T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KARBON NANOTÜP DESENLİ POLİMER PLAKLARIN BURKULMASININ KAYMA DEFORMASYON TEORİSİ ÇERÇEVESİNDE ARAŞTIRILMASI

Üsame KAYA

Danışman
Prof. Dr. Abdullah AVEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023

© 2023[Üsame KAYA]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi	2
1.2. Tezin Amacı	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Karbon Nano Tüplerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri	6
2.2. Karbon Nano Tüp Takviyeli Polimer Malzemelerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri	8
2.3. FD-KNT Takviyeli Polimer Yapı Elemanlarının Burkulmasına İlişkin Kaynak Özetleri	14
2.4. Tez Konusuna İlişkin Nanokompozitlere Ait Kitapların Özetleri	28
2.5. Tez Konusuna İlişkin Olan Plakların Genel Teorisi ve Stabilitesine İlişkin Kitapların Özetleri	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	34
3.1. Problemin Formülasyonu	34
3.2. Nanokompozitin Modellenmesi ve Geometrik Gösterimi	35
3.3. FD-KNT Takviyeli Polimer Dikdörtgen Plakaların Temel Bağıntılarının Oluşturulması	37
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	48
4.1. Çözüm Prosedürü	48
4.2. Karşılaştırmalar	52
4.3. Sayısal Analizler	56
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	90
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	100

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KARBON NANOTÜP DESENLİ POLİMER PLAKLARIN BURKULMASININ KAYMA DEFORMASYON TEORİSİ ÇERÇEVESİNDE ARAŞTIRILMASI

Üsame KAYA

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

Tez çalışmasında, düzlem içi basınç yükleri altındaki karbon nanotüp (KNT) takviyeli polimer dikdörtgen plakların burkulma davranışı kayma deformasyon teorisi (KDT) çerçevesinde araştırılmıştır. İlk olarak karbon nanotüp ve nanokompozitler tanımlanmış ve daha sonra onların malzeme özellikleri, avantajları ve uygulama alanları ile ilgili genel ve temel bilgiler sunulmuştur. Karbon nanotüpler tasarlanabilir eşsiz özellikleri ve değiştirilebilir fonksiyonları nedeniyle birçok endüstride kilit rol oynamaktadır. Nanokompozitlerin oluşturulması mekanik özellikleri, dayanımı ve boyutsal kararlılığı geliştirmenin yanı sıra elektriksel iletkenliği artırma, gaz, su ve hidrokarbon geçirgenliğini azaltma, yangına dayanımı, termal stabilite, kimyasal dayanım ve optik keskinlik gibi avantajlara sahip olmaktadır. Karbon nanotüplerle güçlendirilen polimerlerin mikro-mekanik özellikleri matematiksel olarak modellenmiştir. Kayma deformasyon plak teorisi yapıya sahip nanokompozit plaklara genelleştirilmiştir. Nanokompozit plakların bünyesel bağıntıları modifiye edilmiş kayma deformasyon teorisi çerçevesinde oluşturulduktan sonra stabilite ve şekil değiştirme uygunluk denklemleri yer değiştirme fonksiyonu, Airy gerilme fonksiyonu ve iki adet dönme açı fonksiyonlarına bağlı olarak kısmi türevli diferansiyel denklemler şeklinde türetilmiştir. Somut sınır koşulları için yaklaşım fonksiyonları seçilerek temel diferansiyel denklemler çözülmüş ve düzlem içi kritik basınç yükleri için kapalı çözümler elde edilmiştir. Söz konusu ifadeler dikkate alınarak düzlem içi kritik basınç yüklerinin minimum değerleri sayısal olarak elde edilmiştir. Kayma deformasyon teorisi çerçevesinde elde edilen ifadelerden özel halde klasik plak teorisi (KPT) çerçevesinde fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp (FD-KNT) desenli polimer plakların düzlem içi kritik basınç yükleri için ifadeler özel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamak için literatürde bulunan güvenilir kaynaklarda sunulan sayısal sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Analizlerde dikdörtgen plakları oluşturan matris malzeme olarak polimetil metakrilattan (PMMA) ve takviye elemanı olarak tek duvarlı KNT kullanılmıştır. Ayrıca değişik hacim kesir oranları, dört farklı KNT deseni, dört farklı kayma şekil değiştirme fonksiyonu dikkate alınmıştır. Dikdörtgen plağın eninin kalınlığına oranı, uzunluğun enine oranı ve yük parametre katsayısının değişimine bağlı olarak, tek ve çift eksenli burkulma yüklerinin sayısal davranışlarına ilişkin kapsamlı sayısal analizler, yorumlar ve genelleştirmeler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon nanotüp, fonksiyonel dereceli nanokompozit, plak, burkulma yükü, kayma deformasyon teorisi

2023, 100 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF BUCKLING OF FUNCTIONALLY GRADED CARBON NANOTUBE PATTERNED POLYMER PLATES WITHIN THE FRAMEWORK OF SHEAR DEFORMATION THEORY

Üsame KAYA

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

Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AVEY

In the thesis, the buckling behavior of carbon nanotube (CNT) reinforced polymer rectangular plates under in-plane compressive loads is investigated within the framework of shear deformation theory (SDT). First, carbon nanotubes and nanocomposites are defined and general and basic information about their material properties, advantages and application areas is presented. The CNTs play a key role in many industries due to their unique designable properties and replaceable functions. The formation of nanocomposites has advantages such as improving mechanical properties, strength and dimensional stability, as well as increasing electrical conductivity, reducing gas, water and hydrocarbon permeability, fire resistance, thermal stability, chemical resistance and optical sharpness. Micromechanical properties of polymers reinforced with CNTs are modeled mathematically. The SDT has been generalized to nanocomposite plates. After the constitutive relations of the nanocomposite plates are established within the framework of the SDT, the stability and strain compatibility equations are derived as partial differential equations depending on the displacement, Airy stress and two rotation angle functions. From the obtained expressions within the framework of the shear deformation theory, in particular, expressions for the in-plane critical compressive loads of functionally graded carbon nanotube (FG-CNT) patterned polymer plates within the framework of classical plate theory (CPT). In order to prove the accuracy of the obtained expressions, comparisons were made with the numerical results presented in reliable sources in the literature. In the analyzes, polymethyl methacrylate (PMMA) was used as the matrix material forming the rectangular plates and single-walled CNT was used as the reinforcement element. In addition, different volume fraction ratios, four different CNT patterns, four different shear strain shape functions are taken into account. Comprehensive numerical analyzes, comments and generalizations have been made on the numerical behavior of uniaxial and biaxial buckling loads, depending on the ratio of the width to the thickness, the ratio of length to the width of the rectangular plate, and the variation of the load parameter coefficient.

Keywords: Carbon nanotube, functional grade nanocomposites, plates, buckling load, shear deformation theory

2023, 100 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması döneminde, yapıcı öneri ve düzenlemeleriyle bana yardımcı olan tez danışmanım, saygıdeğer hocam, Sayın **Prof. Dr. Abdullah AVEY**'e teşekkürlerimi sunarım.

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

Üsame KAYA
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Çift eksenli basınç yükü altındaki KNT ile güçlendirilmiş polimer dikdörtgen plak ve koordinat sistemi 34
Şekil 3.2. Boyuna basınç yükü altındaki KNT ile güçlendirilmiş dikdörtgen plak ve koordinat sistemi KNT profilli dikdörtgen plakların en kesitleri (a) UD, (b) VD, (c) OD, (d) XD 36
Şekil 3.3. Dikdörtgen plağın şekil değiştirme öncesi ve sonrası durumu 39
Şekil 4.1. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı 62
Şekil 4.2. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı 63
Şekil 4.3. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı 64
Şekil 4.4. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı 65
Şekil 4.5. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı 66
Şekil 4.6. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı 67
Şekil 4.7. KPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 30'a kadar değişimine göre dağılımı 68
Şekil 4.8. KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 30'a kadar değişimine göre dağılımı 68
Şekil 4.9. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı 69
Şekil 4.10. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı 70
Şekil 4.11. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı 71

Şekil 4.12. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 73
Şekil 4.13. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 3'e kadar değişimine bağlı değişimi 73
Şekil 4.14. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 75
Şekil 4.15. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 3'e kadar değişimine bağlı değişimi 76
Şekil 4.16. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 78
Şekil 4.17. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 3'e kadar değişimine bağlı değişimi 78
Şekil 4.18. KPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 79
Şekil 4.19. KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 80
Şekil 4.20. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 81
Şekil 4.21. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 82
Şekil 4.22. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı 83
Şekil 4.23. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin δ parametresinin 0.2'den 1.0'a kadar değişimine bağlı değişimi 85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Kayma deformasyonlu homojen izotropik plakların boyutsuz kritik burkulma yükü ($\bar{P}_{1kdt}^{kr}$) değerlerinin mukayesesi 53

Çizelge 4.2. Homojen ortotropik dikdörtgen plakların boyutsuz kritik yükü değerlerinin Ambartsumian (1964) monografisindeki değerler ile mukayesesi..... 54

Çizelge 4.3. Değişik V_{knt}^{*} 'ler için FD-KNT plakların kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) çalışmasındaki değerlerle karşılaştırılması..... 55

Çizelge 4.4. Değişik kalınlık-en oranı için FD-KNT plakların kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) çalışmasındaki değerlerle karşılaştırılması..... 56

Çizelge 4.5. Nanokompoziti oluşturan bileşenlerin özellikleri ve verimlilik parametreleri..... 56

Çizelge 4.6. $\bar{P}_{1}^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu..... 58

Çizelge 4.7. $\bar{P}_{2}^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu..... 59

Çizelge 4.8. $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu..... 60

Çizelge 4.9. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{1}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi..... 62

Çizelge 4.10. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{2}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi..... 64

Çizelge 4.11. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi..... 66

Çizelge 4.12. $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ basınç yüklerinin kritik değerleri ve burkulma modunun a/b oranına bağlı dağılımı..... 72

Çizelge 4.13. P_{2kdt}^{kr} ve P_{2kpt}^{kr} değerleri ve burkulma modunun a/b oranına bağlı değişimi..... 75

Çizelge 4.14. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun a/b oranına göre değişimi..... 77

Çizelge 4.15. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun δ parametresine bağlı dağılımı..... 84

Çizelge 4.16. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{1}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^{*} 'ye bağlı dağılımı..... 86

Çizelge 4.17. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^* 'ye bağlı dağılımı 88
Çizelge 4.18. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^* 'ye bağlı dağılımı.... 89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a, b	Dikdörtgen plağın boyu ve eni
A_{pq}	Nanokompozitlerin özelliklerine bağlı katsayılar
D_{11}	Geleneksel kompozitin eğilme sertliği
D_0	İzotropik plağın eğilme sertliği
FDM	Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
FD-KNT	Fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp kısaltma
F	Airy gerilme fonksiyonu
$f_q(x,y)(q=1,2)$	Dönme açı fonksiyonları
$\bar{f}_q(q=1,2)$	Dönme açı fonksiyonlarının genlikleri
$\bar{F},\bar{w}$	Çökme ve Airy gerilme fonksiyonlarının genlikleri
h	Plağın kalınlığı
i	Boyuna doğrultudaki dalga sayısını,
j	Enine doğrultudaki dalga sayısını
i_1, j_1	burkulma modu parametreleridir
K	Kayma gerilme katsayısı
KDPT	Kayma deformasyon teorisi kısaltma
KNT	Karbon Nanotüp kısaltma
KPT	Klasik kabuk teorisi kısaltma
$M_{pq}(p,q=1,2)$	Plakta oluşan moment bileşenleri
m_{knt}	KNT'nin kütlesi
$N_{pq}(p,q=1,2)$	Kuvvet bileşenleri
OD	O şeklinde KNT dağılımının sembolü
N_{11}^0, N_{12}^0, N_{22}^0	Momentsiz durumda mambran kuvvetlerdir
P_{kdt}^{kr}	FDPT çerçevesinde kritik yük
P_{1kdt}^{kr}	FDPT çerçevesinde boyutsuz kritik yük
P_{kpt}^{kr}	FDPT çerçevesinde kritik yük
P_{1kpt}^{kr}	FPT çerçevesinde boyutsuz kritik yük
$Q_{pq}(p,q=1,2,,6)$	Nanokompozitlerin özelliklerine bağlı katsayılar
$Q_p(p=1,2)$	Enine kesme kuvvetleri
$r_{pq}(p=4,q=1,2,...,4)$	Malzeme ve plak özelliklerine bağlı katsayıları
u,v, w	Sırasıyla, x, y ve z doğrultularda yerdeğiştirmeler
ÜD	Üniform KNT dağılımının sembolü
VD	V şeklinde KNT dağılımının sembolü
$V_{knt}^{z_1}$, V_m	Sırasıyla KNT ve polimerin hacim fraksiyonları
V_{knt}^*	KNT total hacim oranı
XD	X şeklinde KNT dağılımının sembolü

x, y, z	Koordinat eksenleri
Y_{pq}^{knt}, Y^{m}	KNT ve polimerin Young ve kayma modülleri
Y_{ij}	Nanokompozitin Young ve kayma modülleri
$z_1 = z / h$	Boyutsuz kalınlık koordinatı
δ	Yük parametresi
$\varepsilon_{pq}(p,q=1,2)$	Her hangi noktada gerinim bileşenleri
$\varepsilon_{pq}^{0}(p,q=1,2)$	Orta düzlemdeki gerinim bileşenleri
ν_{12}, ν_{21}	Nanokomozitin Poisson oranları
ν_{12}^{knt} , ν_{12}^{m}	KNT ve polimerin Poisson oranları
ν_{m}	Metalin Poisson oranı
$\lambda_{p}(p=1,2,3)$	Ortotropi katsayıları
ρ^{knt} , ρ^{m}	Sırasıyla KNT ve polimerin yoğunlukları
ρ	Nanokompozitin yoğunlukları
$\tau_{pq}(p,q=1,2)$	Gerilme bileşenleri
$\Gamma(z)$	Enine kayma gerilmelerini karakterize eden fonksiyon
$\bar{\Gamma}(z)$	Enine kayma gerilmeleri karakterize eden boyutsuz fonksiyon
Λ	Plağı tanımlayan üç boyutlu bölge

1. GİRİŞ

Çağımızın başlangıcından günümüze kadar bilim ve teknolojideki nano ölçekli gelişmeler, çeşitli nano ölçekli malzemelerin üretilmesine yol açmış ve üstün fiziksel, optik, elektriksel ve mekanik özelliklerinin keşfedilmesini sağlamıştır. Bu tür nano ölçekli malzemelerden biri olan karbon nanotüpler (KNT), gelişmiş özellikleri nedeniyle modern teknolojinin çeşitli alanlarında büyük ilgi görmüş ve takviye elemanı olarak olağanüstü mekanik özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Qian vd. (2000) çalışmasında, bir matris malzemesine yalnızca %1 (ağırlıkça) KNT eklendiğinde, elde edilen bir kompozit filmin sertliğinin yaklaşık %36-42 ve çekme mukavemetinin %25 artırılabileceğini ortaya koymuştur. Bazı araştırmalarda ise, nanotüplerin tokluk, mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır (Thostenson vd., 2001; Kireitseu vd., 2008; Spitalsky vd., 2009; Joshi, 2011; Wang vd., 2011; Butt vd., 2023).

