklı simetrik seçimi için sayısal sonuçlar elde edilerek, literatürdeki mevcut tam üç boyutlu çözümlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda yeni teori tarafından sunulan birden

fazla seçenek, ya uygun yer değiştirme açılımlarını değiştirerek ya da serbestlik derecelerini yavaş yavaş arttırarak, homojen plakların statik veya dinamik analizi ile ilgili gelecekteki çalışmalara yararlı olacağı gösterilmektedir (Soldatos, 1992).

Bu çalışmada, yüksek mertebeden kayma deformasyonlu tabakalı kompozit plak teorisi önerilmiştir. Sunulan teori plağın üst ve altındaki gerilme sınır koşullarında kesinlikle tatmin edicidir. Mevcut beşinci dereceden serbest kayma deformasyonu teorileri ile kıyaslandığında eğilme ve gerilme analizleri için üç boyutlu elastiklik çözümleri konusunda bu teorinin daha kesin sonuçlar verdiği görülmektedir. Tüm kayma deformasyonu teorileri, genel olarak %2 civarında sapmaya sahip titreşim ve burkulma sonuçlarını öngörürler. Karama vd. (2003)'ın önceki üstel kayma deformasyonu teorisi özel bir durum gibi elde edilebilir (Aydogdu, 2009).

Grover vd. (2013) çalışmasında, tabakalı kompozit ve sandviç plakların statik ve burkulma tepkileri için çeşitli sayısal örnekler, yeni bir ters hiperbolik kayma deformasyon teorisi için doğrulanmış ve formüle edilmiştir. Sunulan kayma şekil değiştirme şekil fonksiyonuna dayalı teori, enine kayma gerilmelerin doğrusal olmayan dağılımını vermektedir ve aynı zamanda çekme serbest sınır koşullarını karşılamaktadır. Sanal iş prensibi doğrusal kinematikleri varsayarak temel diferansiyel denklemleri geliştirmek için kullanılmıştır. Bir Navier tipi kapalı form çözümü yönteminin uygulanabilirlik sınırları da çapraz katlı basit mesnetli plaklar için önerilmiştir. Sayısal hesaplama hataları dışında doğru çözüm sağlanmıştır. Tabakalı kompozit ve sandviç plak modelleri için sunulan teori daha doğru bir şekilde tatbik edilebilmektedir ve sunulan teorinin hesaplama zahmeti diğer kayma deformasyon teorileri ile aynı orandadır.

Bu çalışmada, plaklar için geliştirilmiş yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi sunulmuştur. Teori Ambartsumian tarafından sunulan enine kayma deformasyon teorisinden geliştirilmiştir. Sunulan plak teorisi, plakların yüksek mertebeden yerdeğiştirme alanının kinematiğini, eğilmiş plakların genelleştirilmiş üç yer değiştirmelerine bağlı terimlerinden oluşan yüksek mertebeden diferansiyel denge denklemler sistemini ve plağın her bir kenarındaki sınır koşulları sistemini içermektedir. Sunulan plak kayma deformasyon teorisinin doğruluğu, plakların burulması ve basit mesnetli plak problemini çözmek için uygulanarak test

edilmektedir. Mevcut teori kullanılarak elde edilen çözümler, diğer kayma deformasyon teorileri çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara iyi bir uyum elde edilmiştir ve mevcut teorinin avantajları açıkça ortaya konulmuştur. Tabakalı kompozit plakların dinamik ve statik davranışlarını daha iyi tahmin etmek için burada sunulan kayma deformasyon plak teorisinin kullanılması önerilmektedir. Sunulan teoride yeni kabuk elemanları geliştirmek için sonlu eleman analizi ilave edilmektedir (Liu, 2011).

Bu çalışmada, esnek plakların kayma analizi için geliştirilmiş basit üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisi sunulmuştur. Bu yeni plak teorisi üç bölümden oluşmaktadır: Yazar tarafından daha önce elde edilen yüksek mertebeden yer değiştirme alanına indirgenmiş basit üçüncü dereceden kinematik yer değiştirmeler, eğilmiş plaklarının genelleştirilmiş üç yer değiştirme teriminin onuncu mertebeden diferansiyel denge denklemleri sistemi, her bir kenardaki plak sınırları için beş sınır koşulu ele alınmıştır. Elde edilen yer değiştirme alanı Murthy tarafından önerilen alanla aynı olmasına rağmen, değişken sürekli ana denklemler ile ilgili elde edilen uygun sınır koşulları, ilk kez bu çalışmada tespit edilmiştir. Plakların mevcut kayma deformasyon teorisinin uygulamaları ve doğruluğu burulma plaklarının ana diferansiyel denklemlerinin, eğilme kirişi ve iki eğilmeli plakların üç boyutlu mevcut elastisite çözümlerinin analitik çözülmesi ile gösterilmiş ve burulma plakları ile plak sınırlarında doğru karakterize edilen gerilmelerin kare kesit etkilerinde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu analitik çözümler açıkça göstermektedir ki, bu çalışmada geliştirilen basit üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisi gerçekten birinci dereceden kayma deformasyon teorileri ve diğer basit üst düzey kayma deformasyon teorilerinden daha iyi sonuçlar vermekte, mevcut üçüncü dereceden kayma esneklik teorisi ile sadece değişken sürekli denklem sistemleri değil aynı zamanda diferansiyel denklemler ile ilgili düzgün sınır koşulları daha düzgün bir kinematik yer değiştirmeye dayanmakta ve oluşmaktadır. Mevcut basit üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisi diğer popüler kayma esnek plak teorileri uygulamalarında olduğu gibi tabakalı plakların statik ve dinamik sonlu elemanlar analizinde kolaylıkla uygulanmakta ve geliştirilmiş sonuçlar plakların mevcut basit üçüncü dereceden kayma deformasyon teorilerinden elde edilmektedir (Shi, 2007).

Bu çalışmada, bir sinüs kayma ve normal deformasyon teorisi dikkate alınarak enine kayma etkileri yanı sıra normal enine etkiler de kullanılarak izotrop, enine izotrop, tabakalı kompozit ve sandviç dikdörtgen plakların eğilme analizleri için analitik çözüm geliştirilmiştir. Teoride, plak sınır yüzeyinde, plaka kalınlığı ve çekme serbest sınır koşulları ile enine kayma şekil değiştirmelerinin yeterli dağılımı oluşturulduğundan dolayı bir kayma düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Yer değiştirme alanı, enine kayma etkileri içeren kalınlık koordinatında sinüs ve kalınlık koordinatındaki kosinüs fonksiyonlarının terimleri kullanılarak enine yer değiştirmedeki enine normal etkisini içermektedir. Mevcut teorinin kinematiği diğer yüksek mertebeden kayma deformasyon teorilerinden çok daha kapsamlıdır, çünkü trigonometrik terimler kuvvet serilerine genişletilerek yüksek mertebeden teorilerin kinematiğinde dolaylı olarak iyi bir uyum sağlanmaktadır. Ana denklemler ve teori sınır koşulları virtüel iş prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Basit mesnetli tabakalı kompozit plaklar için Navier çözümü geliştirilmiştir. Yer değiştirmeler ve basit mesnetli dikdörtgen plakların gerilmeleri için elde edilen sonuçlar, diğer düzenlenmiş teoriler ve mevcut tam elastisite çözümleri ile karşılaştırılmıştır (Sayyad ve Ghugal, 2014).

Bu makale, eğilme altındaki tabakalı izotrop olmayan plaklar için geliştirilmiş bir KDT içermektedir. Bu teori, rastgele seçilen kayma düzeltme faktörü ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Eğilme ve gerilme çiftine sahip bir tabaka için, yer değiştirme ve dönmelere sahip gerilme sonuçlarına bağlı temel denklemler türetilmiştir. Eğilmeye sahip simetrik bir tabakanın bu özel örneği için bu bağıntıların basitleştirilmiş formları elde edilmiştir. Her bir kenar boyunca üç fiziksel doğal sınır koşullarının talimat gerektiren normal yerdeğiştirmesi için altıncı mertebeden temel denklemler elde edilmiştir. İzotropluğun eş durumları için, sunulan teori Mindlin teorisinin gelişmiş bir versiyonundan indirgenerek elde edilmiştir. Silindirik eğilme altındaki tabakalı plak örneği için sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Sunulan teori, denk mertebedeki diğer teorilerden daha kesindir ki bu da tam üç boyutlu analiz sonuçlarındaki karşılaştırmalarla ortaya konulmuştur (Murthy, 1981).

Bu çalışmada, çok katmanlı tabakalı kompozit yapıların mekanik davranışlarını belirlemek için yeni bir yapı modeli sunulmuştur. Tabakalı kompozit kirişin mekanik davranışı (90/0/0/90) dizilişine göre dinamik ve statik durumlar için test edilmiştir.

Sonuçlar Abou Harb'ın çalışmasındaki sonlu elemanlar yöntemi ve sinüs modeli ile karşılaştırılarak, bu yeni modelin sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ile elde edilen sonuçlara kıyasla daha kesin olduğu görülmüştür. Ossadzow tarafından tanımlanan kinematik kullanılarak, tabakaların ara yüzlerindeki sürekliliği ortaya koymuştur. Doğal sınır koşulları ve denge denklemleri, sanal iş prensibi ile türetilmiştir. Önerilen modeli geçerli kılmak için eğilme, burkulma ve serbest titreşimdeki farklı örnekler ele alınmıştır (Karama vd., 2003).

Fares ve Elmaghany (2008) çalışmasında, modifiye edilmiş karışık varyasyonel formülü kullanarak kompozit tabakalı plakların düzenlenmiş doğrusal olmayan zikzak kayma deformasyon teorisi sunulmuştur. Teori, yerdeğiştirmeler için kalınlık yönünde sürekli parçalı tabakalı plakların doğrusal varyasyon yaklaşımını hesaplar. Diğer yandan, tabaka ara yüzleri ve yüzey koşullarındaki parçalı gerilme dağılımları yeterli süreklilik koşullarını içerir. Bu teorinin avantajı, tabakalar arası gerilmeleri düzeltmesi ve diğer birinci mertebeden teorilerde kullanılan kayma düzeltme faktörüne ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu teorinin doğruluğunu teyit etmek için, simetrik ve simetrik olmayan çapraz kat tabakalı plakların eğilme problemleri çözülmüştür. Dönme ve gerilmeler için bazı sayısal sonuçlar literatürdeki üç boyutlu elastik çözüm ve daha yüksek mertebeden plak teorileri ile elde edilmiş benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Sunulan makalede mükemmel doğruluğa sahip tabakalı plakların bölgesel ve evrensel tepkileri belirlenmiştir.

Reddy (2007) kitabında, geçmişten günümüze kadar olan klasik ve kayma deformasyonlu plak teorilerinin ve onların analitik ve sayısal sonuçlarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kitap on iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde elastisitenin vektörleri, tansörleri ve denklemleri yer almaktadır. İkinci bölümde enerji prensipleri ve varyasyonel yöntemler sunulmuştur. Üçüncü bölüm klasik plak teorisi ve dördüncü bölüm plak şeritlerin analizini içermektedir. Beşinci bölümde dairesel plakların analizi ve altıncı bölümde basit mesnetli dikdörtgen plakların eğilmesi sunulmuştur. Yedinci bölüm ve sekizinci bölümler sırasıyla, çeşitli sınır koşullarına sahip dikdörtgen plakların analizini ve dikdörtgen plakların genel burkulmasını kapsar. Dokuzuncu bölümde dikdörtgen plakların dinamik analizi ve onuncu bölümde kayma deformasyonlu plak teorileri ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

On birinci bölüm kabuklar teorisi ve analizi ve son on ikinci bölüm plakların sonlu elemanlar ile analizlerini içermektedir.

#### **2.4. Homojen Ortotrop Plakların KDPT Çerçevesinde Stabilite ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri**

Bu eleştiri sürekli fiber kompozit mekaniği ile ilgilidir. Alanındaki ilk ve en önemli gelişmeler vurgulanmıştır. Okuyucuların zamanlarını almamak için yazarların ilgi ve deneyimleri doğrultusunda bazı kapsamlar boyut olarak sınırlandırılmıştır. Kompozit mekaniğindeki gelişmeler, malzeme bilimi sayesinde ilerleyen kompozit gelişimi tarafından, büyük ölçüde etkilenmiştir. Bu gelişmeleri tartışmak için hiçbir girişim yapılmamıştır. Bu çalışma, kompozit malzemelerin ve yapıların tepkisini tahmin etmek, deneylerle doğrulamak, teorileri geliştirmek ve uygulamalı teorik mekaniğin kullanımını vurgulamaktadır. Hepsi olmasa da yayınlanmış birçok çalışma için atıfta bulunulmuştur. Çok sayıda eser, belirtilen referanslarda bulunmaktadır (Herakovich, 2012).

Matsunaga (2001) çalışmasında, dönel atalet, kalınlık değişimi ve kayma deformasyonunun etkileri hesaba katılarak açılı tabakalı kompozit plakların burkulma yükü ve doğal frekanslarının analizi yapılmıştır. Kalın dikdörtgen tabakalı plaklar için yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi çerçevesinde temel dinamik denklemler sistemi, yer değiştirme bileşenlerinin kuvvet serisine açma yöntemi ve Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Basit mesnetli kalın tabakalı plağın karakteristik problemlerinin çözümü için bazı kesik şekiller dizisi teorileri uygulanmıştır. Sunulan teorinin doğruluğunu kanıtlamak için, esas doğal frekansın yakınsama özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar literatürdeki mevcut teoriler ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Kalınlık doğrultusundaki gerilme dağılımının şekilleri çizilmiştir. Sunulan yüksek mertebeden teori, kalın, çok tabakalı açılı kompozit tabakaların gerilmelerini, burkulma yüklerini ve doğal frekanslarını yaklaşık olarak, tabaka sayısına dayanmayan küçük miktardaki bilinmeyenleri ise kesin olarak önceden belirleyebilmektedir.

Ferreira vd. (2011) çalışmasında Reddy'nin üçüncü mertebeden kayma deformasyon teorisi ve kolokasyon ile radyal temel fonksiyonları, elastik plakların burkulma

yüklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Teori plağın kalınlığı boyunca, enine şekil değiştirmelerin parabolik dağılımına dayanır. Radyal temel fonksiyonları ile kolokasyon yöntemi, yüksek hassasiyet ile kritik burkulma yüklerinin ve modların elde edilmesine olanak sağlar.

Bu makalede, iki değişkenli arıtılmış plak teorisi kullanılarak çeşitli sınır koşullarına sahip kalın dikdörtgen plakların eğilme, burkulma ve titreşim analizleri için analitik çözümler sunulmuştur. Bu teori, kayma düzeltme faktörü kullanımına gerek olmayan plakların kalınlık boyunca enine kayma gerilmelerinin parabolik varyasyonları için hesaplanır. Ayrıca, sadece iki bilinmeyen içerir ve gerilme, sınır koşulları ve hareket denklemlerinin sonuç ifadeleri gibi birçok açıdan klasik plak teorisi ile güçlü benzerliklere sahiptir. Hareket denklemleri Hamilton prensibinden türetilmiştir. İki karşılıklı kenarı basit mesnetli, diğer iki kenarı isteğe bağlı sınır koşullarına sahip dikdörtgen plaklar için doğal frekans, burkulma yükü ve sapmanın kapalı form çözümleri elde edilmiştir. Karşılaştırma çalışmaları, sunulan çalışmanın doğruluğu ispatlamak için sunulmuştur. Birinci ve üçüncü dereceden kayma deformasyonu teorileri ile elde edilen doğal frekans, burkulma yükü, gerilme ve dönmenin bu teori ile elde edilenlerle çok iyi bir uyum yakaladığı keşfedilmiştir (Thai ve Choi, 2013).

Yeni sinüs kayma deformasyon teorisi, eğilme, burkulma ve fonksiyonel değişimli plakların titreşimi için geliştirilmiştir. Teori, enine kayma gerilmesinin sinüs dağılımı için dikkate alınmış ve kayma düzeltme faktörü kullanılmadan plakların alt ve üst yüzeylerindeki serbest enine kayma gerilme koşullarını ele almaktadır. Geleneksel sinüs kayma deformasyon teorisinin aksine, sunulan kayma deformasyon teorisi sadece dört bilinmeyen içerir ve hareket denklemleri, sınır koşulları ile gerilme sonuçlarındaki ifadeleri gibi birçok konuda klasik plaka teorisi ile güçlü benzerlikleri olduğu görülmektedir. Plağın malzeme özelliklerinin, hacim kesir bileşenlerinin kuvvet kuralı dağılımındaki gibi değişken olduğu varsayılmaktadır. Hareket denklemleri Hamilton prensiplerine göre türetilmiştir. Basit mesnetli plakların kapalı form çözümleri elde edilmiş ve sonuçlar birinci dereceden kayma deformasyon teorisi ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ile karşılaştırılmıştır. Sunulan bu teorinin, eğilme, burkulma ve fonksiyonel değişimli plakların titreşim tepkisinin tahmininde, doğru ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Thai ve Choi, 2013).

Termal titreşim altındaki tabakalı dikdörtgen plağın tabakaları arasındaki gerilmeler ve çökmeler, kayma deformasyon etkisini içeren genelleştirilmiş diferansiyel kareleme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Yaklaşık gerilme ve çökme çözümleri, çapraz kat tabakalı olarak termal tabaka yükünün sinüs sıcaklık titreşiminden elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, tabakanın merkez pozisyonunda özellikle  $a/h^* \leq 20$  bölgesinde kenar kalınlık oranı  $a/h^*$  değeri azaldıkça en büyük çökme gerilmelerinin arttığı göstermektedir. Diferansiyel kareleme yöntemi, birkaç dönüm noktası ile kayma deformasyonu içeren, termal sıcaklıkta sinüs titreşimine maruz çapraz kat tabakalı birçok plağın tabakalar arası gerilmelerinin ve çökmelerinin hesaplanması için etkili bir yöntem sağlamaktadır (Hong ve Jane, 2003).

Xiao vd. (2008) çalışmasında, farklı sınır koşulları altında olan kalın ve tabakalı kompozit elastik plakların küçük deformasyonlarda statik analizi için meshless bölgesel Petrov-Galerkin yöntemi ve daha yüksek mertebeden kayma ve normal deformasyonlu plak teorisi kullanılmıştır. Radyal temel fonksiyonların iki tipi, ikinci derece ve ince plak şeritleri, test fonksiyonlarında olduğu gibi kullanılmış, dördüncü dereceden şerit fonksiyonuna karşın deneme fonksiyonlar inşa etmek için çalıştırılmıştır. Farklı tabaka şekilleri için hesaplanan sonuçların, diğer araştırmacılar tarafından elde edilmiş sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Hesaplara ait maliyeti düşüren köklü sınır koşullarını uygulamaya koymak için en küçük kareler yaklaşımı ile kullanılan radyal temel fonksiyonların sonuçlar üzerindeki olumlu etkileri ortaya konulmuştur.

Hong (2009) çalışmasında, tabakalar arasındaki gerilme ve dönmeler içeren kayma deformasyonlu tabakalı dikdörtgen anizotrop plakların sıcaklık altındaki eğilmesi genelleştirilmiş diferansiyel kareleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sinüs eğrisi şeklindeki sıcaklık dağılımına sahip ısı yüklerine bağlı olarak anizotrop, simetrik olmayan, çapraz kat ve açılı katlarda çapraz merkez dönme ve boyutsuz gerilmeler bulunmuştur. Isı yükleri ve eğilme durumu altında, tabakalı anizotrop plaklar için dönmeler ve gerilmeler üzerinde kayma deformasyonunun önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Keyfi ankastre kenarlı dikdörtgen plakların tam analizi mevcut değildir. Mevcut çözümler ya yaklaşık ya da matematiksel karmaşık olarak bulunmaktadır. Bu çalışma, virtüel iş prensibi kullanılarak kolayca türetilen çift sinüs serisi çözümlerinin süperpozisyona dayalı problemleri için tam bir çözüm yöntemi sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma, gelecekteki karşılaştırmalar için önemli olacak, bir ucu ankastre diğer ucu basit mesnetli kenarların olası tüm kombinasyonları için iki tabakalı sonuçların tablolarını içermektedir (Bhaskar ve Kaushik, 2004).

Kshirsagar ve Bhaskar (2009) makalesinde, titreşim ve stabilite problemleri için yeni bir süperpozisyon yönteminin tanımlanarak uygulanması ve geleneksel süperpozisyon yöntemi ile mukayesede onun avantajlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır. Çözümün kesinlik veya doğruluk derecesi azaltılmadan yeni yaklaşım kullanılabilir. Sunulan yeni yöntem sonraki aşamalarda, analitik metodoloji veya temel denklemlerin doğasını değiştirmeden elastik bir temel, dış kuvvetler ve malzeme ortotropisi gibi karmaşık etkilerin bir arada dikkate alınabilmesini kolaylaştırmaktadır.

İki kat eğimli, nispeten derin ve kalın kabuklar için denge denklemleri ve birleştirilmiş sınır koşulları gösterilmiştir. İki birinci mertebeden kayma deformasyonu teorisi (BKDT) kullanılmıştır. İlkinde, kalın kabuklar için plak sertlik parametreleri kullanır ve diğeri sertlik parametresinin hesaplanmasındaki eğrilik etkisini içerir. Denge denklemleri, on yedi birinci mertebeden diferansiyel denklemler sistemine ulaşmak için gerilme bileşkelerinin denklemleri ile birlikte konulmuştur. Bu denklemler, yukarıdaki teorilerde adı geçen farklı sınır koşullarının altı tipine sahip izotrop, çapraz katlı, açılı katlı ve genel konumlu silindirik kabuklar için Genel Diferansiyel Kareleme (GDK) yardımı ile sayısal olarak çözülmüştür. Sonuçlar, hem literatürdeki mevcut teorilerle karşılaştırılmış hem de kabuk teorilerinin kesinliği üç boyutlu analiz ile test edilerek burada sunulmuştur (Asadi ve Qatu, 2012).

Wang ve Dawe (1999) çalışmasında, kademeli olarak artan düzlem yükleri için dikdörtgen, kompozit tabakalı plakların geometrik doğrusal olmayan tepkilerinin belirlenmesi için sonlu şerit yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, birinci mertebeden kayma deformasyonu plak teorisi (BMKDPT) ve gerilme yer değiştirme

bağıntılarında von Karman doğrusal olmama varsayımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plâğın, kademeli olarak artan düzlem kaymasına ve doğrusal kısalmasına bağlı olduğunu varsayarak uygulama sayıları tanımlanmıştır. Sonlu şerit uygulamalarının sonuçları ile bağımsız sonlu eleman sonuçlarının karşılaştırılması örneklerle gösterilmiştir.

Sheikh vd. (2002) çalışmasında, sonuncu yazar tarafından geliştirilen yüksek kesinlikli üçgen şeklinde bir eleman kullanılarak tabakalı kompozit plakların analizi gerçekleştirilmiştir. Bu elemandaki kayma deformasyonu, bağımsız alan değişimi gibi eğilme dönmeleri ve enine yerdeğiştirmeler dikkate alınmıştır. Yaklaşımda kullanılan interpolasyon fonksiyonu enine yerdeğiştirmede eğilme dönmesinde kullanılan fonksiyona göre bir derece yüksektir. Alan değişkenleri gibi düzlem içi yer değiştirmeler ve simetrik olmayan tabakaların analizleri çalışmada ele alınmıştır. Söz konusu eleman kullanılarak, farklı şekillere, sınır koşullarına, kalınlık oranlarına, tabaka sayılarına, lif konumlarına sahip plaklar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, diğer kaynaklardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve bazı öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada dikdörtgen ortotrop plakların burkulma analizi ve serbest titreşim için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Daha önce yayınlanmış yöntemlerden önemli ölçüde farklı olarak sunulan bu yöntem, serbest titreşim için pratik kesin sonuçlar elde etmek ve ortotrop plakların burkulmasını ele almaktadır. Süperpozisyon yöntemini geliştirerek, sınır değer problemi lineer cebirsel denklemlerin sonsuz sistemine indirgenmiştir. Bu araştırmada, özellikle bilinmeyenlerin ortadan kaldırılması sonrasındaki sonsuz sistemin sınırlı çözümünün varlığı, istenilen sayısal yol ile herhangi bir doğal frekans veya ortotrop plâğın kritik burkulma yükü üzerine yakınsamanın doğruluğunun önemine dikkat çekilmiştir. Teori ankastre kenarlı ortotrop plak için uygulansa da diğer sınır koşullarına genişletilebilmektedir. Burkulma analizi, sıfır frekansında serbest titreşimin bozulmuş bir durumu olarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde sonuçlarla mevcut teoride hesaplanan sonuçların karşılaştırılması mümkün olduğunca yapılmış ve bazı kayda değer sonuçlar çizilmiştir (Papkov ve Banerjee, 2015).

## **2.5. Homojen Olmayan İzotrop veya Ortotrop Plakların KDPT Çerçevesinde Stabilité ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri**

Plak teorisi katı cisimler mekaniğinin eski bir dalıdır. Genel plak teorisinin temeli yüz elli yıldan daha önce Kirchhoff tarafından ortaya konulmuştur. Bundan sonra birçok gelişmeler ortaya çıkmış aynı zamanda plak teorisi üzerine bazı araştırmalar yapılmıştır. Plak benzeri yapı elemanları, mekanik ve mühendislik gibi klasik uygulama alanlarında ve aynı zamanda bazı yeni alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma elastik plak teorisinin temel teorik yönleri hakkında kısa bir özet vermektedir. Ek bilgiler literatürde mevcuttur (Altenbach, 2008).

Pan (2003) makalesi, fonksiyonel değişimli (FD) ortotrop plakların analizi için ilk girişimlerden biridir. Kusursuz şekilcilik açısından ifade edilen çözümler, Stroh şekilciliğine ve özelliklerin kalınlık doğrultusunda üssel olarak değişen çok tabakalı FD malzemelerden yapılmış kompozit tabakalara benzerdir. Sunulan çözüm, ortotrop fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) için Pagano çözümünü geliştirmekte ve çeşitli sayısal yöntemlere dayanan FDM modeli için bir ölçü olarak kullanılabilir. Sunulan çözümün karakteristik sonuçları, homojen bir tabakayı kaplayan FDM'ye sahip tek ve çift tabakalı FDM'ler için tartışılmıştır. Her iki plağın üst yüzeylerine basit yük uygulanmıştır. Uygun bir FD tabaka ile çift tabakalı plağın üst yüzeydeki çekme gerilmesinin azaltılabildiği görülmüştür. Bu ilginç özellik, FD kompozit tabakaların tasarımında yararlı olabilir.

Bu çalışma, serbest kenarlarında paralel çatlaklar yer alan fonksiyonel değişimli ortotropik şeridin termal kırılma sorunu ile ilgilidir. Tüm malzeme özelliklerinin sadece  $y$  koordinatına (çatlak yüzeylere dik olarak) bağlı olduğu varsayılmıştır. Fourier dönüşümü kullanılarak, tekil integral denklem sisteminin içerdiği termoelastik problem azaltılmıştır. Sayısal sonuçlar çatlak pozisyonunda ve termal gerilme şiddeti faktörlerinde malzeme dağılımının etkilerini göstermek için sunulmuştur (Chen vd., 2004).

Ootao ve Tanigawa (2007) makalesinde, düzenli olmayan ısı kaynağından dolayı bir ortotrop FD dikdörtgen plağı kapsayan süreksiz termo elastik problemin teorik davranışları incelenmiştir. Dikdörtgen plağın termal ve termo elastik sabitlerinin

kalınlık koordinatına bağılı olarak üssel değiştiği var sayılmıştır. Süreksiz üç boyutlu sıcaklık, sonlu kosinüs dönüşümleri ve Laplace yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Basit mesnetli fonksiyonel değişimli ortotrop malzemedan oluşan dikdörtgen plak için üç boyutlu çözüm elde edilmiştir. Gerilme dağılımı, yer değiştirme ve sıcaklık değişimi için bazı sayısal sonuçlar kullanılarak şekiller çizilmiştir. Ayrıca, dinamik parametrelere homojen olmama ve malzeme ortotropisinin etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada, hidrostatik basınç altında homojen olmayan ortotrop kesik konik kabukların titreşim ve stabilitesi incelenmiştir. İlk olarak ortotrop malzemenin yoğunluk ve Young modülleri kalınlık doğrultusunda sürekli değiştiğinde, kesik konik kabuklar için temel bağıntıları elde edilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak temel denklemler türetilmiş ve Galerkin yöntemi uygulanarak kesik konik kabukların burkulma basıncı ve frekans parametresi elde edilmiştir. Son olarak, Young modülü ve yoğunluk birlikte ve ayrı ayrı değiştiğinde, kritik boyutsuz hidrostatik yüke ve en küçük boyutsuz frekans parametresine, konik kabuk karakteristiklerinin değişimi, homojen olmamanın ve ortotropinin etkisi incelenmiştir. Diğer çalışmalar ile karşılaştırılan sonuçlar, tablolar ve şekiller halinde sunulmuştur (Sofiyev vd., 2009).

Bu çalışma, fonksiyonel değişimli delikli kutupsal ortotrop dairesel dönel disklerin elastik problemlerini incelemektedir. Kendi eksenini etrafında sabit bir açısal hızla dönen delikli halka şeklindeki plaklarda özellikle elastik bölgedeki ortotropi ve derecelenmenin çevresel gerilme dağılımı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Kuvvet kuralı değişimine dayanan derecelendirmelerde elastik alan için açık ifadeler elde edilmiştir. Keyfi değişken derecelenmelerde, Fredholm integral denklemini çözmek için problem dönüşümünde kullanılan bir yöntem sunulmaktadır. Sayısal sonuçlar iki farklı sınır koşulu için sunulmaktadır. Bunlardan biri serbest sınırlar ve diğeri bir ucu ankastre ve diğeri ucu serbest sınırlardır. Kuvvet kuralı ile değişen malzeme özellikleri için sayısal sonuçlar, kesin olanlarla karşılaştırılmış, sunulan yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Voigt kuralına göre herhangi bir şekilde değişen malzeme özellikleri için derecelenme ve orthotropinin elastik alan dağılımına etkilerini göstermek için sayısal sonuçlar sunulmuştur (Peng ve Li, 2012).

Bu makalede, kalın fonksiyonel değişimli (FD) sandviç plakların burkulma ve serbest titreşim analizi için enine kayma deformasyonu etkilerinin göz önüne alındığı yeni bir hiperbolik kayma deformasyonu teorisi geliştirmiştir. Diğer teorilerden farklı olarak, bu teori sadece dört temel denklem içerir. Mindlin ve Reissner' in basit kayma deformasyonu teorilerindeki (BMKDT) beş değişkenin yerine, bilinmeyen fonksiyonların sayısı dördür. Plak özellikleri, malzeme bileşenlerinin hacim kesirlerine bağlı olarak kalınlık doğrultusunda basit kuvvet kuralı dağılımına sahiptir. Bu teori kullanıldığında, kayma düzeltme katsayısına gerek olmamakta ve enine kayma gerilmeleri parabolik olarak değişmektedir. Hareket denklemi Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. FD sandviç plakların kapalı form çözümleri Navier çözümü kullanılarak elde edilmiştir. Bu teoride çeşitli kalınlık oranlarına sahip plaklar için elde edilen sonuçlar, KPT'ne göre oldukça kesin olup daha yüksek mertebeden teorilerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilir (Meiche vd., 2011).

Bu makalede, ilk olarak fonksiyonel değişimli (FD) kabukların eğilme analizi için sinüs eğrisi şeklinde daha yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorisinin (YKDT) optimizasyonu ele alınmıştır. Temel denklemler ve sınır koşulları sanal iş prensibi kullanılarak türetilmiştir. Navier tipi kapalı çözüm, basit mesnetli sınır koşulları için enine yüklere bağlı olan FD plak ve kabuklar için elde edilmiştir. Optimize edilmiş sinüs eğrisi şeklindeki YKDT çerçevesinde elde edilen sayısal sonuçlar, üç boyutlu karma tip YKDT'lerle ve birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi ile kıyaslanmıştır. Sunulan sayısal sonuçlardan optimizasyon işleminin doğruluğu açısından yararlı olduğu gözlenmiştir (Mantari ve Soares, 2014).

Bu çalışmada, kayma deformasyonu kabuk teorisi (KDKT) kullanılarak üniform dış basınç yükleri etkisi altındaki fonksiyonel değişimli (FD) ortotrop silindirik kabukların titreşim ve burkulması incelenmiştir. Kayma deformasyonlu FD ortotrop silindirik kabukların temel denklemleri Donnell kabuk teorisi kullanılarak türetilmiş ve çözümünde Galerkin yöntemi kullanılmıştır. Boyutsuz kritik dış basınç yükleri ve boyutsuz frekans parametresine kabuk karakteristikleri, yapısal profiller, ortotropiklik ve kayma deformasyonunun etkileri incelenmiştir. Bazı yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ve parabolik kayma deformasyonu teorisi arasındaki farklılıkları göstermek amacıyla karşılaştırmalar yapılmıştır (Sofiyev ve Kuruoglu, 2014).

Fonksiyonel değişimli malzemeden (FDM) oluşan elastik plakların üç boyutlu anizotrop statik analizi için yaklaşık bir çözüm sunulmuştur. Herhangi sayıda homojen veya FDM tabakalardan oluşan plakların çözümü Ritz yöntemi ile birlikte kullanılan ayrıık (discrete) tabaka teorisi kullanılarak elde edilmiştir. İki tür fonksiyonel değişimli malzemeler ele alınmıştır: İlk olarak mekanik özellikler plak kalınlığı doğrultusunda üstel olarak değişmekte ve diğerinde mekanik özellikleri lif doğrultularının fonksiyonları olarak tabaka kalınlığı boyunca karesel değişmektedir. Bu yaklaşım belirli bir geçiş fonksiyonuna bağımlı değildir ve kalınlık doğrultusunda çeşitli malzeme özelliklerini temsil eden sürekli bir fonksiyon modelinde ele alınmaktadır. Yöntem, tek bir basit mesnetli FDM plak problemini çözerek doğrulanmış, kesin çözüm ile mükemmel bir uyum elde edilmiştir. Bu çözümün uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, farklı sınır koşulları ve farklı malzeme özellikleri ile iki tane daha örnek sunulmaktadır. Değişimli, homojen ve iki tabakalı plaklar FDM kullanımının muhtemel avantajlarını incelemek için ele alınmıştır (Ramirez vd., 2006).

Yang, Norris ve Stavsky tarafından geliştirilen anizotrop tabakalı plakları için eğilme teorileri incelenmiştir. Teori, izotrop homojen plaklar için Mindlin teorisi ile aynı şekilde kayma deformasyonu ve dönел eylemsizlik etkilerini içermektedir. Temel denklemler, Kirchhoff varsayımlara dayalı klasik tabakalı plak teorisinde bulunan aynı eğilme-uzatma birleşik olgusuyla simetrik olmayan tabakalı plak görüntülerini ortaya koymaktadır. Çözümlerde enine yük altında simetrik ve simetrik olmayan tabakalı esnek titreşim frekansları için eğilme sunulmaktadır. Plak eğilmesinin sayısal sonuçları, klasik elastisite teorisi ile elde edilen kesin çözümlerle mukayese edilmiş ve iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Klasik tabakalı plak teorisi, bazı lif takviyeli kompozit malzemeler için radikal değişiklik göstermiştir (Whitney ve Pagano, 1970).