Nanokompozit malzemelerin üretiminde metal ve seramiklerle kıyasla polimerler, özellikle de termoplastik yapıdaki polimerlerin daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Bunun ana nedeni metal ve seramiklerle kıyasla polimerlerin kolay işlenebilmesi, esnek yapıya ve düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Vurgulamak gerekir ki polimerin ve dolgu malzemelerinin kimyasal özelliklerine, kullanılan polimerin kristal oranına ya da polimer zincirlerinin düzenine bağlı olarak polimer nanokompozit malzemelerin termal, elektriksel, yapısal gibi bazı özellikleri farklılık gösterebilir (Qian vd., 2000; Moaseri vd., 2014; Zhou, 2022; Xiang, 2022).

Nanokompozit malzemelerin uygulamaları ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır (Kurahatti vd., 2010; Mylvaganam ve Zhang, 2012; Liew vd., 2015; Raza vd., 2021; Hawal vd., 2022).

Fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüpler kavramı yaklaşık 15 yıl öncesinde ortaya atıldı ve çok çeşitli görevleri çözmek için yeni ve etkili bir kompozit modeli önerilmiştir (Shen, 2009; Kwon vd., 2011). Bu model FD-KNT yapı elemanlarının davranışlarını araştırmak için önemli bir alan açmış ve tez çalışması söz konusu model esaslarına göre oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında, düzlem içi kuvvet etkisi altındaki FD-KNT desenli polimer plakların burkulma problemi ele alınmıştır. Kenarlarından basınç yüküne maruz nanokompozit plakların burkulma davranışları kayma deformasyon teorisi çerçevesinde araştırılmıştır.

1.1. Tezin Önemi

Yüksek kaliteli malzemelerden biri olan karbon nanotüplerde, nanoteknolojnin gelişimi ile gelişmiş fiber takviyeli eleman olarak önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Havacılık ve uzay uygulamalarında, hafif ve yüksek mukavemetli yapısal malzemelerin arayışı hep güncel olmuş ve temininin yolları aranmıştır.

1991 yılında Iijima tarafından yapılan karbon nanotüpler hakkında çığır açan makale, alanında büyük bir atılım olarak kabul edilmektedir. Bu keşif, olağanüstü mekanik, elektriksel ve termal özellikleriyle KNT'lerin birçok uygulamada kullanılmasının yolunu açmıştır (Iijima, 1991). KNT'ler iki tür olarak sınıflandırılabilir; tek duvarlı karbon nanotüpler ve çok duvarlı karbon nanotüpler (Iijima ve Ichihashi 1993). Diğer geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, KNT'lerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Lu (1997) çalışmasında, yarıçapı 1-2 nm olan tüm KNT'lerin, yaklaşık 1 TPa'da Young modülü ve yaklaşık 0.45 TPa'da kayma modülü ile aynı elastik özelliklere sahip olduğu sonucuna varmıştır. Lau ve Hui (2002), KNT'lerin çelikten 100 kat daha güçlü olduğunu ve aynı anda sadece 1/6'lık özgül ağırlıkla önemli ölçüde daha hafif olduğunu belirtmişlerdir. KNT'ler üstün özellikleri nedeniyle değişik yapı elemanlarında, örneğin kiriş, plak ve kabuklarda kullanılan polimer kompozitlerde donatı olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde karbon nanotüplerle güçlendirilmiş kompozitler (nanokompozitler), olağanüstü özellikleri nedeniyle gelecek vaat eden yeni nesil bir malzeme olarak gelişmiş endüstrilerde çok cazip hale gelmiştir. Nanokompozitler kendini oluşturan fazlardan birinin 100 nanometreden (nm) küçük kompozitler olup iki farklı fazın birleşmesiyle oluşur. Tasarlanabilir eşsiz özellikleri ve değiştirilebilir fonksiyonları nedeniyle birçok endüstride kilit rol oynamaktadır. Nanokompozitlerin oluşturulması mekanik özellikleri, dayanımı ve boyutsal kararlılığı geliştirmenin yanı sıra elektriksel

iletkenliği artırma, gaz, su ve hidrokarbon geçirgenliğini azaltma, yangına dayanımı, termal stabilite, kimyasal dayanım ve optik keskinlik gibi avantajlara sahip olmaktadır.

Uzun yıllardır kompozit malzemeler, denizcilik, inşaat, mekanik, otomotiv ve uçak yapıları gibi ağırlığa duyarlı yapısal uygulamalara hizmet etmek için yüksek özgül mukavemet ve sertlik elde etmek için fiber takviyelerle güçlendirilmiştir. Bu eğilim, günümüzde fiber takviye olarak kullanılan karbon nanotüplerin keşfedilmesine kadar olan süreçte gerçekleştirilmiştir. KNT'lerin matrise eklenmesi, kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini önemli derecede iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu gelişmeler, yeni bir KNT-takviyeli kompozit malzeme tipinin önerilmesine yol açmıştır (Shen, 2012; Liew vd., 2015). Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) malzemeler konseptinden ilham alan KNT ile güçlendirilmiş kompozitler, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler sınıfına aittir. Dolayısıyla, matrisler KNT'ler ile tek eksenli olarak güçlendirilir, eksenel doğrultuda hizalanır ve malzeme özellikleri kalınlık yönünde derecelendirilerek FD-KNT kompozit elde edilir (Shen, 2009). FD-KNT takviyeli kompozitler, temel yapısal bileşenler oluşturan gelişmiş malzemelerdir.

FD-KNT takviyeli kompozit kirişlerin, plakaların ve kabukların mekanik davranışları üzerindeki etkileri araştırmacıların hep ilgi odağı olmuştur. Shen ve Zhang (2010) ve Shen (2012) çalışmalarında bu konu değişik formülasyonlarda incelenmiştir. Aynı metodoloji Shen (2012) tarafından kabuk problemlerini incelemek için genişletilmiştir. Bu çalışmaların hemen ardından 2013-2015 yılları arasında Lei vd. (2013); Liew vd. (2014); Zhang vd. (2014 a; 2014b); Zhang vd. (2015a; 2015b; 2015c; 2015d) FD-KNT ile güçlendirilmiş kompozit plakların değişik problemlerini sayısal yöntemlerle çözmüşlerdir.

Sonraki aşamalarda nanokompozitlerden oluşan değişik yapısal elemanların titreşim ve stabilite problemlerine ait çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir (Wang vd., 2011; Wu ve Li, 2016; Dong ve Li, 2017; Torabi vd., 2019; Zhu vd., 2019; Sofiyev, 2020; Sofiyev vd., 2020a; 2020b; 2020c; Fan vd., 2021; Wang vd., 2021; Avey vd., 2022a, 2022b, 2022c ve 2022d; Rad ve Hosseini, 2022; Sharma vd., 2022; Sofiyev ve Kuruoglu, 2022).

Son yıllarda tez konusu ile ilişkili olan nanokompozitlere ait bazı kitaplar basılmıştır ve bu kitaplar tez konusunun belirlenmesinde ve gelişiminde çok yaralı olmuştur (Visakh ve Morlanes, 2016; Ray, 2018, Kar, 2020; Sharma, 2020; Ginzburg and Hall, 2021; Hoque vd., 2022). Tezin teori kısmında, temel bilgileri içeren plakların genel teorisi ve stabilitesine ilişkin bazı makale ve kitaplardan da yararlanılmıştır (Ambartsumian, 1964; Kienzler, 2004; Aydogdu, 2009; Akhavan vd., 2009; Ugural, 2017; Eslami, 2018; Narayanan, 2019; Jerath, 2020).

1.2. Tezin Amacı

Son yıllarda, geleneksel sürekli mikrofiberler (grafit, cam ve bor gibi) yerine ayrık nano ölçekli karbon nanotüpler, olağanüstü mekanik, termik ve elektriksel özellikleri nedeniyle polimer kompozitlerin performansını artırmak için takviye malzemeleri olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle, kalınlık doğrultusunda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş plak şeklinde yapı elemanları ve onların bileşik elektro-termo-mekanik özellikleri çok dikkat çekmekte olup ve tüm yönleri ile incelenmesi gerekliliği oluşmuştur. Söz konusu özelliklerin yanı sıra KNT takviyeli güçlendirilmiş plak şeklinde yapısal elemanların stabilite ve titreşim problemleri araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve bu alan yeni çalışmalara ilham olmaktadır.

Tez çalışmasında, düzlem içi basınç yükü altındaki karbon nanotüp takviyeli polimer dikdörtgen plakların burkulma problemi kayma deformasyon teorisi çerçevesinde araştırılmıştır. İlk olarak karbon nanotüp ve nanokompozitler tanımlanmış ve özellikleri, avantajları ve uygulama alanları ile ilgili genel ve temel bilgiler sunulmuştur. Karbon nanotüplerle güçlendirilen polimerlerin mikro mekanik özellikleri matematiksel olarak modellenmiştir. Nanokompozit plakların bünyesel bağıntıları oluşturulduktan sonra burkulma ve şekil değiştirme uygunluk denklemleri kayma deformasyon plak teorisi (KDPT) çerçevesinde türetilmiştir. Somut sınır koşulları için yaklaşım fonksiyonları seçilerek burkulma ve şekil değiştirme uygunluk denklemleri çözülmekte ve kritik burkulma yükü için kapalı çözüm elde edilmiştir. Söz konusu ifadeler temel alınarak kritik basınç yükünün minimum değeri burkulma moduna bağlı olarak sayısal olarak elde edilmiştir. KDPT çerçevesinde elde edilen ifadelerden özel halde klasik plak teorisi (KPT) çerçevesinde FD-KNT desenli

dikdörtgen polimer plakların kritik burkulma yükü için ifade özel olarak bulunmuştur. Değişik hacim kesir oranları, KNT desenleri, kayma şekil değiştirmeleri dikkate alınarak çeşitli plak boyutları için kapsamlı sayısal analizler, yorumlar ve genelleştirmeler yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, karbon nanotüplerin üretimi ve uygulaması, nanokompozitlerin üretimi ve uygulamaları, nanokompozit plakların stabilitesi, nanokompozitlere ilişkin temel kitaplar ve plak teorisi ve stabilitesine ait temel kitapların özetleri sunulmuştur.

2.1. Karbon Nano Tüplerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri

Iijima (1991), bu makalesinde C60 ve diğer fullerenler1 formundaki moleküler karbon yapılarının sentezi, grafit karbon plaklarının erişebildiği yapılara yoğun bir ilgi uyandırmıştır. Burada iğne benzeri tüplerden oluşan yeni bir tür sonlu karbon yapısının hazırlanışını bildirmiştir. Fulleren sentezi için kullanılana benzer bir ark deşarjı buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilen iğneler, ark deşarjı için kullanılan elektrotun negatif ucunda büyümektedir. Elektron mikroskobu, her iğnenin, sayıları iki ila yaklaşık 50 arasında değişen, eş eksenli grafit plak tüpleri içerdiğini ortaya koymaktadır. Her tüpte karbon atomu altıgenleri, iğne ekseni etrafında sarmal bir şekilde düzenlenmiştir. Sarmal adım, tek bir iğne içinde iğneden iğneye ve tüpten tüpe değişir. Görünüşe göre bu sarmal yapı büyüme sürecine yardımcı olabilir. Çapları birkaç ila birkaç on nanometre arasında değişen bu iğnelerin oluşumu, karbon yapılarının mühendisliğinin fullerenlerle ilgili olanlardan çok daha büyük ölçeklerde mümkün olması gerektiğini ortaya koyuyor.

Iijima ve Ichihashi (1993), bu bilimsel makalelerinde karbon nanotüplerin çok çeşitli ilginç özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Açık tüplerdeki kılcallık hali hazırda kanıtlanmışken, elektronik yapıları ve mekanik dayanıklılıkları ile ilgili tahminler henüz test edilmeyi beklemektedir. Bu yapıların özelliklerini incelemek için, iyi tanımlanmış morfolojilere, uzunluğa, kalınlığa ve bir dizi eş merkezli kabuğa sahip tüplere ihtiyaç vardır; ancak normal karbon ark sentezi, bir dizi tüp tipi verir. Özellikle, çoğu hesaplama tek duvarlı tüplerle ilgiliyken, karbon ark sentezi neredeyse tamamen çok duvarlı tüpler üretmektedir. Burada, yaklaşık bir nanometre çapında bol miktarda tek duvarlı tüplerin sentezini rapor etmişler. Çok duvarlı nanotüpler karbon katot üzerinde oluşturulurken, bu tek duvarlı tüpler gaz fazında büyümektedir. Tek bir

tüpten elektron kırınımı, daha önce çok duvarlı tüpler için çıkarılan karbon altıgenlerin sarmal düzenlemesini doğrulanmasına izin vermektedir.

Tek ve çok katmanlı nanotüplerin elastik özellikleri ampirik bir model kullanılarak hesaplanır. Nanotüplerin günümüzde en güçlü ve sağlam malzeme olduğu tahmin edilmektedir. Young modülü ve kayma modülü, elmasınkiyle karşılaştırılabilirken yığın modülü neredeyse iki kat daha büyüktür. Elastik modüllerin sarmallık, tüp yarıçapı ve katman sayısı gibi nanotüp yapısının ayrıntılarına duyarsız olduğu gösterilmiştir. Bu alışılmadık özellikler, nanotüplerin çok çeşitli potansiyel uygulamalara sahip olmasını sağlamaktadır (Lu, 1997).

Entegre çok duvarlı karbon nanotüp-karbon fiber (KF) hibrit malzeme, asitle işlevselleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin KF yüzeyinde elektroforetik biriktirilmiş, ardından toluen içinde %10'luk bir petrol zift çözeltisine batırılarak piroliz ile imal edilmiştir. Nitrojen atmosferinde çok duvarlı karbon nanotüplerin KF yüzeyini tamamen kapladığı ortaya çıkmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüplerin KF hibritleri ile güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik özellikleri, alınan KF'lerle güçlendirilmiş kompozitlere kıyasla gerilme mukavemetinde %120'ye ve elastik modülde %100'e kadar iyileştirilmiştir. Fraktografi gözlemlerine göre, epoksi matrisi ve çok duvarlı karbon nanotüplerin KF hibritleri arasında sağlam bir kenetlenme meydana gelmiştir (Moaseri vd. 2014).

Xiang (2022), bilimsel araştırmasında karbon nanotüp, özellikle tek duvarlı CNT, olağanüstü özelliklere sahiptir ve yüksek performanslı elektronikler de dâhil olmak üzere birçok üst düzey uygulamada kullanılabilir olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, bir KNT'nin atomik düzeni, bant yapısını belirleyerek atomik hassasiyette üretimi bu malzemenin geliştirilmesi için en önemli konulardan biri haline getirmektedir. Bu perspektifte KNT'nin atomik hassasiyette üretiminin tarihi ve mevcut durumu hakkında bir özet verilmiş ve atomik olarak kesin KNT'lerin üretimini "fabrikasyondan" "üretmeye" götürebilecek olası yolların yanı sıra kalan zorlukların ana hatları verilmiştir.

Nano ölçekli çapa ve ultra pürüzsüz hidrofobik yüzeye sahip karbon nanotüpler, akış geliştirme, güçlü iyon dışlama, ultra hızlı proton taşınması ve faz geçişi gibi birçok

egzotik özelliğe yol açan güçlü sınırlama ve olağandışı su-karbon çifti sağlamaktadır. Zhou vd. (2022), yaptıkları incelemelerde, CNT tabanlı nano akışkan cihazların imalatındaki son gelişmelere, onların özelliklerine ve uygulamalarına odaklanmaktadır.