İki doğrultulu değişken kalınlıkta ince, dikdörtgen plakların serbest enine titreşimine homojen olmamanın etkisi, genelleştirilmiş diferansiyel kareleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Homojen olmayan plak malzemesinin yoğunluğu ve Young modülü düzlem içi  $x$  ve  $y$  koordinatlarına lineer bağlı olarak değiştiği varsayılmaktadır. Sayısal sonuçlar tamamen ankastre ve tamamen basit mesnetli sınır koşulları için hesaplanmıştır. Genelleştirilmiş diferansiyel kareleme yöntemiyle

özüm işleml MATLBA kodu ile uygulanmıştır. Çeşitli plak parametrelerinin etkisi titreşimin ilk üç modu için araştırılmıştır. Literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılması sunulmuştur.

Bu alışmada, Winkler-Pasternak elastik zeminine oturan basit mesnetli fonksiyonel değişimli plakların serbest titreşim analizi, yeni bir yüksek kayma deformasyon teorisi kullanılarak incelenmiştir. Mevcut teori, plak altındaki ve üstündeki gerilme sınır koşullarını tam olarak karşılamaktadır. Malzeme özellikleri, plağın kalınlığı boyunca sürekli değişmektedir. Bu durutrsm kuvvet kuralı, üstel ya da bu doğrultuda başka formülasyonlara göre farklılık gösterebilir. Elastik zemine oturan fonksiyonel değişimli dikdörtgen plaklar için hareket denklemi Hamilton prensibi ile elde edilmiştir. Kapalı formda özüm, Navier tekniği kullanılarak elde edilmiştir ve sonra temel frekanslar özdeğer problemlerini çözerek bulunmuştur. Mevcut analizler aracılığıyla elde edilen sayısal sonuçlar, elastik zemindeki fonksiyonel değişimli plakların serbest titreşimi için sunulmuş ve literatürde mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır (Atmane vd., 2010).

Zenkour ve Fares (1999) makalesinde, homojen olmayan elastik özelliklere sahip çapraz tabakalı kompozit plakların eğilmesi için formülasyon sunulmuştur. Üçüncü mertebeden kayma deformasyonlu plak teorisine dayanan temel denklemler sanal iş prensibine dayanmaktadır. Küçük parametre yöntemi kullanılarak simetrik ve simetrik olmayan, tabakalı heterojen ortotrop dikdörtgen plakların analizleri sunulmuştur. Homojen olmamanın, tabaka dizilişi, en boy oranlarının ve malzeme ortotropisinin dönmeler ve gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kompozit plakların homojen olmamaya karşı tepkileri için yeni sonuçlar gelecek kıyaslamalar için bir ölçüt olarak kullanılmıştır.

Bu makalede, özellikleri kalınlık doğrultusunda değişen fonksiyonel değişimli (FD) plakların statik, titreşim ve burkulma analizleri için daha yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorisi türetilmiştir. Temel denklemler ve sınır koşulları Carrera Birleşik Formülasyonu altında sanal yer değiştirmeler prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Statik ve özdeğer problemleri radyal temel fonksiyonlara sahip düzenlemeler ile özölmüştür. Sunulan yaklaşımın etkinliği, fonksiyonel değişimli sandviç plakların ve fonksiyonel değişimli izotrop plakların burkulması, serbest

titreşimi, gerilmeleri ve dönmesi için sayısal sonuçlar ve değerlendirmeler yapılmıştır (Neves vd., 2013).

Bu makalede, analitik bir yaklaşım ile daha yüksek mertebeden kayma ve normal deformasyonlu plak teorisi kullanılarak iki elastik zemin parametresine dayanan basit mesnetli fonksiyonel değişimli dikdörtgen plakların serbest titreşimi çalışılmıştır. Üç yer değiştirme bileşeninin tümü Legendre polinomu kullanılarak kalınlık yönünde genişletilmiştir. Enine kayma ve normal deformasyonların etkileri dikkate alınmış ve sanal iş prensibi kullanılarak hareket denklemleri türetilmiştir. Fonksiyonel değişimli plağın kalınlığına rağmen mekanik ve fiziksel özelliklerinin çeşitlerini açıklamak için bir kuvvet kuralı dağılımı kullanılmıştır. Temel denklemler türetilmiş ve doğal frekanslarla yerini tutan formlar on beşinci mertebeye doğru genişlemede elde edilmiştir. Detaylı sayısal sonuçlar verilmiştir ve mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki on beşinci mertebeden genişleme kullanıldığında, kalın fonksiyonel değişimli dikdörtgen plakların doğal frekansı için bu teorelin sonuçları, üç boyutlu elastiklik teorisinden sonuçları elde etmekten çok daha yakındır (Sheikholeslami ve Saidi, 2013).

Eğilme-uzama-kayma çiftlerinin dikkate alınması fonksiyonel değişimli ortotrop plakların termal burkulmasını karmaşık bir hale getirmektedir. Bu konu ile ilgili literatürde hiçbir çalışma bulunmamakta ve sınırlı sayıda teori bu duruma model olabilmektedir. Diğer yandan yüksek mertebeden teorilerin üç farklı tipi; açık kayma eğilmeli sadeleştirilmiş dört parametrelili kabuk teorisi (SPT), Reddy'nin üçüncü mertebeden beş parametrelili teorisi (ÜMT) ve Reddy'nin p'inci dereceden genelleştirilmiş teorisi (GRT) ilk defa sunulan çalışmada uygulanmıştır. Temel diferansiyel denklemler yeni diferansiyel kareleme yöntemi ile çözülmüştür. En az yer değiştirme parametrelerine sahip SPT teorisi GRT ve ÜMT teorilerine göre daha isabetli sonuçlar verdiği sunulan sonuçlarla tespit edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada ön burkulma etkileri de göz önüne alınmıştır. Çok sayıda geometrik ve malzeme özellik parametreleri ve çeşitli sınır koşulları için kapsamlı parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. SPT ve GRT'nin bazen uygun olmayan sonuçlar verdiği sunulan çalışmadan görülmektedir. Ayrıca, yüksek dereceli üsler ve ortotropi açıları burkulma sıcaklıklarını azaltmakta iken en-boy oranı arttığında bunun tersi olabilmektedir (Mansouri ve Shariyat, 2014).

Thai vd. (2014) çalışmasında, fonksiyonel değişimli sandviç plaklar için birinci mertebeden yeni bir kayma deformasyonu teorisi sunulmuştur. Mevcut birinci mertebeden kayma deformasyonu teorisine daha ileri bir varsayım ilave edilerek, bilinmeyenlerin sayıları ve mevcut teorinin temel denklemleri azaltılmış, dolayısıyla kullanım için basitleştirilmiştir. Buna ek olarak, denge denklemleri kullanılarak enine kayma kuvvetlerinden doğrudan enine kayma gerilmeleri hesaplandığından mevcut teorideki kayma düzeltme faktörünün kullanımına gerek olmamaktadır. Hareket denklemi Hamilton prensibine dayanarak türetilmiştir. Çeşitli sınır koşulları altında dikdörtgen plakların serbest titreşim, burkulma ve eğilme analizleri için analitik çözümler sunulmuştur. Doğrulama çalışmaları göstermiştir ki, mevcut birinci mertebeden kayma deformasyonu teorisi ne klasik olandan daha doğrudur, ne de daha fazla bilinmeyen sayısına sahip daha yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorileri ile kıyaslanabilir.

Oktem (2014) bu makalede, analitik bir çözüm tekniği kullanılarak yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorisine bağlı olarak fonksiyonel değişimli plakların statik analizlerini gerçekleştirmiştir. Sınır-devamsız çift Fourier serileri yaklaşımı, karışık tip kenetlenmelere sahip büyük ölçüde eşleşmiş doğrusal kısmi türev denklem sistemlerini çözmek için kullanılmıştır ve kenarlarda basit mesnetli sınır koşulları saptanmıştır. Plakların mekanik özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesirleri ile bağlantılı olarak kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık yönünde değiştiği farz edilmiştir. Analitik sonuçlar, düzgün yayılı yük altında piyasada satılan yazılımlar kullanılarak sonlu eleman karşıtları ile karşılaştırılmıştır. Sunulan sonuçlar, sonlu elemanlar karşıtları ile iyi bir uyum içindedir.

Xia vd. (2010) makalesinde, homojen olmayan kısmen kalın plağın elastik dinamik analizi için ağırsız yerel Petrov-Galerkin yöntemi sunulmuştur. Kısmen kalın plağın ayrıklaştırılmış denklem sistemi yerel ağırlıklı artıklar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Yerel ağırlıklı artıklar yönteminin bir test fonksiyonu olarak dördüncü dereceden eğrilik fonksiyonu ile deneme fonksiyonu olarak kuadratik polinom esaslı fonksiyonla birleştirilmiş radyal temel fonksiyon kullanılmıştır. Şekil fonksiyonu Kronecker delta fonksiyonu özelliklerine sahiptir ve zorunlu sınır koşullarını uygulamak için ek hiçbir uygulamaya sahip değildir. Sayısal prosedürde, integrasyonda Gauss noktasındaki uygun malzeme parametreleri kabul edilerek

dikkate alınan alanda malzeme özellikleri modellenmiştir. Örnekler göstermiştir ki, homojen olmayan kısmen kalın plağın elastik dinamik problemleri için sunulan yöntem oldukça doğru sonuçlar vermektedir.

## **2.6. Elastik Zemine Oturan Homojen Ortotrop Plakların KPT ve KDPT Çerçevesinde Stabilité ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri**

Akhavan vd. (2009) çalışması, elastik zemine oturan, iki zıt kenarları basit mesnetli, düzlem içi yüklerin üniform ve lineer olarak dağılımına maruz kalan dikdörtgen Mindlin plaklarının burkulma analizi için kesin çözüm sunmaktadır. Diğer iki kenar ise herhangi bir şekilde basit mesnetli ya da ankastre mesnetli olabilir. Elastik zemine oturan ve düzlem içi yük etkisi altındaki dikdörtgen plağın karakteristik denklemlerinin elde edilmesi, plak zemin etkileşimini içeren birinci mertebeden kayma deformasyon etkisinin göz önünde bulundurulduğu Mindlin plak teorisine dayanmaktadır. Elastik zemin modeli, Winkler modeline bir kayma tabakası eklenerek Pasternak modeli olarak kullanılmaktadır. İlk karşılaştırmalar elde edilen birkaç veri ile mevcut kapalı formda kesin çözümün doğruluğunu göstermek için yapılmıştır. Ardından, zemin sertlik katsayıları ve sınır koşulları ile birlikte diğer plak parametrelerinin yani; en boy oranları, kalınlık uzunluk oranları ve yükleme faktörlerinin düzlem içi burkulma yüküne etkileri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Ek olarak, yukarıda belirtilen parametrelerin boyutsuz kritik burkulma yüklerine etkisi boy oranlarının geniş bir aralığı için grafiksel olarak sunulmuştur. Son olarak, dikdörtgen Mindlin plakları için mod şekilleri üç boyutlu olarak gösterilmiştir.

Değişken Winkler elastik zeminine oturan bir kirişin stabilite ve titreşim özdeğer problemlerini çözmek için iki yöntem sunulmuş ve karşılaştırılmıştır. Birincisi, değişken bir Winkler elastik zemine oturan kiriş için tam sertlik, uyumlu bir kütle ve geometrik sertlik matrisleri kullanımına dayanmaktadır. İkinci yöntem, titreşim ve stabilite analizleri için, düzenli kiriş sertlik matrisine bir zemin elemanı sertlik matrisi eklenmesine dayanmaktadır. Bu matrisler ile doğal frekansları ve titreşim mod şekilleri ile burkulma yükü ve mod şekli bulmak, bölümleri az sayıda kullanarak mümkün olmuştur. Bu zemin elemanının sertlik yaklaşımının kullanımı düşük maliyetli hesaplamalarda daha iyi yakınsama sonuçları vermiştir (Eisenberger vd., 1987).

Liew vd. (1996) çalışmasında, Mindlin plak teorisine dayalı Winkler zemin üzerine oturan dikdörtgen plakların yaklaşık analizi sunulmuştur. Plaklar serbest, basit mesnetli ve ankastre sınır koşullu herhangi bir kombinasyona tabidir. Problem çözümleri, temel diferansiyel denklemleri çözerek ve diferansiyel kareleme yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Sayısal sonuçlar, yöntemin geçerliliğini ve doğruluğunu kurmak için mevcut literatür ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada bazı seçilmiş yerlerde, çökme ve gerilme üzerinde oluşan kayma deformasyonunun sayısal etkilerini gösterilmiştir. Çeşitli plaklar için eğilme ve burulma momenti ve kayma kuvveti dağılımları, kalınlık oranı  $h/a$  değiştirilerek kayma deformasyonunun önemli etkisini göstermek için grafiksel olarak sunulmuştur.

Elastik bir ortam ile temas halinde olan ince, dairesel silindirik kabuğun serbest titreşimleri, membran teorisi kullanılarak incelenmiştir. Elastik ortamın tepkisi Winkler/Pasternak modelleri ile gösterilmiştir. Boyutsuz frekans parametrelerini ve eksenel dalga parametrelerini içeren dinamik özellikleri çizilmiştir. Radyal titreşim mod frekansının zemin modülü değerine önemli ölçüde etkisi bulunmuştur, diğer iki mod frekansları ise, yani burulma ve uzunlama neredeyse etki etmemiştir. Ayrıca boyutsuz kayma modülleri parametresinin etkileri bulunmuştur. Bu etki radyal titreşim mod frekansında, az ölçüde burulma mod frekansı ve en az uzunlama mod frekansından daha belirgindir (Paliwal vd., 1996).

Bu çalışma, iki parametrelili zemin modelleri üzerine outran Levy plaklarının elastik eğilme, burkulma ve titreşim problemleri ile ilgilenmektedir. Bu tür plaklar için kabul edilmiş kesin çözümler, Green fonksiyonları kullanılarak türetilmiştir. Bu kesin çözümler, sayısal çözümlerin yakınsama, geçerlilik ve doğruluğunu kontrol etmek için kullanılabilir ve araştırmacılar ve mühendisler için yararlı olmaktadır. Bu amaçla, iki parametrelili zemin üzerindeki Levy plaklarının eğilme, burkulma ve titreşim sonuçları için bazı örnekler sunulmuştur. Ayrıca bu kesin çözümler, çeşitli tasarım parametreleri açısından çözümlerin gerçek özelliklerini açıkça göstermektedir (Lam vd., 2000).

Omurtag ve Kadioğlu (1998) çalışmasında, karışık sonlu eleman formülasyonu üç farklı yöntem ile yaygın olarak kullanılmıştır. Bunlar; Hellinger-Reissner prensibi, Hu-Washizu prensibi ve Gateaux Diferansiyel yöntemidir. Bu çalışmada, Gateaux

diferansiyel yöntemi kullanılarak, fonksiyonel ve Winkler/Pasternak (izotropik/ortotropik) elastik zemine oturan Kirchhoff tipi ortotrop plak modelleme yeteneğine sahip bir plak elemanı verilmiştir ve serbest titreşim analizinin sayısal sonuçları gerçekleştirilmiştir. Kabuk, plak, gibi çeşitli yapısal problemlerde Gateaux diferansiyel yöntemi, Omurtag ve Aköz tarafından başarıyla uygulanmıştır. PLTEOR4 elemanının  $4 \times 4$  DOF ile dört düğümü vardır. Ortotrop plağın doğal açısal frekans sonuçları, literatürdeki mevcut analitik ifadeler ve elastik zemin üzerindeki ortotrop plak için bazı yeni problemler çözülerek doğrulanmıştır. Kayma tabakası ihmal edildiğinde ise Pasternak zemini, özel bir durum olarak, Winkler tipi zemine yaklaşmaktadır. Sonuçlar oldukça tatmin edici olmuştur.

Civalek (2007) bu makalede, elastik zemine oturan ince dikdörtgen plakların geometrik doğrusal olmayan statik ve dinamik problemlerinin çözümü için sayısal bir yöntem sunmuştur. Winkler-Pasternak iki parametrelili zemin modeli olarak kabul edilmiştir. Dinamik analoglarda Von Karman denklemleri kullanılmaktadır. Plağın doğrusal olmayan kısmi diferansiyel ana denklemleri sırasıyla, ayrık tekil kıvrım ve harmonik diferansiyel kareleme yöntemlerini kullanarak uzay ve zaman etki alanlarını ayırklaştırmaktadır. Tekil çekirdek gibi düzenlenmiş Shannon çekirdeği ve Lagrange delta çekirdeğin iki farklı uygulaması, mevcut ayrık tekil kıvrım algoritmasını göstermek için tekil kıvrım olarak seçilmiştir. Analiz, iki ucu ankastre ve basit mesnetli plaklar ile kenarları taşınmaz düzlem içi sınır koşulları için sağlanmıştır. Çeşitli tiplerde dinamik yüklemeler, yani adım fonksiyonu, sinüsoidal darbe, N dalgası darbesi ve üçgen yük incelenmiş ve sonuçlar grafik olarak sunulmuştur. Winkler ve Pasternak zemin parametrelerinin etkilerinin, zemin kütle etkilerine tepkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak, dinamik analize süspansiyon etkisi incelenmiştir. Önerilen ayrık tekil kıvrım ve harmonik diferansiyel kareleme birleştirilmiş yöntemlerin doğruluğu, sayısal örnekler ile ortaya konulmuştur.

Shen (1995) çalışmasında, iki parametrelili (Pasternak tipi) elastik zemine oturan düzlem içi yüklemeye maruz, basit mesnetli kompozit tabakalı dikdörtgen plağın burkulma ötesi analizi sunulmuştur. Burkulma yüklerini ve burkulma ötesi denge yörüngesini belirlemek için pertürbasyon tekniğini kullanmaktadır. Plağın ilkel geometrik kusurları dikkate alınmıştır. İlkel kusurlu ve kusursuz, simetrik olmayan açılı kat ve simetrik çapraz tabakalı dikdörtgen plağın davranışları ile ilgili sayısal

örnekler sunulmuştur. Sayısal sonuçlar boyutsuz değerler için grafik formda sunulmuştur.

Doğruoğlu ve Omurtag (2000) çalışmasının amacı Pasternak tipi zemin ile kompozit tabakalı plak etkileşiminin stabilite analizlerini ve zeminin ikinci parametrenin kritik burkulma yüküne etkilerini araştırmaktır. İki parametrelili zemin modelleri tek parametrelili (Winkler) zemin modellerine kıyasla daha gerçekçidir. Uygun dinamik ve geometrik sınır koşullu, ince tabakalı kompozit plaklar için potansiyel operatör kavramı ile Gâteaux diferansiyeli kullanılmıştır. Doğrusallaştırılmış artan formülasyon ve karışık sonlu eleman yöntemi için stabilite analizlerinin adımları oluşturulmuştur. Özel durumda, Pasternak zeminin modeli kullanılarak ikinci parametre ihmal edilirse Winkler modeli elde edilir. Dört düğümlü dörtgen, izoparametrik ve  $C_0$  sınıfı 4 x 9 serbestlik dereceli eleman oluşturulmuştur. Her bir düğüm için değişkenler üç zar kuvveti ve üç momente dönüştürülmüştür. Sonuçlar literatürdeki mevcut sayısal çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. İkinci parametrenin kritik burkulma yüküne etkisinin önemli derecede olduğu ve elde edilen sonuçların ilgili zemin modelleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

## **2.7. Elastik Zemine Oturan Homojen Olmayan Plakların KPT ve KDPT Çerçevesinde Stabilite ve Titreşim Davranışı İle İlgili Çalışmaların Özetleri**

Bu çalışmada ilk olarak, düzlem içi yük altında iki parametrelili elastik zemine oturmuş fonksiyonel değişimli düz kenarlı dörtgen plakların burkulma analizi sunulmaktadır. Formülasyonda birinci dereceden kayma deformasyon teorisi temel alınmıştır. Malzeme özelliklerinin kalınlık doğrultusunda değiştiği varsayılmaktadır. Çözüm yönteminde temel denklemler fiziksel etkiden hesaplama etkisine dönüşmekte ve sonra, verimli ve doğru bir sayısal yöntem olarak diferansiyel kareleme yöntemi kullanılarak uzaysal türevler ayrıştırılmıştır. Yöntemin yakınsaklığı inceledikten sonra, izotrop çarpık ve fonksiyonel değişimli dikdörtgen plaklar için literatürdeki mevcut sonuçlarla elde edilen çözümler karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu gösterilmiştir. Ardından kalınlık-boy oranı, elastik temel parametreleri, hacim-kesir endeksi, geometrik şekil ve sınır koşullarının fonksiyonel değişimli plakların kritik burkulma yükü parametresine etkisi incelenmiştir (Malekzadeh vd., 2012).

Kumar ve Lal (2012) çalışmasında, klasik plak teorisi temel alınarak Rayleigh-Ritz yönteminde iki boyutlu sınır karakteristikli ortogonal polinomlar kullanılarak elastik zemin üzerinde bulunan çift doğrusal kalınlığa sahip ortotrop plakların serbest titreşimi sunulmuştur. Ortogonal polinomları türetmek için Gram-Schmidt yöntemi kullanılmıştır. Plâın homojen olmamasının, malzeme yoğunluğu ve elastik özelliklerdeki değişimlerden kaynaklandığı varsayılmıştır. İki boyutlu kalınlık değişimi, plâın kesişen iki kenarı doğrultusundaki doğrusal değişimlerin Dekart çarpımı olarak dikkate alınmıştır. Ankastre, basit mesnetli ve serbest sınır koşullarının dört değişik kombinasyonu için, titreşimin ilk üç modunda homojen olmamanın, en-boy oranının ve kalınlık değişiminin elastik zemin parametreleriyle bir arada titreşim frekanslarına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dört sınır koşulu için belirlenmiş plâın üç boyutlu mod şekilleri çizilmiş ve literatürdeki çalışma sonuçları ile özel halde kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada, Galerkin yöntemi kullanılarak elastik ortamda FD ortotrop silindirik kabukların, burulma titreşimi ve stabilite problemleri araştırılmıştır. Silindirik kabuğun üzerinde elastik bir ortamın tepkisini tanımlamak için Pasternak elastik zemin modeli kullanılmıştır. Karışık sınır koşulları kabul edilmektedir. Kabuğun ortotrop malzeme özellikleri ve yoğunluğu kalınlık doğrultusunda üstel olarak değişmektedir. Pasternak tipi elastik zemin üzerine oturan, burulma yükü altındaki FD ortotrop silindirik kabuğun temel denklemleri elde edilmiştir. Elastik zemin üzerine oturan fonksiyonel değişimli ortotrop silindirik kabuğun kritik burulma yükü ve boyutsuz burulma frekans parametresi için ifadeler elde edilmiştir. Kritik burulma yükü ve boyutsuz burulma frekans parametrelerine, kabuk parametrelerinin değişim etkilerinin, malzeme değişim derecesini karakterize eden üstel faktörün, ortotropinin, zemin sertliğinin ve kayma zemini modülünün etkileri incelenmiştir (Najafov vd., 2013)

Bu makalede, elastik zemindeki fonksiyonel değişimli plakların serbest titreşimi için yüksek mertebeli kayma deformasyonu teorisi geliştirilmiştir. Kayma gerilmelerinin plak yüzeylerinde ortadan kaybolacağı şekilde kalınlık boyunca kayma basınçlarının parabolik varyasyonlarını meydana getiren düzlem deplasmanlarının kayma bileşenlerini, eğilme ve kayma bileşenlerini meydana getiren düzlem ve enine deplasmanların varsayımlarına dayanarak yerdeğiştirme alanları seçilmiştir. Bu

nedenle kayma düzeltme faktörü kullanılmasına ihtiyaç kalmamıştır. Fonksiyonel değişimli plakların malzeme özelliklerinin bileşen hacim kesri oranlarının kuvvet kuralı dağılımına göre değiştiği varsayılmıştır. Elastik zemin Pasternak zemini olarak modellenmiştir. Hareket denklemi Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Dikdörtgen plağın kapalı form çözümü elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar üç boyutlu elastiklik çözümleri ve üçüncü mertebeden kayma deformasyonu teorisi çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, güç kanunu indeksi, kalınlık oranı, zemin parametresi ve sınır koşulunun plakların doğal frekansları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Thai ve Choi, 2012).

Bu çalışmada, çeşitli sınır koşulları altında elastik zemin üzerine oturan üssel değişimli malzemeden oluşan sandviç plağın titreşim ve burkulma davranışlarını ele alınmaktadır. Farklı sınır koşullarında orta düzlem yer değiştirmeleri için yeni fonksiyonlar önerilmektedir. Winkler elastik zeminine ek olarak kayma tabakası da dikkate alındığında, izotrop veya ortotrop elastik zemin Pasternak zeminine dönüşür. Mevcut üssel değişimli malzemeden oluşan sandviç plağın, metal-seramik üssel değişimli malzeme kaplaması tarafından sıkıştırılmış tam seramik çekirdek tabakasından yapıldığı kabul edilmiştir. Homojen olmayan kompozit plakların dinamik tepkisinin temel denklemleri çeşitli kayma deformasyon plak teorileri kullanılarak elde edilmiştir. Simetrik üssel değişimli malzemeden oluşan sandviç plakların çeşitli türleri için kritik burkulma yükleri ve doğal frekansların sayısal sonuçları sunulmaktadır. Bu çözümün geçerliliği literatürdeki mevcut çözümler ile karşılaştırılarak gösterilmektedir. Homojen olmama parametresi, en boy oranı, kalınlık oranı ve zemin parametrelerinin doğal frekanslar ve kritik burkulma yüklerine etkileri incelenmiştir (Sobhy, 2013).

Mevcut çalışmalar, Winkler-Pasternak elastik zemin üzerine oturmuş fonksiyonel değişimli plakların termomekanik eğilme tepkisi ile ilgilenmektedir. Teorik formülasyonlar, son zamanlarda geliştirilen düzenlenmiş trigonometrik kayma deformasyon teorisine dayanmaktadır. Enine kayma gerilmesinin trigonometrik dağıtımı için, bir teori dikkate alınmıştır. Geleneksel trigonometrik kayma deformasyon teorisinin aksine, mevcut düzenlenmiş trigonometrik kayma deformasyon teorisi, diğer kayma deformasyon teorilerinde olduğu gibi beşe karşı sadece dört bilinmeyen içermektedir. Fonksiyonel değişimli plakların malzeme

özelliklerinin, hacim kesir bileşenlerin basit bir kuvvet yasası dağılımına göre, kalınlık boyunca sürekli olarak değiştiği kabul edilmiştir. Elastik zemin iki parametrelili Pasternak zemini olarak modellenmiştir. Kayma deformasyon teorileri sonuçları birlikte karşılaştırılmıştır. Sayısal örnekler fonksiyonel değişimli plakların termomekanik davranışı üzerindeki değişim indeksi, plak en-boy oranı, yan kalınlık oranı ve elastik zemin parametrelerinin etkilerini kapsamaktadır. Sunulan bu teorisinin, fonksiyonel değişimli plakların termomekanik eğilme tepkisinin tahmininde doğru ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Bouderba vd., 2013).

Bu makalede, iki parametrelili elastik temeldeki nokta desteklerin dayanımına sahip homojen olmayan kısmen kalın plakların serbest titreşim analizi için serbest elemanlı Galerkin yöntemi ile kombine edilmiş kayma deformasyonlu plak teorisi kullanılmıştır. Yeterli bir doğruluğa erişmek için bazı diğer yöntemlerde bir zorluk olarak görülebilen düşük düğüm sayısı kullanılmasına rağmen bu yöntem ile elde edilmiş titreşim sonuçları mevcut literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, homojenlik varyasyon parametresi, en-boy oranı, kalınlığın uzunluğa oranı, temel parametreleri, sınır koşullarının çeşitli türleri ve farklı sayılardaki nokta desteklerin farklı değerleri için sayısal örneklerin çözümü ile bu yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Bu sayısal sonuçlar, çeşitli yapısal uygulamalardaki tasarımcı ve mühendisler için faydalı bilgiler sunar ve de gelecek referanslar için kullanılabilir, faydalı bir kriter olduğunu gösterir (Bahmyari ve Khedmati, 2013).

Bu çalışmada, termo mekanik yükler altında iki parametrelili elastik zemine oturan ortotrop dikdörtgen plağın eğilme tepkisi ele alınmaktadır. Birleştirilmiş kayma deformasyon plak teorisi kullanılarak, yer değiştirme ve gerilmeler için analitik çözümler incelenmiştir. Mevcut plak teorisi, enine kayma deformasyon kalınlık dağılımları ve aralarında enine kayma düzeltme faktörü içermeyen şekil değiştirme dağılımlarını içermektedir. Plak ve zeminler arasındaki etkileşimi içeren temel denklemler elde edilmiştir. Sistemin davranışını göstermek için sayısal sonuçlar sunulmuştur. En boy oranı, yan-kalınlık oranı, genişleme katsayıları oranı ve istifleme dizisinin, ısının neden olduğu cevaba etkileri incelenmiştir (Zenkour vd., 2013).

Bu çalışmada, ortotrop heterojen fonksiyonel değişimli malzemeden oluşan plakların kayma burkulma analizi ilk defa ele alınmıştır. Ayrıca, Winkler tipi elastik zemin

etkisi kabul edilmektedir. Malzeme özelliklerinin düzlem içi ortotropi ve enine heterojenliğe sahip olduğu varsayılmaktadır. En doğru yaklaşım, üç boyutlu elastisite yerine yaklaşık plak teorilerini kullanarak gerçekleştirilmektedir.  $C_0$  sürekli sonlu eleman kodları ya da yarı analitik yöntemleri kullanan mevcut yerdeğiştirme bazlı tüm burkulma analizlerinin aksine, bu formülasyonlarda önerilen üç boyutlu kübik B-eğrisi elemanı kullanılarak  $C_2$  sürekli olmaktadır. Sonuçlar, minimum potansiyel enerji ve Galerkin tipi üç boyutlu kübik B-eğrisi çözüm yöntemi kullanılarak, lineer olmayan bir sonlu eleman yöntemi prensibine göre elde edilmiştir. Burkulma yükleri genelleştirilmiş geometrik sertlik kavramı temel alınarak tespit edilmiştir. Bu bağlamda, burkulma öncesi ve burkulma durumundaki etkiler kabul edilmiştir. Daha iyi bir vizyon ve daha detaylı tartışmalar sunmak için, burkulma mod şekilleri ve zemin etkileşim detayları kenarları basit mesnetli plaklar için tartışılmıştır. Buna ek olarak, daha pratik olan serbest ve ankastre kenar koşulları da dikkate alınmıştır (Shariyat ve Asemi, 2014).

Morimoto ve Tanigawa (2007), çalışmasında düzlem içi basınç altında elastik zemin üzerindeki sonsuz homojen olmayan ince plakların elastik stabilitesi ele alınmıştır. Elastik sertlik sabitleri plağın kalınlığı yönündeki koordinat değişkenine bağlıdır. Elastik zemin, doğrusal ve doğrusal olmayan yay sabitleri ile karakterize edilip, Winkler-tipi model olarak gösterilmiştir. İlk olarak, elastik gerilme enerjisinin varyasyonları alınarak, Föppl-von Karman denklemleri türetilmiştir. Sonra üniform düzlem içi basınç altında plağın doğrusal stabilite analizini geliştirmek ve üç durum için dalga numaraları ve kritik yükler açık bir şekilde türetilmiştir. Kritik durumlar üzerindeki, malzeme homojen olmaması, malzeme ortotropisi ve yükleme ortotropi etkileri bağımsız olarak incelenmiştir. Son olarak, plağın başlangıçtaki burkulma instabilitesi basit bir doğrusal olmayan analiz ile gerçekleştirilmiştir. Çoklu ölçekler yöntemi ile kararsız modlar için, mod tipinden elde edilen genlik denklemleri onların genliğinden türetilmiştir ve sonra burkulma modlarının malzemenin homojen olmamasına etkisi niteliksel olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, yanal basınca maruz elastik zemin üzerindeki homojen olmayan ankastre kabukların stabilite özelliklerini belirlemek için bir teorik analiz sunulmuştur. Kabuk için temel denklemler elde edilmiş, elastik zemine oturan kabukta Young modülü kalınlık doğrultusunda üssel olarak değişmektedir. Temel

denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak, homojen olmayan veya elastik zeminsiz kabuğun kritik yanal basınç ifadeleri elde edilmiştir. Son olarak, homojen olmamanın elastik zeminin ve kabuk karakteristiklerinin kritik yanal basınca etkileri incelenmiştir (Sofiyev vd., 2014).

Elastik ortamdaki bir fonksiyonel değişimli orta tabaka ile eksenel sıkıştırılmış üç tabakalı kesik konik kabukların titreşim ve stabilite analizleri sunulmuştur. Fonksiyonel değişimli malzemelerin (FDM) malzeme özelliklerinin, basit kuvvet kuralı ve bileşenlerin hacim kesirleri açısından üssel dağılımlarına göre kalınlık doğrultusunda kademeli olduğu varsayılmaktadır. Malzeme karışımı beş çeşit olarak ele alınmıştır. Elastik ortamı tanımlamak için Pasternak modeli kullanılmıştır. Fonksiyonel değişimli malzeme içeren orta tabaka ile üç tabakalı kesik konik kabuk için temel bağıntılar, değiştirilmiş Donnell tipi dinamik stabilite ve uygunluk denklemlerinden çıkarılmıştır. Ana denklemler çözülerek elastik zeminsiz fonksiyonel değişimli orta tabaka ile üç tabakalı kesik konik kabuklar için boyutsuz frekans parametreleri ve boyutsuz kritik eksenel yük ifadeleri Galerkin yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, kompozisyonel profillerinin, zeminin etkisi, uzunluk yarıçap oranı, kabuk kalınlığının FDM kalınlığına oranı değişimlerinin orta tabakası FDM olan kabuğun boyutsuz kritik eksenel yük ve boyutsuz frekans parametresine etkilerini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, mevcut literatürdeki değerler ile elde edilen değerler karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Najafov vd., 2014a).

Bu makalede, kayma gerilmeleri dikkate alınarak hidrostatik basınç altında bulunan ve Pasternak elastik zemine oturan FD ortotrop silindirik kabukların stabilitesi incelenmiştir. Kayma gerilme şekil fonksiyonu kabuk kalınlığı boyunca parabolik bir şekilde dağılmıştır. Birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanarak Pasternak elastik zemine oturan üssel değişimli ortotrop silindirik kabukların denklemleri Donnell tipi kabuk teorisi çerçevesinde elde edilmiştir. Bu çalışmada birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı Pasternak elastik zemine oturan üssel olarak değişen ortotrop silindirik kabukların kritik hidrostatik basınçları için kapalı formda çözümleri elde edilmiştir. Özel durumlar için klasik kabuk teorisi (KKT) temel alınarak elastik zeminsiz üssel değişimli ortotrop silindirik kabukların kritik hidrostatik basınç ifadeleri elde edilmiştir. Son olarak, birinci mertebeden

kayma deformasyon teorisine dayanan kritik hidrostatik basınçtaki Pasternak zemini, kayma gerilmesi, ortotropi ve heterojenlik etkileri araştırılmıştır (Najafov vd., 2014b).