Butt vd. (2023), bu çalışmada, tüm polimer matrislere evrensel uygulanabilirliği olan elektriksel ve termal olarak iletken termoset nanokompozitlerin üretimi için bağlayıcı içermeyen, sağlam ve güvenli bir malzeme olarak önceden birleştirilmiş tek duvarlı karbon nanotüpler önermektedir. Briketlerin, referans örneklerle karşılaştırıldığında nanokompozitlerde benzer performans sağladığı kanıtlanmaktadır. Kapsamlı yöntem setleri kullanarak, çok çeşitli tek duvarlı karbon nanotüpler yoğunlaşmalarında tüm numune türleri için elektriksel (tek duvarlı karbon nanotüp yüklemesine bağlı olarak ~10−7-1 S/cm) ve termal (0,210–0,304 W/mK) iletkenliklerde önemli farklılıklar gözlemlenmemektedir. Ayrıca, tek duvarlı karbon nanotüpler briketleri için nanokompozitlerin süzülme eşikleri ultra düşük ve önceden dağıtılmış ana partilerinkine yakın olduğu gözlemlenmiştir (ağırlıkça %0.001-0.003). Önceden pekiştirilmiş edilmiş tek duvarlı karbon nanotüp tozunun, tek duvarlı karbon nanotüp tozu/aerojel için kullanım sırasında masterbatch üretiminin veya aerosolizasyonun daha yüksek fiyatı ve düşük dağılabilirlik gibi yaygın nanotüp dezavantajlarından muafken, aynı nihai işlevsel özellikleri sağladığı gösterilmiştir. Briketler, kişisel ve tesis düzeyinde güvenlik önlemleri ihtiyacını ortadan kaldırarak yalnızca büyük ölçekli imalat için güvenli bir çözüm sunmakla kalmaz, aynı zamanda bunu önemli bir maliyet artışı olmadan da yapar, herhangi bir polimer matrisi ve ilgili endüstriyel işleme yolu ile herhangi bir kayıp olmaksızın kullanılabilir. Bu, onları tüm kompozit endüstriyel üretimler ve küçük ölçekli düşük sermayeli laboratuvarlar için evrensel olarak çekici kılmaktadır.

2.2. Karbon Nano Tüp Takviyeli Polimer Malzemelerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri

Çok duvarlı karbon nanotüpler, nanotüplerin bütünlüğünü bozmadan basit bir çözelti-buharlaştırma yöntemi ile polistiren matrisler boyunca homojen olarak dağılmıştır. Kompozit filmler üzerindeki çekme testleri, ağırlıkça %1 nanotüp ilavesinin, elastik modül ve kırılma geriliminde sırasıyla %36-%42 ve ~%25 artışla sonuçlandığını ve

nanotüp-matris arayüzü boyunca önemli yük aktarımına işaret ettiğini göstermektedir. Yerinde transmisyon elektron mikroskobu çalışmaları, kompozit deformasyon mekanizmaları ve çok duvarlı nanotüpler ile polimer matris arasındaki arayüzey bağı hakkında bilgi sağlamıştır (Qian vd. 2000).

Yaklaşık on yıl önce Iijima tarafından ilk gözlemlerinden bu yana, karbon nanotüpler önemli araştırmaların odak noktası olmuştur. O zamandan beri çok sayıda araştırmacı, bu yeni karbon formu için dikkate değer fiziksel ve mekanik özellikler bildirdi. Karbon nanotüpler, benzersiz elektronik özelliklerden ve elmastan daha yüksek bir termal iletkenlikten sertlik, dayanıklılık ve esnekliğin mevcut herhangi bir malzemeyi aştığı mekanik özelliklere kadar, temelde yeni malzeme sistemlerinin geliştirilmesi için muazzam fırsatlar sunmaktadır. Özellikle, düşük yoğunlukları ile birlikte karbon nanotüplerin istisnai mekanik özellikleri, nanotüp takviyeli kompozit malzemelerin geliştirilmesi için geniş bir kapsam sunmaktadır. Olağanüstü özgül sertliğe ve dayanıklılığa sahip karbon nano tüplerle güçlendirilmiş nanokompozitlerin potansiyeli, 21. yüzyılda uygulama için bizlere muazzam bir fırsat sunmaktadır. Bu makale, karbon nanotüpler ve bunların kompozitlerindeki son gelişmelerin kısa bir incelemesini sunmaktadır. Karbon nanotüplerin yapısı ve işlenmesi ile karbon nanotüplerin ve bunların kompozitlerinin karakterizasyonu ve özellik modellemesi hakkında literatürde bildirilen araştırma çalışmaları takip edilmekte ve incelenmektedir. (Thostenson vd. 2001).

Lau ve Hui (2002), çalışmalarında, karbon nanotüplerin keşfinden bu yana, kimya, fizik, malzeme bilimi ve mühendisliği ile elektrik ve elektronik mühendisliği alanlarında nanotüplerle ilgili kapsamlı araştırmalara giderek daha fazla yer verilmektedir. Son derece küçük bir fiziksel boyuta (çap ≈1 nm) ve altıgen kafes düzenine ve kiral vektörüne bağlı olarak pek çok benzersiz mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olan nanotüpler, nanokompozit yapılar için ideal lifler olarak uygun görülmektedir. Nanotüplerin, sırasıyla 1 TPa ve 200 GPa kadar yüksek teorik Young modülü ve çekme mukavemeti ile dikkat çekici mekanik özelliklere sahip olduğu ortaya koyulmuştur. Nanotüpler yüksek oranda kimyasal ek olduklarından ve kırılma olmaksızın yüksek gerilimi (%10-30) sürdürebildikleri için, nanotüple ilgili yapıların ultra küçük elektronik devreler oluşturmak için nano enstrüman için tasarlanabileceği ve güçlü, hafif olarak kullanılabileceği öngörülebilir. Burada, karbon nanotüpler ve

nanotüp kompozitler üzerine yapılan son araştırmalar ve uygulamalar gözden geçirilmektedir. Nanotüp/polimer kompozitlerin arayüzey bağlanma özellikleri, mekanik performansı ve güvenilirliği elbette tartışılacaktır.

Karbon nanotüpler uzun zamanlardan günümüze kadar bilinen en sert ve en güçlü insan yapımı malzeme olarak kabul edilmektedir. Ek olarak, yüksek elektriksel iletkenlikleri, elektrikli ev aletleri ve iletişimle ilgili uygulamalar alanında ilgi uyandırmıştır. Bununla birlikte, küçük boyutlarından dolayı, bu nano-yapıların mükemmel özelliklerinden ancak bir dizi mühendislik polimeri tarafından sunulanlar gibi hafif matrislerin içine homojen bir şekilde gömülürlerse yararlanılabilir. Dolgu maddelerinin karbon nanotüpler olduğu polimer nanokompozit araştırmalarının mevcut durumunu takip etmekteyiz. Mühendislik polimeri matrislerine kimyasal afinitelerini arttırmak için, grafit yan duvarların ve uçların kimyasal modifikasyonu gereklidir. Bu incelemede, polimerlerin karbon nanotüpler üzerine aşılanması ve karbon nanotüp/polimer nanokompozitlerin üretimi için çeşitli kimyasal stratejilerin genişletilmiş bir açıklaması verilmektedir. Çeşitli karbon nanotüp içeriklerine sahip bir dizi nanokompozitin bugüne kadarki mekanik ve elektriksel özellikleri de, ortaya çıkan bu alanda ilerlemeyi kolaylaştırmak amacıyla gözden geçirilmiştir (Spitalsky vd. 2009).

Kireitseu vd. (2008), bu makalelerinin odak noktası, karbon nanotüp takviyeli kompozit yapıların termal püskürtme üretimine ve deneysel doğrulamasına yönelik olup, işleme rotası ve tasarım kavramları sağlar. Sandviç metal-polimer-seramik kaplamalar ve karbon nanotüplerle kalıplanmış polimer kompozitler, eğilme testlerinde ve +200 °C ile -80 °C sıcaklık arasındaki termal döngüde incelenmiştir. Karbon nanotüpler, polimer parçacıkları arasındaki arayüzleri güçlendirmek, kompozit sertliği ve yapısal sönümlemeyi arttırmak için kullanılmıştır. Kompozit sandviçlerin sönümleme davranışı ve darbe tokluğuna ilişkin sonuçlar, CNT ile güçlendirilmiş numunelerin geniş bir sıcaklık aralığında gelişmiş darbe dayanımı ve titreşim sönümleme özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Kompozit katmanlarla titreşen kenetlenmiş kiriş kullanılarak yapılan deneyler, kompozitin yoğunluğunda bir miktar azalma (%20-30) ile doğal sönümleme seviyesinde %200'e kadar artış ve sertlikte %30'a kadar artış göstermiştir. Nanotüpler ve kompozit katmanlar arasındaki çapraz bağlar, ağ içindeki yük transferini iyileştirmeye hizmet ederek sertlik

özelliklerini iyileştirdi. Sonuçlar, havacılık ve uzay mühendisliğindeki uygulama için hedeflenmiştir.

Savunma teknolojilerinde ilerleme sağlamak için nanoteknolojik gelişmeler, potansiyel fırsatlar sunmaktadır. Bu fırsatların birkaç on yıl içinde gerçekleşmesi muhtemel olsa da, özellikle savunma uygulamaları için birçok avantajları günümüzde araştırılmaktadır. Bu inceleme, akıllı malzemeler, daha sert/daha hafif platformlar, yeni yakıt kaynakları ve depolamanın yanı sıra yeni tıbbi uygulamaları içeren nanokompozitlerin sunduğu yetenekler hakkında bir fikir vermektedir. Polimer tabanlı nanokompozit malzemeleri, nano ölçekli dolgu maddelerini içerir ve nanokompozit malzemelerin savunmada fiili ve potansiyel kullanımlarını pratik örneklerle sunmuştur (Kurahatti vd. 2010).

Kwon vd. (2011), işlevsel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp ile güçlendirilmiş alüminyum (Al) matris kompozitler, bir toz metalürjisi yolu ile başarıyla imal edildiğini makalesinde vurgulamıştır. Farklı miktarlarda KNT ilavesi içeren gradyan katmanları, farklı mikroyapılar ve sertlikler sergilemiştir. Her katman, ciddi gözenekler veya mikro çatlaklar olmadan iyi bir yapışma göstermiştir. Her bir KNT gradyan katmanının verimli tasarımıyla toplu kompozitin özellikleri kontrol edilmiştir. İşlevsel olarak derecelendirilmiş malzeme kavramı, Al-KNT nanokompozitlerinin üretilmesi için uygulanabilir bir yaklaşım sunmuştur.

Karbon nanotüpler, muazzam uygulamalara sahip yüksek performanslı kompozitlerin ideal takviyeleri olarak kabul edilmiştir. Bu yazıda, uzun ve kısa dalgalı karbon nanotüplere sahip 3 boyutlu temsili bir hacim elemanı kullanılarak dalgalı karbon nanotüplerin esneklik ve mukavemet yönleri gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri nanokompozitler için araştırılmaktadır. Karbon nanotüp, şeklinde bir miktar eğrilik olan sürekli içi boş silindirik şekilli elastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Karbon nanotüplerin dalgalılığının etkisi ve parametreleri incelenmiştir. Düz karbon nanotüpler için eksenel yükleme altında temsili hacim elemanlarının farklı geometrileri için etkili malzeme özelliklerini zorlamak için sayısal denklemler kullanılır. Dalgalılığın nanokompozitlerin etkili takviyesini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Etkili modüller dalgalılığa karşı çok hassastır ve dalgalılığın artmasıyla bu hassasiyet azalır. Kısa karbon nanotüpler söz konusu olduğunda, belirli

bir dalgalılık indeksi değerine kadar artan bir eğilim gözlenir. Çekme mukavemeti analizi, dalgalılık indekslerinin artan değerlerine karşı mukavemetin azalma eğilimi gösterdiğini göstermektedir. RVE'nin geometrisinin de karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin gücünü etkilediği bulunmuştur. Simülasyon, altıgen temsili hacim elemanı ile düz karbon nanotüplere uygulanmış ve sonuçların, önerilen modeli doğrulayan karışımlar kuralı sonuçlarıyla tutarlı olduğu bulunmuştur (Joshi vd. 2011).

Mylvaganam ve Zhang (2012), bu çalışmalarıyla gösteriyorlar ki, karbon nanotüpler, yüksek mukavemetleri, yüksek en boy oranları ve mükemmel termal ve elektrik iletkenlikleri nedeniyle kompozit yapımında karbon fiberlerin yerine kullanılmaktadır. Karbon nanotüpler on yıldan fazla bir süre önce keşfedilmiş olmasına rağmen, karbon nanotüplerle güçlendirilmiş tatmin edici kompozitlerin hazırlanmasına yönelik çalışmalarda zorluklarla karşılaşılmıştır. Bu inceleme, nano-elektronik cihazlarda ve uzayda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan elektriksel iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve radyasyon tespiti gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik karbon nanotüp-polimer kompozitlerin imalatına ilişkin bazı tescilli patentleri ve tıbbi unsurlar ilgili belgeleri tartışmaya sunmuştur.

Liew vd. (2015), bu yazılarıyla anlaşılıyor ki, işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) ile ilgili araştırma faaliyetleri son yıllarda hızla artmıştır. Karbon nanotüplerin üstün özellikleri, yani yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek en-boy oranı ve düşük yoğunluk, onları kompozit malzemeler için mükemmel bir takviye haline getirmiştir. FDM kavramından esinlenerek, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) takviye modeli, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit (FD-KNTTK) malzemeler için uygulanmıştır. Bu makale, FD-KNTTK ile ilgili konuları belirlemeye ve vurgulamaya çalışmakta ve bu konularda bildirilen son araştırma çalışmalarını gözden geçirmektedir. Mevcut inceleme, (i) karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemenin kısa bir tanıtımı; (ii) FD-KNTTK'in mekanik analizinin gözden geçirilmesi ve (iii) FD-KNTTK'deki son gelişmeler ve geleceği hakkında ayrıntılı bir tartışma konularını içermektedir.

Şu anda, iletken polimerler, benzersiz özellikleri ve iyonik iletkenlik, elektroanalitik teknik, optik şeffaflık, metal benzeri iletkenlik, çevresel kirleticilere duyarlı malzemeler ve mekanik esneklik gibi önemli uygulamaları nedeniyle büyük ilgi

uyandırmaktadır. Hem ticari hem de diğer temel bakış açılarından özel iletken nanokompozit türlerinin hazırlanması için iletken polimerlerin kullanımında hız kazanılmasına acil bir ihtiyaç vardır. Geleneksel malzeme hazırlama prosedürleri, kör belirleme, numune hazırlama, ölçümleme, kalifiye operatör ihtiyacı, zaman alan teknikler, evrensel olmayan yaklaşımlar ve yüksek maliyet gibi çeşitli eksikliklerden muzdariptir. Bu gözden geçirme makalesinin amacı, sürekli ve farklı gelişmiş malzeme izleme ve diğer önemli uygulamalar için iletken polimer tabanlı nanokompozitlerin üretimi ile ilgili ayrıntıları sağlamaktır. Özellikle, ekosistemde bulunan çevresel kirleticilerin ortadan kaldırılması için iletken polimerlerin nanokompozitlerinin tasarımına, sınıflandırılmasına ve geliştirilmesine ve bunların uygulamalarına dikkat edilmiştir. Biyomedikal, enerji, fotokataliz, çevre ve sensör uygulamaları açısından iletken polimerlerin ve nanokompozitlerin önemli uygulamaları ve sentez yolları öncelikle vurgulanmakta, çünkü bunların hepsi yakından ilişkili alanlardır ve geniş çapta araştırılmıştır. Ayrıca, imalat, hammadde kaynakları ve yeni geliştirilen yaklaşımlardaki bazı önemli temel araştırma eğilimleri tartışılmakta ve yeni araştırma yönleri vurgulanmaktadır (Raza vd. 2021).

Bir nano dolgu maddesi olarak grafen, birçok uygulama için polimer nanokompozitlerde büyük önem kazanmıştır. Grafenin mekanik, elektriksel ve termal alanlarla ilgili çekici özellikleri, gerekli özellikleri elde etmek için polimerleri güçlendirmenin verimli bir yolunu sunmuştur. Polimerlerin kullanımındaki artış bu eğilimi desteklemekte ve araştırmacıları çok işlevli uygulamalar için gizli nanokompozit malzeme bolluğunu kazmaya teşvik etmiştir. Bu derlemede, piller, havacılık, uzay, otomobil ve biyomedikal alanları gibi çeşitli alanlarda yoğun bir şekilde kullanılan grafen tabanlı malzemeler hakkında genel bir gözlem sunulmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından polimer kompozitlerde bir nano dolgu maddesi olarak grafenin kullanımının artmasıyla birlikte, türleri, işleme yöntemleri, grafen nanokompozitlerin geliştirilmesindeki güncellemeleri özümsemek için uygun uygulamalarla vurgulanmıştır (Hawal vd. 2022).

2.3. FD-KNT Takviyeli Polimer Yapı Elemanlarının Burkulmasına İlişkin Kaynak Özetleri

Avey vd. (2022a) yapmış oldukları bu çalışmada, kayma deformasyon teorisi çerçevesinde iki parametreli elastik temel ve termal ortamın karbon nanotüp desenli kompozit konik duvarların burkulma davranışları üzerindeki birleşik etkileri incelenmiştir. Nanokompozit konik kabuğun uçlarında serbestçe desteklendiği ve malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmaktadır. Elastik temeller üzerindeki KNT desenli kesik konik duvarların temel denklemlerinin türetilmesi, Donnell duvar teorisine dayanmaktadır. Galerkin yöntemi, elastik temeller ve termal ortamlarda KNT desenli kesik konik duvarların kritik sıcaklık ve eksenel burkulma yükleri için ifadeleri bulmak için temel denklemlere uygulanır. Elastik temellerin ve termal ortamların varlığında, KNT paternlerinin, hacim kesirlerinin ve konik duvarların özelliklerinin KDT içindeki burkulma yükü üzerindeki etkilerinin klasik kabuk teorisi ile karşılaştırılarak tahmin edilebilir.

Teknolojideki devrim niteliğindeki ilerlemeler, yük taşıyan elemanlar olarak tasarlanan silindirik duvarlar gibi, yüksek sıcaklıklarda çalışan ve özellikleri konuma bağlı olan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit yapı elemanlarının kullanılmasına yol açmıştır. Teknolojideki bu ilerlemeler, bu tür unsurları güvenilir bir şekilde uygulamak için tasarım zamanında geliştirilmiş teoriler kullanılarak gerçekleştirilecek yeni matematiksel modelleme ve güncellenmiş sayısal hesaplamalar gerektirir. Bu çalışmanın temel amacı, karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş kompozit silindirlerin termoelastik stabilite problemini, kayma deformasyon teorisi çerçevesinde üniform bir termal yükleme altında matematiksel olarak ve analitik bir çözümle modellemektir. KNT desenli silindirik duvarların temel ilişkileri oluşturulurken enine kayma deformasyonlarının etkisi dikkate alınır ve temel kısmı diferansiyel denklemler (PDE'ler), değiştirilmiş Donnell tipi duvar teorisi içinde türetilir. PDE'ler Galerkin yöntemi ile çözülür ve fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit silindirik duvarların özdeğeri (kritik sıcaklık) için formül bulunur. KNT modellerinin, hacim fraksiyonunun ve geometrik parametrelerin ST içindeki kritik sıcaklık üzerindeki etkileri, sonuçların klasik teori (KPT) içinde karşılaştırılmasıyla tahmin edilir (Avey vd. 2022b).

Avey vd. (2022c), bu makaledeki çalışmalarına göre, kayma deformasyon teorisi (ST) çerçevesinde karbon nanotüp desenli kompozit konik duvarların termoelastik stabilitesini sunmaktadır. Çalışma iki farklı sınır değer problemi içermektedir. Malzeme özellikleri sıcaklıktan bağımsız olduğundan, kesik konik kabuğun termal yük altında olduğu varsayılır ve malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olduğunda, konik kabuğun eksenel sıkıştırma yükü altında olduğu varsayılır. Değiştirilmiş Donnell tipi duvar teorisi, KNT desenli kesik konik duvarlar için temel denklemleri türetmek için kullanılır. Galerkin yöntemi, KDT çerçevesinde KNT desenli bileşik kesik konik duvarların kritik sıcaklık ve kritik eksenel yük ifadelerini bulmak için temel denklemlere uygulanır. KNT modellerindeki değişikliklerin, hacim fraksiyonunun, yarıçap-kalınlık ve uzunluk-kalınlık oranlarının yanı sıra yarı tepe açısının KDT içindeki kritik parametreler üzerindeki etkisi, KPT ile karşılaştırılarak tahmin edilebilir.

Avey vd. (2022d), bu çalışmalarında net bir şekilde göstermişler ki, karbon nanotüp kaynaklı katmanlardan oluşan orta kalınlıkta lamine konik duvarların termal burkulma probleminin çözümünü sunmaktadır. Lamine kesik konik kabuğun üniform sıcaklık artışına maruz kaldığı varsayılmaktadır. Donnell tipi duvar teorisi, yönetici denklemleri türetmek için kullanılır ve Galerkin yöntemi, kayma deformasyon teorileri çerçevesinde burkulma sıcaklığının ifadesini bulmak için kullanılır. Analiz bölümünde parabolik enine kayma gerilimi (Par- EKK), kosinüs-hiperbolik kayma gerilimi (Cos-Hyp- EKK) ve düzgün kayma gerilimi (U-EKK) gibi farklı enine kayma gerilimi fonksiyonları kullanılmıştır. Formülasyonun mevcut literatüre göre doğrulanmasından sonra, çeşitli enine kayma gerilmesi fonksiyonları ve klasik kabuk teorisi kullanılarak KNT modellerinin, tabakaların sayısının ve düzeninin tekdüze burkulma sıcaklığı (UBS) üzerindeki etkilerini araştırmak için birkaç parametrik çalışma gerçekleştirilir.

Fan vd. (2021) bu makalelerinde, yapmış oldukları mevcut araştırmanın birincil amacı, yerel olmama ve gerinim gradyan boyutu bağımlılıklarının varlığında, gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzemeden (PFDM) yapılmış mikro/nano-plakların doğrusal olmayan burkulma ve burkulma sonrası özelliklerini analiz etmektir. Bu amaca uygun olarak, çeşitli gözeneklilik dağılım modellerine sahip PFDM mikro/nano-plakların etkili mekanik özelliklerini tahmin etmek için değiştirilmiş bir gözenekliliğe bağlı güç kanunu fonksiyonu kullanılmıştır.

Yapılandırılmış doğrusal olmayan yerel olmayan gerinim gradyan problemini çözmek için, verimli bir ayrıklaştırma tekniği olarak düzgün olmayan rasyonel B-spline (NURBS) tabanlı izogeometrik analiz kullanılır. Geometrik doğrusal olmama durumu hesaba katılarak ve burkulma sonrası rejimin daha derin kısmına gidilerek, hem yerel olmama hem de gerinim gradyanı boyut bağımlılıklarının öneminin azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, malzeme özelliği gradyan indeksinin arttırılmasıyla, burkulma sonrası bölgenin daha derin kısımlarında daha belirgin olan, yerel olmayan ve gerinim gradyan boyutu etkilerinde bir artış bulunmuştur. Ek olarak, bir mikro/nano-plak için, gözeneklilik indeksinin değerinin boyut bağımlılıklarının önemi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu ve bu gözlemin her iki tip basit mesnetli ve kenetlenmiş sınır koşulları için aynı olduğu gösterilmiştir.

Dong ve Li (2017) bu makalelerinde, termal yüke maruz kalan sıcaklığa bağlı fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen plaklar için eğilme, burkulma ve titreşimin birleşik bir doğrusal olmayan analitik çözümünü sunmaktadırlar. Orta düzlem gerilmesinden kaynaklanan geometrik doğrusal olmama dikkate alınır. FD plaklarının malzeme özelliklerinin sıcaklıklara ve bileşenlerin hacim oranlarına göre değiştiği varsayılır. Mevcut literatürde yeni önerilen yüksek mertebeli kayma deformasyonu teorileri tasnif edilmiş ve birleşik bir uygulama verilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) etkili malzeme özelliklerini açıklayan üç tür matematiksel model, P-FD, S-FD ve E-FD modelleri tartışılmaktadır. Son olarak, birleştirilmiş doğrusal olmayan analitik çözüme dayalı olarak, malzeme heterojenliği, termal yük ve plak geometrisinin FD plaklarının bükülmesi, burkulması ve titreşimi üzerindeki etkileri incelenir. Sonuçlar, lineer olmayan çözümün eğilme tepkilerinde kayma gerilmesinin hesaplanmasında daha iyi doğruluk sergilediğini ortaya koymaktadır. Termal yük, FD plağının eğilme, burkulma ve titreşiminin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Ek olarak, FDM'lerin etkili malzeme özelliklerini simüle etmek için bu üç tür matematiksel modelin özellikleri sayısal olarak karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

Bu yazıda, element içermeyen kp-Ritz yöntemi kullanılarak tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit plakların serbest titreşim analizi sunulmaktadır. Tek eksenli olarak hizalanmış tek duvarlı karbon nanotüplerin farklı dağılım türleri dikkate alınır. Fonksiyonel olarak

derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin malzeme özelliklerinin, karbon nanotüplerin hacim fraksiyonunun birkaç doğrusal dağılımına göre kalınlık yönü boyunca derecelendirildiği varsayılır. Yönetim denklemleri, birinci dereceden kayma deformasyon plak teorisine dayanmaktadır ve iki boyutlu yer değiştirme alanları, ağsız çekirdek parçacık fonksiyonları tarafından yaklaşık olarak tahmin edilmektedir. Çeşitli tipteki plaklarının serbest titreşim analizi için mevcut yöntemin kararlılığını ve doğruluğunu doğrulamak için yakınsama ve karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Hesaplamalı simülasyonda, çeşitli plak tiplerinin doğal frekansları ve mod şekilleri üzerindeki karbon nanotürü hacim fraksiyonu, plak genişliği-kalınlık oranı, plak en-boy oranı ve sıcaklık değişiminin etkilerini analiz etmek için birkaç örnek sunulur ve sonuçları eşit dağılımlı KNTTK plakları da karşılaştırma için sağlanmıştır. Sınır koşullarının etkisi de incelenmiştir (Lei vd. 2013).

Liew vd. (2014), yapmış oldukları bu çalışmayla, eksenel sıkıştırma altında karbon nanotüp takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik panellerin burkulma sonrası analizini sunmuşlardır. Alan değişkenleri için çekirdek parçacık yaklaşımlarına dayalı olarak, ayrıklaştırılmış yönetici denklemleri elde etmek için Ritz yöntemi kullanılmıştır. Silindirik paneller, farklı dağılım türleri ile kalınlık yönü boyunca derecelendirildiği varsayılan tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiştir. KNTTK-FD silindirik panellerin etkili malzeme özellikleri, genişletilmiş karışım kuralına dayanan bir mikromekanik model aracılığıyla tahmin edilmektedir. Çok ince bir silindirik panel için kayma kilitlenmesini ortadan kaldırmak için, sistemin eğilme sertliği, stabilize edilmiş uyumlu düğüm entegrasyon şeması ile değerlendirilir ve membranın yanı sıra kayma terimleri, doğrudan düğüm entegrasyon yöntemiyle hesaplanır. Bu çalışmada, burkulma sonrası yolu izlemek için değiştirilmiş Newton-Raphson yöntemiyle birleştirilmiş yay boyu yöntemi kullanılmıştır. Çeşitli parametrelerin KNTTK-FD silindirik panellerin burkulma sonrası davranışları üzerindeki etkilerini araştırmak için detaylı parametrik çalışmalar yapılmış ve karşılaştırma için düzgün dağılımlı ve KNTTK-FD silindirik panel sonuçları verilmiştir.

Rad ve Hosseini (2022), bu makalelerinde, çok katmanlı fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli silindirlerin burkulma analizi için Carrera birleşik formülasyonu (CUF) geliştirmiştir. Bu amaçla ilk adım olarak silindirik koordinat

sisteminde CUF elde edilir. Daha sonra, elemandan bağımsız Galerkin yöntemi çerçevesinde her bir katmanda sanal çalışma ilkesinden yer değiştirmeye dayalı CUF türetilir. Her bir CNT takviyeli katmanın mekanik özellikleri, değiştirilmiş Halpin-Tsai (H-T) mikromekanik modeli ve karışım kuralı kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu modelde, KNT'lerin dalgalılığı, interfazı ve aglomerasyonu, KNT'lerin geometrik ve işleme özellikleri açısından etkileyen faktörler kullanılarak açıklanır. Radyal yön boyunca farklı düzenlemelere (dağılımlara) sahip birkaç güçlendirilmiş katmandan oluşan dört tip laminat, silindirin burkulma kapasitesi üzerindeki katman düzenlemesinin etkisini incelemek için dikkate alınmıştır. Önerilen CUF-EFG formülasyonları ve çözüm yöntemi, mevcut burkulma yüklerini homojen ince silindirler için teorik formülle elde edilenlerle karşılaştırarak doğrulanmıştır. KNT'lerin ağırlık fraksiyonunun, dalgalılığının, topaklaşmasının ve arayüzlerin, katmanların dağılımının, güç yasası indeksinin, yarıçap-kalınlık oranının, uzunluk-yarıçap oranının ve sınır koşullarının etkilerini araştırmak için KNTTK-FD silindirin kritik burkulma yükleri üzerinde bir parametrik çalışma yürütülür. Sonuçlar, çok çeşitli en boy oranlarına sahip fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli silindirlerin burkulma analizi için önerilen kullanılan yöntemin yüksek performansını göstermektedir.

Torabi vd. (2019), bu yazılarında, yüksek dereceli kayma deformasyonu plak teorisine dayalı olarak, fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit plakların farklı şekillerinin termal burkulmasını araştırmak için varyasyonel çerçevede birleştirilmiş sayısal formülasyon geliştirmiştir. Termal ortamın karbon nanotüplerin malzeme özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğundan, sıcaklığa bağlı (TD) termo-mekanik malzeme özellikleri dikkate alınır. Yönetici denklemleri sunmak için, plak yapısının enerji fonksiyonelinin ikinci dereceden formu türetilir ve bunun ayrıklaştırılmış karşılıkları, varyasyonel diferansiyel kareleme (VDQ) yaklaşımı kullanılarak sunulur. Ayrıklaştırılmış hareket denklemleri nihayet Hamilton prensibine dayalı olarak elde edilir. Düzensiz fiziksel alanda diferansiyel dörtlü sayısal operatörlerin uygun şekilde uygulanması için, haritalama prosedürü geleneksel sonlu eleman formülasyonuna göre değerlendirilir. Önerilen yaklaşımın geçerliliğini ve etkinliğini göstermek için bazı karşılaştırma ve yakınsama çalışmaları yapılmıştır. Farklı şekilli KNTTK-FD plaklarının termal burkulma davranışını analiz etmek için çok çeşitli sayısal sonuçlar da rapor edilmiştir.