Bu makalede, rastgele sistem özelliklerinin, yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi (YMKDT) kullanan, sıcaklığa bağlı özelliklere sahip olan düzgün sıcaklık artışı altındaki tabakalı kompozit plakların termal burkulma yüküne olan etkileri incelenmiştir. Placı oluşturan kompozit malzeme özellikleri, termal genleşme katsayısı ve tabaka kalınlığı bağımsız rasgele değişkenler olarak modellenmiştir. Özdeğer probleminin çözümü için  $C^0$  sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Sistem özelliklerindeki rastgeleliği hesaba katmak için Taylor serilerine dayanan birinci mertebe pertürbasyon yöntemi kullanılmıştır. Termal burkulmanın ikinci mertebe istatistiği elde edilmiştir. Sonuçlar, literatürdeki mevcut sonuçlarla ve Monte Carlo simülasyon yöntemi ile teyit edilmiştir (Lal vd., 2008).

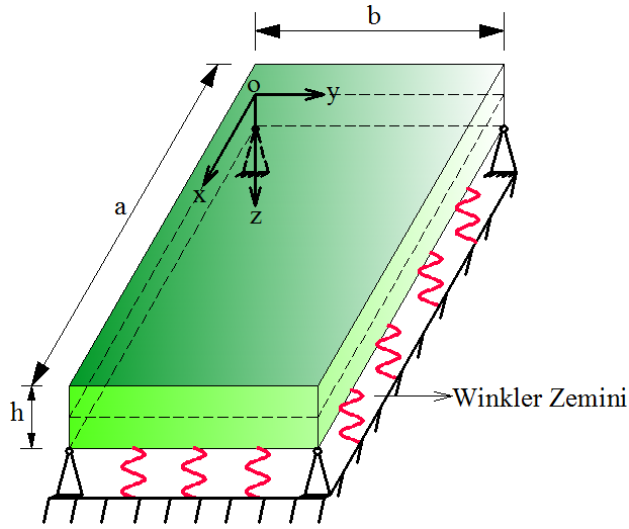
Lal ve Dhanpati (2009) çalışmasında, KPT çerçevesinde, iki parametrelili zemine (Pasternak tip) oturan iki karşı kenarı basit mesnetli ( $y=0$  ve  $y=b$ ), kalınlığı değişen, homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plajın serbest titreşimi incelenmiştir. Diğer iki kenar ( $x=0$  ve  $x=b$ ) ankastre ve basit mesnetli kenar koşullarının herhangi bir kombinasyonu olabilir. Plak malzemesinin homojen olmaması, Young modülü ve yoğunluğun bir doğrultudaki üstel değişiminden kaynaklandığı varsayılmıştır. Sonraki aşamada, yer değiştirmeyi basit mesnetli kenarlar arasında yer alan değişkenin sinüs fonksiyonu olarak ifade ederek ve diğer doğrultuda üstel değişen kalınlığa sahip plakların dördüncü mertebeden kısmi türevli diferansiyelli hareket denklemleri değişken katsayılı adi diferansiyel denkleme indirgenir. Daha sonra, elde edilen denklemler Chebseyhev düzenleme tekniği kullanılarak diğer iki uçtaki ankastre ve basit mesnetli sınırların iki farklı kombinasyonu için çözülmektedir. Homojen olmama, yoğunluk ve kalınlık değişimi gibi parametrelerle, zemin parametrelerinin değişik en-boy oranına sahip plakların frekanslarına olan etkilerini incelemek için en düşük üç frekans hesaplanmıştır. Diğer yöntemlerle elde edilmiş sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, sunulan yaklaşımın geçerli olduğunu göstermektedir.

Bu makalede, KPT temel alınarak, Winkler zemin üzerinde bulunan üniform kalınlıklı ortotropik dikdörtgen plakların titreşim karakteristiklerine homojen olmamanın etkisini incelemek için Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılmıştır. Plak malzemesinin homojen olmamasının, ortotropinin her iki doğrultusunda Young modülü ve yoğunluğun doğrusal değişiminden kaynaklandığı varsayılmıştır. Bu tür plakların enerji işlevi, her iki yönde sınır karakteristik ortogonal polinomlar kullanılarak minimize edilmiştir. Geometrik sınır koşullarını sağlayan bu polinomlar, Gram-Schmidt yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Jacobi yöntemi kullanılarak, ankastre, basit mesnetli ve serbest kenarların dört farklı kombinasyonunda homojen olmama parametrelerinin, yoğunluk parametrelerinin, zamanın parametresinin ve en-boy oranının değişik değerleri için plakların frekansları hesaplanmıştır. Ele alınan tüm sınır koşullarında, ilk üç mod için üç boyutlu mod şekilleri çizilmiştir. Özel halde, homojen izotrop üniform dikdörtgen plakların frekans değerleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır (Lal ve Kumar, 2011).

### 3. MATERİYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Problemin Formülasyonu

Uzunluğu  $a$  , eni  $b$  ve kalınlığı  $h$  olan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak Winkler zemine oturtulmuştur. Oxyz kartezyen koordinat sistemi homojen olmayan ortotrop plağın sol köşesinde ve referans yüzeyinde bulunmaktadır.  $x$  ve  $y$  eksenleri ortotropi doğrultuları ile çakışmaktadır,  $z$  eksenini ise onların bulunduğu düzleme normal doğrultusudur (Bkz., Şekil 3.1.1).



**Şekil 3.1.1.** Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak ve koordinat sistemi

Winkler zemin modeli aralarında etkileşim olmayan bir dizi yaylardan oluşmaktadır (Bkz., Şekil 3.1.1). Winkler zeminin etkisi veya matematik modeli,

$$R_1 = -k_w w \quad (3.1.1)$$

olarak gözönüne alınmaktadır. Burada  $R_1$  zeminin tepki kuvveti,  $k_w$  ( $N/m^3$ ) Winkler elastik zemin katsayısı ve  $w$  normal doğrultudaki çökme olup düzleme normalin pozitif doğrultusundadır.

Tez çalışmasında kullanılan plak teorisinin temelini aşağıdaki varsayımlar oluşturmaktadır (Reddy, 2007):

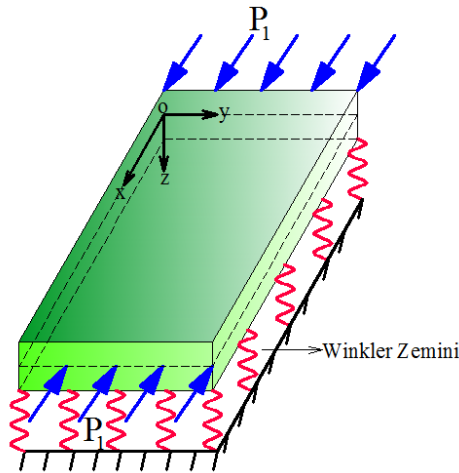
- Plagın toplam kalınlığı diğer boyutlarına göre küçüktür.
- Normal yer değiştirme (çökme)  $w$ , plak kalınlığına kıyasla çok küçüktür.
- Plaktaki normal yer değiştirme  $w$ , kalınlık koordinatına bağlı değildir.
- Plagın  $\gamma_{xz}$  ve  $\gamma_{yz}$  kayma deformasyonları plak kalınlığı doğrultusunda belirli kurallara göre değişmektedir.
- Plagın kalınlık doğrultusundaki normal gerilmesi diğer gerilmelere kıyasla çok küçük olduğu için işlemlerde dikkate alınmamaktadır.

### 3.2. Elastik Zemine Oturan Homojen Olmayan Ortotrop Plğa Etkiyen Kuvvetlerin Modellenmesi

a) Kabul edelim ki elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak  $x$  doğrultusunda etkiyen üniform  $P_1$  basınç yükü etkisi altında olsun (Şekil 3.1.2). Bu durumda,

$$T_x^0 = -P_1 \quad (3.2.1)$$

şeklinde olur. Burada  $T_x^0$  momentsiz durumda  $x$  doğrultusunda zar kuvvetidir.

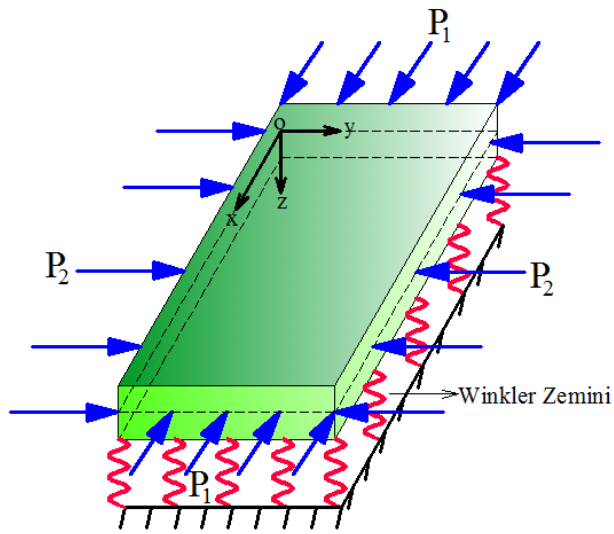


**Şekil 3.2.1.** Winkler zemine oturan dikdörtgen plak  $x$  eksenine doğrultusunda  $P_1$  üniform basınç yükü etkisi altında

b) Kabul edelim ki elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak x ve y doğrultusunda etkiyen üniform  $P_1$  ve  $P_2$  basınç yükleri etkisi altında olsun (Şekil 3.2.2.). Bu durumda,

$$T_x^0 = -P_1, T_y^0 = -P_2 \quad (3.2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $T_y^0$  momentsiz durumda y doğrultusunda zar kuvvetidir.



**Şekil 3.2.2.** Winkler zemine oturan dikdörtgen plak x ve y eksenleri doğrultusunda üniform basınç yükleri etkisi altında

### 3.3. Homojen Olmayan Ortotrop Malzeme Özelliklerinin Analitik Modellenmesi

Anizotrop malzemeler homojen olduğu gibi homojen olmayan da olabilir. Bilindiği gibi tüm noktalarda mekanik özellikleri aynı olan malzemeye homojen malzeme denir. Homojen malzemenin mekanik özellikleri konumdan bağımsızdır. Homojen olmayan malzemede, mekanik özellikler konuma bağlı olarak değişir genelde uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Malzemelerde homojen olmamanın meydana gelmesinin çeşitli nedenleri vardır. Örneğin; malzemelerin homojenliği üretim tekniği, ısı, nem ve radyasyon etkileri gibi nedenlerden dolayı bozulabilir. Ayrıca, laboratuvar ortamlarında yapay homojen olmayan malzemeler, örneğin, fonksiyonel değişimli (FD) malzemeler üretilmektedir. Literatürde homojen

olmayan izotrop veya ortotrop malzemelerin davranışları ile ilgili çok az sayıda model bulunmaktadır. (Pan, 2003; Lal ve Kumar, 2011; Sofiyev vd., 2009). Tez çalışmasında sürekli homojen olmayan ortotrop malzeme modeli kullanılmakta ve hetorejen ortotrop malzemelerin Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatının kuvvet ve üstel fonksiyonları olarak, aşağıdaki gibi matematiksel modellenmektedir:

$$E_x(Z) = (1 + \mu_1 Z^q) E_{0x}, \quad E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z^q) E_{0y}, \quad G_{xy}(Z) = (1 + \mu_1 Z^q) G_{0xy}, \quad (3.3.1)$$

$$G_{xz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^q) G_{0xz}, \quad G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^q) G_{0yz}$$

$$E_x(Z) = E_{0x} e^{\mu_1(Z+0.5)}, \quad E_y(Z) = E_{0y} e^{\mu_1(Z+0.5)}, \quad G_{xy}(Z) = G_{0xy} e^{\mu_1(Z+0.5)}, \quad (3.3.2)$$

$$G_{xz}(Z) = G_{0xz} e^{\mu_1(Z+0.5)}, \quad G_{yz}(Z) = G_{0yz} e^{\mu_1(Z+0.5)}.$$

Burada,  $q = 1, 2, 3, \dots$  kuvvet üssü olup pozitif tam sayı ve  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatıdır.  $E_{0x}$  ve  $E_{0y}$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultularında homojen ortotrop malzemenin Young modülleridir.  $G_{0xy}, G_{0xz}, G_{0yz}$   $x$  ve  $y$ ,  $x$  ve  $z$ ,  $y$  ve  $z$  doğrultuları arasındaki açı değişimini karakterize etmekte olup homojen ortotrop malzemenin kayma modülleri olarak adlandırılır.  $\mu_1$  heterojenlik veya homojen olmama katsayı olup  $z$  doğrultusunda Young ve kayma modüllerinin değişimini karakterize etmektedir ve  $-1 \leq \mu_1 \leq 1$  eşitsizliğini sağlamaktadır. Burada  $\mu_1 = 0$  homojen duruma karşı gelmektedir. Ayrıca,  $\mu_1 < 0$  ise malzeme yumuşak homojen olmayan ortotrop malzeme ve  $\mu_1 > 0$  olduğunda sert homojen olmayan ortotrop malzeme olarak adlandırılmaktadır.

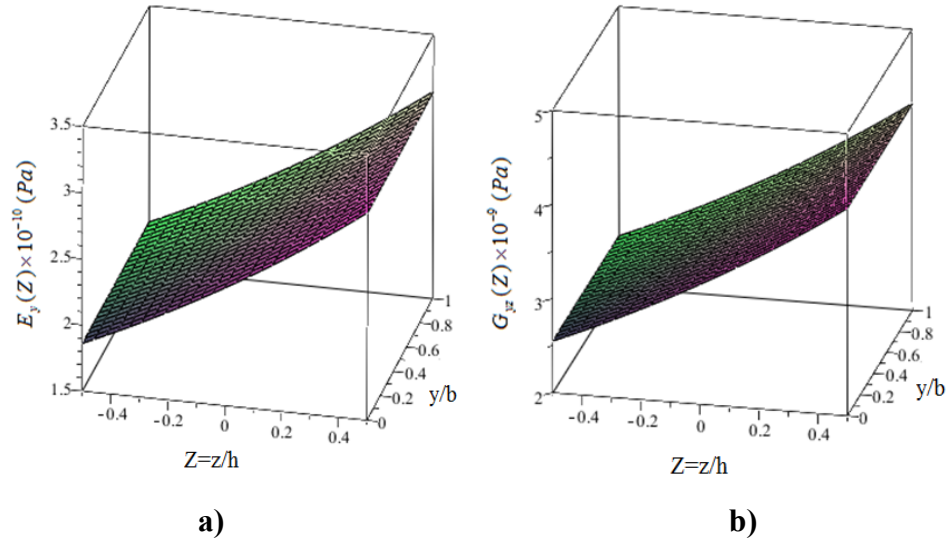
Dikdörtgen plağı oluşturan homojen olmayan bor/epoksi'nin  $E_y(Z)$  Young ve  $G_{yz}(Z)$  kayma modüllerinin kalınlık koordinatına bağlı değişimi üç boyutlu modeller olarak aşağıda sunulmaktadır. Şekillerin çiziminde MAPLE 14 programı kullanılmıştır. Homojen bor/epoksinin malzeme özellikleri şu şekildedir:

$$E_{0x} = 2.06844 \times 10^{11} \text{ Pa}, E_{0y} = 1.86159 \times 10^{10} \text{ Pa};$$

$$G_{0xy} = G_{0xz} = 4.48162 \times 10^9 \text{ Pa}; G_{0yz} = 2.55107 \times 10^9 \text{ Pa}; \nu_{xy} = 0.21$$

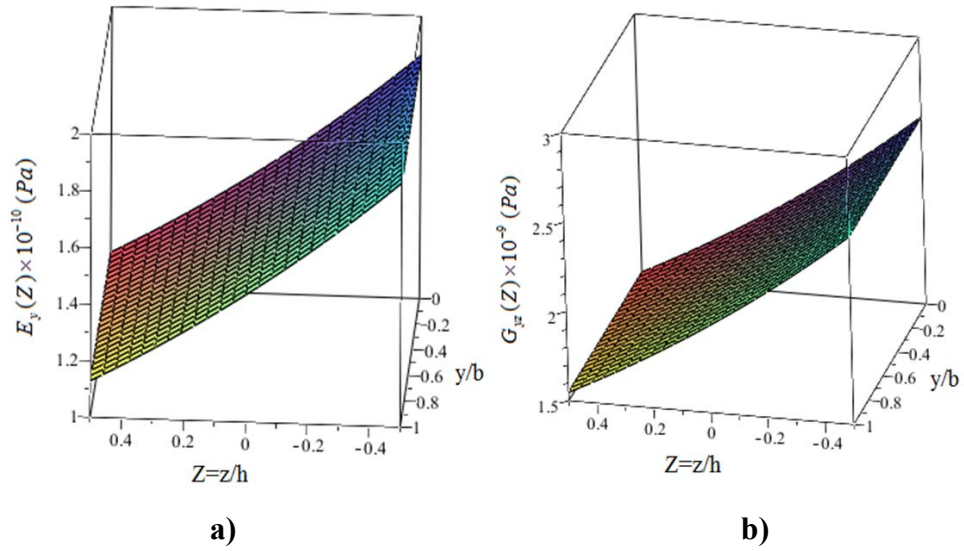
Şekil 3.3.1 - 3.3.8'in çiziminde bor/epoksi' nin y doğrultusundaki Young ve kayma modülleri sırasıyla şu şekilde dikkate alınmıştır:  $E_{0y} = 1.86159 \times 10^{10} \text{ Pa}$  ve  $G_{0yz} = 2.55107 \times 10^9 \text{ Pa}$ . Bor/epoksi'nin diğer doğrultulardaki Young ve kayma modüllerinin grafikleri benzer şekilde çizilebilir.

1) Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young modülü  $E_y(Z) = E_{0y} e^{\mu_1(Z+0.5)}$  ve kayma modülü  $G_{yz}(Z) = G_{0yz} e^{\mu_1(Z+0.5)}$  şeklinde değiştiğinde ve  $\mu_1 = 0.5$  için kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.1. a ve b'de sunulmuştur:



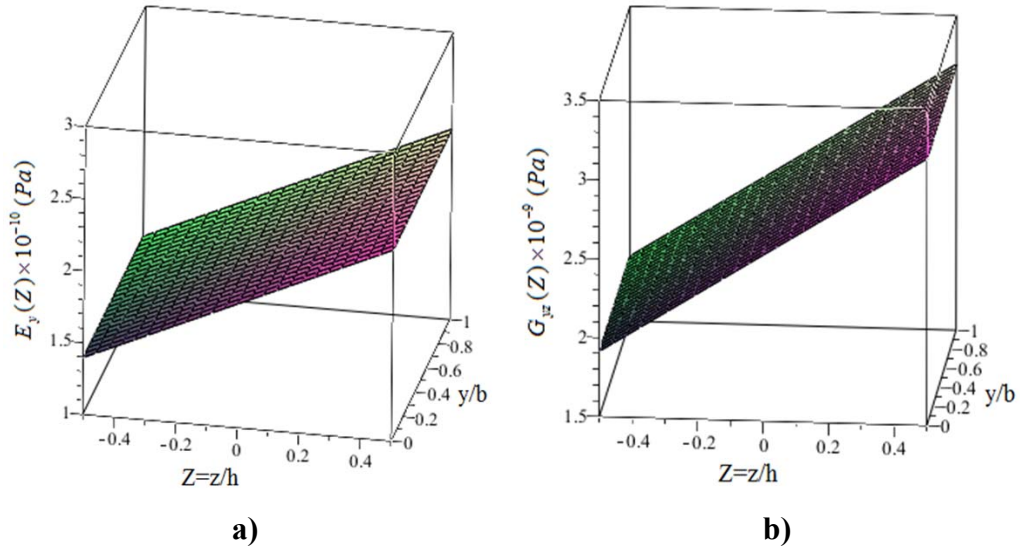
**Şekil 3.3.1.** Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = 0.5$  için üstel olarak değişimi

2) Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young modülü  $E_y(Z) = E_{0y} e^{\mu_1(Z+0.5)}$  ve kayma modülü  $G_{yz}(Z) = G_{0yz} e^{\mu_1(Z+0.5)}$  şeklinde değiştiğinde ve  $\mu_1 = -0.5$  için kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.2. a ve b'de sunulmuştur:



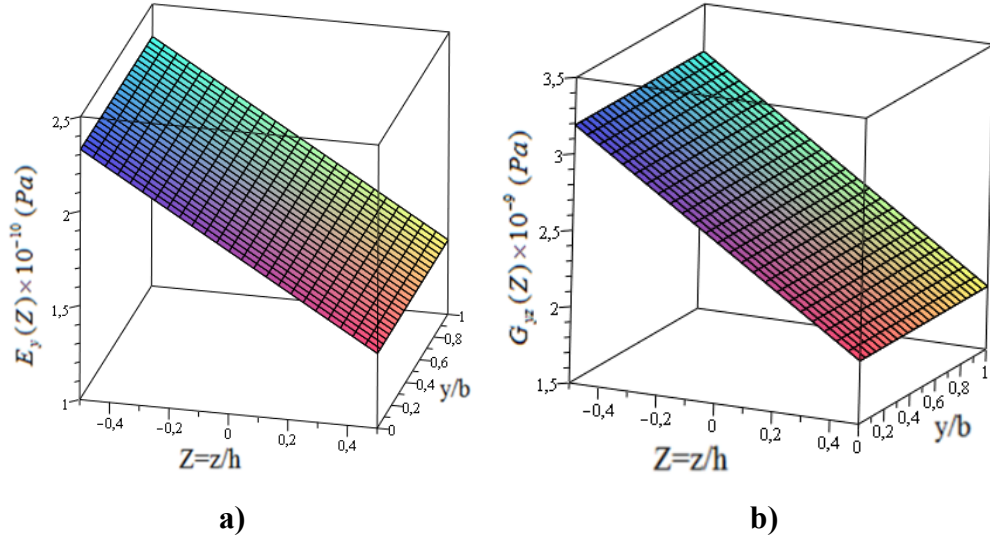
**Şekil 3.3.2.** Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = -0.5$  için üstel olarak değişimi

3) Homojen olmayan ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı doğrusal değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z)E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z)G_{0yz}$  'nin  $\mu_1 = 0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.3.a ve b'de sunulmuştur:



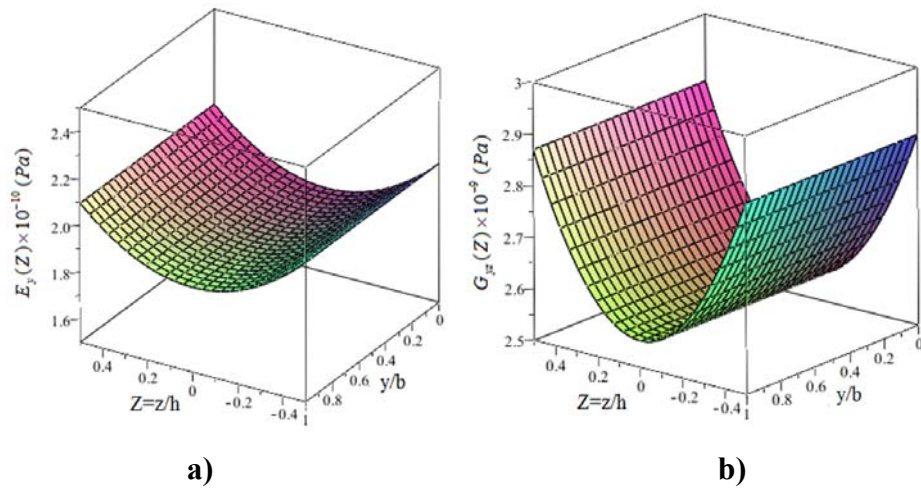
**Şekil 3.3.3.** Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = 0.5$  için doğrusal değişimi

4) Ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı doğrusal değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z)E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z)G_{0yz}$ 'nin  $\mu_1 = -0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.4. a ve b'de sunulmuştur:



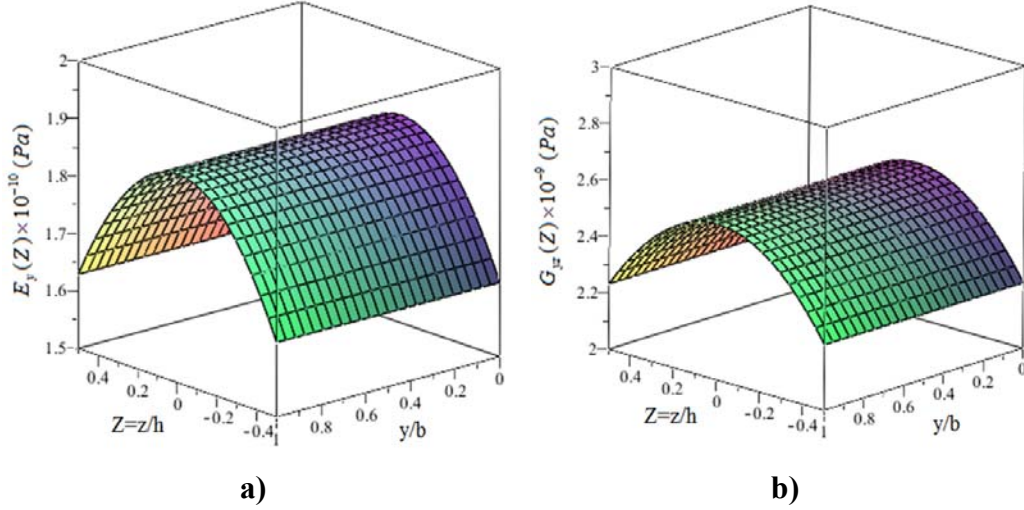
**Şekil 3.3.4.** Homojen olmayan ortotrop plağın  $y$  doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = -0.5$  için doğrusal değişimi

5) Homojen olmayan ortotrop plağın plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı kuadratik değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z^2)E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^2)G_{0yz}$ 'nin  $\mu_1 = 0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.5. a ve b'de sunulmuştur:



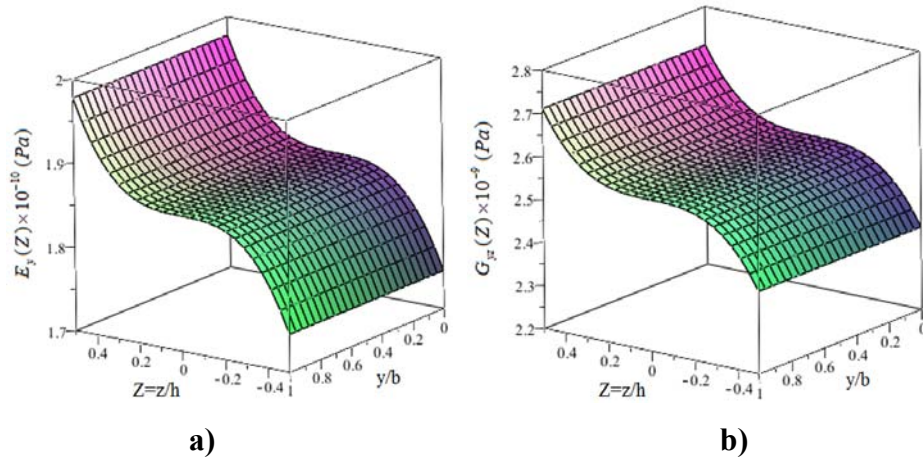
**Şekil 3.3.5.** Homojen olmayan ortotrop plağın  $y$  doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = 0.5$  için kuadratik değişimi

6) Homojen olmayan ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı kuadratik değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z^2) E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^2) G_{0yz}$  'nin  $\mu_1 = -0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.6. a ve b'de sunulmuştur:



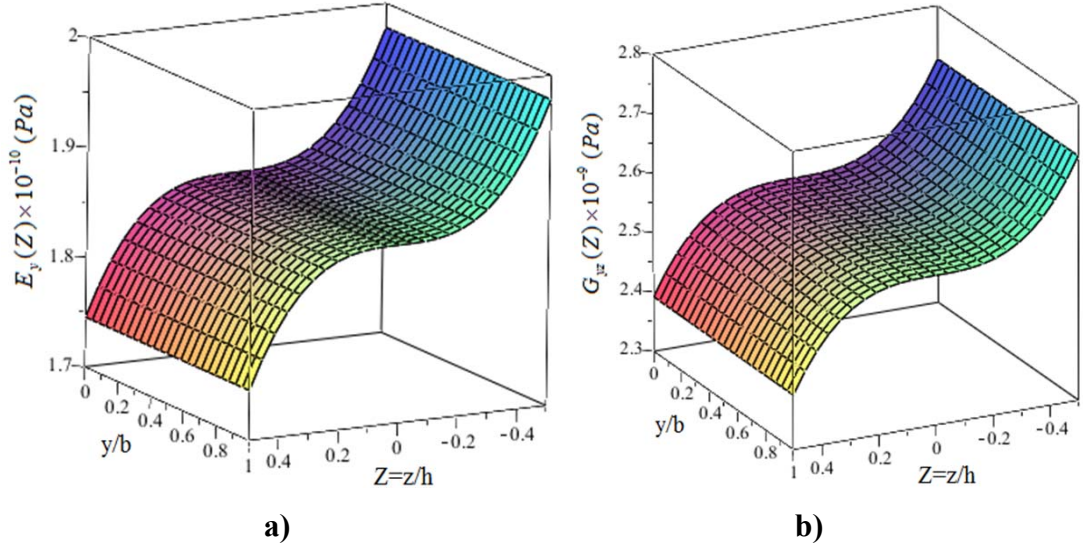
**Şekil 3.3.6.** Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = -0.5$  için kuadratik değişimi

7) Homojen olmayan ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı kübik değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z^3) E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^3) G_{0yz}$  'nin  $\mu_1 = 0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.7 a ve b'de sunulmuştur:



**Şekil 3.3.7.** Homojen olmayan ortotrop plağın y doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = 0.5$  için kübik değişimi

8) Homojen olmayan ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatına bağlı kübik değiştiğinde  $E_y(Z) = (1 + \mu_1 Z^3) E_{0y}$  ve  $G_{yz}(Z) = (1 + \mu_1 Z^3) G_{0yz}$  'nin  $\mu_1 = -0.5$  için üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.3.8. a ve b'de sunulmuştur:



**Şekil 3.3.8.** Homojen olmayan ortotrop plağın  $y$  doğrultusundaki Young ve kayma modüllerinin  $\mu_1 = -0.5$  için kübik değişimi

#### 3.4. KDPT Çerçevesinde Homojen Olmayan Ortotrop Plakların Temel Bağıntılarının Oluşturulması

Homojen olmayan ortotrop plağın Young ve kayma modülleri kalınlık koordinatının kuvvet ve üstel fonksiyonları şeklinde değişmektedir (Bkz., (3.3.1) ve (3.3.2) bağıntıları). Bu bağıntılar dikkate alındığında, homojen olmayan ortotrop plakların gerilme ve deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar KDPT çerçevesinde aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Pan, 2003; Ootao ve Tanigawa, 2007; Sofiyev ve Kuruoglu, 2014):

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}(Z) & Q_{12}(Z) & 0 \\ Q_{21}(Z) & Q_{22}(Z) & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}(Z) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.4.1)$$

ve

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{55}(Z) & 0 \\ 0 & Q_{44}(Z) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (3.4.2)$$

Burada  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  sırasıyla homojen olmayan ortotrop plağın x ve y doğrultularında gerilme bileşenleri,  $\sigma_{xy}, \sigma_{xz}$  ve  $\sigma_{yz}$  sırasıyla homojen olmayan ortotrop plağın Oxy, Oxz ve Oyz düzlemlerinde kayma gerilmeleri,  $\varepsilon_x$  ve  $\varepsilon_y$  sırasıyla homojen olmayan ortotrop plağın x ve y doğrultularında deformasyon bileşenleri,  $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  ise sırasıyla homojen olmayan ortotrop plağın Oxy, Oxz ve Oyz düzlemlerinde kayma deformasyonları ve  $Q_{ij}(Z), (i, j = 1, 2, \dots, 6)$  homojen olmayan ortotrop plağın malzeme özelliklerine bağlı nicelikler olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} Q_{11}(Z) &= \frac{E_x(Z)}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}}; \quad Q_{22}(Z) = \frac{E_y(Z)}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}}; \\ Q_{12}(Z) &= \frac{\nu_{yx}E_x(Z)}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{xy}E_y(Z)}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} = Q_{21}(Z); \end{aligned} \quad (3.4.3)$$

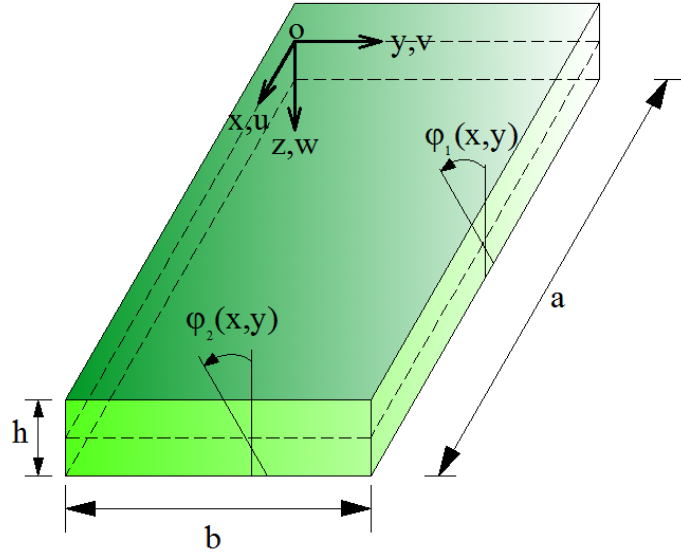
$$Q_{66}(Z) = G_{xy}(Z), \quad Q_{44}(Z) = G_{yz}(Z), \quad Q_{55}(Z) = G_{xz}(Z)$$

Burada  $\nu_{xy}$  ve  $\nu_{yx}$  Poisson oranları olup sabittirler.

Bu çalışmada, homojen ortotrop plaklar için kayma deformasyonlu plak teorisinin varsayımları homojen olmayan ortotrop plaklar için modifiye edilerek aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır (Sofiyev ve Kuruoğlu, 2014):

$$\begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f_{,z}(Z)}{G_{xz}(Z)} \phi_1(x, y) \\ \frac{f_{,z}(Z)}{G_{yz}(Z)} \phi_2(x, y) \end{pmatrix} \quad (3.4.4)$$

Burada  $f(z)$ , kayma gerilmeleri veya deformasyonları karakterize eden fonksiyon olup plağın kalınlık koordinatının fonksiyondur ve sonraki aşamalarda somut ifadeleri sunulacaktır. Ayrıca  $\varphi_1(x,y)$  ve  $\varphi_2(x,y)$  dönme açıları olup Şekil 3.4.1’de sunulmaktadır:



**Şekil 3.4.1.** Dikdörtgen plakta koordinat sistemi ve notasyonlar

KDPT çerçevesinde, geometrik doğrusal durumda, yani  $w \ll h$  olduğunda homojen olmayan ortotrop plağın referans yüzeyinden  $z$  uzaklıktaki deformasyonları yerdeğiştirme ve dönme açıları ile aşağıdaki şekilde ifade edilir (Sofiyev ve Kuruoglu, 2014; Ambartsumian, 1964):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{0x} - zw_{,xx} + I_{01}\varphi_{1,x} \\ \varepsilon_{0y} - zw_{,yy} + I_{02}\varphi_{2,y} \\ \gamma_{0xy} - 2zw_{,xy} + I_{01}\varphi_{1,y} + I_{02}\varphi_{2,x} \end{bmatrix} \quad (3.4.5)$$

Burada  $\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \gamma_{0xy}$  homojen olmayan ortotrop plağın referans yüzeyindeki deformasyonlar olup aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$I_{01} = \int_0^z \frac{f_{,z}(Z)}{G_{xz}(Z)} dz, I_{02} = \int_0^z \frac{f_{,z}(Z)}{G_{yz}(Z)} dz \quad (3.4.6)$$

(3.4.1) denkleminde (3.4.5) bağıntıları dikkate alındığında aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}(Z) & Q_{12}(Z) & 0 \\ Q_{21}(Z) & Q_{22}(Z) & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}(Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{0x} - zW_{,xx} \\ \varepsilon_{0y} - zW_{,yy} \\ \gamma_{0xy} - 2zW_{,xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11}\phi_{1,x} \\ k_{21}\phi_{1,x} \\ k_{15}\phi_{1,y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{12}\phi_{2,y} \\ k_{22}\phi_{2,y} \\ k_{18}\phi_{2,x} \end{bmatrix} \quad (3.4.7)$$

Burada  $k_{ij}$  ( $i=1,2; j=1,2,5,8$ ) homojen olmayan ortotrop malzeme ve plak özelliklerine bağlı parametreler olup şu tanımlar geçerlidir:

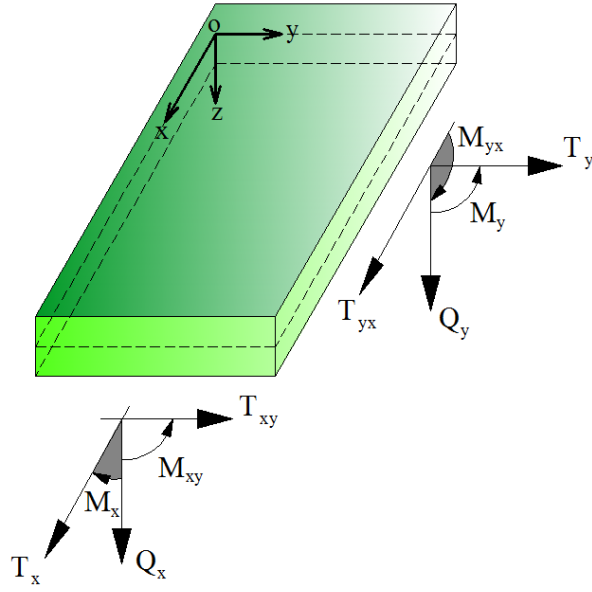
$$\begin{aligned} k_{11}(Z) &= Q_{11}(Z)I_{01}; & k_{12}(Z) &= Q_{12}(Z)I_{02}; & k_{21}(Z) &= Q_{21}(Z)I_{01}; \\ k_{22}(Z) &= Q_{22}(Z)I_{02}; & k_{15}(Z) &= Q_{66}(Z)I_{01}; & k_{18}(Z) &= Q_{66}(Z)I_{02} \end{aligned} \quad (3.4.8)$$

KDPT çerçevesinde, plakların kuvvet ve moment bileşenleri aşağıdaki ifadelerden bulunur (Wang vd., 2005; Reddy, 2007; Volmir, 1967):

$$[T_x, T_y, T_{xy}, Q_x, Q_y] = \int_{-h/2}^{h/2} [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}] dz \quad (3.4.9)$$

$$[M_x, M_y, M_{xy}] = \int_{-h/2}^{h/2} [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}] z dz \quad (3.4.10)$$

Burada  $T_x$  ve  $T_y$  plağın birim alanına etkiyen normal kuvvetler,  $T_{xy}$  ise kayma kuvvetidir.  $Q_x, Q_y$  enine kesme kuvvetleri ve  $M_x, M_y, M_{xy}$  eğilme ve burulma momentleridir. Şekil 3.4.2' de kuvvet ve moment bileşenleri sunulmaktadır.



**Şekil 3.4.2.** Dikdörtgen plaktaki kuvvet ve moment bileşenleri

Kuvvet ve moment bileşenlerinin deformasyon, yer değiştirme ve dönme açılarına bağlı ifadelerini bulmak için (3.4.7) bağıntıları (3.4.9) ve (3.4.10) ifadelerinde yerine yazılır ve bazı matematiksel işlemlerden sonra aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11}^0 & U_{12}^0 & 0 \\ U_{21}^0 & U_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{66}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{11}^1 & U_{12}^1 & 0 \\ U_{21}^1 & U_{22}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 2U_{66}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ w_{,xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{15}^0 & 0 & 0 \\ U_{25}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{35}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1,x} \\ 0 \\ \phi_{1,y} \end{bmatrix} \quad (3.4.11)$$

$$+ \begin{bmatrix} U_{18}^0 & 0 & 0 \\ U_{28}^0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{38}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{2,y} \\ 0 \\ \phi_{2,x} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11}^1 & U_{12}^1 & 0 \\ U_{21}^1 & U_{22}^1 & 0 \\ 0 & 0 & U_{66}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{11}^2 & U_{12}^2 & 0 \\ U_{21}^2 & U_{22}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2U_{66}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ w_{,xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{15}^1 & 0 & 0 \\ U_{25}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{35}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{1,x} \\ 0 \\ \phi_{1,y} \end{bmatrix} \quad (3.4.12)$$

$$+ \begin{bmatrix} U_{18}^1 & 0 & 0 \\ U_{28}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{38}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{2,y} \\ 0 \\ \phi_{2,x} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_5 \phi_1 \\ I_6 \phi_2 \end{bmatrix} \quad (3.4.13)$$

Burada  $U_{ij}^{k_1}$  ( $k_1 = 0,1,2$ ;  $i = 1,2$ ;  $j = 1,2,...,8$ ) homojen olmayan ortotrop malzeme ve plak özelliklerine bağlı parametreler olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
U_{11}^{k_1} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11}(Z) z^{k_1} dz; \quad U_{12}^{k_1} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12}(Z) z^{k_1} dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{21}(Z) z^{k_1} dz, \\
U_{22}^{k_1} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{22}(Z) z^{k_1} dz; \quad U_{66}^{k_1} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66}(Z) z^{k_1} dz \quad k_1 = 0, 1, 2; \\
U_{15}^0 &= \int_{-h/2}^{h/2} k_{11}(Z) dz; \quad U_{18}^0 = \int_{-h/2}^{h/2} k_{12}(Z) dz; \quad U_{25}^0 = \int_{-h/2}^{h/2} k_{21}(Z) dz; \\
U_{28}^0 &= \int_{-h/2}^{h/2} k_{22}(Z) dz; \quad U_{35}^0 = \int_{-h/2}^{h/2} k_{15}(Z) dz; \quad U_{38}^0 = \int_{-h/2}^{h/2} k_{18}(Z) dz; \\
U_{15}^1 &= \int_{-h/2}^{h/2} z k_{11}(Z) dz; \quad U_{18}^1 = \int_{-h/2}^{h/2} z k_{12}(Z) dz; \quad U_{25}^1 = \int_{-h/2}^{h/2} z k_{21}(Z) dz; \\
U_{28}^1 &= \int_{-h/2}^{h/2} z k_{22}(Z) dz; \quad U_{35}^1 = \int_{-h/2}^{h/2} z k_{15}(Z) dz; \quad U_{38}^1 = \int_{-h/2}^{h/2} z k_{18}(Z) dz.
\end{aligned} \tag{3.4.14}$$

(3.4.11) denklemlerinden orta düzlemdeki deformasyon bileşenleri çekildiğinde aşağıdaki matris bağıntı elde edilir:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \varepsilon_{0y} \\ \gamma_{0xy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{13} & b_{14} & 0 \\ b_{23} & b_{24} & 0 \\ 0 & 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ w_{,xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{15} & 0 & 0 \\ b_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{1,x} \\ 0 \\ \varphi_{1,y} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} b_{18} & 0 & 0 \\ b_{28} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_{38} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{2,y} \\ \varphi_{2,x} \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3.4.15}$$

Burada  $b_{ij} (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 8)$ , homojen olmayan ortotrop plağın malzeme sabitlerini içeren semboller olup, aşağıdaki ifadelerde tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= \frac{U_{22}^0}{\Delta}; \quad b_{12} = -\frac{U_{12}^0}{\Delta}; \quad b_{13} = \frac{U_{12}^0 U_{21}^1 - U_{11}^1 U_{22}^0}{\Delta}; \quad b_{14} = \frac{U_{12}^0 U_{22}^1 - U_{12}^1 U_{22}^0}{\Delta}; \\
 b_{15} &= \frac{U_{25}^0 U_{12}^0 - U_{15}^0 U_{22}^0}{\Delta}; \quad b_{18} = \frac{U_{28}^0 U_{12}^0 - U_{18}^0 U_{22}^0}{\Delta}; \quad b_{21} = -\frac{U_{21}^0}{\Delta}; \quad b_{22} = \frac{U_{11}^0}{\Delta}; \\
 b_{23} &= \frac{U_{11}^1 U_{21}^0 - U_{21}^1 U_{11}^0}{\Delta}; \quad b_{24} = \frac{U_{12}^1 U_{21}^0 - U_{22}^1 U_{11}^0}{\Delta}; \quad b_{25} = \frac{U_{15}^0 U_{21}^0 - U_{25}^0 U_{11}^0}{\Delta}; \quad (3.4.16) \\
 b_{28} &= \frac{U_{18}^0 U_{21}^0 - U_{28}^0 U_{11}^0}{\Delta}; \quad \Delta = U_{11}^0 U_{22}^0 - U_{12}^0 U_{21}^0; \quad b_{31} = \frac{1}{U_{66}^0}; \quad b_{32} = -\frac{2U_{66}^1}{U_{66}^0}; \\
 b_{35} &= \frac{U_{35}^0}{U_{66}^0}; \quad b_{38} = \frac{U_{38}^0}{U_{66}^0}; \quad I_5 = I_6 = \int_{-h/2}^{h/2} f_{,z}(z) dz
 \end{aligned}$$

Homojen olmayan ortotrop plağın moment bileşenlerini kuvvet bileşenleri, yerdeğiştirme ve dönme açıları ile ifade etmek için (3.4.15) ifadeleri (3.4.12) bağıntılarında yerine yazılır ve bazı matematiksel işlemlerden sonra aşağıdaki matris ifade elde edilir:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{13} & c_{14} & 0 \\ c_{23} & c_{24} & 0 \\ 0 & 0 & c_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ w_{,xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{15} & 0 & 0 \\ c_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{1,x} \\ 0 \\ \varphi_{1,y} \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} c_{18} & 0 & 0 \\ c_{28} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{38} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{2,y} \\ \varphi_{2,x} \end{bmatrix} \quad (3.4.17)
 \end{aligned}$$

Burada  $c_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, \dots, 8$ ), homojen olmayan ortotrop plağın mekanik özelliklerini karakterize eden semboller olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned}
c_{11} &= U_{11}^1 b_{11} + U_{12}^1 b_{21}, \quad c_{12} = U_{11}^1 b_{12} + U_{12}^1 b_{12}, \\
c_{13} &= U_{11}^1 b_{13} + U_{12}^1 b_{23} + U_{11}^2, \quad c_{14} = U_{11}^1 b_{14} + U_{12}^1 b_{24} + U_{12}^2, \\
c_{15} &= U_{11}^1 b_{15} + U_{12}^1 b_{25} + U_{15}^1, \quad c_{18} = U_{11}^1 b_{18} + U_{12}^1 b_{28} + U_{18}^1 \\
c_{21} &= U_{21}^1 b_{11} + U_{22}^1 b_{21}, \quad c_{22} = U_{21}^1 b_{12} + U_{22}^1 b_{22}, \\
c_{23} &= U_{21}^1 b_{13} + U_{22}^1 b_{23} + U_{21}^2, \quad c_{24} = U_{21}^1 b_{14} + U_{22}^1 b_{24} + U_{22}^2, \\
c_{25} &= U_{21}^1 b_{15} + U_{22}^1 b_{25} + U_{25}^1, \quad c_{28} = U_{21}^1 b_{18} + U_{22}^1 b_{28} + U_{28}^1 \\
c_{31} &= U_{66}^1 b_{31}, \quad c_{32} = U_{66}^1 b_{32} + 2U_{66}^2, \\
c_{35} &= U_{35}^1 - U_{66}^1 b_{35}, \quad c_{38} = U_{38}^1 - U_{66}^1 b_{38}
\end{aligned} \tag{3.4.18}$$

### 3.5. KDPT Çerçevesinde Temel Denklemlerin Türetilmesi

Winkler zemine oturan ve  $x$  ve  $y$  doğrultularında üniform basınç yüküne maruz dikdörtgen plağın stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki kısmi türevli diferansiyel denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemler Hamilton prensibi kullanılarak elde edilir (Ambatsumian, 1964; Morimoto ve Tanigawa, 2007; Sofiyev vd., 2014):

$$M_{x,x} + M_{xy,y} - Q_x = 0 \tag{3.5.1}$$

$$M_{xy,x} + M_{y,y} - Q_y = 0 \tag{3.5.2}$$

$$\varepsilon_{ox,yy} + \varepsilon_{oy,xx} - \gamma_{0xy,xy} = 0 \tag{3.5.3}$$

$$Q_{x,x} + Q_{y,y} + T_x^0 w_{,xx} + T_y^0 w_{,yy} - k_w w = 0 \quad (3.5.4)$$

Moment bileşenleri için (3.4.17) ifadeleri (3.5.1)-(3.5.3) kısmi türevli diferansiyel denklemlerinde ve (3.2.1), (3.2.2) ve (3.4.13) ifadeleri (3.5.4) denkleminde yerine yazıldığında, aşağıdaki şekle dönüşür:

$$c_{11} T_{x,x} + c_{12} T_{y,x} + c_{31} T_{xy,y} - c_{13} w_{,xxx} - (c_{14} + c_{32}) w_{,xyy} + \quad (3.5.5)$$

$$+ c_{15} \varphi_{1,xx} + c_{35} \varphi_{1,xy} - I_5 \varphi_1 + c_{18} \varphi_{2,xy} + c_{38} \varphi_{2,yy} = 0$$

$$c_{21} T_{x,y} + c_{22} T_{y,y} + c_{31} T_{xy,x} - c_{24} w_{,yyy} - (c_{23} + c_{32}) w_{,xxy} + c_{35} \varphi_{1,xx} \quad (3.5.6)$$

$$+ c_{25} \varphi_{1,xy} + c_{28} \varphi_{2,yy} + c_{38} \varphi_{2,xy} - I_6 \varphi_2 = 0$$

$$b_{11} T_{x,yy} + b_{21} T_{x,xx} + b_{12} T_{y,yy} + b_{22} T_{y,xx} - 2b_{31} T_{xy,xy} \\ - b_{23} w_{,xxxx} - (b_{24} + b_{13} - b_{32}) w_{,xxyy} - b_{14} w_{,yyyy} \quad (3.5.7)$$

$$+ b_{25} \varphi_{1,xxx} + (b_{15} + b_{35}) \varphi_{1,xyy} + (b_{28} + b_{38}) \varphi_{2,xyy} + b_{18} \varphi_{2,yyy} = 0$$

$$- P_1 w_{,xx} - P_2 w_{,yy} - k_w w + I_5 \varphi_{1,x} + I_6 \varphi_{2,y} = 0 \quad (3.5.8)$$

İç kuvvetler ve Airy gerilme fonksiyonu arasındaki bağıntıların matris şekli aşağıda sunulmaktadır:

$$[T_x, T_{xy}, T_y] = h [\Psi_{,yy}, -\Psi_{,xy}, \Psi_{,xx}] \quad (3.5.9)$$

(3.5.5)-(3.5.7) denklemlerinde (3.5.9) ifadeleri yerine yazıldığında elastik zemine oturan homojen olmayan plakların basınç yükleri etkisi altında stabilite denklemlerinin matris şekli aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi \\ w \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.5.10)$$

Burada  $L_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3, 4$ ) diferansiyel operatör olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} L_{11} &= (c_{11} - c_{31})h(\bullet)_{,xyy} + c_{12}h(\bullet)_{,xxx}, \quad L_{12} = -c_{13}(\bullet)_{,xxx} - (c_{14} + c_{32})(\bullet)_{,xyy} \\ L_{13} &= c_{15}(\bullet)_{,xxx} + c_{35}(\bullet)_{,xy} - I_5(\bullet)_{,x}, \quad L_{14} = (c_{18} + c_{38})(\bullet)_{,xy}, \\ L_{21} &= c_{21}h(\bullet)_{,yyy} + (c_{22} - c_{31})h(\bullet)_{,xyy}, \quad L_{22} = -(c_{32} + c_{23})(\bullet)_{,xyy} - c_{24}(\bullet)_{,yyy}, \\ L_{23} &= (c_{25} + c_{35})(\bullet)_{,xy}, \quad L_{24} = c_{28}(\bullet)_{,yy} + c_{38}(\bullet)_{,xy} - I_6(\bullet)_{,y} \\ L_{31} &= b_{22}h(\bullet)_{,xxx} + (b_{12} + b_{21} + b_{31})h(\bullet)_{,xyy} + b_{11}h(\bullet)_{,yyy}, \\ L_{32} &= -b_{23}(\bullet)_{,xxx} - (b_{24} + b_{13} - b_{32})(\bullet)_{,xyy} - b_{14}(\bullet)_{,yyy}, \\ L_{33} &= b_{25}(\bullet)_{,xxx} + (b_{15} + b_{35})(\bullet)_{,xy}, \quad L_{34} = (b_{28} + b_{38})(\bullet)_{,xy} + b_{18}(\bullet)_{,yy} \\ L_{41} &= 0, \quad L_{42} = -P_1(\bullet)_{,xx} - P_2(\bullet)_{,yy} - k_w(\bullet), \quad L_{43} = I_5(\bullet)_{,x}, \quad L_{44} = I_6(\bullet)_{,y} \end{aligned} \quad (3.5.11)$$

(3.5.10) diferansiyel denklemler sistemi, KDPT çerçevesinde Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plakların basınç yükleri etkisi altındaki stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleridir.

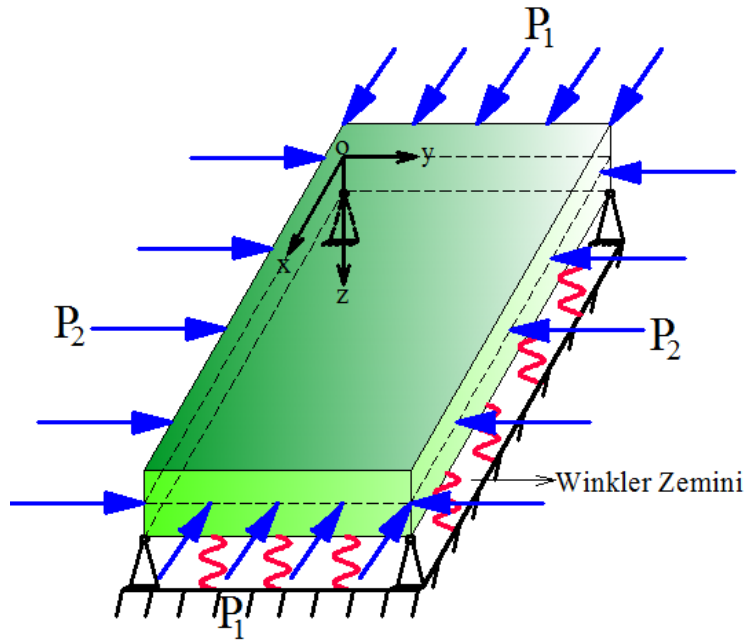
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Temel Denklemlerin Çözümü

Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın  $P_1$  ve  $P_2$  yüklerinin etkisi altında olduğunu varsayalım ve tüm kenarları basit mesnetli olsun (Şekil 4.1.1.). Bu durumda, sınır koşulları matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$x = 0, x = a \text{ ise} \quad w = 0, M_x = 0, \varphi_2 = 0; \Psi_{,yy} = 0; \int_0^b \Psi_{,xy} dy = 0 \quad (4.1.1)$$

$$y = 0, y = b \text{ ise} \quad w = 0, M_y = 0, \varphi_1 = 0; \Psi_{,xx} = 0; \int_0^a \Psi_{,xy} dx = 0 \quad (4.1.2)$$



Şekil 4.1.1. Basit mesnetli dikdörtgen plak eksenel basınç yükleri etkisi altında

Homojen olmayan ortotrop plağın tüm kenarları basit mesnetli olduğu için  $\Psi$ ,  $w$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  değişkenlerine bağlı (3.5.10) kısmi diferansiyel denklemler sisteminin çözümü aşağıdaki gibi aranır (Sofiyev ve Kuruoğlu, 2014):

$$\Psi = f_1 \sin(\lambda x) \sin(\eta y),$$

$$w = f_2 \sin(\lambda x) \sin(\eta y),$$

(4.1.3)

$$\varphi_1 = f_3 \cos(\lambda x) \sin(\eta y),$$

$$\varphi_2 = f_4 \sin(\lambda x) \cos(\eta y)$$

Burada  $\lambda = m\pi/a$ ,  $\eta = n\pi/b$  olup  $m$  ve  $n$  boyuna ve enine doğrultulardaki yarımlık dalga sayıları olup  $f_1, f_2, f_3, f_4$  bilinmeyen genliklerdir.

(4.1.3) ifadeleri (3.5.10) denklemlerinde yerine yazılıp Galerkin yöntemi uygulandığında kapsamlı matematiksel işlemlerden sonra aşağıdaki cebirsel denklemler elde edilir:

$$B_{11}f_1 - B_{12}f_2 + B_{13}f_3 + B_{14}f_4 = 0$$

$$B_{21}f_1 - B_{22}f_2 + B_{23}f_3 + B_{24}f_4 = 0$$

(4.1.4)

$$B_{31}f_1 - B_{32}f_2 + B_{33}f_3 + B_{34}f_4 = 0$$

$$B_{41}f_1 + (P_1\lambda^2 + P_2\mu^2 - k_w)f_2 + B_{43}f_3 + B_{44}f_4 = 0$$

Burada  $B_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3, 4$ ) ortotrop malzeme özelliklerine ve plak ölçülerine bağlı olan katsayılar olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned}
B_{11} &= [(c_{11} - c_{31})\lambda^2\eta^2 + c_{12}\lambda^4]h, & B_{12} &= (c_{14} + c_{32})\lambda^2\eta^2 + c_{13}\lambda^4 \\
B_{13} &= c_{15}\lambda^3 + c_{35}\lambda\eta^2 + I_5\lambda, & B_{14} &= (c_{18} + c_{38})\eta\lambda^2, \\
B_{21} &= [c_{21}\eta^4 + (c_{22} - c_{31})\lambda^2\eta^2]h, & B_{22} &= (c_{32} + c_{23})\lambda^2\eta^2 + c_{24}\eta^4, \\
B_{23} &= (c_{25} + c_{35})\lambda\eta^2, & B_{24} &= c_{28}\eta^3 + c_{38}\lambda^2\eta + I_6\eta, \\
B_{31} &= [b_{22}\lambda^4 + (b_{12} + b_{21} + b_{31})\lambda^2\eta^2 + b_{11}\eta^4]h, \\
B_{33} &= b_{25}\lambda^3 + (b_{15} + b_{35})\lambda\eta^2, \\
B_{32} &= b_{23}\lambda^4 + (b_{24} + b_{13} - b_{32})\lambda^2\eta^2 + b_{14}\eta^4, \\
B_{34} &= (b_{28} + b_{38})\lambda^2\eta + b_{18}\eta^3, & B_{41} &= 0, \\
B_{43} &= I_5\lambda, & B_{44} &= I_6\eta.
\end{aligned} \tag{4.1.5}$$

(4.1.4) denklemler sisteminde,  $f_1, f_3, f_4$  bilinmeyen katsayılar yok edilerek elde edilen denklemden  $f_2 \neq 0$  koşulu dikkate alınarak  $P_1\lambda^2 + P_2\mu^2$  terimi çekildiğinde, KDPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörgen plağın kritik basınç yükleri için aşağıdaki denklem elde edilir:

$$P_1\lambda^2 + P_2\mu^2 = \frac{Y_{22}Y_{11} - Y_{12}Y_{21}}{Y_{11}} + k_w \tag{4.1.6}$$

Burada şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= X_{21} - \frac{X_{11}X_{23}}{X_{13}}, Y_{12} = X_{22} - \frac{X_{12}X_{23}}{X_{13}}, Y_{21} = X_{31} - \frac{X_{11}X_{33}}{X_{13}}, \\
Y_{22} &= X_{32} - \frac{X_{12}X_{23}}{X_{13}}, X_{11} = B_{21} - \frac{B_{11}B_{24}}{B_{14}}, X_{12} = \frac{B_{12}B_{24}}{B_{14}} - B_{22}, \\
X_{13} &= B_{23} - \frac{B_{24}B_{13}}{B_{14}}, X_{21} = B_{31} - \frac{B_{11}B_{34}}{B_{14}}, X_{22} = \frac{B_{12}B_{34}}{B_{14}} - B_{32}, \\
X_{23} &= B_{33} - \frac{B_{13}B_{34}}{B_{14}}, X_{31} = B_{41} - \frac{B_{11}B_{44}}{B_{14}}, \\
X_{32} &= \frac{B_{12}B_{44}}{B_{14}}, X_{33} = B_{43} - \frac{B_{13}B_{44}}{B_{14}}.
\end{aligned} \tag{4.1.7}$$

$P_2 = \beta P_1 = \beta P$  ise KDPT çerçevesinde Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın boyutlu kritik basınç yükü için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$P_{12krw}^{KDPT} = \frac{Y_{22}Y_{11} - Y_{12}Y_{21} + k_w Y_{11}}{Y_{11}(\lambda^2 + \beta\mu^2)} \tag{4.1.8}$$

Burada  $\beta$  pozitif bir sayı olup sıfır ile bir arasında değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için boyutsuz kritik basınç yükü aşağıdaki ifadeden bulunmaktadır.

$$\bar{P}_{12krw}^{KDPT} = \frac{P_{12krw}^{KDPT} b^2}{\pi^2 D_0} \tag{4.1.9}$$

Burada, şu tanım geçerlidir:

$$D_0 = \frac{E_{0x} h^3}{12(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})} \tag{4.1.10}$$

olup plağın silindirik sertlik katsayısıdır. Özel durumlarda,  $P_2 = 0$  ise dikdörtgen plağa sadece  $x$  eksenini doğrultusunda,  $P_1 = 0$  ise dikdörtgen plağa sadece  $y$  eksenini doğrultusunda basınç yükleri etmektedir. Bu durumlarda, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plak için  $x$  ve  $y$  doğrultularındaki boyutlu kritik basınç yükleri sırasıyla aşağıdaki ifadelerden bulunur:

$$P_{1krw}^{KDPT} = \frac{Y_{22}Y_{11} - Y_{12}Y_{21} + k_w Y_{11}}{Y_{11}\lambda^2} \quad (4.1.11)$$

ve

$$P_{2krw}^{KDPT} = \frac{Y_{22}Y_{11} - Y_{12}Y_{21} + k_w Y_{11}}{Y_{11}\eta^2} \quad (4.1.12)$$

KDPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın  $x$  ve  $y$  doğrultularındaki boyutsuz kritik basınç yükleri, sırasıyla aşağıdaki ifadelerden bulunur:

$$\bar{P}_{1krw}^{KDPT} = \frac{P_{1krw}^{KDPT} b^2}{\pi^2 D_0} \quad (4.1.13)$$

ve

$$\bar{P}_{2krw}^{KDPT} = \frac{P_{2krw}^{KDPT} b^2}{\pi^2 D_0} \quad (4.1.14)$$

Kayma gerilmeleri ile kayma deformasyonları arasındaki (3.4.2) bağıntısı, yani  $\gamma_{xz}$  ve  $\gamma_{yz}$  deformasyonları dikkate alınmadığında, bir başka değişle klasik plak teorisi (KPT) çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen ortotrop dikdörtgen plağın tüm taraflı kritik basınç yükü için aşağıdaki ifade özel olarak elde edilir:

$$P_{12krw}^{KPT} = \frac{1}{\lambda^2 + \beta\eta^2} \left\{ [c_{13}\lambda^4 + (c_{14} + 2c_{32} + c_{23})\lambda^2\eta^2 + c_{24}\eta^4 + k_w] - [c_{12}\lambda^4 + (c_{11} - 2c_{31} + c_{22})\lambda^2\eta^2 + c_{21}\eta^4] \frac{[b_{23}\lambda^4 + (b_{13} - b_{32} + b_{24})\lambda^2\eta^2 + b_{14}\eta^4]}{b_{22}\beta_1^4 + (b_{12} + b_{31} + b_{21})\lambda^2\eta^2 + b_{11}\eta^4} \right\} \quad (4.1.15)$$

KPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın tüm taraflı kritik basınç yükünün boyutsuz değeri için aşağıdaki ifade kullanılır:

$$\bar{P}_{12krw}^{KPT} = \frac{P_{12krw}^{KPT} b^2}{\pi^2 D_0} \quad (4.1.16)$$

Yukarıda belirttiğimiz gibi  $P_2 = 0$  ise dikdörtgen plağa sadece x eksenini doğrultusunda,  $P_1 = 0$  ise dikdörtgen plağa sadece y eksenini doğrultusunda basınç yükleri etmektedir. Dolayısıyla, KPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen ortotrop dikdörtgen plağın x ve y doğrultularindeki kritik basınç yükleri için sırasıyla aşağıdaki ifade elde edilir:

$$P_{1krw}^{KPT} = \frac{1}{\lambda^2} \left\{ [c_{13}\lambda^4 + (c_{14} + 2c_{32} + c_{23})\lambda^2\eta^2 + c_{24}\eta^4 + k_w] - [c_{12}\lambda^4 + (c_{11} - 2c_{31} + c_{22})\lambda^2\eta^2 + c_{21}\eta^4] \frac{[b_{23}\lambda^4 + (b_{13} - b_{32} + b_{24})\lambda^2\eta^2 + b_{14}\eta^4]}{b_{22}\beta_1^4 + (b_{12} + b_{31} + b_{21})\lambda^2\eta^2 + b_{11}\eta^4} \right\} \quad (4.1.17)$$

ve

$$P_{2krw}^{KPT} = \frac{1}{\eta^2} \left\{ [c_{13}\lambda^4 + (c_{14} + 2c_{32} + c_{23})\lambda^2\eta^2 + c_{24}\eta^4 + k_w] - [c_{12}\lambda^4 + (c_{11} - 2c_{31} + c_{22})\lambda^2\eta^2 + c_{21}\eta^4] \frac{[b_{23}\lambda^4 + (b_{13} - b_{32} + b_{24})\lambda^2\eta^2 + b_{14}\eta^4]}{b_{22}\beta_1^4 + (b_{12} + b_{31} + b_{21})\lambda^2\eta^2 + b_{11}\eta^4} \right\} \quad (4.1.18)$$

KPT kullanıldığında, Winkler zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın x ve y doğrultularındaki boyutsuz kritik basınç yükleri için sırasıyla aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$\bar{P}_{1krw}^{KPT} = \frac{P_{1krw}^{KPT} b^2}{\pi^2 D_0} \quad (4.1.19)$$

ve

$$\bar{P}_{2krw}^{KPT} = \frac{P_{2krw}^{KPT} b^2}{\pi^2 D_0} \quad (4.1.20)$$

Ek olarak (4.1.8), (4.1.9), (4.1.11)-(4.1.14) ve (4.1.15)-(4.1.20) ifadeleri bazı özel durumlar için de kullanılabilir. Örneğin;

a) Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığında, yani  $k_w = 0$  olduğunda, söz konusu ifadelerden KDPT ve KPT çerçevesinde, homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın kritik basınç yükü ifadeleri özel olarak elde edilir.

b) Ortotrop malzeme homojen ise, yani  $\mu_1 = 0$  olduğunda, söz konusu ifadelerden KDPT ve KPT çerçevesinde, Winkler zemine oturan homojen ortotrop dikdörtgen plağın kritik basınç yükü ifadeleri özel olarak elde edilir.

c) Özel durumda  $k_w = 0$  ve  $\mu_1 = 0$  olduğunda, KDPT ve KPT çerçevesinde, Winkler zemin etkisi dikkate alınmayan ve homojen ortotrop malzemeden oluşan dikdörtgen plak için kritik basınç yükü ifadeleri elde edilir.

#### 4.2. Karşılaştırmalar

Tez çalışmasında elde edilen ifadelerin doğruluğunu teyit etmek için zemin katsayıları  $k_w = 0$  ve  $k_w \neq 0$  olduğunda (4.1.17) ve (4.1.19) ifadeleri kullanılarak sayısal hesaplar yapılmış ve literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır.