Sharma vd. (2022) tarafından oluşturulan mevcut bu çalışmalarında görüyoruz ki, fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüplerin takviyeli plaklarının burkulma ve serbest titreşim özellikleri, ters hiperbolik kayma deformasyon teorisi çerçevesinde gerçekleştirilir. FG CNT malzemesi, PmPV matrisini ve tek duvarlı karbon nanotüpleri takviyesini oluşturur. Ayrıca, bileşenlerin (PmPV matrisi ve KNT) malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Plağın kalınlığı boyunca KNT'lerin çeşitli dağılım türleri bu çalışmada ele alınmıştır, yani tek biçimli dağılım, FG-V, FG-O ve FG-X. Genişletilmiş karışım kuralı, KNT'lerle güçlendirilmiş plağın etkin malzeme özelliklerini hesaplamak için kullanılır. Yönetim denklemleri, yer değiştirme alanı, gerinim-yer değiştirme ilişkisi ve kurucu denklemin sanal iş ilkesine uygulanmasıyla geliştirilir. Navier tipi kapalı form çözümü, yönetici denklemleri çözmek için kullanılır. KNTTK-FD takviyeli plakların burkulma ve titreşim tepkisi için geliştirilen denklem MATLAB'da kodlanmıştır.

Shen (2009), bu makalesinde, termal ortamlarda enine düzgün veya sinüzoidal bir yüke maruz kalan tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş, basit bir şekilde desteklenen, işlevsel olarak derecelendirilmiş nanokompozit plakların doğrusal olmayan bükülmesi üzerine bir araştırma sunmaktadır. KNT'lerin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır ve moleküler dinamik simülasyonlarından elde edilir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılır ve bir mikromekanik model aracılığıyla tahmin edilir. Yönetim denklemleri, Von Kármán tipi bir kinematik doğrusal olmayan daha yüksek dereceli bir kayma deformasyon plak teorisine dayanır ve termal etkileri içerir. Yük-sehim ve yük-eğilme momenti eğrilerini belirlemek için iki adımlı pertürbasyon tekniği kullanılır. Sayısal gösterimler, KNTTK-FD plaklarının farklı termal çevre koşulları altındaki doğrusal olmayan bükülme tepkisi ile ilgilidir; bu tepkiden, karşılaştırıcılar olarak tekdüze dağılmış KNTTK-FD plakları için sonuçlar elde edilir. Sonuçlar, plağın yük-bükme momenti eğrilerinin, işlevsel olarak derecelendirilmiş bir takviyenin bir sonucu olarak önemli ölçüde artırılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan bükülme özelliklerinin sıcaklık artışından, düzlem içi sınır koşullarının karakterinden, enine kayma deformasyonundan, plak en-boy oranından ve ayrıca nanotüp hacim oranından önemli ölçüde etkilendiği doğrulanmıştır.

Termal burkulma ve burkulma sonrası davranış, düzlem içi sıcaklık değişimine maruz kalan tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit plaklar için sunulmuştur. KNT'lerin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır ve moleküler dinamik simülasyonlarından elde edilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılır ve bir mikromekanik model aracılığıyla tahmin edilir. Çok ölçekli yaklaşıma dayalı olarak, nanotüp hacim fraksiyonlarının farklı değerleri altında mükemmel ve kusurlu, geometrik olarak orta düzlem simetrik KNTTK-FD plakları ve düzgün dağılmış KNTTK-FD plakları için sayısal çizimler gerçekleştirilir. Sonuçlar, fonksiyonel olarak kademeli bir takviyenin bir sonucu olarak burkulma sıcaklığının yanı sıra plağın termal burkulma sonrası mukavemetinin artırılabileceğini göstermektedir. Bazı durumlarda, orta nanotüp hacim fraksiyonuna sahip KNTTK-FD plağının, orta burkulma sıcaklığına ve ilk termal burkulma sonrası mukavemetine sahip olmadığı bulunmuştur (Shen ve Zhang, 2010).

Termal burkulma sonrası analiz, düzgün bir sıcaklık artışına maruz kalan tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş nanokompozit silindirik duvarlar için sunulmuştur. KNT'lerin tekdüze bir düzen ile hizalı ve düz olduğu varsayılır. İki tür karbon nanotüple güçlendirilmiş kompozit duvar, yani düzgün dağılmış (UD) ve işlevsel olarak derecelendirilmiş takviyeler ele alınmıştır. KNTTK-FD'lerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılır ve bir mikromekanik model aracılığıyla tahmin edilir. Yönetim denklemleri, Von Kármán tipi bir kinematik doğrusal olmama ile daha yüksek mertebeden kayma deformasyonu teorisine dayanmaktadır. Termal etkiler de dâhil edilir ve KNTTK-FD'lerin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Çok ölçekli yaklaşıma dayalı olarak, nanotüp hacim fraksiyonlarının farklı değerleri altında mükemmel ve kusurlu, FD- ve UD- KNTTK duvarları için sayısal çizimler gerçekleştirilir. Sonuçlar, duvarın burkulma sıcaklığının yanı sıra termal burkulma sonrası mukavemetinin, işlevsel olarak derecelendirilmiş bir takviyenin bir sonucu olarak artırılabileceğini göstermektedir. Çoğu durumda, orta nanotüp hacim fraksiyonuna sahip KNTTK duvarının, orta burkulma sıcaklığına ve ilk termal burkulma sonrası mukavemetine sahip olmadığı bulunmuştur (Shen, 2012).

Sofiyev vd. (2020a) bu çalışmalarında göstermişler ki, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit konik duvarların burkulma davranışı burada, birleşik bir eksenel/yanal veya eksenel/hidrostatik yükleme koşulu altında birinci dereceden kayma deformasyon teorisi aracılığıyla araştırılmaktadır. Burada iki tip KNTTK- konik kabuk ele alınmaktadır, yani, kalınlık boyunca mekanik özelliklerin doğrusal bir varyasyonu ile tekdüze bir dağılım veya fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir donatı dağılımı. Problemin temel denklemleri burada türetilir ve seçilen yapı için kritik birleşik yüklemeyi belirlemek üzere Galerkin prosedürü kullanılarak kapalı bir formda çözülür. İlk olarak, önerilen formülasyonun güvenilirliği ve mevcut literatüre göre sonuçların doğruluğu kontrol edilir. Yapısal tepkinin KNT'lerin geometrisine, orantılı yükleme parametresine, dağılım tipine ve hacim fraksiyonuna duyarlılığını kontrol etmeyi amaçlayan sistematik bir araştırmayı takip etmektedir.

Sofiyev vd. (2020b) yapmış oldukları bu çalışmayla, elastik temeller (ET'ler) ve karbon nanotüp (KNT) takviyesinin kesik konik duvarların (KKK'ler) hidrostatik burkulma basıncı (HBB) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Birinci dereceden kayma deformasyon teorisi, ilk kez ET'lere dayanan KNT'lerle takviye edilmiş KKK'lerin burkulma problemine genelleştirilmiştir. KNT'lerle güçlendirilmiş kompozit KKK'lerin malzeme özellikleri, kalınlık koordinatına göre doğrusal olarak derecelendirilir. Winkler elastik temeli (W-ET) ve Pasternak elastik temeli (P-EF) EF olarak kabul edilir. EF'ler üzerinde KNT'lerle güçlendirilmiş KKK'lerin temel ilişkileri ve denklemleri FOSDT çerçevesinde elde edilmiş ve Galerkin yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmadaki yeniliklerden biri, ET'ler üzerinde KNT'ler ile güçlendirilmiş KKK'lerin HBP'si için kapalı formda bir çözüm elde etmektir. Son olarak, ET'lerin ve çeşitli KNT takviyelerinin HBB üzerindeki etkileri eş zamanlı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir.

Bu çalışmada, fonksiyonel dereceli ve üniform dağılmış karbon nanotüp takviyeli kompozit kaplamalarla kaplanmış sandviç konik duvarların dış basınçlar altındaki stabilitesi gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüp ve matrisin mekanik özelliklerinin, üç tip derecelendirme kuralı aracılığıyla kaplamaların kalınlığı aracılığıyla derecelendirildiği varsayılmaktadır. Karbon nanotüplerle güçlendirilmiş sandviç

konik duvarların temel ilişkileri ve kararlılık denklemleri, modifiye edilmiş Donnell tipi duvar teorisi ve genelleştirilmiş birinci dereceden kayma deformasyonu teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Galerkin prosedürü, dış burkulma basınçlarının ifadelerini tanımlamak için kullanılır. Önerilen formülasyonun doğruluğu için sonuçlar literatürde yayınlanan sonuçlarla karşılaştırılır. Kompozit kaplamalardaki karbon nanotüplerin desen tipine ve hacim fraksiyonuna yapısal tepkinin hassasiyetini kontrol etmeyi amaçlayan sistematik bir çalışmayı takip eder (Sofiyev vd. 2020c).

Sofiyev (2020) yapmış olduğu bu çalışmada heterojen karbon nanotüp takviyeli kompozit kesik konik kabukların titreşimi ve kararlılığını incelemiştir. Bu çalışmanın ana özelliği, titreşim ve kararlılık problemlerinin analitik bir çözümünü elde etmek için birinci dereceden kayma deformasyonu teorisini karbon nanotüp takviyeli kompozit kesik konik kabuklara genişletmektir. Karbon nanotüp takviyeli kompozit kesik konik kabukların dinamik kararlılık denklemleri Galerkin yöntemi uygulanarak çözülmüştür. Karbon nanotüp takviyeli kompozit kesik konik kabukların frekansı ve kritik eksenel yükü için ifadeler elde edilir. Sayısal hesaplamalarda, KNT'lerin heterojenliğinin ve hacim fraksiyonunun karbon nanotüp takviyeli kompozit kesik konik kabukların frekansı ve kritik eksenel yükü üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Sofiyev ve Kuruoglu (2022) yapmış oldukları bu çalışmanın ana amacı, iki parametreli elastik temel (TP-Et) üzerinde duran hidrostatik basınç ve eksenel sıkıştırmanın birleşik yüklemesine maruz kalan KNT'lerle güçlendirilmiş konik kabukların burkulma analizini araştırmaktır. Duvar-temel etkileşimini içeren genelleştirilmiş birinci dereceden kayma deformasyonu duvar teorisine dayanan, KNT'lerle güçlendirilmiş konik kabukların yönetici denklemlerini türetmeye yönelik ilk girişimlerden biridir. Genişletilmiş karıştırma kuralını benimseyerek, doğrusal dağılımlara sahip kNT'lerle güçlendirilmiş konik kabukların etkin malzeme özellikleri, bazı verimlilik parametreleri getirilerek yaklaşık olarak hesaplanır. Matristeki üç karbon nanotüp dağılımı, yani üniform dağılım (U) ve V ve X-tipi lineer dağılım dikkate alınmıştır. Stabilite denklemleri, burada seçilen yapının birleşik burkulma yüklerini (BBY'ler) belirlemek için Galerkin prosedürü kullanılarak çözülür. Sayısal çizimler, T-P-EF varlığında KNT'ler tarafından güçlendirilmiş konik kabukların BBY özelliklerini kapsar. Son olarak, BBY'ler üzerindeki temel parametrelerinin, karbon

nanotüplerin hacim fraksiyonunun ve takviye türlerinin etkilerini incelemek için bir parametrik çalışma gerçekleştirilir.

Zhang vd. (2014a), bu çalışma ile birlikte karbon nanotüp takviyeli kompozit silindirik panellerin eğilme dayanımı ve serbest titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli olarak hizalanmış takviyelerin dört tip dağılımı, panellerin kalınlık yönü boyunca düzgün ve üç çeşit işlevsel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp dağılımı olarak kabul edilir. Nanokompozit panellerin malzeme özellikleri, Eshelby-Mori-Tanaka yaklaşımına dayanan eşdeğer bir süreklilik modeli kullanılarak tahmin edilmektedir. Yönetim denklemleri, birinci dereceden kayma deformasyon duvar teorisine dayalı olarak geliştirilmiştir. Karbon nanotüplerin hacim fraksiyonunun, kenar-yarıçap oranının ve kalınlığın panellerin eğilme mukavemeti ve serbest titreşim tepkileri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak için detaylı parametrik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca karbon nanotüplerin farklı sınır koşulları ve dağılım tiplerinin etkileri incelenmiştir.

Zhang vd. (2014b), bu çalışmalarında ise, tekdüze nokta enine mekanik yükleme altında karbon nanotüp takviyeli fonksiyonel dereceli silindirik panellerin geometrik olarak doğrusal olmayan büyük bir sapma davranışı incelenmiştir. Analiz, iki boyutlu yer değiştirme yaklaşımları için şekil fonksiyonlarını oluşturmak üzere çekirdek parçacık fonksiyonu ile kp-Ritz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilir. Birinci dereceden kayma deformasyon duvar teorisine dayalı olarak, Von Kármán gerinimleri şeklini alan geometrik doğrusal olmama ile doğrusal olmayan yönetim denklemleri geliştirilir. Karbon nanotüplerin eksenel yönde tek eksenli olarak hizalandığı ve silindirik panellerin kalınlık yönünde işlevsel olarak derecelendirildiği varsayılmaktadır. Ortaya çıkan panellerin etkili malzeme özellikleri, Eshelby-Mori-Tanaka yaklaşımına dayanan eşdeğer bir süreklilik modeli kullanılarak tahmin edilmektedir. Sistemin bükülme sertliğini değerlendirmek için stabilize edilmiş uyumlu bir düğüm entegrasyon şeması kullanılır ve çok ince bir silindirik panel için kayma kilitlenmesini ortadan kaldırmak için doğrudan düğüm entegrasyon yöntemiyle kayma terimlerinin yanı sıra membran da hesaplanır. KNT takviyeli panellerinin doğrusal olmayan tepkileri üzerinde karbon nanotüplerin hacim fraksiyonunun, yayılma açısının, kenar-yarıçap oranının ve kalınlığın etkilerini ortaya çıkarmak için

birkaç sayısal örnek problem incelenmiştir. Ayrıca, farklı sınır koşullarının ve karbon nanotüplerin dağılım şeklinin etkileri de incelenmiştir.

Tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit üçgen plakların bilinen ilk serbest titreşim özellikleri sunulmuştur. Plakların enine kayma deformasyonunun etkisini açıklamak için birinci dereceden kayma deformasyon teorisi kullanılır ve sayısal hesaplama için elemandan bağımsız IMLS-Ritz yöntemi kullanılır. Üçgen nanokompozit plaklar, tek eksenli hizalanmış tek duvarlı karbon nanotüplerin farklı dağılım tipleri dikkate alınarak incelenmiştir. Fonksiyonel dereceli karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin malzeme özelliklerinin, karbon nanotüplerin hacim fraksiyonunun doğrusal dağılımlarına göre kalınlık yönü boyunca derecelendirildiği varsayılır. Bu tür FD-KNTK üçgen plaklar için mevcut sonuçlar bulunmadığından, karşılaştırmalar yalnızca farklı açılara ve kalınlık-genişlik oranlarına sahip izotropik üçgen plaklarla yapılabilir. Mevcut yöntemin kararlılığı ve doğruluğu yakınsama çalışmaları ile gösterilmiştir. Çeşitli FD-KNTK üçgen plakları için yeni titreşim frekansı parametreleri ve mod şekilleri sunulmaktadır. Ayrıca karbon nanotüp hacim oranı, plak kalınlığı-genişlik oranı, plak en-boy oranı ve sınır koşulunun plağın titreşim davranışı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu yeni sonuçlar gelecekteki çalışmalar için bir ölçüt görevi görebileceği ifade edilmiştir (Zhang vd. 2015a).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit eğimli plaklar için bir dizi bilinen ilk titreşim frekansları ve mod şekilleri sunulmaktadır. Enine kayma deformasyonunun etkisini dâhil etmek için birinci dereceden kayma deformasyon teorisi kullanılırken orta derecede kalın eğik plaklar dikkate alınır. Alan değişkenleri için IMLS yaklaşımı kullanılarak, problemin ayrıklaştırılmış özdeğer denklemi Ritz prosedürü yoluyla türetilir. Dolayısıyla titreşim çözümleri, özdeğer problemini çözerek elde edilebilir. FD-KNTK eğik plaklar, tek eksenli hizalanmış tek duvarlı karbon nanotüplerin farklı dağılımları dikkate alınarak incelenir. FD-KNTK'lerin malzeme özelliklerinin, karbon nanotüplerin hacim fraksiyonunun doğrusal bir dağılımına göre kalınlık yönü boyunca derecelendirildiği varsayılmaktadır. IMLS-Ritz yönteminin kararlılığını ve doğruluğunu belirlemek için yakınsama çalışmaları yapılır. Bu tür FD-KNTK eğik plaklar için mevcut sonuçlar bulunamadığı için, karşılaştırma çalışmaları sadece izotropik durumda yapılabilir. Bu

karşılaştırma çalışmalarından yakın bir uyum bulunmuştur. Karbon nanotüp hacim oranı, plak kalınlığı-genişlik oranı, plak en boy oranı ve sınır koşulunun FD-KNTK eğik plakların titreşim özellikleri üzerindeki etkisi incelenir. Bilinen bu ilk titreşim sonuçlarının gelecekteki çalışmalar için bir referans olması beklenmektedir (Zhang vd. 2015b).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit kalın eğik plakların burkulma davranışı incelenmiştir. KNT'ler, eksenel yönde tek eksenli olarak hizalanmış olarak güçlendirilmiştir. Nanokompozitlerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılır. Sayısal analiz için element içermeyen IMLS-Ritz yöntemi kullanılır. Teorik formülasyon, birinci dereceden kayma deformasyon teorisini kullanarak enine kayma deformasyonu ve döner atalet etkilerini birleştirmiştir. IMLS-Ritz yönteminin sayısal kararlılığını ve doğruluğunu göstermek için birkaç sayısal örnek seçilmiştir. IMLS-Ritz sonuçlarının geçerliliği literatürdeki bilinen verilerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Farklı sınır koşulları altında çeşitli KNT dağılımları, KNT oranları, eğik plaklar, en-boy oranları ve kalınlık-yükseklik oranları için parametrik çalışmalar yapılır. Burkulma özelliklerine ilişkin parametrik çalışmalarda bazı sonuçlar çıkarılmıştır (Zhang vd. 2015c).

Winkler temelleri üzerine oturan tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş nanokompozit plakların burkulma davranışını incelemek için element içermeyen geliştirilmiş hareketli en küçük kareler-Ritz (IMLS-Ritz) yöntemi önerilmiştir. Birinci dereceden kayma deformasyon teorisi, plakların kayma deformasyonunun etkisini açıklamak için kullanılır. IMLS, iki boyutlu yer değiştirme alanının oluşturulması için kullanılır. Orta kalınlıkta plaklar için enerji fonksiyoneli türetilir. Ritz yöntemi ile fonksiyonel enerjiyi en aza indirerek, elastik matris üzerindeki fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit plakların kritik burkulma yükü için çözümler elde edilmiştir. Winkler modülü parametresinin kritik burkulma yükleri üzerindeki etkisini incelemek için sayısal deneyler yapılmıştır. Sınır koşulunun, plak kalınlığı-genişlik oranının, plak en-boy oranının kritik burkulma yükleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Üst ve alt yüzeyleri KNT bakımından zengin olan FD-KNT takviyeli kompozit plakların en yüksek kritik burkulma yüklerine sahip olduğu bulunmuştur (Zhang vd. 2015d).

Zhu vd. (2019) bu makalelerinde, fonksiyonel derecelendirilmiş plakların statik eğilme, serbest titreşim ve burkulma davranışlarını incelemek için izogeometrik analize (IGA) dayalı yeni bir logaritmik yüksek dereceli kayma deformasyon teorisi (LHSDT) sunmaktadırlar. Sıcaklık değişim koşulları dikkate alınır. LHSDT tarzında, plakların üst ve alt yüzeylerindeki kayma gerilmeleri kaybolur ve kayma düzeltme faktörü kaybolur. LHSDT açısından C1-süreklilik gerekliliği, IGA formülasyonumuzda temel işlevler olarak hizmet eden, tekdüze olmayan rasyonel B-spline'ın (NURBS) doğal yüksek dereceli sürekliliğinin yardımıyla doğrudan elde edilir. Önerilen yöntemin üstün performansı ve doğruluğu, kapsamlı sayısal örneklerle gösterilmiştir. Önerilen teoriden hesaplanan statik eğilme, titreşim ve burkulma sonuçları, çeşitli plak teorileri ve farklı çözme yöntemleri ile elde edilen literatürde bulunan referans çözümlerle çok iyi bir uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

Wang vd. (2011) bu çalışmaları ile birlikte, saf PMMA ve PA-6 nanolifli membranlar ile birlikte PA-6 çekirdekli ve PMMA duvarlı kompozit nanolifli keçeler elektroeğirme yoluyla elde edilmiştir. İki tür şeffaf kompozit, sırasıyla, aynı işleme koşulu altında ve aynı miktarda PA-6 nanolif içeriği ile kompozit nanolif keçelerin ve PMMA nanolifli membranlarla geçmeli saf PA-6'nın sıcak presleme tabakaları tarafından imal edilmiştir. İki şeffaf kompozitin çekme özellikleri ve görünür ışık geçirgenlikleri karakterize edilmiştir. Kompozit nanofiber matlardan elde edilen kompozitlerin hem çekme davranışı hem de görünür ışık geçirgenliğinin, geçmeli saf PA-6 ve PMMA nanolifli membranlardan elde edilen muadillerinden daha iyi olduğu bulunmuştur. Şeffaflıkta %10'dan daha az olan küçük bir kayıpla, kompozit nanoliflerden şeffaf bir kompozit için gerilme modülünde ve gerilme mukavemetinde yaklaşık %20'lik bir maksimum artış kabul edilmiştir. Daha az verimli olmasına rağmen, taramalı nanolifli membranlardan elde edilen kompozitlerin çekme dayanımlarının tümü, saf PMMA nanoliflerinden işlenen şeffaf bir panelinkinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Wang vd. (2021) bu yazılarında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit dörtgen plağın termal titreşimini ve burkulmasını ağsız yöntem kullanarak araştırmaktadırlar. Donatıların kalınlık yönü boyunca dört dağılımı ele alınmıştır; bunlar, düzgün dağılımlar (UD), VD, OD ve XD'dir. Young modülü, kütle yoğunluğu, Poisson oranı ve termal genleşme katsayıları dâhil olmak üzere karşılık

gelen etkili malzeme özellikleri, boyut bağımlılığını açıklayan KNT verimlilik parametreleri ile karışım kuralı ile tahmin edilir. Termal etkilerin dikkate alındığı birinci dereceden kayma deformasyon teorisi kullanılır. Hamilton ilkesine ve hareketli en küçük kareler (MLS) yaklaşımına dayalı olarak, plağın titreşimi için ayrı yönetim denklemleri türetilmiştir. Düzenli ve düzensiz plakların sıcaklık etkisi olan ve olmayan serbest titreşimleri sırasıyla ele alınmış ve karşılık gelen doğal frekanslar ve mod şekilleri özdeğer problemi ile elde edilmiştir. Tek eksenli ve çift eksenli mekanik ve termal burkulmanın kararlılık analizi de daha sonra yapılır. CNTRC dörtgen plağın burkulma davranışları üzerindeki hacim oranı, dağılım modeli, geometrik özellikler ve sıcaklığın etkileri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Reissner'in karışık varyasyon teoremine dayanan sonlu prizma yöntemlerinin (FPM'ler) birleşik bir formülasyonu, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli kompozit plakların ve lamine fiber takviyeli kompozit plakların üç boyutlu (3D) serbest titreşim analizi için geliştirilmiştir; bunların kenar koşulları, bir çift karşılıklı kenarın basitçe desteklendiği ve diğer çiftin serbest, kenetlenmiş veya basitçe desteklenen kenarların kombinasyonları olabileceği şekilde dikkate alınmıştır. Tek duvarlı karbon nanotüpler ve polimer, plağını üretmek için sırasıyla takviye ve matris olarak kabul edilmiştir. KNT'lerin kalınlık yönünde değişen dört farklı dağılımı (yani düzgün dağılımlı ve FG V-, eşkenar dörtgen- ve X-tipi varyasyonlar) dikkate alınmış ve plağın etkili malzeme özelliklerinin kalınlık dağılımları karışımlar kuralı kullanılarak belirlenmiştir. Formülasyonda, plak x alanında bir dizi sonlu prizmaya bölünmüştür; burada trigonometrik fonksiyonlar ve Lagrange polinomları sırasıyla her bir prizmanın birincil değişkenleri için y yönü ve x düzlemi varyasyonlarını enterpole etmek için kullanılır ve kalınlık koordinatındaki çeşitli birincil değişkenlerin genişlemesi için kullanılan ilgili mertebeler serbestçe seçilebilir. Basit mesnetli, CNTRC plakların ve lamine FRC plakların frekans parametrelerinin sekiz ve dokuz düğümlü ikinci dereceden FPM çözümlerinin, literatürde mevcut olan kesin 3D çözümlerle ve çeşitli sınır koşullarına sahip bu plaklar için ANSYS yazılımı kullanılarak elde edilenlerle mükemmel bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir (Wu ve Li, 2016).

2.4. Tez Konusuna İlişkin Nanokompozitlere Ait Kitapların Özetleri

Basit kapasitörlerden süper kapasitörlere kadar olan temelleri kapsamaktadır. Çeşitli modern süperkapasitör malzemelerinin özelliklerini karşılaştırır ve kıyaslar. Süperkapasitörlerin çeşitli uygulamalarını ve gelecekteki gelişim eğilimlerini vurgulamaktadır (Kar, 2020).

Sharma (2020) kitabının içeriği şu şekildedir: Kondansatörün özellikleri: temel yönler. kapasitörden süper kapasitöre. Geçiş metal oksitlerinin özellikleri. Aktif karbonun özellikleri. Grafen/indirgenmiş grafen oksit özellikleri. Karbon nanotüplerin özellikleri. Karbon nanoliflerin özellikleri. İletken polimerlerin özellikleri. Süper kapasitörler için elektrot malzemelerinin özellikleri. Elektrolitlerin özellikleri. Süper kapasitörler için ayırıcı malzemelerin özellikleri. Süper kapasitörler için akım alıcı malzemelerin özellikleri. Süper kapasitörlerin uygulamaları. BIOVIA Materials Studio, Lammps ve Gromacs kullanılarak Nanokompozitlerin Moleküler Dinamik Simülasyonu, nanokompozitlerin moleküler dinamik simülasyonu için kullanılan üç ana yazılım paketini sunmaktadır. Kitap, bu paketlerin her birinin nasıl kullanılacağını ayrıntılı olarak açıklamakta ve ayrıca her birinin ne zaman kullanılması gerektiğini gösteren gerçek dünyadan örnekler vermektedir. Bunlardan son ikisi, modelleme için ücretsiz olarak kullanılabilen açık kaynaklı kodlardır. Metal matris, polimer matris ve seramik matris tabanlı nanokompozitler dâhil olmak üzere nanokompozitlerin çeşitli özelliklerini tahmin etmek için her bir yazılım paketinin nasıl kullanıldığı çeşitli örnek çalışmaları sunmaktadır. Araştırılan özellikler mekanik, termal, optik ve elektriksel özellikleri içermektedir. Bu, Materials Studio, Lampps ve Gromacs'ı aynı yerde kullanma metodolojilerini araştıran ilk kitaptır. Moleküler dinamik simülasyonu alanında çalışan öğrenciler, araştırmacılar ve bilim insanları için faydalı olacağı düşünülmektedir (Sharma, 2020).

Ginzburg and Hall (2021), bu kitaplarında potansiyel yeni malzemelerin özel özelliklerini tahmin etmek ve ayarlamak için en iyi uygulamaları sunmaktadır. Geniş ilgi için modelleme metodolojisini ayrıntılı örneklerle birleştirmektedir. Akademik ve endüstri perspektiflerini bir araya getirmektedir. Kitap, Polimer Referans Etkileşim Yeri Modeli (prısm) Polimer Nanokompozitlerinin Teorisi ve Moleküler Simülasyon Çalışmaları, Polimer Nanokompozitlerin Yoğunluk Fonksiyonel Teorisine Dayalı

Modellemesi, Polimer Nanokompozitlerin Kaba Taneli Modellemesi, Alan-teorik Simülasyonlar, Polimer-nanoparçacık Arayüzünde Polimer Dinamiği, Model Polimer Nanokompozitlerde Nanoparçacık Çevresindeki Arayüzey Katmanları ve Yapısal Gevşeme ve Cam Geçişine Etkisi, Çok Ölçekli Modelleme Örnekleri: Perspektif Yakıt Hücreleri ve Akış Pilleri İçin Yeni Polielektrolit Nanokompozit Membranlar, Moleküler Dinamik ile Tüylü Nanoparçacık Tertibatlarının Mekaniğine Yönelik Araştırmalar, Sürekli Mekaniğe Dayalı Yaklaşım Kullanarak Mekanik Özellikleri Tahmin Etme, Mikro-mekanik ve Sonlu Eleman Analizi, Polimer-inorganik Nanokompozitlerin Termal İletkenliğinin Modellenmesi. Polimer Nanokompozitlerin Optik ve Elektriksel Özelliklerini Tahmin Etmek, Lastik Bileşimi İçin Veriye Dayalı Çok Ölçekli Bilim: Yöntemler ve Gelecek Yönelimleri gibi bölümleri içermektedir.

Nano malzemeler, en az bir uzunluk boyutunun 100 nanometrenin altında olduğu malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu boyut aralığında, bu malzemeler makro ölçekte mevcut olmayan belirli - ve ayarlanabilir - optik, elektriksel veya mekanik özellikler sergilemektedir. Bu da malzeme, kimya, fizik ve biyoloji arayüzünde birçoğu ticari alana girmiş olan çok sayıda uygulamaya olanak sağlamaktadır. Nanomalzemeler, zorunlu olarak nanometre rejiminde olmayan diğer malzemelerle karıştırıldığında, elde edilen nanokompozitler, örneğin, artan termal ve mekanik stabilite açısından gelişmiş bir performansa yol açan, tek başına yığın malzemeden önemli ölçüde farklı özellikler sergileyebilir (Visakh ve Morlanes, 2016).

Ray (2018) kitabında polimer işlemeye ve bunun nanokompozitlerin yapısı, özelliği ve performansı üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Polimer karışımlı nanokompozitlerde nanoparçacıkların rolünü açıklar. Elektrospinning gibi gelişmekte olan teknolojileri ele alır. Kitap, Ticari Polimerlere Dayalı Nanokompozitlerin İşlenmesi, Mühendislik Polimerlerine Dayalı Nanokompozitlerin İşlenmesi: Poliamidler ve Poliimidler, Kauçuk Nanokompozitler: İşleme, Yapı-özellik İlişkileri, Uygulamalar, Zorluklar ve Gelecek Eğilimler, Termoset Bazlı Nanokompozitlerin İşlenmesi, Sürdürülebilir Polimer Nanokompozitlerin İşlenmesi, Polimer Karışımlarının İşlenmesi; eriyik bileşim; nanopartiküllerin karışım morfolojisi ve reolojisi üzerindeki etkisi; üçlü sistemlerde reaktif işleme; morfoloji-özellik ilişkileri; performans ve uygulama zorlukları; ve fırsatlar ve gelecek eğilimler, Elektrospun Polimer Nanokompozitler gibi bölümleri içermektedir.