Birinci karşılaştırmada, KDPT kullanılarak, değişik  $a/b$  ve  $h/a$  oranları için homojen izotrop dikdörtgen ve kare plakların boyutsuz tek eksenli kritik yük değerleri Akhavan vd. (2009) çalışmasında elde edilen sonuçlarla kıyaslanmaktadır (Bkz., Çizelge 4.1). Akhavan vd. (2009) çalışmasında, KDPT kullanıldığında, kayma düzeltme katsayısı kullanılmış ve bu katsayı  $K = 5/6$  olarak dikkate alınmıştır. Karşılaştırmalarda aşağıdaki malzeme özellikleri kullanılmaktadır:

$$E_{0x} = E_{0y} = 7 \times 10^{10} \text{ Pa}, \quad v_{xy} = v_{yx} = 0.3, \quad G_{0xy} = G_{0xz} = G_{yz} = \frac{E_{0x}}{2(1 + v_{xy})},$$

Dikdörtgen plakların boyutları çizelge içinde sunulmaktadır. Bu veriler Akhavan vd. (2009) çalışmasından alınmıştır. Tez çalışmasında kayma gerilme katsayısı kullanılmamış ve kayma gerilme dağılım fonksiyonu,  $f(z) = z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$  olarak ele alınmaktadır. Kritik yüke karşı gelen dalga sayıları  $(m,n)$  çizelge içinde sunulmaktadır. Karşılaştırma, tez çalışmasında elde edilen sonuçların Akhavan vd. (2009) çalışma sonuçları ile oldukça uyum içinde olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.1.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen izotrop plaklar için KDPT temelinde tek eksenli boyutsuz kritik burkulma yükü ( $\bar{P}_{1kr}^{KDPT}$ ) değerlerinin Akhavan vd. (2009) çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

| $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \left[ = P_{1kr}^{KDPT} b^2 / (D_0 \pi^2) \right], (m,n)$ |              |              |              |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Akhavan vd. (2009)                                                              |              |              |              |
| $h/a$                                                                           | $a/b = 0.5$  | $a/b = 1$    | $a/b = 2$    |
| 0.001                                                                           | 61.6848(1,1) | 39.4782(1,1) | 39.4776(2,1) |
| 0.01                                                                            | 61.6641(1,1) | 39.4570(1,1) | 39.3930(2,1) |
| 0.1                                                                             | 59.6629(1,1) | 37.4477(1,1) | 32.4414(2,1) |
| 0.2                                                                             | 54.3207(1,1) | 32.4414(1,1) | 19.2255(3,1) |
| Tez çalışması                                                                   |              |              |              |
| $h/a$                                                                           | $a/b = 0.5$  | $a/b = 1$    | $a/b = 2$    |
| 0.001                                                                           | 61.6568(1,1) | 39.4709(1,1) | 39.4783(2,1) |
| 0.01                                                                            | 61.6632(1,1) | 39.4563(1,1) | 39.3896(2,1) |
| 0.1                                                                             | 59.5848(1,1) | 37.3708(1,1) | 32.2118(2,1) |
| 0.2                                                                             | 54.0625(1,1) | 32.2118(1,1) | 18.7859(3,1) |

İkinci karşılaştırmada, KDPT kullanılarak,  $a/b=1$  ve  $h/a=0.001$  oranları için elastik zemin üzerine oturan ve zemin etkisi olmadığına, basit mesnetli homojen izotrop kare plağın boyutsuz tek eksenli kritik yük değerleri üç farklı çalışma ile, yani Lam vd. (2000), Malakzadeh (2012) ve Sobhy (2013) çalışmalarında elde edilen değerlerle mukayese edilmektedir (Bkz., Çizelge 4.2). Lam vd. (2000) ve Malakzadeh (2012) çalışmasında, KDPT kullanıldığında, kayma düzeltme katsayısı kullanılmış ve bu katsayı  $K=5/6$  olarak dikkate alınmıştır. Sobhy (2013) çalışmasında temel denklemler üç yer değiştirmeye bağlı olarak elde edilmiş ve kesin çözüm bulunmuştur. Karşılaştırmalarda aşağıdaki malzeme özellikleri kullanılmaktadır:

$$E_{0x} = E_{0y} = 7 \times 10^{10} \text{ Pa}, \quad v_{xy} = v_{yx} = 0.3, \quad G_{0xy} = G_{0xz} = G_{0yz} = \frac{E_{0x}}{2(1 + v_{xy})}$$

Winkler elastik zemin katsayısının boyutsuz şekli  $\bar{k}_{w1} = \frac{k_w a^2}{D_0}$  olarak ele

alınmaktadır. Burada  $D_0 = \frac{E_{0x} h^3}{12(1 - v_{xy} v_{yx})}$  olup silindirik sertlik katsayısı

adlandırılır. Bu karşılaştırmada kullanılan tüm veriler, Malakzadeh (2012) ve Sobhy (2013) çalışmalarından alınmıştır. Tez çalışmasında kayma gerilme dağılım

fonksiyonu,  $f(z) = z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$  olarak ele alınmaktadır. Kritik yüke karşı gelen dalga

sayıları  $(m,n)=(1,1)$  olduğu için çizelge içinde sunulmamaktadır. Tez çalışmasında, Winkler zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, kritik yük için elde edilen sonuçların Lam vd. (2000), Malakzadeh (2012) ve Sobhy (2013) çalışmalarında elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.2.** Winkler elastik zemine oturan ve zemin etkisi dikkate alınmayan, ince, homojen, kare plağın kritik burkulma yükünün  $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} [= P_{1krw}^{KDPT} a^2 / (D_0 \pi^2)]$  karşılaştırması

| $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} [= P_{1krw}^{KDPT} b^2 / (D_0 \pi^2)]$ |                |              |                       |               |
|---------------------------------------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|---------------|
| $\bar{k}_{wl}$                                                | Lam vd. (2000) | Sohby (2013) | Malekzadeh vd. (2012) | Tez Çalışması |
| 0                                                             | 4.000          | 3.99998      | 4.0000                | 3.9992        |
| 100                                                           | 5.027          | 5.02658      | 5.0266                | 5.0258        |

Üçüncü karşılaştırmada, KDPT ve KPT çerçevesinde, homojen ortotrop plağın tek eksenli kritik basın yükü değerleri değişik  $a/b$  değişik ortotropi özellikleri kullanılarak Ambartsumyan (1964) kitabında sunulan değerlerle karşılaştırılmakta ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3' de sunulmaktadır. Karşılaştırmada kullanılan

homojen ortotrop plağın malzeme özellikleri şu şekildedir:  $\frac{E_{0x}}{E_{0y}} = \frac{\nu_{xy}}{\nu_{yx}} = k_{01}$ ;

$$\frac{E_{0x}}{G_{0xy}} = k_{02}; \quad \frac{E_{0x}}{G_{0xz}} = \frac{E_{0y}}{G_{0yz}} = k_3. \text{ Ayrıca } k_{01} = k_{02} = 5.0; \quad \nu_{xy} = 0.3 \text{ ve } h/b = 0.1$$

olup bu veriler Ambartsumyan (1964) kitabından alınmıştır. Kritik yüke karşı gelen dalga sayıları  $(m,n)=(1,1)$  olduğu için çizelge içinde sunulmamaktadır. Tez çalışmasında, zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumda, KDPT ve KPT çerçevesinde tek eksenli boyutsuz kritik yük için edilen sonuçların Ambartsumyan (1964) kitabında sunulan sonuçlarla bire-bir aynı olduğu saptanmıştır. Son satırdaki değerler  $a/b$  oranına göre tek eksenli boyutsuz kritik yükün en küçük değerini, yani  $\Phi_{\min} [= P_{1kr}^{KDPT} b^2 / (D_0 \pi^2)]$  göstermektedir. En küçük kritik yüke karşı gelen  $a/b$  oranları ise son satırın üzerinde sunulmaktadır.

**Çizelge 4.3.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen ortotrop plaklar için KDPT ve KPT temelinde, tek eksenli boyutsuz kritik burkulma yükü ( $\bar{P}_{1kr}^{KDPT}$ ) değerlerinin Ambartsumyan (1964) çalışma sonuçları ile karşılaştırılması

| Ambartsumyan (1964) |                       |                |                        |                 |
|---------------------|-----------------------|----------------|------------------------|-----------------|
| a / b               | $\bar{P}_{1kr}^{KPT}$ |                | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT}$ |                 |
|                     | $k_{03} = 0$          | $k_{03} = 2.0$ | $k_{03} = 5.0$         | $k_{03} = 10.0$ |
| 0.35                | 9.093                 | 7.682          | 6.241                  | 4.763           |
| 0.65                | 3.357                 | 3.144          | 2.873                  | 2.516           |
| 0.95                | 2.194                 | 2.105          | 1.984                  | 1.816           |
| 1.25                | 1.858                 | 1.799          | 1.716                  | 1.596           |
| 1.65                | 1.817                 | 1.769          | 1.700                  | 1.598           |
| 1.95                | 1.929                 | 1.881          | 1.814                  | 1.712           |
| 2.25                | 2.116                 | 2.066          | 1.995                  | 1.889           |
| 2.55                | 2.360                 | 2.306          | 2.230                  | 2.115           |
| a / b               | 1.5954                | 1.4820         | 1.4629                 | 1.4336          |
| $\Phi_{min}$        | 1.8000                | 1.7488         | 1.6770                 | 1.5694          |
| Tez Çalışması       |                       |                |                        |                 |
| a / b               |                       |                |                        |                 |
| 0.35                | 9.0934                | 7.6817         | 6.2408                 | 4.7629          |
| 0.65                | 3.3570                | 3.1439         | 2.8728                 | 2.5156          |
| 0.95                | 2.1941                | 2.1046         | 1.9840                 | 1.8128          |
| 1.25                | 1.8581                | 1.7985         | 1.7165                 | 1.5961          |
| 1.65                | 1.8174                | 1.7686         | 1.7004                 | 1.5982          |
| 1.95                | 1.9291                | 1.8812         | 1.8138                 | 1.7120          |
| 2.25                | 2.1156                | 2.0658         | 1.9954                 | 1.8885          |
| 2.55                | 2.3599                | 2.3063         | 2.2304                 | 2.1148          |
| a / b               | 1.5954                | 1.4820         | 1.4629                 | 1.4336          |
| $\Phi_{min}$        | 1.8075                | 1.7488         | 1.6770                 | 1.5694          |

#### 4.3. Sayısal Hesaplar ve Analiz

Bu alt bölümde, KDPT ve KPT kullanılarak, Winkler zemini üzerine oturan ve zemin etkisi dikkate alınmayan homojen ve homojen olmayan dikdörtgen ve kare plakların bir ve iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerleri sayısal olarak bulunmaktadır. Sayısal hesaplar Çizelge 4.4-4.13 ve Şekil 4.3.1-4.3.11'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.12 ve 4.13 hariç diğer tüm çizelge ve şekillerde kayma gerilmesi için

$f(z) = z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$  fonksiyonu, yani parabolik fonksiyon kullanılmaktadır. Çizelge

4.12 ve 4.13'de kayma gerilmesinin değişim kuralını karakterize eden fonksiyonlar

$$f(z) = z \left( 1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right); f(z) = z, \text{ yani } \text{üniform} \text{ ve } f(z) = h \sin\left(\frac{z}{h}\right) - z \cosh\left(\frac{1}{2}\right), \text{ yani}$$

sinüs hiperbolik şeklinde sunulmaktadır. Sayısal hesaplarda, Young modülleri, kayma modülleri ve yoğunluğun değişim fonksiyonları kuvvet ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir. Tüm hesaplarda dikdörtgen plağın eni  $b = 0.3411 \text{ m}$  olarak dikkate alınmaktadır. Kullanılan malzeme bor/epoksi olup özellikleri şu şekildedir:

$$E_{0x} = 206.844 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad E_{0y} = 18.6159 \times 10^9 \text{ Pa}; \quad G_{0xy} = G_{0xz} = 4.48162 \times 10^9 \text{ Pa};$$

$$G_{0yz} = 2.55107 \times 10^9 \text{ Pa}; \quad \nu_{xy} = 0.21.$$

Çizelge ve şekillerde boyutsuz Winkler zemin katsayısı olarak  $\bar{k}_w = \frac{K_w b^2}{D_0 \pi^2}$  dikkate

alınmaktadır. Maple 14 bilgisayar programı kullanılarak sayısal hesaplar yapılarak çizelgeler oluşturulmakta ve Excel programı kullanılarak grafikler çizilmektedir. KPT ve KDPT çerçevesinde, (4.1.9), (4.1.13), (4.1.14), (4.1.16), (4.1.19) ve (4.1.20) ifadeleri Maple 14 programında yazılır ve bor/epoksi malzeme özellikleri, Winkler zemin katsayısı ve somut plak boyutları için değişik (m,n) dalga sayıları için hesaplar yapılarak bir ve iki eksenli kritik basınç yüklerinin değerleri bulunmaktadır. Sonraki aşamada, kritik basınç yüklerinin (m,n) dalga sayılarına göre en küçük minimum değerleri bulunmaktadır.

Malzemenin Young ve kayma modülleri homojen durumda sabit, homojen olmayan durumda doğrusal, kuadratik ve üstel olarak değişmektedir. Homojen olmayan malzemelerde, Young ve kayma modülleri değişim katsayısı tüm hesaplarda  $\mu_1 = \pm 1$  olarak göz önüne alınmaktadır. Gerektiğinde homojen ve homojen olmayan yerine sırasıyla H ve HO kısaltmaları kullanılmaktadır. Oranlarda  $[(P_{1krw} - P_{1kr})/P_{1kr}] \times \%100$ ,  $[(H - HO)/H] \times \%100$  ve  $[(KPT - KDPT)/KPT] \times \%100$  ifadeleri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri

ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $a/h$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri şu şekildedir:  $a/b = 0.5$ ;  $b = 0.3411\text{ m}$ ;  $\bar{k}_w = 400$ . Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, Winkler zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/h$  oranı arttığında artmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $a/h$  oranından bağımsızdır.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli ve zeminsiz durumda  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak daha yavaş azalmaktadır. Örneğin, zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen durum için  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin x eksenı doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31.28'den %1.81'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %28.67'den %1.64'e kadar azalmaktadır.

Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin x eksenı doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.65'den %1.66'ya, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %27.18'den %1.48'e kadar azalmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin x eksenı doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %33.42'den %1.99'a ve %28.82'den %1.62'ye, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %30.7'den %1.83'e ve %26.39'dan %1.4'e kadar azalmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z \pm 0.5}$ ) olduğunda,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31'den %1.75'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise %28.34'den %1.6'ya kadar azalmaktadır. Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklerle etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %24.34'den %1.39'a, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %24.82'den %1.4'e kadar azalmaktadır.

Homojen olmama doğrusal olarak ( $Z$ ) değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\mu_1 = \pm 1$  için  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %22.63'den %1.27'ye, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %23.49'dan %1.29'a kadar azalmaktadır.

Homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %26.79'dan %1.58'e ve %21.58'den %1.19'a her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.72'den %1.56'ya ve %22.91'den %1.24'e kadar azalmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.32'den %1.49'a ve %20.99'dan %1.20'ye her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.65'den %1.45'e ve %25.42'den 1.40'a kadar değişmektedir.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $a/h$  oranına bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar değiştiğinde homojen olmamanın hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi sabit olur ve  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$ ,  $1 \pm z$  ve  $1 \pm z^2$  için etkiler sırasıyla (-%63.54); %39.84; %8.34;  $\mp$  %15 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $a/h$  oranına yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $a/h$  oranının küçük değerlerinde artar  $a/h$ 'ın sonraki artışlarında homojen olmama etkisi yine sabitlenir. Örneğin  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar değiştiğinde homojen olmamanın hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkileri yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.49)'dan (-%63.63)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%39.51)'den (%39.81)'e,  $1 \pm z$  için (%6.18)'den (%8.2)'ye,  $1 + z^2$  için (-%11.4)'den (-%14.78)'e,  $1 - z^2$  için (%11.96)'dan (%14.83)'e olmaktadır.

KPT çerçevesinde, Winkler zeminli durumda homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı değildir ve homojen olmamanın etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%49.5);  $e^{z-0.5}$  için (%30);  $1 \pm z$  için (%6.48);  $1 + z^2$  için (-%11.68) ve  $1 - z^2$  için (%11.68) olmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$

için (-%54.32);  $e^{z-0.5}$  için (%34.03);  $1 \pm z$  için (%7.13);  $1 + z^2$  için (-%12.81) ve  $1 - z^2$  için (%12.81) olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, Winkler zeminli durumda homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%45.59)'dan (-%49.34)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%27.95)'den (%31)'e,  $1 \pm z$  için (%4.37)'den (%6.36)'ya,  $1 + z^2$  için (-%8.07)'den (-%11.46)'ya,  $1 - z^2$  için (%8.46)'dan (%11.46)'ya artmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%52.61)'den (-%54.24)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%34.56)'dan (%34.02)'ye,  $1 \pm z$  için (%5.48)'den (%7.02)'ye,  $1 + z^2$  için (-%9.56)'dan (-%12.63)'e,  $1 - z^2$  için (%10.6)'dan (%12.67)'ye kadar artmaktadır.

Görüldüğü gibi KDPT çerçevesinde zemine oturan plaklarda homojen olmamanın iki eksenli kritik yüke etkisi bir eksenli kritik yüke olan etkiden daha belirgindir.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $a/h$  oranına bağlı olarak Winkler zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, Winkler zeminin etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup H ve HO durumunda fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar değiştiğinde Winkler zeminin hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi sabit olmaktadır. Bir eksenli kritik yüke homojen durumunda etki %28.1 olmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$ ,  $1 \pm z$ ,  $1 + z^2$  ve  $1 - z^2$  için etkiler sırasıyla %17.38; %47.25; %31.02; %24.7 ve %33.42 olmaktadır.

İki eksenli kritik yük için ise, homojen durumda etki %17 olmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$ ,  $1 \pm z$ ,  $1 + z^2$  ve  $1 - z^2$  için etkiler sırasıyla %10.36; %25.25; %16.55; %14.74 ve %20 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde Winkler zemin etkisi, H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar değiştiğinde azalmaktadır. Örneğin,  $a/h$  oranı 10'dan 50'ye kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %41.37'den %28.95'e değişmektedir. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için %25.13'den %17.69'a,  $e^{z-0.5}$  için %68.39'dan %48.10'a,  $1 \pm z$  için %44.09'dan %31.54'e,  $1 + z^2$  için %37.13'den %25.22'ye ve  $1 - z^2$  için %46.99'dan %34'e olmaktadır.

İki eksenli kritik yüke ise, homojen durumda Winkler zemin etkisi %23.31'den %17.29'a değişmektedir. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişmiştir:  $e^{z+0.5}$  için %14.5'den %10.53'e,  $e^{z-0.5}$  için %33.44'den %28.56'ya,  $1 \pm z$  için %24.56'dan %18.78'e,  $1 + z^2$  için %23.33'den %15.06'ya ve  $1 - z^2$  için %25.67'den %20'ye olmaktadır.

KPT ve KDPT çerçevesinde, iki eksenli kritik yüke karşı gelen enine dalga sayısı bir eksenli kritik yüke karşı gelen enine dalga sayısından büyük olur, fakat  $a/h$  oranının etkisine bağlı olarak yaklaşık değişmemektedir. Ayrıca, bir eksenli kritik yüke karşı gelen boyuna ve enine dalga sayısı genelde (1,1) olmaktadır.

**Çizelge 4.4.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $a/h$  oranına bağlı dağılımı

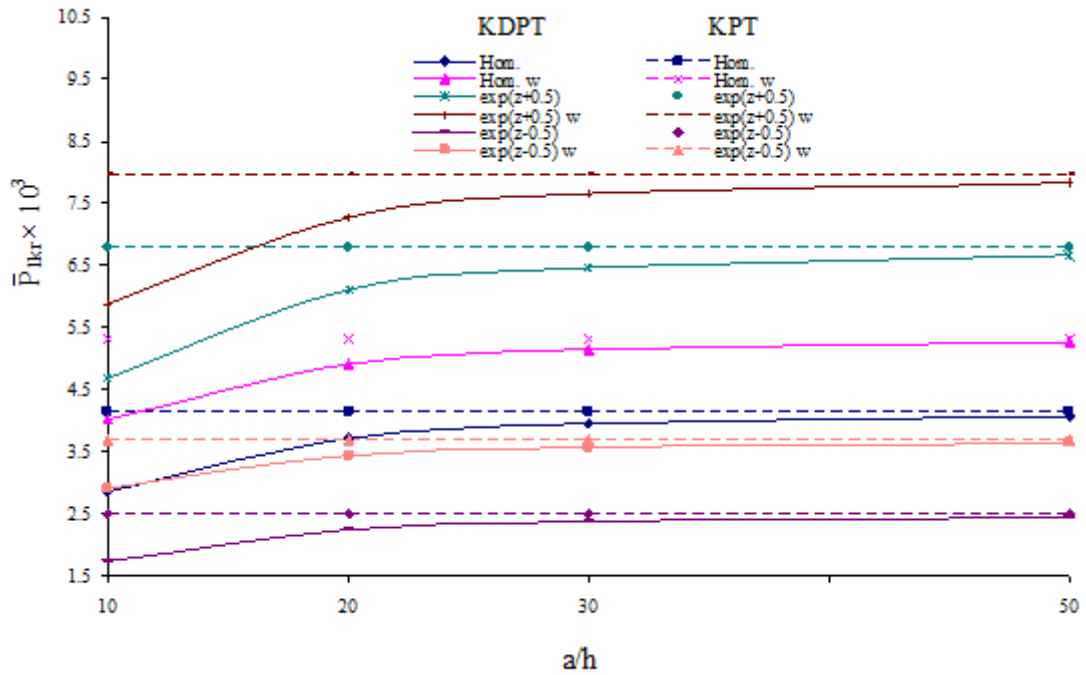
| $a/b = 0.5; b = 0.341\text{m}; \bar{k}_w = 0$ |                                              |                                             |                                              |                                             |                                              |                                             |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                               | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| a / h                                         | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 10                                            | 2.850(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 4.688(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.724(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| 20                                            | 3.722(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 6.099(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 2.244(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| 30                                            | 3.947(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 6.461(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 2.377(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| 50                                            | 4.072(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 6.663(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 2.451(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| a / h                                         | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 10                                            | 2.674(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 3.175(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.509(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| 20                                            | 3.438(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 4.235(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 3.200(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| 30                                            | 3.631(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 4.516(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 3.373(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| 50                                            | 3.738(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 4.674(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 3.468(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
|                                               | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| a / h                                         | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 10                                            | 1.523(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 2.503(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.921(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| 20                                            | 1.936(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 3.172(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 1.167(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| 30                                            | 2.041(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 3.342(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 1.229(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| 50                                            | 2.100(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 3.437(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 1.264(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| a / h                                         | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 10                                            | 1.425(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 1.702(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.336(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| 20                                            | 1.787(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 2.205(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.663(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| 30                                            | 1.877(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 2.337(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.744(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| 50                                            | 1.928(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 2.411(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.789(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |

**Çizelge 4.5.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $a/h$  oranına bağlı dağılımı

| $a/b = 0.5; b = 0.341\text{m}; \bar{k}_w = 400$ |                                               |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                 | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| a/h                                             | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 10                                              | 4.029(1,1)                                    | 5.325(1,1)                                   | 5.866(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 2.903(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| 20                                              | 4.901(1,1)                                    | 5.325(1,1)                                   | 7.278(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 3.423(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| 30                                              | 5.125(1,1)                                    | 5.325(1,1)                                   | 7.640(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 3.556(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| 50                                              | 5.251(1,1)                                    | 5.325(1,1)                                   | 7.842(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 3.630(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| a/h                                             | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 10                                              | 3.853(1,1)                                    | 4.980(1,1)                                   | 4.354(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 3.688(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| 20                                              | 4.617(1,1)                                    | 4.980(1,1)                                   | 5.414(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 4.379(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| 30                                              | 4.809(1,1)                                    | 4.980(1,1)                                   | 5.695(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 4.551(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| 50                                              | 4.917(1,1)                                    | 4.980(1,1)                                   | 5.853(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 4.647(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
|                                                 | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| a/h                                             | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 10                                              | 1.878(1,4)                                    | 2.498(1,3)                                   | 2.866(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.229(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| 20                                              | 2.299(1,3)                                    | 2.498(1,3)                                   | 3.535(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.513(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| 30                                              | 2.404(1,3)                                    | 2.498(1,3)                                   | 3.704(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.585(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| 50                                              | 2.463(1,3)                                    | 2.498(1,3)                                   | 3.799(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.625(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| a/h                                             | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 10                                              | 1.775(1,4)                                    | 2.320(1,3)                                   | 2.065(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 1.679(1,4)                                    | 2.178(1,3)                                   |
| 20                                              | 2.150(1,3)                                    | 2.320(1,3)                                   | 2.568(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 2.025(1,3)                                    | 2.178(1,3)                                   |
| 30                                              | 2.240(1,3)                                    | 2.320(1,3)                                   | 2.700(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 2.106(1,3)                                    | 2.178(1,3)                                   |
| 50                                              | 2.290(1,3)                                    | 2.320(1,3)                                   | 2.774(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 2.151(1,3)                                    | 2.178(1,3)                                   |

Şekil 4.3.1’de Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.4 ve 4.5’den alınmıştır. Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

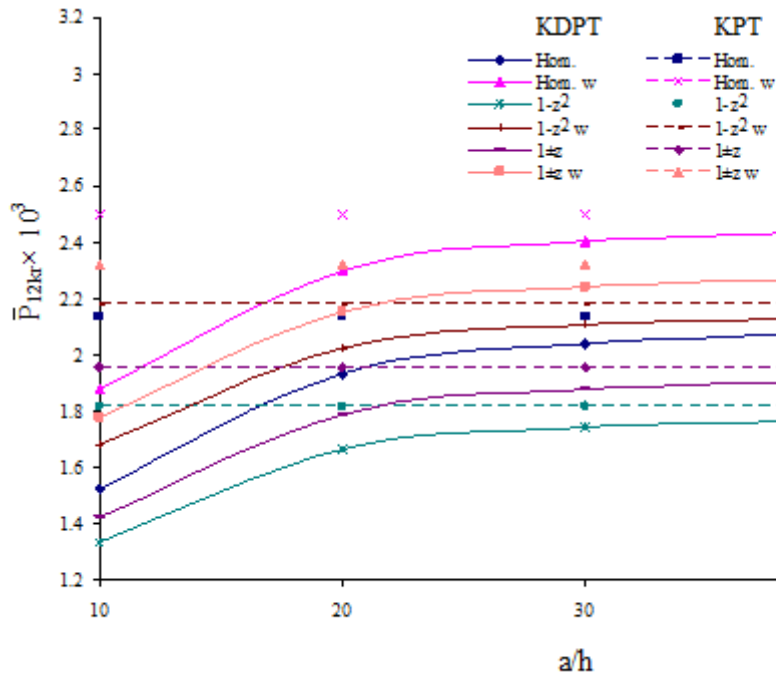
KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $a/h$  oranının artışına bağlı değildir.



**Şekil 4.3.1.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı

Şekil 4.3.2’de Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.4 ve 4.5’den alınmıştır. Homojen olmama ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda kuvvet fonksiyonu şeklinde değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $a/h$  oranının artışından bağımsızdır.

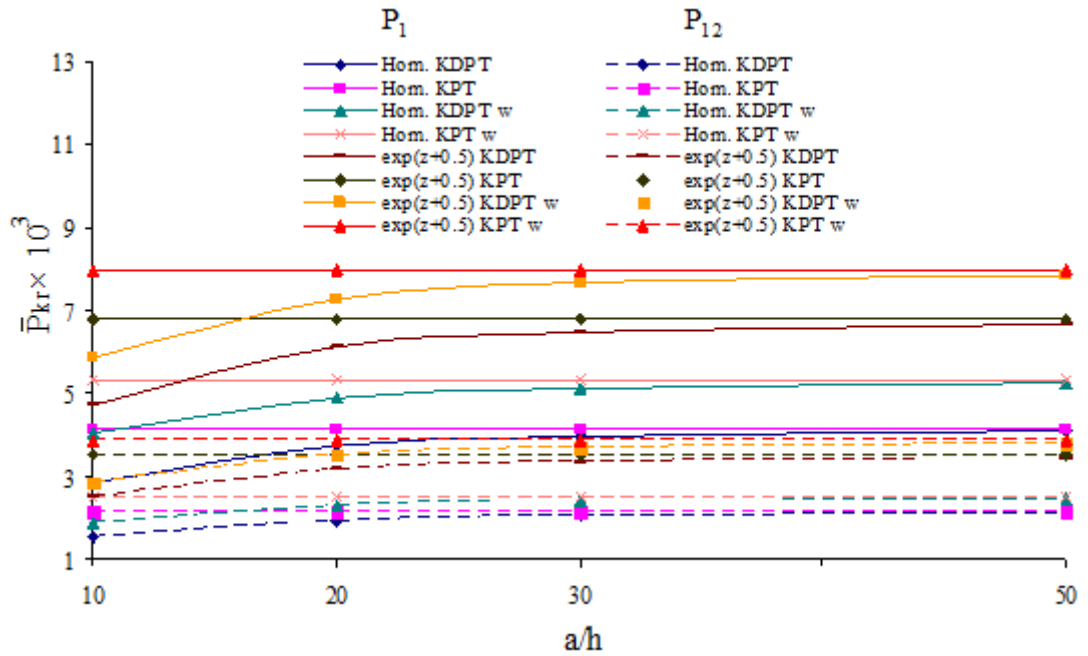


**Şekil 4.3.2.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı

Şekil 4.3.3’de zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama

fonksiyonları Çizelge 4.4 ve 4.5'deki verilerin aynısıdır. Homojen olmama ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda kuvvet fonksiyonu şeklinde değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $a/h$  oranının artışından bağımsızdır. Ayrıca bir eksenli kritik basınç yükü değerleri zeminli ve zeminsiz durumlarda iki eksenli basınç yükü değerlerinden büyük olmaktadır.



**Şekil 4.3.3.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/h$  oranına bağlı dağılımı

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de Winkler zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $a/b$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri şu şekildedir:  $a/h = 10$ ;  $b = 0.3411\text{ m}$ ;  $\bar{k}_w = 100$ . Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/b$  oranı arttığında genelde azalmaktadır.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin  $x$  eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminsiz durumda  $a/b$  oranının artışına bağlı olarak çok az miktarda azalmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine kayma gerilmelerinin etkileri ise az miktarda artmaktadır. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerlerine kayma etkisi  $a/b$  oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen durum için  $a/b$  oranı 0.25’den 1’e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31.38’den %30.15’e, azalmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %28.67’den %29.98’e kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için  $a/b$  oranı 0.25’den 1’e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.75’den %28.57’ye azalmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %27.18’den %28.44’e kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda  $a/b$  oranı 0.25’den 1’e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %33.54’den %32.23’a ve %28.91’den %27.81’e azalmakta, her iki doğrultudaki

kritik yük değerlerine kayma etkisi ise sırasıyla %30.69'dan %32.15'e ve %26.40'dan %27.66'ya kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z\pm 0.5}$ ) olduğunda,  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31'den %29.76'ya azalmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise %28.32'den %29.76'ya kadar artmaktadır. Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31.23'den %25.87'ye, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %28.61'den %21.51'e kadar azalmaktadır.

Homojen olmama doğrusal olarak ( $Z$ ) değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\mu_1 = \pm 1$  için  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.6'dan %25.09'a, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %27.1'den %19.77'ye kadar azalmaktadır.

Homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %33.42'den %26.6'ya ve %28.76'dan %25.51'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise sırasıyla %30.62'den %23.82'ye ve %26.32'den %18.78'e kadar azalmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e arttığında kayma gerilmelerinin  $x$  eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %30.91'den %18.67'ye ve %30.76'dan %37.4'e her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %28.28'den %23.83'e ve %28.21'den %23.09'a kadar değişmektedir.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında a/b oranına bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi a/b oranının artışına neredeyse bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, a/b oranı 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın hem bir hem de iki eksenli kritik yüklere etkileri neredeyse sabit olup  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$ ,  $1 \pm z$  ve  $1 \pm z^2$  için etkiler sırasıyla yaklaşık olarak (-%63.56); %39.83; %8.33;  $\mp$  %15 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki a/b oranına yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki a/b oranı 0.25'den 1'e kadar değişiminde bir eksenli durumda küçük artış, iki eksenli durumda ise küçük bir azalma görülmektedir. Örneğin a/b oranı 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkileri homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  olduğunda yaklaşık olarak eşit olup sırasıyla (-%64.4) ve (%39.5) olmaktadır. Söz konusu etki bir eksenli kritik yük için diğer durumlarda yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $1 \pm z$  için (%6.16)'dan (%6.25)'e, ve  $1 + z^2$  için (-%11.37)'den (-%11.56)'ya,  $1 - z^2$  için (%11.95)'den (%12.15)'e ve iki eksenli yük için  $1 \pm z$  için (%6.42)'den (%6.33)'e,  $1 + z^2$  için (-%11.75)'den (-%11.44)'e,  $1 - z^2$  için (%12.29)'dan (%12.17)'ye değişmektedir.

KPT çerçevesinde, Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi a/b oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır ve homojen olmamanın etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.

Örneğin  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%63.28)'den (-%32.26)'ya,  $e^{z-0.5}$  için (%39.65)'den (%20.23)'e,  $1 \pm z$  için (%8.29)'dan (%4.22)'ye,  $1 + z^2$  için (-%14.94)'den (-%7.61)'e,  $1 - z^2$  için (%14.23)'den (%7.61)'e olmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%63.39)'dan (-%45.32)'ye,  $e^{z-0.5}$  için (%39.72)'den (%28.43)'e,  $1 \pm z$  için (%8.31)'den (%5.35)'e,  $1 + z^2$  için (-%14.96)'dan (-%10.69)'a,  $1 - z^2$  için (%14.96)'dan (%10.69)'a olmaktadır.

KDPT çerçevesinde Winkler zeminli durumda, homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $a/b$  oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.04)'den (-%45.10)'a,  $e^{z-0.5}$  için (%39.24)'den (%32.64)'e,  $1 \pm z$  için (%6.13)'den (%3.21)'e,  $1 + z^2$  için (-%11.28)'den (-%6.54)'e ve  $1 - z^2$  için (%11.87)'den (%7.16)'ya azalmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi ise aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.15)'den (-%41.02)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%39.39)'dan (%29.88)'e,  $1 \pm z$  için (%6.38)'den (%3.87)'ye,  $1 + z^2$  için (-%11.71)'den (-%7.43)'e ve  $1 - z^2$  için (%12.23)'den (%7.59)'a kadar azalmaktadır.

Görüldüğü gibi KDPT çerçevesinde Winkler zemine oturan plaklarda homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüke etkisi yaklaşık olarak aynıdır. KPT ve KDPT çerçevesinde, zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmamanın kritik yüklere en büyük etkisi  $e^{z+0.5}$  'de olmaktadır. Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT çerçevesinde, homojen olmamanın kritik yüklere etkisi KDPT çerçevesindeki etkiden daha belirgindir.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $a/b$  oranına bağlı olarak Winkler zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminin etkisi  $a/b$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır ve bu etki önemli olup H ve HO durumunda fonksiyonların şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin,  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde zeminin hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi artmaktadır. Bir eksenli kritik yüke homojen durumda zemin etkisi %0.45'den %97.12'ye artmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %0.28'den %59.37'ye,  $e^{z-0.5}$  için %0.75'den %161.15'e,  $1 \pm z$  için %0.49'dan %105.93'e,  $1 + z^2$  için %0.4'den %84.6'ya ve  $1 - z^2$  için %0.54'den %114.24'e artmaktadır.

İki eksenli kritik yük için ise, homojen durumda Winkler zemin etkisi %0.27'den %40.2'ye artmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %0.16'dan %24.45'e,  $e^{z-0.5}$  için %0.45'den %66.86'ya,  $1 \pm z$  için %0.29'dan %43.87'ye,  $1 + z^2$  için %0.23'den %34.96'ya ve  $1 - z^2$  için %0.32'den %47.29'a artmaktadır.

KDPT çerçevesinde Winkler zemin etkisi, H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde artmaktadır. Örneğin,  $a/b$  oranı 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %0.67'den %109.2'ye değişmektedir. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için %0.41'den %84.52'ye,  $e^{z-0.5}$  için %1.1'den %132.94'e,  $1 \pm z$  için %0.7'den %115.97'ye,  $1 + z^2$  için %0.59'dan %99.79'a ve  $1 - z^2$  için %0.76'dan %121.07'ye artmaktadır.

İki eksenli kritik yüke ise, homojen durumda zemin etkisi %0.36'dan %57.18'e değişmektedir. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişmiştir:  $e^{z+0.5}$  için %0.23'den %34.96'ya,  $e^{z-0.5}$  için %0.6'dan %82.66'ya,  $1 \pm z$  için %0.4'den %61.3'e,  $1 + z^2$  için %0.32'den %51.53'e ve  $1 - z^2$  için %0.43'den %65.37'ye artmaktadır.

Görüldüğü gibi KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke zemin etkisi iki eksenli kritik yüke zemin etkisinden daha belirgin olmaktadır.

a/b oranı artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen boyuna ve enine dalga sayıları azalmaktadır.

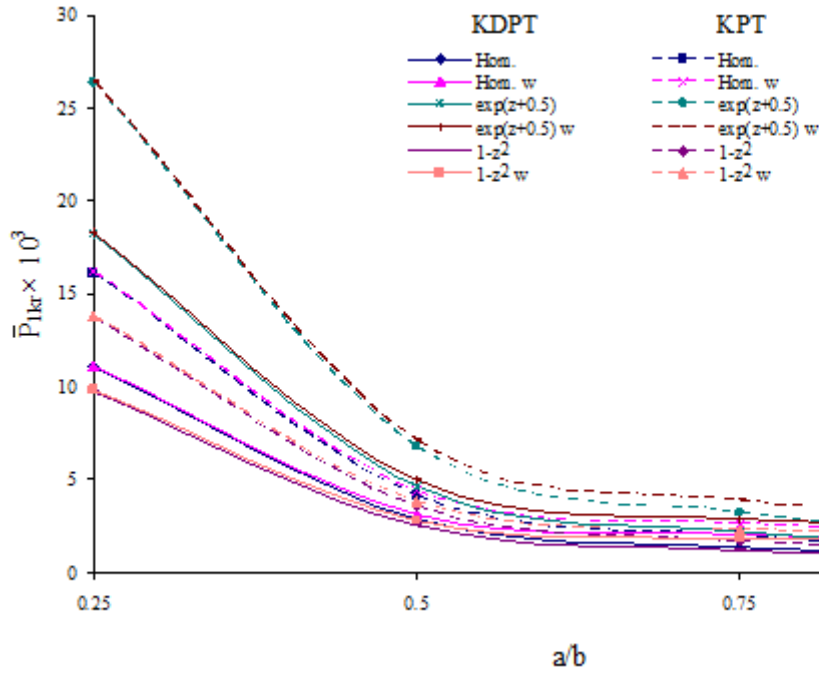
**Çizelge 4.6.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının a/b oranına bağlı değişimi

| a/h = 10; b = 0.341 m; $\bar{k}_w = 0$ |                                              |                                             |                                              |                                             |                                              |                                             |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                        | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| a / b                                  | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 0.25                                   | 11.069(1,1)                                  | 16.13(1,1)                                  | 18.205(1,1)                                  | 26.383(1,1)                                 | 6.697(1,1)                                   | 9.706(1,1)                                  |
| 0.50                                   | 2.850(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 4.688(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.724(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| 0.75                                   | 1.350(1,1)                                   | 1.953(1,1)                                  | 2.220(1,1)                                   | 3.194(1,1)                                  | 0.817(1,1)                                   | 1.175(1,1)                                  |
| 1.0                                    | 0.848(1,1)                                   | 1.214(1,1)                                  | 1.395(1,1)                                   | 1.986(1,1)                                  | 0.513(1,1)                                   | 0.731(1,1)                                  |
| a / b                                  | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 0.25                                   | 10.387(1,1)                                  | 14.786(1,1)                                 | 12.327(1,1)                                  | 18.549(1,1)                                 | 9.746(1,1)                                   | 13.71(1,1)                                  |
| 0.50                                   | 2.674(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 3.175(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.509(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| 0.75                                   | 1.266(1,1)                                   | 1.79(1,1)                                   | 1.504(1,1)                                   | 2.245(1,1)                                  | 1.187(1,1)                                   | 1.660(1,1)                                  |
| 1.0                                    | 0.795(1,1)                                   | 1.113(1,1)                                  | 0.946(1,1)                                   | 1.396(1,1)                                  | 0.745(1,1)                                   | 1.032(1,1)                                  |
|                                        | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| a / b                                  | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 0.25                                   | 6.092(1,6)                                   | 8.541(1,6)                                  | 10.013(1,6)                                  | 13.970(1,6)                                 | 3.684(1,6)                                   | 5.139(1,6)                                  |
| 0.50                                   | 1.523(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 2.503(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.921(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| 0.75                                   | 0.677(1,2)                                   | 0.949(1,2)                                  | 1.113(1,2)                                   | 1.552(1,2)                                  | 0.409(1,2)                                   | 0.571(1,2)                                  |
| 1.0                                    | 0.411(1,2)                                   | 0.587(1,2)                                  | 0.675(1,2)                                   | 0.961(1,2)                                  | 0.248(1,2)                                   | 0.353(1,2)                                  |
| a / b                                  | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 0.25                                   | 5.701(1,6)                                   | 7.829(1,6)                                  | 6.808(1,6)                                   | 9.822(1,6)                                  | 5.343(1,6)                                   | 7.260(1,6)                                  |
| 0.50                                   | 1.425(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 1.702(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.336(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| 0.75                                   | 0.633(1,2)                                   | 0.870(1,2)                                  | 0.756(1,2)                                   | 1.091(1,2)                                  | 0.594(1,2)                                   | 0.807(1,2)                                  |
| 1.0                                    | 0.385(1,2)                                   | 0.538(1,2)                                  | 0.458(1,2)                                   | 0.675(1,2)                                  | 0.361(1,2)                                   | 0.499(1,2)                                  |

**Çizelge 4.7.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının a / b oranına bağlı değişimi

| a/h = 10; b = 0.341 m; $\bar{k}_w = 100$ |                                               |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                          | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| a / b                                    | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 0.25                                     | 11.143(1,1)                                   | 16.203(1,1)                                  | 18.279(1,1)                                   | 26.456(1,1)                                  | 6.771(1,1)                                    | 9.779(1,1)                                   |
| 0.50                                     | 3.145(1,1)                                    | 4.441(1,1)                                   | 4.982(1,1)                                    | 7.077(1,1)                                   | 2.019(1,1)                                    | 2.790(1,1)                                   |
| 0.75                                     | 2.013(1,1)                                    | 2.616(1,1)                                   | 2.883(1,1)                                    | 3.857(1,1)                                   | 1.480(1,1)                                    | 1.838(1,1)                                   |
| 1.0                                      | 1.774(2,1)                                    | 2.393(1,1)                                   | 2.574(1,1)                                    | 3.165(1,1)                                   | 1.195(2,1)                                    | 1.909(1,1)                                   |
| a / b                                    | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 0.25                                     | 10.460(1,1)                                   | 14.859(1,1)                                  | 12.400(1,1)                                   | 18.623(1,1)                                  | 9.820(1,1)                                    | 13.784(1,1)                                  |
| 0.50                                     | 2.969(1,1)                                    | 4.096(1,1)                                   | 3.469(1,1)                                    | 5.063(1,1)                                   | 2.804(1,1)                                    | 3.819(1,1)                                   |
| 0.75                                     | 1.929(1,1)                                    | 2.453(1,1)                                   | 2.167(1,1)                                    | 2.909(1,1)                                   | 1.850(1,1)                                    | 2.323(1,1)                                   |
| 1.0                                      | 1.717(2,1)                                    | 2.292(1,1)                                   | 1.890(2,1)                                    | 2.575(1,1)                                   | 1.647(2,1)                                    | 2.211(1,1)                                   |
|                                          | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| a / b                                    | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 0.25                                     | 6.114(1,6)                                    | 8.564(1,6)                                   | 10.036(1,6)                                   | 13.993(1,6)                                  | 3.706(1,6)                                    | 5.162(1,6)                                   |
| 0.50                                     | 1.614(1,3)                                    | 2.226(1,3)                                   | 2.594(1,3)                                    | 3.583(1,3)                                   | 1.012(1,3)                                    | 1.376(1,3)                                   |
| 0.75                                     | 0.881(1,2)                                    | 1.153(1,2)                                   | 1.317(1,2)                                    | 1.756(1,2)                                   | 0.583(1,3)                                    | 0.775(1,2)                                   |
| 1.0                                      | 0.646(1,2)                                    | 0.823(1,2)                                   | 0.911(1,2)                                    | 1.196(1,2)                                   | 0.453(1,3)                                    | 0.589(1,2)                                   |
| a / b                                    | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 0.25                                     | 5.724(1,6)                                    | 7.852(1,6)                                   | 6.830(1,6)                                    | 9.845(1,6)                                   | 5.366(1,6)                                    | 7.283(1,6)                                   |
| 0.50                                     | 1.516(1,3)                                    | 2.048(1,3)                                   | 1.793(1,3)                                    | 2.546(1,3)                                   | 1.426(1,3)                                    | 1.906(1,3)                                   |
| 0.75                                     | 0.838(1,2)                                    | 1.074(1,2)                                   | 0.960(1,2)                                    | 1.295(1,2)                                   | 0.798(1,2)                                    | 1.011(1,2)                                   |
| 1.0                                      | 0.621(1,2)                                    | 0.774(1,2)                                   | 0.694(1,2)                                    | 0.911(1,2)                                   | 0.597(1,2)                                    | 0.735(1,2)                                   |

Şekil 4.3.4’de zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Çizimlerde kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.6 ve 4.7’den alınmıştır. Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda üstel ve kuadratik olarak değişmektedir. KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/b$  oranı arttığında genelde azalmaktadır. KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli kritik basınç yükü değerleri zeminsiz durumdaki değerlerden önemli derecede büyük olmaktadır.

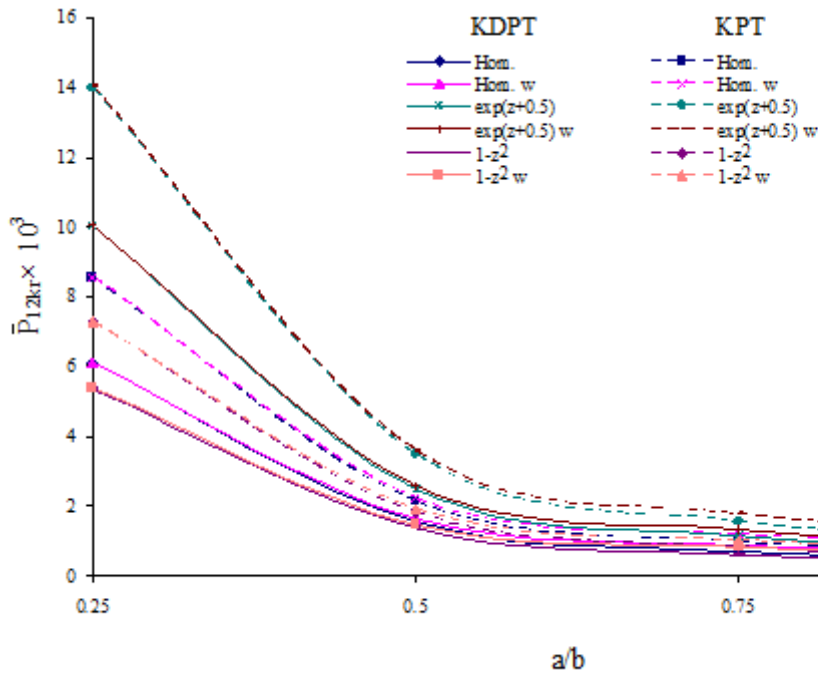


**Şekil 4.3.4.** Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların tek eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi

Şekil 4.3.5’de zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama

fonksiyonları Çizelge 4.6 ve 4.7’den alınmıştır. Homojen olmama ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda üstel ve kuadratik olarak değişmektedir.

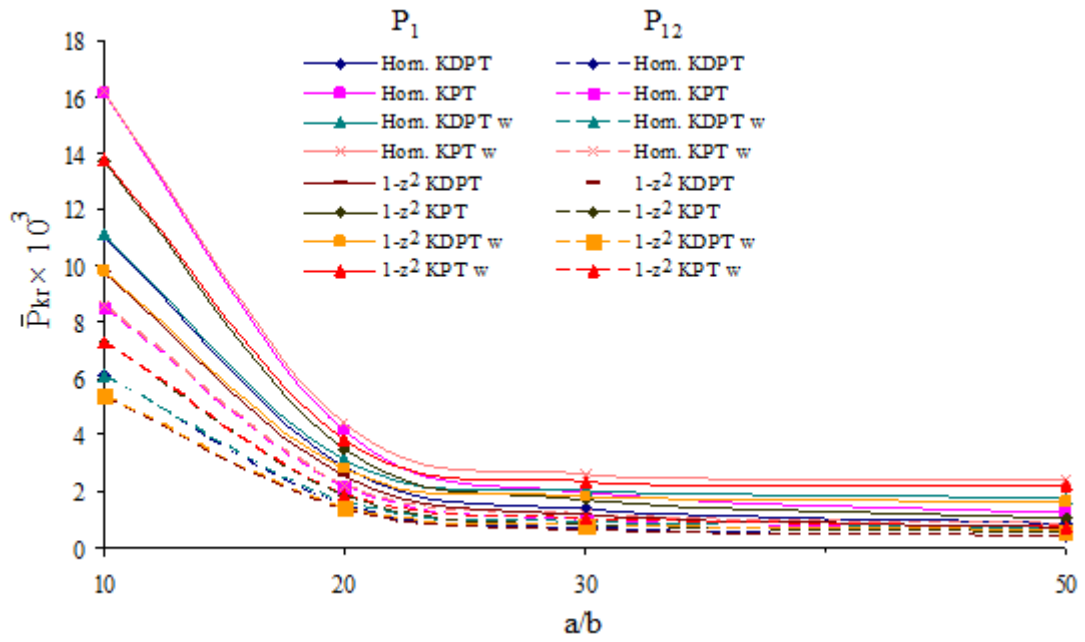
KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/b$  oranı arttığında genelde azalmaktadır. KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri zeminsiz durumdaki değerlerden önemli derecede büyük olmaktadır.



**Şekil 4.3.5.** Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi

Şekil 4.3.6’da zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.6 ve 4.7’den alınmıştır. Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda üstel ve kuadratik olarak değişmektedir.

KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/b$  oranı arttığında genelde azalmaktadır. KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri bir eksenli kritik basınç yükü değerlerinden önemli derecede küçük olmaktadır. Zemin etkisinin kritik yüklere etkisi göz ardı edilemez kadar belirgin olmaktadır.



**Şekil 4.3.6.** Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $a/b$  oranına bağlı değişimi

Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’de KPT ve KDPT kullanılarak, Winkler zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $E_x / E_y$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri Çizelge 4.8 ve 4.9 içinde sunulmaktadır. Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $E_x / E_y$  oranı arttığında azalmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $E_x / E_y$  oranı arttığında azalmaktadır.

KPT çerçevesindeki azalmanın KDPT çerçevesindeki azalmadan daha az olduğu görülmektedir.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli ve zeminsiz durumda  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine etkisi  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak daha yavaş artmaktadır. Örneğin, zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen durum için  $E_x / E_y$  oranı 5’ten 45’e arttığında kayma gerilmelerinin x eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %9.42’den %46.98’e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %10.83’den %40.1’e kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için  $E_x / E_y$  oranı 5’ten 45’e arttığında kayma gerilmelerinin x eksen doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %8.79’dan %45.1’e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %10.07’den %38.3’e kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda  $E_x/E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %10.31'den %49.46'ya ve %8.46'dan %44.09'a, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %11.8'den %42.35'e ve %9.72'den %34.44'e kadar artmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z \pm 0.5}$ ) olduğunda,  $E_x/E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %9.27'den %46.56'ya, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise yaklaşık %10.64'den %39.67'ye kadar artmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için  $E_x/E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %7.48'den %36.41'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %9.2'den %35.38'e kadar artmaktadır.

Homojen olmama doğrusal olarak ( $Z$ ) değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\mu_1 = \pm 1$  için  $E_x/E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %6.85'den %34.24'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %8.49'dan %33.52'ye kadar artmaktadır.

Homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $E_x/E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %8.41'den %39.49'a ve %6.49'dan %32.87'ye her iki doğrultudaki kritik

yük değerlerine etkisi sırasıyla %10.25'den %37.95'e ve %8.1'den %32.56'ya kadar artmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %8'den %39.53'e ve %6.49'dan %32.46'ya her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %9.62'den %36.65'e ve %10.42'den 34.3'e kadar artmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $E_x / E_y$  oranına bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin,  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi sabit olur ve  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$   $1 \pm z$  ve  $1 \pm z^2$  için etkiler sırasıyla yaklaşık olarak (-%63.56); %39.82; %8.34;  $\mp$  %15.01 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $E_x / E_y$  oranına yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $E_x / E_y$  oranının küçük değerlerinde azalmaktadır. Örneğin  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkileri homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  olduğunda yaklaşık olarak yaklaşık olarak  $e^{z+0.5}$  için (-%63.83)'den (-%64.89)'a,  $e^{z-0.5}$  için (%39.70)'den (%39.34)'e

değişmektedir. Söz konusu etki bir eksenli kritik yük için diğer durumlarda yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $1 \pm z$  için (%7.7)'den (%5.06)'ya,  $1 + z^2$  için (-%13.87)'den (-%9.61)'e,  $1 - z^2$  için (%14.11)'den (%10.36)'ya ve iki eksenli yük için  $1 \pm z$  için (%7.58)'den (%5.6)'ya,  $1 + z^2$  için (-%13.73)'den (-%10.66)'ya,  $1 - z^2$  için (%13.96)'dan (%11.02)'ye azalmaktadır.

KPT çerçevesinde, Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak azalmakta, iki eksenli kritik yüklere etkisi ise  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak önce çok bir miktar artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Homojen olmamanın etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.

Örneğin  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%50.47)'den (-%49.26)'ya,  $e^{z-0.5}$  için (%31.62)'den (%30.86)'ya,  $1 \pm z$  için (%6.62)'den (%6.47)'ye,  $1 + z^2$  için (-%11.91)'den (-%11.62)'ye,  $1 - z^2$  için (%11.91)'den (%11.62)'ye olmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%54.16)'dan (-%56.03)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%33.93)'den (%35.16)'ya,  $1 \pm z$  için (%7.09)'dan (%7.36)'ya,  $1 + z^2$  için (-%12.79)'dan (-%13.21)'e,  $1 - z^2$  için (%12.77)'den (%13.29)'a olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x / E_y$  oranının, yani malzeme ortotropisinin artışına bağlı olarak genellikle azalmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%49.62)'den (-%41.93)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%30.89)'den (%26.56)'ya,  $1 \pm z$  için (%5.99)'dan (%3.27)'ye,  $1 + z^2$  için (-%11.78)'den (-%6.21)'e ve  $1 - z^2$  için (%10.97)'den (%6.69)'a azalmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için

(-%53.45)'den (-%52.96)'ya,  $e^{z-0.5}$  için (%34.82)'dan (%34.08)'e,  $1 \pm z$  için (%6.37)'den (%4.69)'a,  $1 + z^2$  için (-%11.49)'dan (-%8.72)'ye ve  $1 - z^2$  için (%11.71)'den (%9.5)'e olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $E_x / E_y$  oranına bağlı olarak zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminin bir eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x / E_y$  oranının, yani malzeme ortotropisinin artışına bağlı olarak artmakta, zeminin iki eksenli kritik yüklere etkisi ise azalmaktadır. Söz konusu zemin etkileri önemli olup H ve HO durumunda fonksiyonların şekline bağlı olarak değişmektedir.  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke homojen durumda zemin etkisi %25.94'den %29.03'e artmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %15.86'dan %17.73'e,  $e^{z-0.5}$  için %43.11'den %48.24'e,  $1 \pm z$  için %28.3'den %31.64'e,  $1 + z^2$  için %22.56'dan %25.25'e ve  $1 - z^2$  için %30.52'den %34.15'e artmaktadır.

İki eksenli kritik yük için ise, homojen durumda zemin etkisi %17.37'den %13.34'e azalmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %10.62'den %8.1'e,  $e^{z-0.5}$  için %28.87'den %22.18'e,  $1 \pm z$  için %18.99'dan %14.55'e,  $1 + z^2$  için %15.14'den %11.6'ya ve  $1 - z^2$  için %20.48'den %15.59'a azalmaktadır.

KDPT çerçevesinde H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $E_x / E_y$  oranı 5'den 45'e kadar değiştiğinde zeminin bir eksenli kritik yüklere etkisi artmakta, iki eksenli kritik yüklere etkisi ise önce bir miktar azalmakta ve daha sonra artmaktadır. Örneğin,  $E_x / E_y$  oranı 5'ten 45'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %28.64'den %54.76'ya artmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şu şekilde değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için %17.48'den %33.21'e,  $e^{z-0.5}$  için %47.52'den %87.37'ye,

$1 \pm z$  için %31.03'den %57.68'e,  $1 + z^2$  için %25.15'den %49.96'ya ve  $1 - z^2$  için %33.34'den %61.09'a artmaktadır.

İki eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %19.52'den %22.27'ye değişmektedir. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şekilde değişmiştir:  $e^{z+0.5}$  için %11.89'dan %13.52'ye,  $e^{z-0.5}$  için %29.18'den %32.88'e,  $1 \pm z$  için %21.08'den %23.44'e,  $1 + z^2$  için %17.16'dan %20.12'ye ve  $1 - z^2$  için %22.65'den %24.62'ye değişmektedir.

$E_x / E_y$  oranı artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları artmaktadır.

**Çizelge 4.8.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $E_x / E_y$  oranına bağlı dağılımı

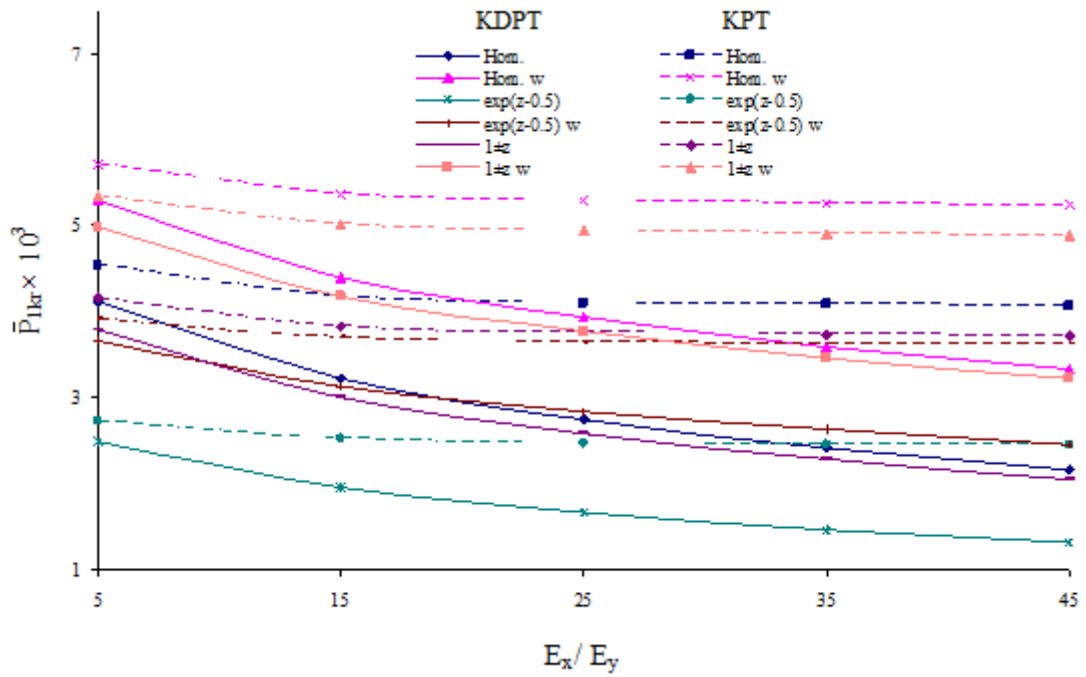
|             | $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341\text{m}; \bar{k}_w = 0$ |                                             |                                              |                                             |                                              |                                             |
|-------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|             | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)             | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| $E_x / E_y$ | Hom.                                                    |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 5           | 4.117(1,1)                                              | 4.545(1,1)                                  | 6.745(1,1)                                   | 7.434(1,1)                                  | 2.481(1,1)                                   | 2.735(1,1)                                  |
| 15          | 3.224(1,1)                                              | 4.183(1,1)                                  | 5.294(1,1)                                   | 6.842(1,1)                                  | 1.948(1,1)                                   | 2.517(1,1)                                  |
| 25          | 2.752(1,1)                                              | 4.110(1,1)                                  | 4.527(1,1)                                   | 6.722(1,1)                                  | 1.665(1,1)                                   | 2.473(1,1)                                  |
| 35          | 2.414(1,1)                                              | 4.078(1,1)                                  | 3.976(1,1)                                   | 6.671(1,1)                                  | 1.463(1,1)                                   | 2.454(1,1)                                  |
| 45          | 2.153(1,1)                                              | 4.061(1,1)                                  | 3.55(1,1)                                    | 6.643(1,1)                                  | 1.306(1,1)                                   | 2.444(1,1)                                  |
| $E_x / E_y$ | $1 \pm z$                                               |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 5           | 3.800(1,1)                                              | 4.166(1,1)                                  | 4.688(1,1)                                   | 5.227(1,1)                                  | 3.536(1,1)                                   | 3.863(1,1)                                  |
| 15          | 3.006(1,1)                                              | 3.834(1,1)                                  | 3.621(1,1)                                   | 4.810(1,1)                                  | 2.811(1,1)                                   | 3.555(1,1)                                  |
| 25          | 2.585(1,1)                                              | 3.767(1,1)                                  | 3.060(1,1)                                   | 4.726(1,1)                                  | 2.427(1,1)                                   | 3.493(1,1)                                  |
| 35          | 2.281(1,1)                                              | 3.739(1,1)                                  | 2.663(1,1)                                   | 4.690(1,1)                                  | 2.148(1,1)                                   | 3.467(1,1)                                  |
| 45          | 2.044(1,1)                                              | 3.723(1,1)                                  | 2.360(1,1)                                   | 4.670(1,1)                                  | 1.930(1,1)                                   | 3.452(1,1)                                  |
|             | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)            | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| $E_x / E_y$ | Hom.                                                    |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 5           | 3.023(1,2)                                              | 3.390(1,2)                                  | 4.955(1,2)                                   | 5.545(1,2)                                  | 1.823(1,2)                                   | 2.040(1,2)                                  |
| 15          | 1.628(1,3)                                              | 2.106(1,3)                                  | 2.673(1,3)                                   | 3.445(1,3)                                  | 0.983(1,3)                                   | 1.267(1,3)                                  |
| 25          | 1.133(1,4)                                              | 1.631(1,4)                                  | 1.862(1,4)                                   | 2.668(1,4)                                  | 0.685(1,4)                                   | 0.982(1,4)                                  |
| 35          | 0.887(1,4)                                              | 1.394(1,4)                                  | 1.460(1,4)                                   | 2.28(1,4)                                   | 0.537(1,4)                                   | 0.839(1,4)                                  |
| 45          | 0.732(1,5)                                              | 1.222(1,5)                                  | 1.206(1,5)                                   | 1.999(1,5)                                  | 0.444(1,5)                                   | 0.735(1,5)                                  |
| $E_x / E_y$ | $1 \pm z$                                               |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 5           | 2.794(1,2)                                              | 3.107(1,2)                                  | 3.438(1,2)                                   | 3.898(1,2)                                  | 2.601(1,2)                                   | 2.881(1,2)                                  |
| 15          | 1.517(1,3)                                              | 1.931(1,3)                                  | 1.829(1,3)                                   | 2.422(1,3)                                  | 1.419(1,3)                                   | 1.790(1,3)                                  |
| 25          | 1.062(1,4)                                              | 1.495(1,4)                                  | 1.263(1,4)                                   | 1.876(1,4)                                  | 0.996(1,4)                                   | 1.387(1,4)                                  |
| 35          | 0.835(1,4)                                              | 1.278(1,4)                                  | 0.985(1,4)                                   | 1.603(1,4)                                  | 0.784(1,4)                                   | 1.185(1,4)                                  |
| 45          | 0.691(1,5)                                              | 1.120(1,5)                                  | 0.810(1,5)                                   | 1.405(1,5)                                  | 0.650(1,5)                                   | 1.039(1,5)                                  |

**Çizelge 4.9.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $E_x/E_y$  oranına bağlı dağılımı

|           | $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341\text{ m}; \bar{k}_w = 400$ |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|-----------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|           | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)               | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| $E_x/E_y$ | Hom.                                                       |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 5         | 5.296(1,1)                                                 | 5.724(1,1)                                   | 7.924(1,1)                                    | 8.613(1,1)                                   | 3.660(1,1)                                    | 3.914(1,1)                                   |
| 15        | 4.403(1,1)                                                 | 5.362(1,1)                                   | 6.473(1,1)                                    | 8.020(1,1)                                   | 3.126(1,1)                                    | 3.696(1,1)                                   |
| 25        | 3.931(1,1)                                                 | 5.289(1,1)                                   | 5.706(1,1)                                    | 7.901(1,1)                                   | 2.844(1,1)                                    | 3.652(1,1)                                   |
| 35        | 3.592(1,1)                                                 | 5.257(1,1)                                   | 5.155(1,1)                                    | 7.850(1,1)                                   | 2.642(1,1)                                    | 3.633(1,1)                                   |
| 45        | 3.332(1,1)                                                 | 5.240(1,1)                                   | 4.729(1,1)                                    | 7.821(1,1)                                   | 2.447(2,1)                                    | 3.623(1,1)                                   |
| $E_x/E_y$ | $1 \pm z$                                                  |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 5         | 4.979(1,1)                                                 | 5.345(1,1)                                   | 5.867(1,1)                                    | 6.406(1,1)                                   | 4.715(1,1)                                    | 5.042(1,1)                                   |
| 15        | 4.185(1,1)                                                 | 5.013(1,1)                                   | 4.800(1,1)                                    | 5.989(1,1)                                   | 3.990(1,1)                                    | 4.734(1,1)                                   |
| 25        | 3.764(1,1)                                                 | 4.946(1,1)                                   | 4.238(1,1)                                    | 5.905(1,1)                                   | 3.606(1,1)                                    | 4.672(1,1)                                   |
| 35        | 3.460(1,1)                                                 | 4.917(1,1)                                   | 3.841(1,1)                                    | 5.869(1,1)                                   | 3.327(1,1)                                    | 4.646(1,1)                                   |
| 45        | 3.223(1,1)                                                 | 4.901(1,1)                                   | 3.539(1,1)                                    | 5.849(1,1)                                   | 3.109(1,1)                                    | 4.631(1,1)                                   |
|           | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)              | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| $E_x/E_y$ | Hom.                                                       |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 5         | 3.613(1,2)                                                 | 3.979(1,2)                                   | 5.544(1,2)                                    | 6.134(1,2)                                   | 2.355(1,3)                                    | 2.629(1,2)                                   |
| 15        | 1.886(1,4)                                                 | 2.421(1,4)                                   | 2.947(1,4)                                    | 3.808(1,3)                                   | 1.233(1,4)                                    | 1.550(1,4)                                   |
| 25        | 1.354(1,5)                                                 | 1.867(1,4)                                   | 2.098(1,4)                                    | 2.904(1,4)                                   | 0.884(1,5)                                    | 1.217(1,4)                                   |
| 35        | 1.064(1,5)                                                 | 1.576(1,5)                                   | 1.646(1,5)                                    | 2.475(1,5)                                   | 0.708(1,6)                                    | 1.013(1,5)                                   |
| 45        | 0.895(1,5)                                                 | 1.385(1,5)                                   | 1.369(1,5)                                    | 2.161(1,5)                                   | 0.59(1,6)                                     | 0.898(1,5)                                   |
| $E_x/E_y$ | $1 \pm z$                                                  |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 5         | 3.383(1,2)                                                 | 3.697(1,2)                                   | 4.028(1,2)                                    | 4.488(1,2)                                   | 3.190(1,2)                                    | 3.471(1,2)                                   |
| 15        | 1.776(1,4)                                                 | 2.239(1,4)                                   | 2.087(1,4)                                    | 2.748(1,4)                                   | 1.677(1,4)                                    | 2.093(1,4)                                   |
| 25        | 1.281(1,5)                                                 | 1.731(1,4)                                   | 1.489(1,5)                                    | 2.112(1,4)                                   | 1.212(1,5)                                    | 1.622(1,4)                                   |
| 35        | 1.011(1,5)                                                 | 1.458(1,5)                                   | 1.163(1,5)                                    | 1.788(1,5)                                   | 0.960(1,5)                                    | 1.364(1,5)                                   |
| 45        | 0.853(1,6)                                                 | 1.283(1,5)                                   | 0.973(1,5)                                    | 1.568(1,5)                                   | 0.810(1,6)                                    | 1.201(1,5)                                   |

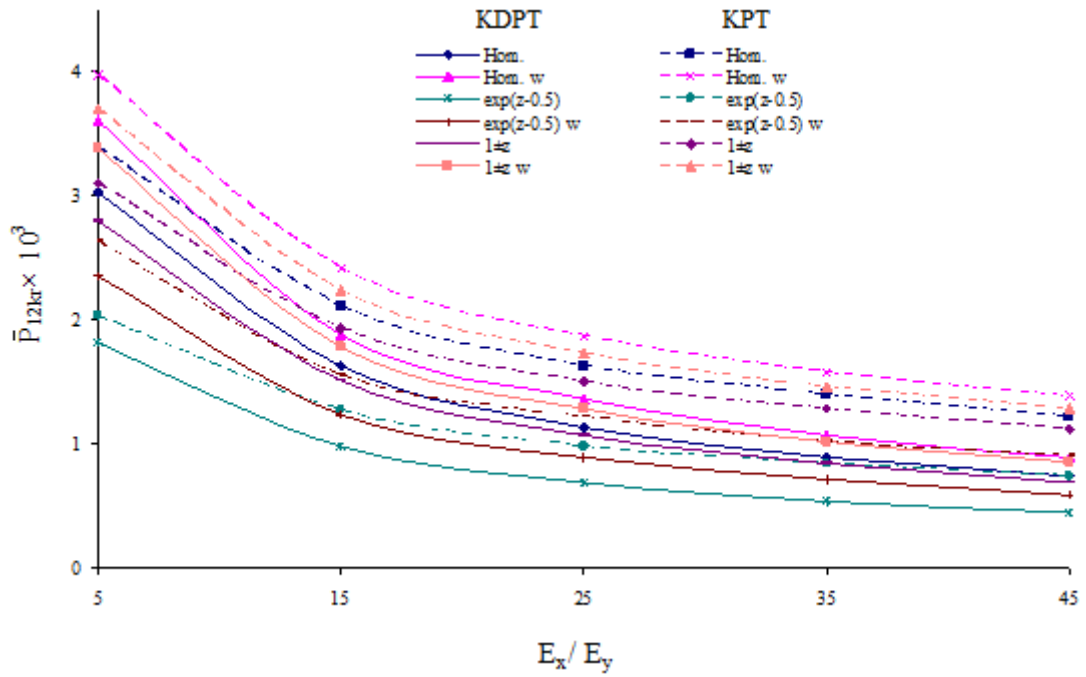
Şekil 4.3.7’de zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerlerinin  $E_x/E_y$  oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri şu şekildedir:  $a/b = 0.5$ ;  $a/h = 10$ ;  $b = 0.341\text{m}$ ;  $\bar{k}_w = 400$ . Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal ve üstel olarak değişmektedir.

KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli kritik basınç yükü değerleri  $E_x/E_y$  oranı arttığında azalmaktadır. KPT çerçevesinde ise zeminli ve zeminiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $E_x/E_y$  oranı arttığında azalmaktadır.