Gelişmiş polimer nanokompozitler: bilim teknolojisi ve uygulamaları, bilim, teknoloji ve gelişmiş uygulamalarla ilgili temel kavramlardan yeni ve gelişmekte olan araştırma sonuçlarının ayrıntılı bir incelemesini sunmaktadır. Bölümler, hafif ve yüksek mukavemetli otomotiv parçalarına yönelik artan talep, gıda, içecek ve içecek endüstrilerinde sürdürülebilir ambalaj malzemeleri ve lezzetin korunması ihtiyacı ve balistik koruma, yangın geciktirme ve elektromanyetik koruma gibi savunma girişimleri gibi temel faktörleri kapsamaktadır. En ileri araştırmalarda çalışan uluslararası yazarların katkılarıyla hazırlanan bu kitap, malzeme bilimcileri, kimyagerler, imalatçılar ve polimer mühendisleri için temel bir referans kaynağı olacaktır. Nanoteknolojideki son gelişmeler sayesinde, araştırmacılar artık atomları kullanarak hayatımızı yaşama biçimimizi değiştiren malzemeler ve ürünler ortaya koyabilirler. Bu malzemeler, gerilme mukavemeti, darbe ve çizilme direnci, elektriksel ve termal iletkenlik, termal kararlılık ve yangına dayanıklılık gibi gelişmiş özelliklere sahiptirler (Hoque vd. 2022).

2.5. Tez Konusuna İlişkin Olan Plakların Genel Teorisi ve Stabilitesine İlişkin Kitapların Özetleri

Ambartsumian (1964) kitabı anizotrop plakların kayma deformasyon çerçevesinde titreşim ve stabilite problemlerine ilikin ilk kaynaklardan biridir. Kitap dört bilimden ibaret olup, birinci bölüm anizotropik cisimlerin elastisite teorisinin denklemlerini içerir, ikinci bölümde anizotropik plakların genel teorisi sunulmaktadır, üçüncü bölümde anizotropik plakların gerilme ve deformasyon durumu tanımlanır ve sonuncu dördüncü bölümde plakların bazı stabilite ve titreşim problemleri çözülmüştür.

Bu makale, elastik temel üzerinde basit bir şekilde mesnetlenmiş iki karşılıklı kenar üzerinde düzgün ve doğrusal olarak dağılmış düzlem içi yüklemeye maruz kalan dikdörtgen Mindlin plakalarının burkulma analizi için kesin çözümleri sunmaktadır. Diğer iki kenara serbest, basit mesnetli ve kenetlenmiş sınır koşullarının herhangi bir kombinasyonu verilebilir. Düzlem içi yük altında ve elastik temel üzerine oturan dikdörtgen plakanın karakteristik denklemlerini çıkarmak için, analiz prosedürü, plaka-temel etkileşimi de dâhil olmak üzere birinci dereceden kayma deformasyon etkisini dikkate alan Mindlin plaka teorisine dayanmaktadır. Elastik temel, Winkler modeline kayma tabakası eklenmiş Pasternak modeli olarak ele alınmıştır. Mevcut

kapalı kesin çözümün doğruluğunu ortaya çıkarmak için önce mevcut birkaç veri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha sonra, temel rijitlik katsayılarının ve sınır koşullarının, en-boy oranları, kalınlık-uzunluk oranları ve yükleme faktörleri gibi diğer plaka parametreleriyle birlikte düzlem içi burkulma yükleri için çizelgeler oluşturulmuştur (Akhavan vd., 2009).

Bu çalışmada, yeni bir yüksek mertebeden kayma deformasyonlu lamine kompozit plak teorisi önerilmiştir. Bu teori, ters yöntem kullanılarak 3 boyutlu elastik eğilme çözümlerinden oluşturulmuştur. Mevcut teori, plağın üst ve alt kısmındaki gerilme sınır koşullarını tam olarak karşılamaktadır. Bu teorinin, mevcut beş serbestlik dereceli kayma deformasyon teorileri ile karşılaştırıldığında, eğilme ve gerilme analizi için 3 boyutlu elastisite çözümleri açısından en doğru sonuçları verdiği görülmüştür. Enine kayma gerilmesi sürekliliğine sahip yeni çok katmanlı lamine kompozit yapılar modeli ile lamine kompozit kirişin mekanik davranışı incelenmiştir. Tüm kayma deformasyon teorileri, incelenen problemler için genellikle %2 içinde, makul bir doğrulukla titreşim ve burkulma sonuçlarını tahmin etmektedir (Aydogdu, 2009).

Narayanan (2019) bu kitabında, bir plak kirişin tasarımının çeşitli yönlerini tartışmakta ve kayma işlemindeki ilgili stabilite problemlerine odaklanmaktadır. Prizmatik kiriş flanşlarında ve gemi gövdelerinde karşılaşılan basınçların stabilite problemlerini ele almaktadır. Kitap sekiz bölümden oluşur. Birinci bölümde boyuna ve enine takviyeli plak kirişler; 2. bölümde plak kirişlerin taşıma kapasitesi ağzında açıklıklar bulunan plak kirişlerin nihai kayma kapasitesi, 3. bölümde plak kirişlerde yama yüklemesi 4. bölümde ağ sertleştiricilerinin optimum rijitliği, 5. bölümde sertleştirilmiş plakların nihai kapasitesi basınçta takviye edilmiş plakların taşıma kapasitesi, 6. bölümde kutu kirişlerde kayma gecikmesi, 7. bölümde çift eksenli yüklenmiş plakların basınç dayanımı 8. bölüm doğrudan ve kayma etkileşimi plak panellerde doğrudan ve kayma gerilmelerinin etkileşimi yer almaktadır.

İnşaat, makine ve uzay mühendisliği alanındaki profesyonellerin yanı sıra yapı mühendisliği derslerinde lisans ve yüksek lisans öğrencileri için ideal olan yapıların stabilitesi ve pratik uygulamaları ile ilgili problemlerin çözümü yer almaktadır. Bu kitapta kolon, kiriş, plak ve kabukların stabilitesi ele alınmaktadır. Kitapta ayrıca

okuyuculara kapsamlı açıklamalar ve pratik örneklerle birlikte ayrıntılı matematiksel işlemler sağlamaktadır (Jerath, 2020).

Bu kitap, Eksik Nervürlü Duvarların Hesaplanması, Esnek Olmayan Duvarlar İçin Uyarlanabilir Dalgacık Algoritmaları, Enine Çekirdek Sıkıştırılabilirliğinin Sandviç Duvarların Burkulmasına Etkisi Üzerine, Esnek Yapıların Örtü Simülasyonu, Duvarların Evrensel Dinamik Teorisi, Tutarlı İkinci Dereceden Plak Teorileri Üzerine, 3-D Elastisite Teorisi Modelinden Elde Edilen Gerilmiş Plağın 2-D Modeli, Düzlem Sandviç Yapılar İçin Genelleştirilmiş Çekirdek Çarpıtma ile Esnek Kalınlık Teorisi, İnce Piezoelektrik Aktüatörler ve Sensörler ile Katmanlı Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi Üzerine, Tutarsız Plaklarda Serbest Dalgalar, Kademeli Kare Plakların Elastik Olmayan Davranışı, Sanal Yer Değiştirmeler Prensibinden Elde Edilen Klasik ve Rafine Plak Teorilerinin Bir Değerlendirmesi, Plakların Stokastik Sonlu Elemanlar Analizi, Teori ve Uygulama, Kirchhoff Hipotezleri Olmadan Katı-esnek Duvarların Doğrusal Olmayan Teorisi Üzerine adlı bölümleri içermektedir (Kienzler, 2004).

Ugural (2017) tarafından önerilen bu eserde, lisans ve lisansüstü düzeydeki mühendislik mekaniğine pratik ve erişilebilir yaklaşımıyla dikkat çeken bir kitaptır. Temel kavramları incelemek ve desteklemek için birçok yeni örnek ve uygulama dâhil edilmiştir. Gelişmiş yöntemler, resimlerle birlikte tartışılır ve analiz edilir. Problemler, temel seviyeden daha zorlu seviyeye kadar dikkatlice düzenlenmiştir. Bilgisayar/nümerik yaklaşımlar (sonlu farklar, sonlu elemanlar, MATLAB) tanıtılır ve seçilen açıklayıcı problemler için MATLAB kodu ve bir vaka çalışması dâhil edilir. Bölüm I'de temel bilgiler, temel kavramlar, basit yapı elemanları yer almaktadır. 2. Bölümde, plak eğme teorisi, dairesel plaklar, dikdörtgen plaklar, çeşitli geometrik formlardaki plaklar, sayısal yöntemler, anizotropik plaklar, birleşik yükler altındaki plaklar, büyük plak sapması, plaklarda termal gerilmeler sunulmaktadır. Bölüm 3'te, kabuklarda membran gerilmeleri, kabuk eğilme gerilmeleri, borulara, tanklara ve basınçlı kaplara uygulamalar, genel yükler altındaki silindirik kabuklar ve ek Fourier serisi genişletmeler sunulmaktadır.

Eslami (2018) tarafından öne çıkan bu kitap, eğilme teorisinin tüm ana alanlarının stabilitesini ele alan sekiz bölümden oluşmaktadır. Mekanik ve termal yükler altındaki yapıların stabilitesini ve yapısal, yükleme ve malzeme türlerinin tüm alanlarını

kapsamaktadır. Yapısal elemanın homojen/izotropik bir malzemeden veya fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir malzemeden yapıldığı varsayılabilir. Yapılar burkulma olayını deneyimleyebilir veya burkulma sonrası süreci takip edebilirler. Bu kitapta tüm bu hususlar ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Kitap bağımsız olup, gerekli matematiksel kavramlar ve sayısal yöntemler, okuyucunun bu temel araçlara dayanarak konuları kolayca takip edebileceği şekilde sunulmuştur. Kitap, mekanik ve/veya termal yükler altında yapısal stabilite alanlarında çalışan veya bu alanlara ilgi duyan kişilere yöneliktir. Klasik mekanik ve elastisite teorisinde bazı temel bilgiler gereklidir.

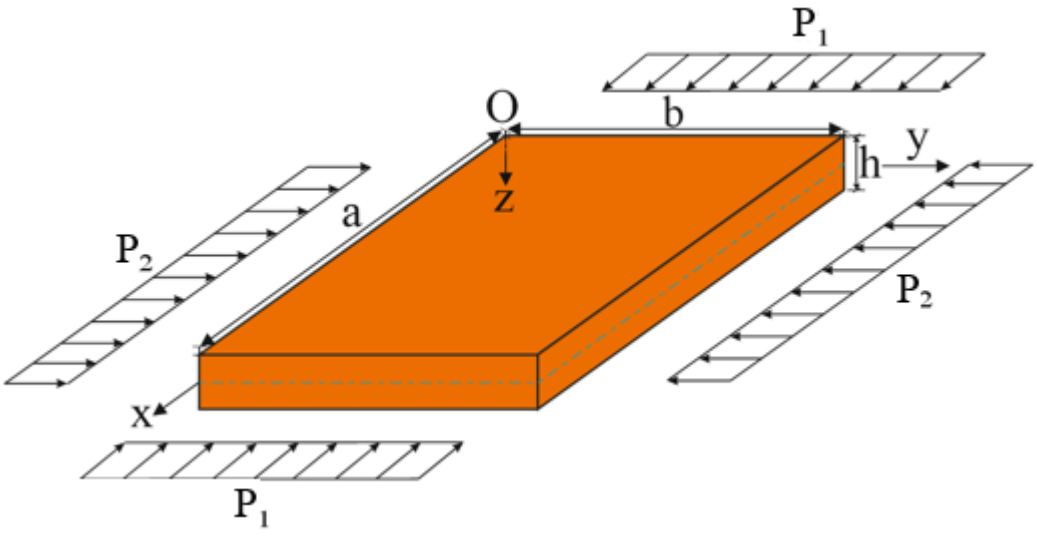
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Problemin Formülasyonu

Kenar uzunlukları sırasıyla a , b , kalınlığı h olan ve orta düzleminde $Oxyz$ koordinat sistemi seçilen KNT ile güçlendirilmiş dikdörtgen plak, çift eksenli basınç yükü etkisine maruz bırakılmıştır (Bkz., Şekil 3.1). Şekil 3.1'den görüldüğü gibi x ve y eksenleri boyuna ve enine doğrultulardaki yönlendirilirken, z ekseni onların düzlemine diktir ve içe dönüktür. x , y ve z eksenleri boyunca yer değiştirmeler sırasıyla u, v ve w ile gösterilmektedir. Nanokompozit plakanın malzeme özellikleri konuma $(z_1 = z/h)$ bağlıdır. Şekil 3.1'de P_1 üniform basınç yükü x ekseni doğrultusunda ve P_2 üniform basınç yükü y ekseni doğrultusunda etkilemektedir.

Plaka üç boyutlu Λ bölgesi biçiminde matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\Lambda = \left\{ x, y, z : (x, y, z) \in [0,\ a] \times [0,\ b] \times [-h/2,\ h/2] \right\}$$



Şekil 3.1. Çift eksenli basınç yükü altındaki KNT ile güçlendirilmiş polimer dikdörtgen plak ve koordinat sistemi

3.2. Nanokompozitin Modellenmesi ve Geometrik Gösterimi

Nanokompozitin bileşenleri olan KNT ve polimerin malzeme özelliklerinin konuma bağlı olduğu varsayıldığında nanokompozitlerin etkin elastik özellikleri şu şekilde yazılabilir (Shen, 2009):

$$Y_{11}(z_1)=\eta_1 V_{knt}^{z_1} Y_{11}^{knt}+V_m Y^m,\ \frac{\eta_2}{Y_{22}(z_1)}=\frac{V_{knt}^{z_1}}{Y_{22}^{knt}}+\frac{V_m}{Y^m},$$

$$\frac{\eta_3}{Y_{12}(z_1)}=\frac{V_{knt}^{z_1}}{Y_{12}^{knt}}+\frac{V_m}{Y_{12}^m},\ \ Y_{13}(z_1)=Y_{12}(z_1),\ Y_{23}(z_1)=1.2Y_{12}(z_1),\ \ z_1=z/h \tag{3.1}$$