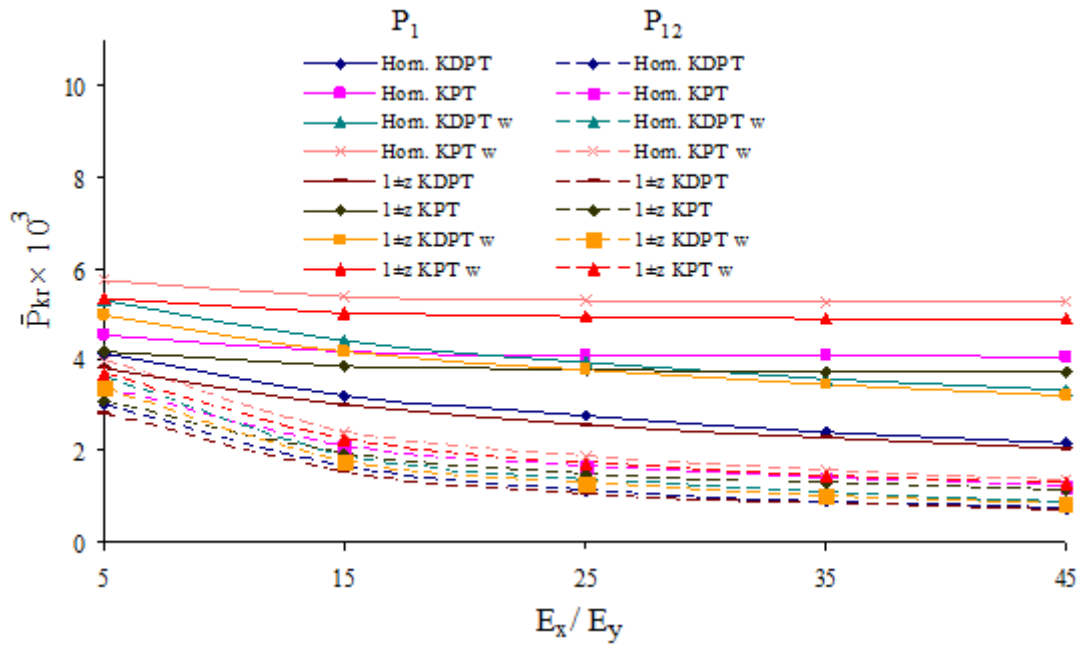
**Şekil 4.3.7.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların tek eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $E_x/E_y$  oranına bağlı dağılımı

Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yük değerlerinin  $E_x / E_y$  oranına bağlı dağılımı Şekil 4.3.8’de sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.8 ve 4.9’dan alınarak şekil 4.7’de de kullanılmaktadır. KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $E_x / E_y$  oranı arttığında azalmaktadır.



**Şekil 4.3.8.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $E_x / E_y$  oranına bağlı dağılımı

Şekil 4.3.9’de zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerinin  $E_x/E_y$  oranına bağlı dağılımı bir arada sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri ve homojen olmama fonksiyonları Çizelge 4.8 ve 4.9’da kullanılan verilerdir. KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir eksenli kritik basınç yükü değerleri iki eksenli basınç yükü değerlerinden büyük olmaktadır.



**Şekil 4.3.9.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların hem bir hem de iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $E_x/E_y$  oranına bağlı dağılımı

Çizelge 4.10'da Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $\beta_0$  değerine bağlı değişimi sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri çizelge 4.10' da yer almaktadır. Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

KDPT ve KPT çerçevesinde  $\beta_0 = 0$  olduğunda tek eksenli durum söz konusu iken,  $\beta_0$  değeri sıfırdan büyük olduğunda iki eksenli durum söz konusu olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\beta_0$  değeri arttığında azalmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde zeminsiz durumdaki azalmanın zeminli durumdaki azalmadan daha az olduğu görülmektedir.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminsiz durumda,  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak az miktarda azalmaktadır. Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak çok az seviyede artış ya da azalış göstermektedir. Örneğin, zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen durum için  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31.28 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %30.94'den %28.67'ye kadar azalmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal (Z) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.65 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %29.32'den %27.18'e kadar azalmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %33.42 ve %28.82 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %33.12'den %30.7'ye ve %28.5'den %26.39'a kadar azalmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z\pm 0.5}$ ) olduğunda,  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %30.89 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise yaklaşık %30.57'den %28.34'e kadar azalmaktadır. Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %24.34 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %24.23'den %24.82'ye kadar artmaktadır.

Homojen olmama doğrusal olarak ( $Z$ ) değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\mu_1 = \pm 1$  için  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %22.63 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %22.6'dan %23.49'a kadar artmaktadır.

Homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %26.79 ve %21.58 olmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.59'dan %26.72'ye ve %21.6'dan %22.91'e kadar artmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.32 ve %20.99 olmaktadır. Her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkileri ise sırasıyla %25.92'den %25.65'e azalmakta ve %21.21'den 25.42'ye kadar artmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $\beta_0$  değerine bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin,  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi sabit olur ve  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$   $1 \pm z$  ve  $1 \pm z^2$  için etkiler sırasıyla yaklaşık olarak (-%63.56); %39.82; %8.34;  $\mp$  %15.01 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $\beta_0$  değerine yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $\beta_0$  değerinin küçük değerlerinde artmaktadır. Örneğin  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar değiştiğinde homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkileri homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  olduğunda yaklaşık olarak yaklaşık olarak  $e^{z+0.5}$  için (-%64.41),  $e^{z-0.5}$  için (%39.52) olmaktadır. Söz konusu etki bir eksenli kritik yük için diğer durumlarda yaklaşık olarak şu şekildedir:  $1 \pm z$  için (%6.18),  $1 + z^2$  için (-%11.4),  $1 - z^2$  için (%11.96) olmakta ve iki eksenli yük için  $1 \pm z$  için (%6.19)'dan

(%6.43)'e,  $1+z^2$  için (-%11.37)'den (-%11.75)'e,  $1-z^2$  için (%12)'den (%12.28)'e artmaktadır.

KPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi ise  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Homojen olmamanın etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.

Örneğin  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%49.5),  $e^{z-0.5}$  için (%31),  $1\pm z$  için (%6.48),  $1+z^2$  için (-%11.68),  $1-z^2$  için (%11.68) olmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%51.16)'dan (-%54.32)'ye,  $e^{z-0.5}$  için (%32.04)'den (%34.03)'e,  $1\pm z$  için (%6.69)'dan (%7.13)'e,  $1+z^2$  için (-%12.08)'den (-%12.81)'e,  $1-z^2$  için (%12.05)'den (%12.81)'e artmaktadır.

KDPT çerçevesinde, Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda, homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibidir:  $e^{z+0.5}$  için (-%45.59),  $e^{z-0.5}$  için (%27.95),  $1\pm z$  için (%4.37),  $1+z^2$  için (-%8.07) ve  $1-z^2$  için (%8.46) olmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%47.79)'den (-%52.61)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%29.33)'den (%34.56)'ya,  $1\pm z$  için (%4.67)'den (%5.48)'e,  $1+z^2$  için (-%8.58)'den (-%9.96)'ya ve  $1-z^2$  için (%8.99)'den (%10.6)'ya artmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $\beta_0$  değerine bağlı olarak Winkler zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminin iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır. Söz konusu zemin etkileri önemli olup H ve HO durumunda fonksiyonların şekline bağlı olarak değişmektedir.  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke homojen durumda zemin etkisi %28.41 olmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %17.38,  $e^{z-0.5}$  için %47.25,  $1 \pm z$  için %31.02,  $1 + z^2$  için %24.7 ve  $1 - z^2$  için %33.42 olmaktadır.

İki eksenli kritik yük için ise, homojen durumda zemin etkisi %24.27'den %17'ye azalmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %14.84'den %10.36'ya,  $e^{z-0.5}$  için %40.33'den %28.25'e,  $1 \pm z$  için %26.51'den %18.55'e,  $1 + z^2$  için %21.11'den %14.74'e ve  $1 - z^2$  için %28.59'dan %20'ye azalmaktadır.

KDPT çerçevesinde H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar değiştiğinde zeminin iki eksenli kritik yüklere etkisi azalmaktadır. Örneğin,  $\beta_0$  değeri 0'dan 1'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %41.37 olmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için %25.13,  $e^{z-0.5}$  için %68.39,  $1 \pm z$  için %40.09,  $1 + z^2$  için %37.13 ve  $1 - z^2$  için %46.99 olmaktadır.

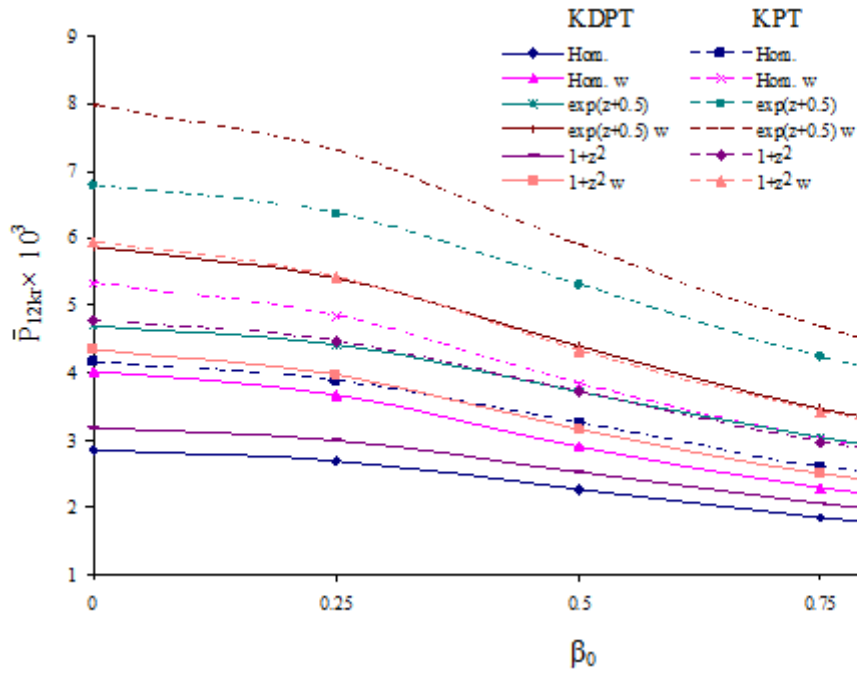
İki eksenli kritik yüke, homojen durumda Winkler zemin etkisi %36.34'den %23.31'e azalmaktadır. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şekilde değişmiştir:  $e^{z+0.5}$  için %22.53'den %14.5'e,  $e^{z-0.5}$  için %59.27'den %33.44'e,  $1 \pm z$  için %38.54'den %24.56'ya,  $1 + z^2$  için %32.93'den %21.33'e ve  $1 - z^2$  için %41'den %25.67'ye değişmektedir.

$\beta_0$  değeri artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları artmaktadır.

**Çizelge 4.10.** Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen dalga sayılarının  $\beta_0$  değerine bağlı değişimi

| $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341\text{ m}; \bar{k}_w = 0$ |                                               |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                                          | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| $\beta_0$                                                | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 0                                                        | 2.850(1,1)                                    | 4.147(1,1)                                   | 4.688(1,1)                                    | 6.782(1,1)                                   | 1.724(1,1)                                    | 2.495(1,1)                                   |
| 0.25                                                     | 2.683(1,1)                                    | 3.885(1,2)                                   | 4.412(1,1)                                    | 6.355(1,2)                                   | 1.623(1,1)                                    | 2.338(1,2)                                   |
| 0.5                                                      | 2.262(1,2)                                    | 3.238(1,2)                                   | 3.719(1,2)                                    | 5.296(1,2)                                   | 1.368(1,2)                                    | 1.948(1,2)                                   |
| 0.75                                                     | 1.842(1,3)                                    | 2.582(1,3)                                   | 3.027(1,3)                                    | 4.224(1,3)                                   | 1.114(1,3)                                    | 1.554(1,3)                                   |
| 1.0                                                      | 1.523(1,3)                                    | 2.135(1,3)                                   | 2.503(1,3)                                    | 3.493(1,3)                                   | 0.921(1,3)                                    | 1.285(1,3)                                   |
| $\beta_0$                                                | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 0                                                        | 2.674(1,1)                                    | 3.801(1,1)                                   | 3.175(1,1)                                    | 4.769(1,1)                                   | 2.509(1,1)                                    | 3.525(1,1)                                   |
| 0.25                                                     | 2.517(1,1)                                    | 3.561(1,2)                                   | 2.988(1,1)                                    | 4.468(1,2)                                   | 2.361(1,1)                                    | 3.302(1,2)                                   |
| 0.5                                                      | 2.120(1,2)                                    | 2.968(1,2)                                   | 2.524(1,2)                                    | 3.723(1,2)                                   | 1.988(1,2)                                    | 2.752(1,2)                                   |
| 0.75                                                     | 1.724(1,3)                                    | 2.367(1,3)                                   | 2.058(1,3)                                    | 2.970(1,3)                                   | 1.615(1,3)                                    | 2.195(1,3)                                   |
| 1.0                                                      | 1.425(1,3)                                    | 1.957(1,3)                                   | 1.702(1,3)                                    | 2.456(1,3)                                   | 1.336(1,3)                                    | 1.815(1,3)                                   |
| $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341\text{ m}; K_{w1} = 400$  |                                               |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|                                                          | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| $\beta_0$                                                | Hom.                                          |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| 0                                                        | 4.029(1,1)                                    | 5.325(1,1)                                   | 5.866(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 2.903(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| 0.25                                                     | 3.658(1,2)                                    | 4.828(1,2)                                   | 5.406(1,2)                                    | 7.298(1,2)                                   | 2.585(1,2)                                    | 3.281(1,2)                                   |
| 0.5                                                      | 2.884(1,3)                                    | 3.820(1,3)                                   | 4.383(1,3)                                    | 5.896(1,3)                                   | 1.963(1,3)                                    | 2.520(1,3)                                   |
| 0.75                                                     | 2.280(1,3)                                    | 3.021(1,3)                                   | 3.466(1,3)                                    | 4.662(1,3)                                   | 1.537(1,4)                                    | 1.992(1,3)                                   |
| 1.0                                                      | 1.878(1,4)                                    | 2.498(1,3)                                   | 2.866(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.229(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| $\beta_0$                                                | $1 \pm z$                                     |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| 0                                                        | 3.853(1,1)                                    | 4.98(1,1)                                    | 4.354(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 3.688(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| 0.25                                                     | 3.487(1,2)                                    | 4.505(1,2)                                   | 3.972(1,2)                                    | 5.411(1,2)                                   | 3.329(1,2)                                    | 4.246(1,2)                                   |
| 0.5                                                      | 2.735(1,3)                                    | 3.548(1,3)                                   | 3.158(1,3)                                    | 4.310(1,3)                                   | 2.598(1,3)                                    | 3.331(1,3)                                   |
| 0.75                                                     | 2.162(1,3)                                    | 2.806(1,3)                                   | 2.497(1,3)                                    | 3.408(1,3)                                   | 2.054(1,3)                                    | 2.633(1,3)                                   |
| 1.0                                                      | 1.775(1,4)                                    | 2.320(1,3)                                   | 2.065(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 1.679(1,4)                                    | 2.178(1,3)                                   |

Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların iki eksenli boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri  $\beta_0$ 'a bağlı dağılımı Şekil 4.3.10'da sunulmaktadır. Çizimlerde kullanılan veriler Çizelge 4.10'dan alınmıştır. Homojen olmama ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir. KDPT ve KPT çerçevesinde  $\beta_0 = 0$  olduğunda tek eksenli durum söz konusu iken,  $\beta_0$  değeri sıfırdan büyük olduğunda iki eksenli durum söz konusu olmaktadır. KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\beta_0$  değeri arttığında azalmaktadır. KDPT ve KPT çerçevesinde zeminsiz durumdaki azalmanın zeminli durumdaki azalmadan daha az olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.3.10.** Zemin etkisi dikkate alındığında ve alınmadığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $\beta_0$  değerine bağlı dağılımı

Çizelge 4.11’de KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $\bar{k}_w$  boyutsuz Winkler zemin katsayısı değerine bağlı dağılımı sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri şu şekildedir:  $a/b = 0.5$ ;  $a/h = 10$ ;  $b = 0.341\text{ m}$ . Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir.

KDPT ve KPT çerçevesinde, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\bar{k}_w$  değeri arttığında artmaktadır. KPT çerçevesindeki artmanın KDPT çerçevesindeki azalmadan daha az olduğu görülmektedir.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli durumda  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır. Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin iki eksenli kritik basınç yüklerine etkisi bir eksenli kritik basınç yüklerine etkisinden  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak daha yavaş azalmaktadır. Örneğin, zemin etkisi dikkate alınmadığında yani  $\bar{k}_w = 0$  olduğunda, homojen durum için kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %31.28 her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %28.67 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.65, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %27.28 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %33.42 ve %28.82, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %30.7 ve %26.39 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z\pm 0.5}$ ) olduğunda, kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %30.89, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise yaklaşık %28.34 olmaktadır. Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %27.36'dan %19.93'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %26.46'dan %25.06'ya kadar azalmaktadır.

Homojen olmama doğrusal olarak ( $Z$ ) değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\mu_1 = \pm 1$  için  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %25.67'den %18.3'e, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %24.87'den %23.39'a kadar azalmaktadır.

Homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla %29.75'den %22.37'ye ve %24.7'den %17.26'ya her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %28.59'dan %27.39'a ve %24'den %22.41'e kadar azalmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında,  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e arttığında kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %28.42'den %22.92'ye ve %24.99'dan %16.28'e her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.92'den %24.8'e ve %24.83'den %22.28'e kadar azalmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $\bar{k}_w$  değerine bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, homojen olmamanın hem bir ve hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi neredeyse sabit olur ve  $e^{z+0.5}$ ,  $e^{z-0.5}$ ,  $1 \pm z$  ve  $1 \pm z^2$  için etkiler sırasıyla yaklaşık olarak (-%63.56); %39.82; %8.34;  $\mp$  %15 olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $\bar{k}_w = 0$  değerine yaklaşık bağlı değildir. Homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $\bar{k}_w = 0$  değerinde farklı olmaktadır. Örneğin homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkileri homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  olduğunda yaklaşık olarak yaklaşık olarak  $e^{z+0.5}$  için (-%64.4),  $e^{z-0.5}$  için (%39.52) olmaktadır. Söz konusu etki bir eksenli kritik yük için diğer durumlarda yaklaşık olarak şu şekildedir:  $1 \pm z$  için (%6.18),  $1 + z^2$  için (-%11.4),  $1 - z^2$  için (%11.96) ve iki eksenli yük için  $1 \pm z$  için (%6.43),  $1 + z^2$  için (-%11.75),  $1 - z^2$  için (%12.28) olmaktadır.

KPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmamanın hem bir hem iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır. Homojen olmamanın etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Bir eksenli kritik yüklere etkinin azalması, iki eksenli kritik yüklere etkinin azalmasından daha hızlı olmaktadır.

Örneğin  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%55.66)'dan (-%40.53)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%34.86)'dan (%25.38)'a,  $1 \pm z$  için (%7.28)'den (%5.3)'e,  $1 + z^2$  için (-%13.13)'den (-%9.56)'ya,  $1 - z^2$  için (%13.13)'den (%9.56)'ya azalmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%58.57)'den (-%49.52)'ye,  $e^{z-0.5}$  için (%36.73)'den (%33.18)'e,  $1 \pm z$  için (%7.68)'den (%6.95)'e,  $1 + z^2$  için (-%13.81)'den (-%12.48)'e,  $1 - z^2$  için (%13.85)'den (%12.51)'a azalmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir. Örneğin  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e kadar arttığında, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%53.4)'den (-%25.27)'ye,  $e^{z-0.5}$  için (%32.73)'den (%21.99)'a,  $1 \pm z$  için (%5.12)'den (%3.38)'e,  $1 + z^2$  için (-%9.42)'den (-%6.22)'ye ve  $1 - z^2$  için (%9.94)'den (%6.55)'e azalmaktadır. Homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi aşağıdaki gibi değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%57.57)'den (-%50.05)'e,  $e^{z-0.5}$  için (%35.33)'den (%30.7)'ye,  $1 \pm z$  için (%5.69)'dan (%4.87)'a,  $1 + z^2$  için (-%10.5)'den (-%8.99)'a ve  $1 - z^2$  için (%10.97)'den (%9.41)'e azalmaktadır.

KDPT ve KPT çerçevesinde H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında  $\bar{k}_w$  değerine bağlı olarak zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KPT çerçevesinde, zeminin hem bir hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Söz konusu zemin etkileri önemli olup H ve HO durumunda fonksiyonların şekline bağlı olarak değişmektedir.  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke homojen durumda zemin etkisi %14.2'den %56.84'e artmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için

%8.7'den %34.77'ye,  $e^{z-0.5}$  için %23.65'den %94.51'e,  $1 \pm z$  için %15.52'den %62.04'e,  $1 + z^2$  için %12.35'den %49.42'ye ve  $1 - z^2$  için %16.71'den %66.87'ye artmaktadır.

İki eksenli kritik yük için ise, homojen durumda zemin etkisi %8.52'den %32.13'e artmaktadır. Homojen olmama durumunda ise  $e^{z+0.5}$  için %5.18'den %20.76'ya,  $e^{z-0.5}$  için %14.09'dan %46.69'a,  $1 \pm z$  için %9.3'den %34.13'e,  $1 + z^2$  için %7.37'den %29.19'a ve  $1 - z^2$  için %9.97'den %35.98'e artmaktadır.

KDPT çerçevesinde H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e kadar değiştiğinde zeminin hem bir hem de iki eksenli kritik yüklere etkisi artmaktadır. Örneğin,  $\bar{k}_w$  değeri 200'den 800'e kadar değiştiğinde bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %20.7'den %82.74'e artmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şu şekilde değişmektedir:  $e^{z+0.5}$  için %12.56'dan %50.28'e,  $e^{z-0.5}$  için %34.22'den %135.67'ye,  $1 \pm z$  için %22.06'dan %88.18'e,  $1 + z^2$  için %18.55'den %74.24'e ve  $1 - z^2$  için %23.48'den %93.98'e artmaktadır.

İki eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %11.88'den %38.8'e artmaktadır. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise şu şekilde değişmiştir:  $e^{z+0.5}$  için %7.27'dan %26.73'e,  $e^{z-0.5}$  için %19.65'den %59.07'ye,  $1 \pm z$  için %12.77'den %41.12'ye,  $1 + z^2$  için %10.63'den %35.37'ye ve  $1 - z^2$  için %13.55'den %63.34'e artmaktadır.

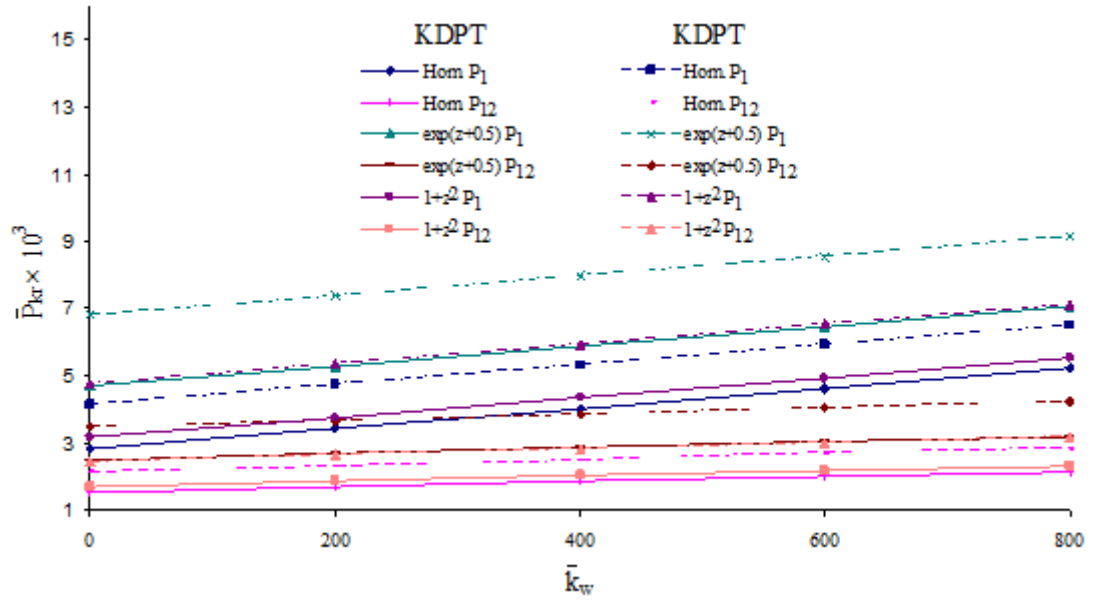
KDPT çerçevesinde,  $\bar{k}_w$  değeri artışına bağlı olarak zeminin kritik yüklere etkisi KPT çerçevesindeki etkiden daha hızlı artış göstermektedir.

$\bar{k}_w$  değeri artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları artmaktadır.

**Çizelge 4.11.** KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının  $\bar{k}_w$  boyutsuz Winkler zemin katsayısına bağlı dağılımı

| $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341m;$ |                                              |                                             |                                              |                                             |                                              |                                             |
|------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                    | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| $\bar{k}_w$                        | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 0                                  | 2.850(1,1)                                   | 4.147(1,1)                                  | 4.688(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.724(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| 200                                | 3.440(1,1)                                   | 4.736(1,1)                                  | 5.277(1,1)                                   | 7.372(1,1)                                  | 2.314(1,1)                                   | 3.085(1,1)                                  |
| 400                                | 4.029(1,1)                                   | 5.325(1,1)                                  | 5.866(1,1)                                   | 7.961(1,1)                                  | 2.903(1,1)                                   | 3.674(1,1)                                  |
| 600                                | 4.619(1,1)                                   | 5.915(1,1)                                  | 6.456(1,1)                                   | 8.551(1,1)                                  | 3.493(1,1)                                   | 4.263(1,1)                                  |
| 800                                | 5.208(1,1)                                   | 6.504(1,1)                                  | 7.045(1,1)                                   | 9.14(1,1)                                   | 4.063(2,1)                                   | 4.853(1,1)                                  |
| $\bar{k}_w$                        | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 0                                  | 2.674(1,1)                                   | 3.801(1,1)                                  | 3.175(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.509(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| 200                                | 3.264(1,1)                                   | 4.391(1,1)                                  | 3.764(1,1)                                   | 5.358(1,1)                                  | 3.098(1,1)                                   | 4.114(1,1)                                  |
| 400                                | 3.853(1,1)                                   | 4.980(1,1)                                  | 4.354(1,1)                                   | 5.947(1,1)                                  | 3.688(1,1)                                   | 4.703(1,1)                                  |
| 600                                | 4.442(1,1)                                   | 5.569(1,1)                                  | 4.943(1,1)                                   | 6.537(1,1)                                  | 4.277(1,1)                                   | 5.293(1,1)                                  |
| 800                                | 5.032(1,1)                                   | 6.159(1,1)                                  | 5.532(1,1)                                   | 7.126(1,1)                                  | 4.867(1,1)                                   | 5.882(1,1)                                  |
|                                    | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| $\bar{k}_w$                        | Hom.                                         |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| 0                                  | 1.523(1,3)                                   | 2.135(1,3)                                  | 2.503(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.921(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| 200                                | 1.704(1,3)                                   | 2.317(1,3)                                  | 2.685(1,3)                                   | 3.674(1,3)                                  | 1.102(1,3)                                   | 1.466(1,3)                                  |
| 400                                | 1.878(1,4)                                   | 2.498(1,3)                                  | 2.866(1,3)                                   | 3.855(1,3)                                  | 1.229(1,4)                                   | 1.648(1,3)                                  |
| 600                                | 1.996(1,4)                                   | 2.679(1,3)                                  | 3.047(1,3)                                   | 4.037(1,3)                                  | 1.347(1,4)                                   | 1.767(1,4)                                  |
| 800                                | 2.114(1,4)                                   | 2.821(1,4)                                  | 3.172(1,4)                                   | 4.218(1,3)                                  | 1.465(1,4)                                   | 1.885(1,4)                                  |
| $\bar{k}_w$                        | $1 \pm z$                                    |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| 0                                  | 1.425(1,3)                                   | 1.957(1,3)                                  | 1.702(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.336(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| 200                                | 1.607(1,3)                                   | 2.139(1,3)                                  | 1.883(1,3)                                   | 2.637(1,3)                                  | 1.517(1,3)                                   | 1.996(1,3)                                  |
| 400                                | 1.775(1,4)                                   | 2.320(1,3)                                  | 2.065(1,3)                                   | 2.818(1,3)                                  | 1.679(1,4)                                   | 2.178(1,3)                                  |
| 600                                | 1.893(1,4)                                   | 2.501(1,3)                                  | 2.186(1,4)                                   | 3.000(1,3)                                  | 1.797(1,4)                                   | 2.350(1,4)                                  |
| 800                                | 2.011(1,4)                                   | 2.625(1,4)                                  | 2.304(1,4)                                   | 3.173(1,4)                                  | 1.915(1,4)                                   | 2.468(1,4)                                  |

KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerlerinin  $\bar{k}_w$  boyutsuz zemin katsayısı değerine bağlı dağılımı Şekil 4.3.11’de sunulmaktadır. Çizimlerde kullanılan veriler Çizelge 4.11’de kullanılan verilerdir. Homojen olmama ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir. KDPT ve KPT çerçevesinde, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\bar{k}_w$  değeri arttığında artmaktadır.



**Şekil 4.3.11.** KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin  $\bar{k}_w$  boyutsuz zemin katsayısına bağlı dağılımı

Çizelge 4.4-4.11’de kullanılan tüm analizler, çizelgelere karşılık gelen Şekil 4.3.1-4.3.11 için de geçerlidir.

Çizelge 4.12 ve çizelge 4.13’de Winkler zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yüklerinin değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının değişik kayma gerilme fonksiyonları için değişimi sunulmaktadır. Hesaplarda kullanılan plak parametreleri şu şekildedir:  $a/b = 0.5$ ;  $a/h = 10$ ;  $b = 0.341\text{ m}$ ;  $\bar{k}_w = 400$ . Homojen olmama, ortotrop dikdörtgen plağın kalınlığı doğrultusunda doğrusal, kuadratik ve üstel fonksiyonlar olarak değişmektedir. Kayma gerilme fonksiyonları parabolik, uniform ve sinüs hiperbolik fonksiyonlar olarak ele alınmıştır.

KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri kayma gerilme fonksiyonları parabolik ve hiperbolik olduğunda aynı, üniform olduğunda ise az miktarda farklılıklar göstermektedir.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli ve zeminsiz durumda kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır. Örneğin, zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen durum için kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %31.27, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %28.67 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %27.49, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %23.86 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %29.63, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %27.15 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenli doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %26.1, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %23.86 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) seçildiğinde kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla yaklaşık %33.41 ve %28.81, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %30.68 ve %26.39 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %29.38 ve %25.36, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %26.91 ve %23.2 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alınmadığında ve homojen olmama fonksiyonu üstel ( $e^{z \pm 0.5}$ ) olduğunda, kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik seçildiğinde kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %30.88, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise %28.33 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %27.16, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi ise %24.89 olmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi yaklaşık olarak aynı olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında, homojen durum için kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %24.33, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %24.8 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %21.41, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %20.3 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında, homojen olmama doğrusal ( $Z$ ) ve  $\mu_1 = \pm 1$  için kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %22.62, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %23.47 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik

yük değerlerine etkisi %19.92, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %20.3 olmaktadır.

Zemin etkisi dikkate alındığında ve homojen olmama fonksiyonu kuadratik ( $Z^2$ ) seçildiğinde kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yüke etkisi  $\mu_1 = 1$  ve  $\mu_1 = -1$  için sırasıyla yaklaşık %26.77 ve %21.57, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi yaklaşık %36.72 ve %22.89 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda ise x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi %23.54 ve %19.01, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi %23.46 ve %19.83 olmaktadır.

Homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde ve zemin etkisi dikkate alındığında, kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %26.3 ve %20.98, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %25.64 ve %25.39 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda kayma gerilmelerinin x eksenini doğrultusundaki boyutsuz kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %23.14 ve %18.45, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine etkisi sırasıyla %22.54 ve %22.33 olmaktadır.

Görüldüğü gibi zemin etkisi dikkate alındığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi farklı olmaktadır.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında kayma gerilme fonksiyonu değişimine bağlı olarak homojen olmamanın kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki, kayma gerilme fonksiyonlarının her üçü için de aynıdır, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz

konusu etki kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır.

Örneğin kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkileri yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.48),  $e^{z-0.5}$  için (%39.5),  $1 \pm z$  için (%6.18), ve  $1 + z^2$  için (-%11.4),  $1 - z^2$  için (%11.96) olmaktadır. İki eksenli kritik yüklere söz konusu etki ise yaklaşık şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.88),  $e^{z-0.5}$  için (%39.53),  $1 \pm z$  için (%6.4), ve  $1 + z^2$  için (-%11.78),  $1 - z^2$  için (%12.28) olmaktadır.

Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkileri yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.28),  $e^{z-0.5}$  için (%39.57),  $1 \pm z$  için (%6.58),  $1 + z^2$  için (-%12.01),  $1 - z^2$  için (%12.5) olmaktadır. İki eksenli kritik yüklere söz konusu etki ise yaklaşık şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%64.21),  $e^{z-0.5}$  için (%39.61),  $1 \pm z$  için (%6.76),  $1 + z^2$  için (-%12.33),  $1 - z^2$  için (%12.77) olmaktadır.

KDPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmama fonksiyonları doğrusal, kuadratik ve üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır.

Örneğin, kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkileri yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için (-%45.6),  $e^{z-0.5}$  için (%28.95),  $1 \pm z$  için (%4.37), ve  $1 + z^2$  için (-%8.06),  $1 - z^2$  için (%8.46) olmaktadır. İki eksenli kritik yüklere söz konusu etki ise yaklaşık şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%52.60),  $e^{z-0.5}$  için (%34.55),  $1 \pm z$  için (%5.48),  $1 + z^2$  için (-%9.93),  $1 - z^2$  için (%10.6) olmaktadır.

Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkileri yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için (-%46.21),  $e^{z-0.5}$  için

(%28.41),  $1 \pm z$  için (%4.71),  $1 + z^2$  için (-%8.65),  $1 - z^2$  için (%8.98) olmaktadır. İki eksenli kritik yüklere söz konusu etki ise yaklaşık şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için (-%52.35),  $e^{z-0.5}$  için (%34.69),  $1 \pm z$  için (%5.66),  $1 + z^2$  için (-%10.05),  $1 - z^2$  için (%10.92) olmaktadır.

Görüldüğü gibi KDPT çerçevesinde zemine oturan plaklarda homojen olmamanın iki eksenli kritik yüke etkisi bir eksenli kritik yüke olan etkiden daha belirgindir.

H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerleri kıyaslandığında kayma gerilme fonksiyonu değişimine bağlı olarak zeminin kritik yüklere etkisi için aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmaktadır:

KDPT çerçevesinde zemin etkisi, H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır. Örneğin, kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %41.36 olmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için %25.13,  $e^{z-0.5}$  için %68.37,  $1 \pm z$  için %44.08,  $1 + z^2$  için %37.13 ve  $1 - z^2$  için %46.98 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda bir eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %39.18 olmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde değişir:  $e^{z+0.5}$  için %23.87,  $e^{z-0.5}$  için %64.89,  $1 \pm z$  için %41.97,  $1 + z^2$  için %35.01 ve  $1 - z^2$  için %44.77 olmaktadır.

Kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda iki eksenli kritik yüke zemin etkisi ise, homojen durumda %23.34 olmaktadır. Homojen olmama durumunda iki eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekildedir:  $e^{z+0.5}$  için %14.5,  $e^{z-0.5}$  için %33.5,  $1 \pm z$  için %24.55,  $1 + z^2$  için %21.3 ve  $1 - z^2$  için %25.7 olmaktadır. Kayma gerilme fonksiyonu üniform olduğunda iki eksenli kritik yüke, homojen durumda zemin etkisi %22.65 olmaktadır. Homojen olmama durumunda bir eksenli kritik yüklere zemin etkileri ise yaklaşık olarak şu şekilde

değişir:  $e^{z+0.5}$  için %13.8,  $e^{z-0.5}$  için %32.64,  $1 \pm z$  için %24.09,  $1 + z^2$  için %20.17 ve  $1 - z^2$  için %25.75 olmaktadır.

**Çizelge 4.12.** Zemin etkisi dikkate alınmadığında KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yük değerleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının değişik kayma gerilme fonksiyonları için dağılımı

| Kayma Gerilme Fonksiyonu Şekli | a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341m; $\bar{k}_w = 0$ |                                             |                                              |                                             |                                              |                                             |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)      | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| f(Z)                           | Hom.                                             |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| Parabolik                      | 2.850(1,1)                                       | 4.147(1,1)                                  | 4.688(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.724(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| Üniform                        | 3.007(1,1)                                       | 4.147(1,1)                                  | 4.940(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.817(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| Hiperbolik                     | 2.851(1,1)                                       | 4.147(1,1)                                  | 4.689(1,1)                                   | 6.782(1,1)                                  | 1.725(1,1)                                   | 2.495(1,1)                                  |
| f(Z)                           | $1 \pm z$                                        |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| Parabolik                      | 2.674(1,1)                                       | 3.801(1,1)                                  | 3.175(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.509(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| Üniform                        | 2.809(1,1)                                       | 3.801(1,1)                                  | 3.368(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.631(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
| Hiperbolik                     | 2.675(1,1)                                       | 3.801(1,1)                                  | 3.176(1,1)                                   | 4.769(1,1)                                  | 2.510(1,1)                                   | 3.525(1,1)                                  |
|                                | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)     | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12kr}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| f(Z)                           | Hom.                                             |                                             | $e^{z+0.5}$                                  |                                             | $e^{z-0.5}$                                  |                                             |
| Parabolik                      | 1.523(1,3)                                       | 2.135(1,3)                                  | 2.503(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.921(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| Üniform                        | 1.598(1,3)                                       | 2.135(1,3)                                  | 2.624(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.965(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| Hiperbolik                     | 1.523(1,3)                                       | 2.135(1,3)                                  | 2.504(1,3)                                   | 3.493(1,3)                                  | 0.921(1,3)                                   | 1.285(1,3)                                  |
| f(Z)                           | $1 \pm z$                                        |                                             | $1 + z^2$                                    |                                             | $1 - z^2$                                    |                                             |
| Parabolik                      | 1.425(1,3)                                       | 1.957(1,3)                                  | 1.702(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.336(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| Üniform                        | 1.490(1,3)                                       | 1.957(1,3)                                  | 1.795(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.394(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |
| Hiperbolik                     | 1.426(1,3)                                       | 1.957(1,3)                                  | 1.703(1,3)                                   | 2.456(1,3)                                  | 1.336(1,3)                                   | 1.815(1,3)                                  |

**Çizelge 4.13.** Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, KPT ve KDPT kullanılarak, H ve HO bor/epoksi malzemeden oluşan dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükleri ve onlara karşı gelen boyuna ve enine dalga sayılarının değişik kayma gerilme fonksiyonları için dağılımı

| Kayma Gerilme Fonksiyonu Şekli | $a/b = 0.5; a/h = 10; b = 0.341\text{ m}; \bar{k}_w = 400$ |                                              |                                               |                                              |                                               |                                              |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)               | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)  | $\bar{P}_{1krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n)  |
| f(Z)                           | Hom.                                                       |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| Parabolik                      | 4.029(1,1)                                                 | 5.325(1,1)                                   | 5.866(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 2.903(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| Üniform                        | 4.185(1,1)                                                 | 5.325(1,1)                                   | 6.119(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 2.996(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| Hiperbolik                     | 4.030(1,1)                                                 | 5.325(1,1)                                   | 5.868(1,1)                                    | 7.961(1,1)                                   | 2.904(1,1)                                    | 3.674(1,1)                                   |
| f(Z)                           | $1 \pm z$                                                  |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| Parabolik                      | 3.853(1,1)                                                 | 4.980(1,1)                                   | 4.354(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 3.688(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| Üniform                        | 3.988(1,1)                                                 | 4.980(1,1)                                   | 4.547(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 3.809(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
| Hiperbolik                     | 3.854(1,1)                                                 | 4.980(1,1)                                   | 4.355(1,1)                                    | 5.947(1,1)                                   | 3.689(1,1)                                    | 4.703(1,1)                                   |
|                                | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n)              | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KDPT} \times 10^3$<br>(m,n) | $\bar{P}_{12krw}^{KPT} \times 10^3$<br>(m,n) |
| f(Z)                           | Hom.                                                       |                                              | $e^{z+0.5}$                                   |                                              | $e^{z-0.5}$                                   |                                              |
| Parabolik                      | 1.878(1,4)                                                 | 2.498(1,3)                                   | 2.866(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.229(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| Üniform                        | 1.960(1,3)                                                 | 2.498(1,3)                                   | 2.986(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.280(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| Hiperbolik                     | 1.879(1,4)                                                 | 2.498(1,3)                                   | 2.867(1,3)                                    | 3.855(1,3)                                   | 1.230(1,4)                                    | 1.648(1,3)                                   |
| f(Z)                           | $1 \pm z$                                                  |                                              | $1 + z^2$                                     |                                              | $1 - z^2$                                     |                                              |
| Parabolik                      | 1.775(1,4)                                                 | 2.320(1,3)                                   | 2.065(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 1.679(1,4)                                    | 2.178(1,3)                                   |
| Üniform                        | 1.849(1,4)                                                 | 2.320(1,3)                                   | 2.157(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 1.746(1,4)                                    | 2.178(1,3)                                   |
| Hiperbolik                     | 1.776(1,4)                                                 | 2.320(1,3)                                   | 2.065(1,3)                                    | 2.818(1,3)                                   | 1.680(1,4)                                    | 2.178(1,3)                                   |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışmasında, Winkler elastik zemine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın basınç yükü etkisi altında stabilite problemi KDPT çerçevesinde ele alınmaktadır. Önce, Winkler elastik zemin etkisi dikkate alınarak, homojen olmayan ortotrop plağın temel bağıntı ve stabilite denklemleri KDPT çerçevesinde türetilmektedir. Homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın tüm kenarları basit mesnetli sınır koşullarına tabi tutulmaktadır. Söz konusu sınır koşulları altında stabilite problemi çözülerek, Winkler elastik zemini üzerine oturan homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plağın kritik yük ifadeleri KDPT ve KPT temelinde bulunmaktadır. Kritik yükün minimum değerini bulmak için elde edilen ifadeler dalga sayılarına göre minimize edilmektedir. Bu ifadelerden, Winkler elastik zemine oturan, homojen ortotrop dikdörtgen plakların KDPT ve KPT temelinde kritik yük ifadeleri özel olarak elde edilmektedir. Ayrıca, bu ifadelerden elastik zemin etkisi dikkate alınmayan homojen ve homojen olmayan ortotrop dikdörtgen plaklar için kritik yük ifadeleri KDPT ve KPT çerçevesinde özel olarak elde edilmektedir.

Sayısal analizlerden aşağıdaki genelleştirmeler ortaya konulmuştur:

- a.) KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yük değerleri  $a/h$  oranı arttığında artmakta, KPT çerçevesinde ise söz konusu kritik yük değerleri yaklaşık sabit kalmaktadır.
- b.) KPT ve KDPT çerçevesinde, iki eksenli kritik yüke karşı gelen enine dalga sayısı bir eksenli kritik yüke karşı gelen enine dalga sayısından büyük olmakta, fakat  $a/h$  oranının etkisine bağlı olarak yaklaşık değişmemektedir.
- c.) H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli ve zeminsiz durumda  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- d.) Zemin etkisi dikkate alındığında, kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine kayma gerilmelerinin etkisi zeminsiz duruma kıyasla  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak daha yavaş azalmaktadır.

- e.) Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığında, kayma gerilmesinin bir eksenli kritik yük değerine etkisi daha belirgin, zemin etkisi dikkate alındığında ise iki eksenli kritik yük değerine kayma gerilmesinin etkisi daha belirgin olmaktadır.
- f.) Zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmama üstel olarak, yani  $e^{z+0.5}$  ve  $e^{z-0.5}$  şeklinde değiştiğinde kayma gerilmelerinin kritik yüklere etkisi aynı olduğu halde zemin etkisi dikkate alındığında söz konusu etki farklı olmaktadır.
- g.) KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi  $a/h$  ve  $E_x/E_y$  oranının artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.
- h.) KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $a/h$  ve  $E_x/E_y$  oranına yaklaşık bağlı değildir.
- i.) KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $a/h$  oranının küçük değerlerinde artar  $a/h$ 'ın sonraki artışlarında homojen olmama etkisi yine sabitlenir.
- j.) KDPT çerçevesinde, Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $a/h$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.
- k.) KDPT çerçevesinde zeminli ve zeminsiz durumlarda homojen olmamanın iki eksenli kritik yüke etkisi bir eksenli kritik yüke olan etkiden daha belirgindir.
- l.) KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $a/b$  oranı arttığında genelde azalmaktadır.
- m.)  $a/b$  oranı artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları  $a/b$  oranının küçük değerlerinde büyük olmakta ve  $a/b$  artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- n.) Zeminsiz durumda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin bir eksenli boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri  $a/b$

- oranının artışına bağlı olarak çok az miktarda azalmakta, her iki doğrultudaki kritik yük değerlerine kayma gerilmelerinin etkileri ise az miktarda artmaktadır.
- o.) Zeminli durumda bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerlerine kayma etkisi  $a/b$  oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
  - p.) Zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmamanın en büyük etkisi üstel durumda, yani  $e^{z+0.5}$ , de ortaya çıkmaktadır.
  - q.) KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke zemin etkisi iki eksenli kritik yüke zemin etkisinden daha belirgin olmaktadır.
  - r.) KPT ve KDPT çerçevesinde, zemin etkisi dikkate alınmadığında homojen olmamanın kritik yüklere en büyük etkisi  $e^{z+0.5}$ , de olmaktadır.
  - s.) Zemin etkisi dikkate alınmadığında, KPT çerçevesinde, homojen olmamanın kritik yüklere etkisi KDPT çerçevesindeki etkiden daha belirgindir.
  - t.) KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $E_x/E_y$  oranı arttığında azalmaktadır.
  - u.) Zeminsiz durumda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine kayma gerilmelerinin etkileri  $E_x/E_y$  oranının artışına bağlı olarak önemli derecede artmaktadır.
  - v.) Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine etkisi  $E_x/E_y$  oranının artışına bağlı olarak artmaktadır fakat artış hızı yavaştır.
  - w.) Zeminsiz durumda ve KPT çerçevesinde, homojen olmamanın etkisi  $E_x/E_y$  oranının artışına bağlı değildir, fakat bu etki önemli olup homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.
  - x.) Zeminsiz durumda ve KDPT çerçevesinde, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x/E_y$  oranına yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $E_x/E_y$  oranının küçük değerlerinde azalmalar görülmektedir.
  - y.) Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve KPT çerçevesinde, homojen olmamanın bir eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x/E_y$  oranının artışına bağlı

- olarak azalmakta, iki eksenli kritik yüklere etkisi ise  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak önce çok bir miktar arttığı ve daha sonra azaldığı gözlenilmiştir.
- z.) Winkler zemin etkisi dikkate alındığında ve KDPT çerçevesinde homojen olmamanın bir ve iki eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak genellikle azalmaktadır ve homojen olmama etkisinin belirginliği homojen olmama fonksiyonlarının şekline bağlı olarak değişmektedir.
- aa.) KPT çerçevesinde, Winkler zeminin bir eksenli kritik yüklere etkisi  $E_x / E_y$  oranının artışına bağlı olarak artmakta, zeminin iki eksenli kritik yüklere etkisi ise azalmaktadır.
- bb.) KDPT çerçevesinde H ve HO durumunda yani üstel ve kuvvet fonksiyonlarında  $E_x / E_y$  oranı arttığında zeminin bir eksenli kritik yük etkisi artmakta, iki eksenli kritik yüke etkisi ise önce bir miktar azalmakta ve daha sonra artmaktadır.
- cc.)  $E_x / E_y$  oranı artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları artmaktadır.
- dd.) KDPT ve KPT çerçevesinde  $\beta_0 = 0$  olduğunda tek eksenli durum söz konusu iken,  $\beta_0$  değeri sıfırdan büyük olduğunda iki eksenli durum söz konusu olmaktadır.
- ee.) KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\beta_0$  değeri arttığında azalmaktadır.
- ff.) KDPT ve KPT çerçevesinde zeminsiz durumdaki azalmanın zeminli durumdaki azalmadan daha az olduğu görülmektedir.
- gg.) H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminsiz durumda,  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak az miktarda azalmaktadır.
- hh.) Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin kritik basınç yüklerine etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak çok az seviyede artış ya da azalış göstermektedir.

- ii.) KPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmamanın etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olmadığı halde KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki  $\beta_0$  değerine yaklaşık bağlı değildir, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki  $\beta_0$  değerinin küçük değerlerinde artmaktadır.
- jj.) KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda homojen olmamanın iki eksenli kritik yüklere etkisi ise  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır.
- kk.)  $\beta_0$  değeri artışına bağlı olarak, zeminli ve zeminsiz durumda, KPT ve KDPT çerçevesinde bir eksenli kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (1,1) değerleri aldığı halde iki eksenli kritik yüklere karşı gelen enine dalga sayıları artmaktadır.
- ll.) KPT ve KDPT çerçevesinde, Winkler zeminin iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\beta_0$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- mm.) KDPT ve KPT çerçevesinde, zeminli durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri  $\bar{k}_w$  değeri arttığında artmaktadır.
- nn.) H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli durumda  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- oo.) Zemin etkisi dikkate alındığında kayma gerilmelerinin iki eksenli kritik basınç yüklerine etkisi bir eksenli kritik basınç yüklerine etkisinden  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak daha yavaş azalmaktadır.
- pp.) KPT ve KDPT çerçevesinde, zeminli durumda homojen olmamanın hem bir hem iki eksenli kritik yüklere etkisi  $\bar{k}_w$  değerinin artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- qq.) KDPT çerçevesinde, zeminli ve zeminsiz durumlarda, H ve HO ortotrop dikdörtgen plakların bir ve iki eksenli kritik basınç yükü değerleri kayma gerilme fonksiyonları parabolik, uniform ve hiperbolik fonksiyonlar olarak ele alındığında değişmektedir.

- rr.) H ve HO ortotrop dikdörtgen plaklar için kayma gerilmelerinin boyutsuz kritik basınç yükü değerlerine etkileri zeminli ve zeminsiz durumda kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır.
- ss.) KDPT çerçevesinde, zeminsiz durumda, homojen olmama üstel değiştiğinde bir ve iki eksenli kritik yüklere etki kayma gerilme fonksiyonlarının her üçü için aynıdır, homojen olmama fonksiyonları doğrusal ve kuadratik değiştiğinde söz konusu etki kayma gerilme fonksiyonu parabolik ve hiperbolik olduğunda yaklaşık aynı iken, üniform olduğunda biraz daha küçük olmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akhavan, H., Hashemi, S.H., Taher, H.R.D., Alibeigloo, A., Vahabi, S., 2009. Exact Solutions for Rectangular Mindlin Plates under In-Plane Loads Resting on Pasternak Elastic Foundation. Part I: Buckling Analysis. *Computational Materials Science*, 44, 968-978.
- Altenbach, H., 2008. Analysis of Homogenous and Non-Homogenous Plates. de Borst, R. and Sadowski, T. (eds.), *Lecture Notes on Composite Materials - Current Topics and Achievements*. Springer Science Business Media B.V., Netherlands.
- Ambartsumyan, S.A., 1964. *Theory of Anisotropic Plates; Strength, Stability, Vibration*. Technomic published by Stamford.
- Asadi, E., Qatu, M.S., 2012. Static Analysis of Thick Laminated Shells with Different Boundary Conditions Using GDQ. *Thin-Walled Structures*, 51, 76-81.
- Atmane, H.A., Tounsi, A., Mechab, I., Bedia, E.A.A., 2010. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Plates Resting on Winkler-Pasternak Elastic Foundations Using a New Shear Deformation Theory. *International Journal of Mechanics and Materials*, 6, 113-121.
- Aydogdu, M., 2009. A New Shear Deformation Theory for Laminated Composite Plates. *Composite Structures*, 89, 94-101.
- Bahmyari, E., Khedmati, M.R., 2013. Vibration Analysis of Nonhomogeneous Moderately Thick Plates with Point Supports Resting on Pasternak Elastic Foundation Using Element Free Galerkin Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37, 1212-1238.
- Bhaskar, K., Kaushik, B., 2004. Simple and Exact Series Solutions for Flexure of Orthotropic Rectangular Plates with Any Combination of Clamped and Simply Supported Edges. *Composite Structures*, 63, 63-68.
- Bouderba, B., Houari, M.S.A., Tounsi, A., 2013. Thermomechanical Bending Response of FGM Thick Plates Resting on Winkler-Pasternak Elastic Foundations. *Steel and Composite Structures*, 14, 85-104.
- Chen, J., Soh, A.K., Liu, J., Liu, Z. 2004. Thermal Fracture Analysis of a Functionally Graded Orthotropic Strip With a Crack. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 1, 131-141.
- Civalek, O., 2007. Nonlinear Analysis of Thin Rectangular Plates on Winkler-Pasternak Elastic Foundations by DSC-HDQ Methods. *Applied Mathematical Modelling*, 31, 606-624.

- Doğruoğlu, A.N, Omurtag, M.H., 2000. Stability Analysis of Composite-Plate Foundation Interaction by Mixed FEM. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 9, 928-936.
- Eisenberger M., Clastornik J, Eisenberger M., 1987. Vibrations and Buckling of a Beam on Variable Winkler Elastic Foundation. *Journal of Sound and Vibration*, 115, 233-241.
- Fares, M.E., Elmarghany, M.Kh., 2008. A Refined Zigzag Nonlinear First-Order Shear Deformation Theory of Composite Laminated Plates. *Composite Structures*, 82, 71-83.
- Ferreira, A.J.M., Roque, C.M.C., Neves, A.M.A., Jorge, R.M.N., Soares, C.M.M., Reddy, J.N., 2011. Buckling Analysis of Isotropic and Laminated Plates by Radial Basis Functions According to a Higher-Order Shear Deformation Theory. *Thin-Walled Structures*, 49, 804-811.
- Gadjiev, V.D., Sofiyev, A.H., 1988. The Effect of Moving Load to the Non-Homogeneous Cylindrical Shell. *Mechanics of Deformable Rigid Bodies*, Baku State University, Baku, 28-33.
- Gorbunov-Possadov, M.I., Malikova, T.A., Solomin V.I., 1984. Design of Structures on Elastic Foundation. Third edition, revised and completed, Strojizdat, Moscow USSR, Russia.
- Grigorenko, Y.M., Grigorenko, A.Y., 2013. Static and Dynamic Problems for Anisotropic Inhomogeneous Shells with Variable Parameters and Their Numerical Solution (review). *International Applied Mechanics*, 49, 123-193.
- Grover, N., Maiti, D.K., Singh, B.N., 2013. A New Inverse Hyperbolic Shear Deformation Theory for Static and Buckling Analysis of Laminated Composite and Sandwich Plates. *Composite Structures*, 95, 667-675.
- Herakovich, C.T., 2012. Mechanics of Composites: A Historical Review. *Mechanics Research Communications*. 41, 1-20.
- Hetenyi, M., 1966. Beams and Plates on Elastic Foundations and Related Problems. *Applied Mechanics Reviews*, 19, 95-102.
- Hong, C.C., Jane, K.C., 2003. Shear Deformation in Thermal Vibration Analysis of Laminated Plates by the GDQ Method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45, 21-36.
- Hong, C.C., 2009. Thermal Bending Analysis of Shear-Deformable Laminated Anisotropic Plates by the GDQ Method. *Mechanics Research Communications*, 36, 804-810.

- Karama, M., Afaq, K.S., Mistou, S., 2003. Mechanical Behaviour Of Laminated Composite Beam by New Multi-Layered Laminated Composite Structures Model with Transverse Shear Stress Continuity, *International Journal of Solids and Structures*, 40, 1525-1546.
- Kerr, A.D., 1964. A Study of a New Foundation Model. *Acta Mechanica*, 1, 135-147.
- Kshirsagar, S., Bhaskar, K., 2009. Free Vibration and Stability Analysis of Orthotropic Shear-Deformable Plates Using Untruncated Infinite Series Superposition Method. *Thin-Walled Structures*, 47, 403-411.
- Kumar, Y., Lal, R. 2011. Buckling and Vibration of Orthotropic Nonhomogeneous Rectangular Plates with Bilinear Thickness Variation. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 78, 1-11.
- Kumar, Y., Lal, R., 2012. Vibrations of Non-Homogeneous Orthotropic Rectangular Plates with Bilinear Thickness Variation Resting on Winkler Foundation. *Meccanica*, 47, 893-915.
- Lal, A., Singh B.N., Kumar, R., 2008. Effect of Random System Properties on Initial Buckling of Composite Plates Resting on Elastic Foundation. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 8, 103-130.
- Lal, R., Dhanpati 2009. Effect of Nonhomogeneity on Vibration of orthotropic Rectangular Plates of Varying Thickness Resting on Pasternak Foundation. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 131, 1-9.
- Lal, R., Kumar, Y., 2011. Rayleigh-Ritz Method in the Study of Transverse Vibration of Nonhomogeneous Orthotropic Rectangular Plates of Uniform Thickness Resting on Winkler Foundation. *Advances in Vibration Engineering*, 10, 207-220.
- Lal, R., Kumar, Y., 2013. Transverse Vibrations of Nonhomogeneous Rectangular Plates with Variable Thickness. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 20, 264-275.
- Lam, K.Y., Wang, C.M., He, X.Q., 2000. Canonical Exact Solutions for Levy-Plates on Two-Parameter Foundation Using Green's Functions. *Engineering Structures*, 22, 364-378.
- Liew, K.M., Han, J-B., Xiao, Z.M., Du, H., 1996. Differentiel Quadrature Method for Mindlin Plates on Winkler Foundations. *International Journal of Mechanical Sciences* 38, 405-421.
- Liu, Y., 2011. A Refined Shear Deformation Plate Theory. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 12, 141-149.

- Malekzadeh, P., Haghghi, M.R.G., Beni, A.A., 2012. Buckling Analysis of Functionally Graded Arbitrary Straight-Sided Quadrilateral Plates on Elastic Foundations. *Meccanica*, 47, 321-333.
- Mansouri, M.H., Shariyat, M., 2014. Thermal Buckling Predictions of Three Types of High-Order Theories for the Heterogeneous Orthotropic Plates, Using the New Version of DQM. *Composite Structures*, 113, 40-55.
- Mantari, J.L., Soares, C.G., 2014. Optimized Sinusoidal Higher Order Shear Deformation Theory for the Analysis of Functionally Graded Plates and Shells. *Composites Part B: Engineering*, 56, 126-136.
- Matsunaga, M., 2001. Vibration and Stability of Angle-Ply Laminated Composite Plates Subjected to In-Plane Stresses. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, 1925-1944.
- Meiche, N.E., Tounsi, A., Ziane, N., Mechab, I., Adda.Bedia, E.A., 2011. A New Hyperbolic Shear Deformation Theory for Buckling and Vibration of Functionally Graded Sandwich Plate. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53, 237-247.
- Morimoto, T., Tanigawa, Y., 2007. Elastic Stability of Inhomogeneous Thin Plates on an Elastic Foundation. *Archive of Applied Mechanics*, 77, 653-674.
- Murthy, M.V.V., 1981. An improved transverse shear deformation theory for laminated anisotropic plates. NASA Technical Paper, 1903.
- Najafov, A.M., Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N., 2013. Torsional Vibration and Stability of Functionally Graded Orthotropic Cylindrical Shells on Elastic Foundations. *Meccanica*, 48, 829-840.
- Najafov, A.M., Sofiyev, A.H., Ozyigit, P., Yucel K.T., 2014a. Vibration and Stability of Axially Compressed Truncated Conical Shells with Functionally Graded Middle Layer Surrounded by Elastic Medium. *Journal of Vibration and Control*, 20, 303-320.
- Najafov, A.M., Sofiyev, A.H., Hui, D., Karaca, Z., Kalpakci, V., Ozelik, M., 2014b. Stability of EG Cylindrical Shells with Shear Stresses on a Pasternak Foundation. *Steel and Composite Structures*, 17, 453-470.
- Neves, A.M.A., Ferreira, A.J.M., Carrera, E., Cinefra, M., Roque, C.M.C., Jorge, R.M.N., Soares, C.M.M., 2013. Static, Free Vibration and Buckling Analysis of Isotropic and Sandwich Functionally Graded Plates Using a Quasi-3d Higher-Order Shear Deformation Theory and a Meshless Technique. *Composites Part B: Engineering*, 44, 657-674.
- Oktem, A.S., 2014. Static Analysis of Functionally Graded (FGM) Composite Plates. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29, 111-120.

- Omurtag, M.H., Kadioğlu, F., 1998. Free Vibration Analysis of Orthotropic Plates Resting on Pasternak Foundation by Mixed Finite Element Formulation. *Computers and Structures*, 67, 253-265.
- Ootao, Y., Tanigawa, Y., 2007. Three-Dimensional Solution for Transient Thermal Stresses of an Orthotropic Functionally Graded Rectangular Plate. *Composite Structures*, 80, 10-20.
- Paliwal, D.N., Kumar, P.R., Nath, T., 1996. Free Vibrations of Circular Cylindrical Shell on Winkler and Pasternak Foundations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 69, 79-89.
- Paliwal, D.N., Singh, S., 1999. Free Vibrations of Orthotropic Cylindrical Shell on Elastic Foundation. *AIAA Journal*, 37, 1135-1139.
- Paliwal, D.N., Pandey, R.K., 2001. Free Vibrations of an Orthotropic Thin Cylindrical Shell on a Pasternak Foundation. *AIAA Journal*, 39, 2188-2191.
- Pan, E., 2003. Exact Solution for Functionally Graded Anisotropic Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*, 37, 1903-1920.
- Papkov, S.O., Banerjee, J.R., 2015. A New Method for Free Vibration and Buckling Analysis of Rectangular Orthotropic Plates. *Journal of Sound and Vibration*, 339, 342-358.
- Peng, X.L., Li, X.F., 2012. Elastic Analysis of Rotating Functionally Graded Polar Orthotropic Disks. *International Journal of Mechanical Sciences*, 60, 84-91.
- Pronk, A.C., 1993. The Pasternak Foundation, An Attractive Alternative for the Winkler Foundation. *Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, 1, 349-357.
- Ramirez, F., Heyliger, P.R., Pan, E., 2006. Static Analysis of Functionally Graded Elastic Anisotropic Plates Using a Discrete Layer Approach. *Composites Part B: Engineering*, 37, 10-20.
- Reddy, J.N. 2007. *Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells*, Second Ed, CRC Press, New York.
- Reissner E., 1945. Reflection on the Theory of Elastic Plates. *Journal of Applied Mechanics* 38:1453-1464.
- Saini, R., Lal, R., 2014. Transverse Vibration of Non-Homogeneous Rectangular Plates of Variable Thickness Using GDQ. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering*, 8, 1160-1165.

- Sayyad, A.S., Ghugal, Y.M., 2014. A New Shear and Normal Deformation Theory for Isotropic, Transversely Isotropic, Laminated Composite and Sandwich Plates. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 10, 247-267.
- Shariyat, M., 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.
- Sheikh, A.H., Halder, S., Sengupta, D., 2002. A High Precision Shear Deformable Element for the Analysis of Laminated Composite Plates of Different Shapes. *Composite Structures*, 55, 329-336.
- Sheikholeslami, S.A., Saidi, A.R., 2013. Vibration Analysis of Functionally Graded Rectangular Plates Resting on Elastic Foundation Using Higher-Order Shear and Normal Deformable Plate Theory. *Composite Structures*, 106, 350-361.
- Shen, H.S., 1995. Post-Buckling of Orthotropic Plates on Two-Parameter Elastic Foundation. *Journal of Engineering Mechanics*, 121, 50-56.
- Shi, G., 2007. A new simple third-order shear deformation theory of plates. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 4299-4417.
- Sladek, J., Sladek, V., Zhang, C.H., 2005. Stress Analysis in Anisotropic Functionally Graded Materials by the MLPG Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 29, 597-609.
- Sobhy, M., 2013. Buckling and Free Vibration of Exponentially Graded Sandwich Plates Resting on Elastic Foundations under Various Boundary Conditions. *Composite Structures*, 99, 76-87.
- Sofiyev, A.H., Karaca, Z., 2009. The Vibration and Stability of Laminated Non-Homogeneous Orthotropic Conical Shells Subjected to External Pressure. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 28, 317-328.
- Sofiyev A.H., Omurtag M., Schnack E., 2009. The Vibration and Stability of Orthotropic Conical Shells with Non-Homogeneous Material Properties Under a Hydrostatic Pressure. *Journal of Sound and Vibration*, 319, 963-983.
- Sofiyev, A.H., Schnack, E., Hacıyev, V.C., Kuruoglu, N., 2012. Effect of the Two-Parameter Elastic Foundation on the Critical Parameters of Non-Homogeneous Orthotropic Shells. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 12, 1-24.
- Sofiyev, A.H., Deniz, A., Ozyigit, P., Pinarlik, M., 2014. Stability Analysis of Clamped Nonhomogeneous Shells on the Elastic Foundation. *Acta Physica Polonica*, 125, 459-461.

- Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N., 2014. Buckling and Vibration of Shear Deformable Functionally Graded Orthotropic Cylindrical Shells Under External Pressures. *Thin-Walled Structures*, 78, 121-130.
- Soldatos, K.P., 1992. A Transverse Shear Deformation Theory for Homogeneous Monoclinic Plates. *Acta Mechanica*, 94, 195-220.
- Thai, H.T., Choi, D.H., 2012. A Refined Shear Deformation Theory for Free Vibration of Functionally Graded Plates on Elastic Foundation. *Composites Part B: Engineering*, 43, 2335-2347.
- Thai, H.T., Choi, D.H., 2013. Analytical Solutions of Refined Plate Theory for Bending, Buckling and Vibration Analyses of Thick Plates. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 8310-8323.
- Thai, H.T., Thuc, P.V., 2013. A New Sinusoidal Shear Deformation Theory for Bending, Buckling, and Vibration of Functionally Graded Plates. *Applied Mathematic Modelling*, 37, 3269-3281.
- Thai, H.T., Nguyen, T.K., Vo, T.P., Lee, J., 2014. Analysis of Functionally Graded Sandwich Plates Using a New First-Order Shear Deformation Theory. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 45, 211-225.
- Tomar, J.S., Gupta, D.C., Jain, N.C., 1982. Vibration of Non-Homogeneous Plates of Variable Thickness. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 851-855.
- Touratier, M., 1991. An Efficient Standard Plate Theory. *International Journal of Engineering Science*, 29, 901-916.
- Tsudik, E., 2012. *Analysis of Structures on Elastic Foundations*. J. Rosss Publishing, Plantation, USA.
- Vlasov, V.Z., Leont'ev, N.N., 1966. *Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations*. Translated from Russian to English by Baruch, A., Israel Program for scientific translations, Jerusalem.
- Volmir, A.S., 1967. *Stability of Elastic Systems*. Nauka, Moscow. English Translation: Foreign Tech. Division, Air Force Systems Command. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, AD628508.
- Wang, S., Dawe, D.J., 1999. Spline FSM Postbuckling Analysis of Shear-Deformable Rectangular Laminates. *Thin-Walled Structures*, 34, 163-178.
- Wang, C.M., Wang, C.Y., Reddy, J.N., 2005. *Exact Solutions for Buckling of Structural Members*. CRC Series in Computational Mechanics and Applied Analysis. Boca Raton, Florida.

- Whitney, J.M., Pagano, N.J., 1970. Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates. *Journal of Applied Mechanics*, 37, 1031-1036.
- Wosu, S.N., Hui, D., Daniel, L., 2012. Hygrothermal Effects on the Dynamic Compressive Properties of Graphite/Epoxy Composite Material. *Composites Part B: Engineering*, 43, 841-855.
- Xia, P., Mao, W., Hu, W. 2010. An Elastic Dynamic Analysis of a Nonhomogeneous Moderately Thick Plate using the Meshless Local Petrov-Galerkin Method. *Applied Mechanics and Materials*, 34-35, 393-398.
- Xiao, J.R., Gilhooley, D.F., yuBatra, R.C., Gillespie Jr., J.W., McCarthy, M.A., 2008. Analysis of Thick Composite Laminates Using a Higher-Order Shear and Normal Deformable Plate Theory (HOSNDPT) and a Meshless Method. *Composites: Part B*, 39, 414-427.
- Zenkour, A.M., Fares, M.E., 1999. Non-Homogeneous Response of Cross-Ply Laminated Elastic Plates Using a Higher-Order Theory. *Composite Structures*, 44, 297-305.
- Zenkour, A.M., Alam, M.N.M., Radwan, A.F., 2013. Bending of Cross-Ply Laminated Plates Resting on Elastic Foundations Under Thermo-Mechanical Loading. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 9, 239-251.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali Nadi KAPLAN  
Doğum Yeri : Isparta  
Doğum Tarihi : 08.03.1991  
Yabancı Dil : İngilizce  
E-Posta : nadikaplan32@gmail.com



## Eğitim Durumu

Lisans Süleyman Demirel Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği  
2009 – 2013  
Lise Mürşide Ermumcu Anadolu Öğretmen Lisesi  
2009 – 2013

## Yayınları

Sofiyev, A.H., Deniz, A., Ozyigit, P., Osmancelebioglu, E., Pinarlik, M., Takin, M., Kaplan, A.N., 2014. The Stability of Cylindrical Shells With Exponentially Graded Coatings Subjected to Lateral Pressure. International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians, 17-20 May, Antalya, Turkey, 98-105.

Sofiyev, A.H., Taşkın, M., Şayev, Z.Ş., Kaplan A.N., 2014. Süperonik Gaz Akımında Fonksiyonel Değişimli Malzeme İle Kaplı Silindirik Panelin Stabilitesi. V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 8-10 Eylül, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, UHUK-2014-071.

Sofiyev, A.H., Mecitoglu, Z., Ozyigit, P., Taşkın, M., Pinarlik, M., Kaplan A.N., 2014. Vibration Analysis of Ceramic Cylindrical Panels Coated with Functional Gradient Materials. VII. Internationally Participated National Biomechanics Congress, 16-18 Oct, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey, 153-154.

Sofiyev, A.H., Mecitoglu, Z., Ozyigit, P., Taşkın, M., Pinarlik, M., Kaplan, A.N., 2014. Fonksiyonel Değişimli Malzemelerle Kaplı Seramik Silindirik Panelin Titreşim Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18, 117-122.

## **Yer Aldığı Ulusal Projeler**

Tübitak 1001 Araştırma Projesi - Proje No: 113M399, “Kayma Deformasyonlu Kabuk Teorisi (KDKT) Kullanarak Fonksiyonel Değişimli Malzemelerle (FDM'ler) Kaplı Sandviç Kabukların Hidrostatik Dış Basınç Yüğü Etkisi Altında Stabilite ve Serbest Titreşim Davranışlarının İncelenmesi” Yürütücü: Prof. Dr. Abdullah AVEY