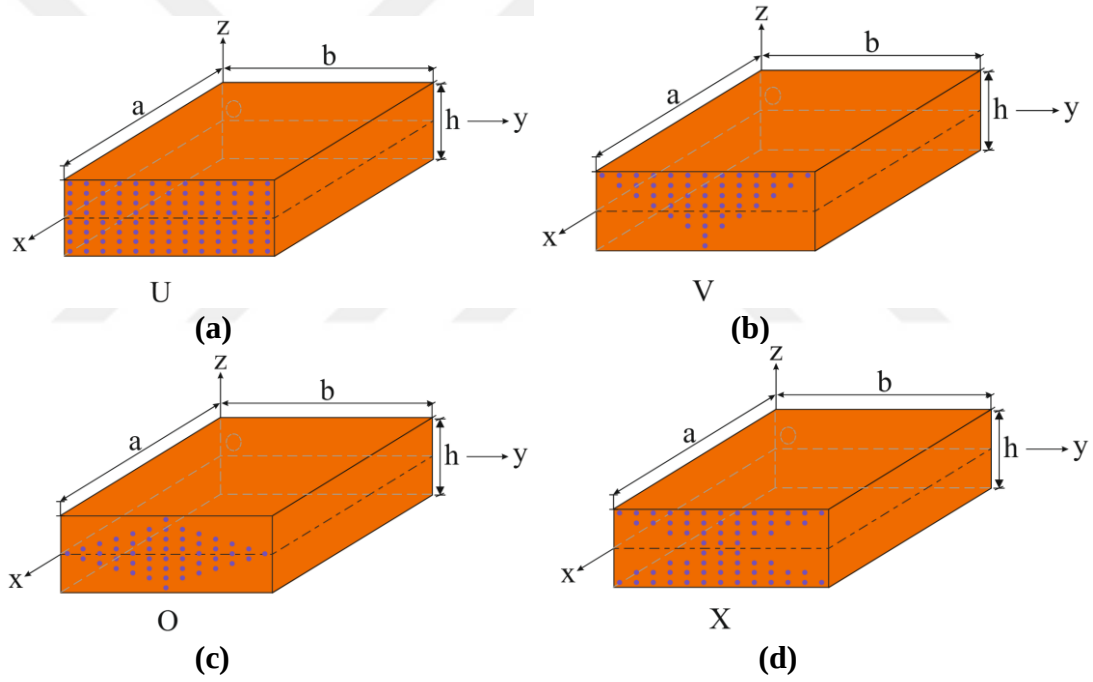
Nanokompozit plağın Poisson oranı ve yoğunluğu sabit olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\nu_{12}=V_{knt}^{*}\nu_{12}^{knt}+V_m\nu^m,\ \rho=V_{knt}^{*}\rho^{knt}+V_m\rho^m \tag{3.2}$$

Burada, KNT ve polimerin Young ve kayma modulleri sırasıyla $Y_{pq}^{knt},\ (p=1,2;q=1,2,3)$ ve Y^m, Y_{12}^m, yoğunlukları ρ^{knt} ve ρ^m, Poisson oranları ν_{12}^{cnt} ve ν_{12}^m, KNT'lerin verimlilik parametreleri $\eta_q(q=1,2,3)$ sembolleri ile gösterilmektedir. $V_{knt}^{z_1}$ ve V_m sırasıyla KNT ve polimerin hacim fraksiyonları olup $V_{knt}^{z_1}+V_m=1$ bağıntısı geçerlidir, ayrıca KNT'nin total hacim fraksiyonu: $V_{knt}^{*}=\dfrac{m_{knt}}{m_{knt}+(\rho^{knt}/\rho^m)(1-m_{knt})}$ ifadesinden bulunur (Shen, 2012). Burada, m_{knt} KNT'nin kütlesi ρ^{knt} ve ρ^m sırasıyla KNT ve Polimerin yoğunlukları olup $V_{knt}^{z_1}$ aşağıdaki doğrusal fonksiyonlar şeklinde tanımlanmaktadır:

$$V_{knt}^{z_1} = \begin{cases} V_{knt}^{*} & ise\ UD \\ (1-2z_1)V_{knt}^{*} & ise\ \ VD \\ 2(1-2|z_1|)V_{knt}^{*} & ise\ OD \\ 4|z_1|V_{knt}^{*} & ise\ \ XD \end{cases} \tag{3.3}$$

(3.3) ile tanımlanan profillerin geometrik modellenmesi, diğer bir değişle (a) UD, (b) VD, (c) OD ve (d) XD profillerine sahip nanokompozit plakanın en kesitleri Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Boyuna basınç yükü altındaki KNT ile güçlendirilmiş dikdörtgen plak ve koordinat sistemi KNT profilli dikdörtgen plakaların en kesitleri (a) UD, (b) VD, (c) OD, (d) XD

3.3. FD-KNT Takviyeli Polimer Dikdörtgen Plakaların Temel Bağıntılarının Oluşturulması

Enine kayma deformasyonlarının varsayımı göz önüne alındığında, nanokompozitlerden üretilmiş dikdörtgen plakalarda τ_{pq} gerilmeleri ve $\varepsilon_{pq}(p=1,2;q=1,2,3)$ gerinimleri ile aşağıdaki gibi ifade edilir (Shen, 2009):

$$\begin{bmatrix}\tau_{11}\\ \tau_{22}\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{21} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{12}\end{bmatrix} \tag{3.4}$$

ve

$$\begin{bmatrix}\tau_{13}\\ \tau_{23}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{55} & 0\\ 0 & Q_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{13}\\ \varepsilon_{23}\end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Burada $Q_{pq}(p,q=1,2,...,6)$ nanokompozitlerin özelliklerine bağlı katsayılardır ve aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$\begin{gathered}Q_{11}=\frac{Y_{11}(z_1)}{1-\nu_{12}\nu_{21}},\ Q_{12}=\frac{\nu_{21}Y_{11}(z_1)}{1-\nu_{12}\nu_{21}}=\frac{\nu_{12}Y_{22}(z_1)}{1-\nu_{12}\nu_{21}}=Q_{21}\\ Q_{22}=\frac{Y_{11}(z_1)}{1-\nu_{12}\nu_{21}},\ \ Q_{66}=Y_{12}(z_1),\ Q_{55}=Y_{23}(z_1),\ Q_{44}=Y_{23}(z_1)\end{gathered} \tag{3.6}$$

Bu çalışmada, Ambartsumian (1964) çalışmasında önerilen birinci mertebe kayma deformasyon teorisi fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp takviyeli plaklara genişletilmektedir. Ambartsumian (1964) çalışmasında önerilen varsayımlar fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozitlere modifiye edildiğinde, aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{13} \\ \\ \varepsilon_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{55}(z_1)\, f_1(x,y) \dfrac{\mathrm{d}\Gamma(z)}{\mathrm{dz}} \\ \\ A_{44}(z_1)\, f_2(x,y) \dfrac{\mathrm{d}\Gamma(z)}{\mathrm{dz}} \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

Burada $\Gamma(z)$, τ_{13} ve τ_{23} enine kayma gerilmelerini karakterize eden fonksiyon olup dikdörtgen plağın kalınlık koordinatına bağlı şekil fonksiyonudur ve aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$A_{55}(z_1) = \frac{1}{G_{13}(z_1)},\ A_{44}(z_1) = \frac{1}{G_{23}(z_1)} \tag{3.8}$$

Burada, $f_1(x,y)$ ve $f_2(x,y)$ dönme açıları olup Şekil 3.2'de sunulmaktadır:

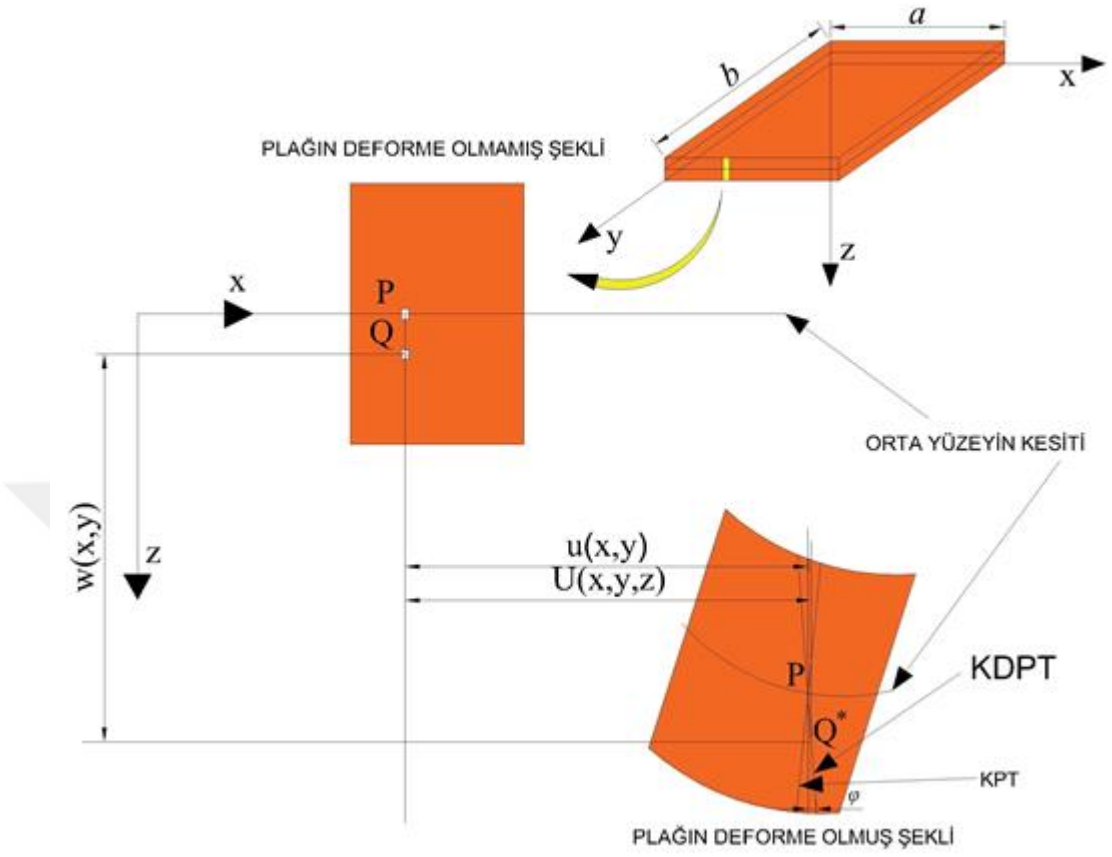
(3.4), (3.5) ve (3.7) ifadeleri bir arada kullanılarak, kalınlığın herhangi bir noktasındaki gerinim bileşenleri $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22})$, orta düzlemin gerinim bileşenleri $(\varepsilon_{011}, \varepsilon_{012}, \varepsilon_{022})$ ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \\ \varepsilon_{22} \\ \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{011} - z\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \\ \varepsilon_{022} - z\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \\ \varepsilon_{012} - 2z\dfrac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1(z)\dfrac{\partial f_1}{\partial x} \\ \\ \delta_2(z)\dfrac{\partial f_2}{\partial y} \\ \\ \delta_1(z)\dfrac{\partial f_1}{\partial y} + \delta_2(z)\dfrac{\partial f_2}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

(3.9) bağıntılarında şu tanımlar geçerlidir:

$$\delta_1(z) = \int_0^z \frac{\mathrm{d}\Gamma(z)}{\mathrm{dz}} A_{55}(z_1)dz,\ \delta_2(z) = \int_0^z \frac{\mathrm{d}\Gamma(z)}{\mathrm{dz}} A_{44}(z_1)dz \tag{3.10}$$

Şekil 3.3'de dikdörtgen plağın kinematik gösterimi, yerdeğiştirmeleri ve φ dönme açısı görsel olarak sunulmaktadır:



Şekil 3.3. Dikdörtgen plağın şekildeğiştirme öncesi ve sonrası durumu

Termal ortamlarda düzlem içi kuvvet bileşenleri $N_{pq}(p,q=1,2)$'yi ve enine kesme kuvvetleri $Q_p(p=1,2)$'yi bulmak için (3.4) ve (3.5) ile tanımlanan gerilme bileşenleri $(-h/2)$'den $(+h/2)$'ye z kalınlık koordinatına bağlı olarak integrallenir (Eslami, 2018):

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \mathrm{dz} \tag{3.11}$$

Moment bileşenleri $M_{pq}(p,q=1,2)$'yi bulmak için gerilme bileşenleri z değişkenine çarpılarak $(-h/2)$'den $(+h/2)$'ye kalınlık koordinatına bağlı olarak integrallenir (Eslami, 2018):

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \mathrm{zdz} \tag{3.12}$$

(3.9) denklemi (3.4)'de ve (3.7) denklemi (3.5)'te yerine getirildiğinde ve elde edilen ifadeler (3.11) denklemleri ile değiştirildiğinde, FD-KNT desenli plakların kuvvet bileşenleri orta düzlemin gerinim bileşenleri ve eğrilik değişimleri ile aşağıdaki ilintiye sahip olur:

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{110}\varepsilon_{011} + A_{120}\varepsilon_{022} - A_{111}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} - A_{121}\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ A_{210}\varepsilon_{011} + A_{220}\varepsilon_{022} - a_{211}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a_{221}\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ a_{660}\varepsilon_{012} - 2a_{661}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} A_{150} & 0 & 0 \\ A_{250} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{350} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial x} \\ 0 \\ \dfrac{\partial f_1}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{180} & 0 & 0 \\ A_{280} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{380} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_2}{\partial y} \\ 0 \\ \dfrac{\partial f_2}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

ve

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_3 f_1 \\ \delta_4 f_2 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Burada şu tanımlar geçerlidir:

$$A_{11i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} z^i dz,\ A_{22i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{22} z^i dz,\ A_{12i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12} z^i dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{21} z^i dz = A_{12i},$$

$$A_{66i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66} z^i dz, \quad i = 0,1.\ A_{150} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{11} dz,\ A_{180} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_2 Q_{12} dz,$$

$$A_{250} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{21} dz, \quad A_{280} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_{22} Q_{22} dz,\ A_{350} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{66} dz,\ A_{380} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{66} dz, \tag{3.15}$$

$$\delta_3 = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\mathrm{d}\Gamma_1}{\mathrm{dz}} dz,\ \delta_4 = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\mathrm{d}\Gamma_2}{\mathrm{dz}} dz,$$

Denklem (3.9), denklem (3.4)'de yerine yazıldığında ve elde edilen ifadeler (3.12) denklemleri ile değiştirildiğinde, FD-KNT desenli plakların moment bileşenleri orta düzlemin gerinim bileşenleri ve eğrilik değişimleri ile aşağıdaki ilintiye sahip olur:

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{111}\varepsilon_{011} + A_{121}\varepsilon_{022} - A_{112}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} - A_{122}\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ A_{211}\varepsilon_{011} + A_{221}\varepsilon_{022} - A_{212}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} - A_{222}\dfrac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ A_{661}\varepsilon_{012} - 2A_{662}\dfrac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} A_{151} & 0 & 0 \\ A_{251} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{351} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_1}{\partial x} \\ 0 \\ \dfrac{\partial f_1}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{181} & 0 & 0 \\ A_{281} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{381} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_2}{\partial y} \\ 0 \\ \dfrac{\partial f_2}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

Burada, kullanılan semboller aşağıdaki bağıntıları içerir:

$$A_{11i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} z^i dz,\ A_{22i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{22} z^i dz,\ A_{12i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12} z^i dz = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{21} z^i dz = A_{12i},$$

$$A_{66i} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66} z^i dz,\quad i = 1,2.\ A_{151} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{11} z dz,\ A_{181} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_2 Q_{12} z dz, \tag{3.17}$$

$$A_{251} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{21} z dz,\ \ A_{281} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_{22} Q_{22} z dz,\ \ A_{351} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{66} z dz,\ A_{381} = \int_{-h/2}^{h/2} \delta_1 Q_{66} z dz,$$

Kuvvet bileşenleri $N_{pq}(p,q=1,2)$ ve Airy gerilme fonksiyonu F arasında bağıntı şu şekilde belirlenmiştir (Ambartsumian, 1964):

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} = h\begin{bmatrix} \dfrac{\partial^2 F}{\partial x^2} \\ \dfrac{\partial^2 F}{\partial y^2} \\ -\dfrac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Bağıntı (3.18) dikkate alınarak, (3.13) denklemleri $\varepsilon_{0pq}(p,q=1,2)$'ye göre çözüldüğünde şu denklemler seti elde edilir:

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_{011}\\ \varepsilon_{022}\\ \varepsilon_{012}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}k_{11} & k_{12} & 0\\ k_{21} & k_{22} & 0\\ 0 & 0 & k_{31}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}N_{11}\\ N_{22}\\ N_{12}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}k_{13} & k_{14} & 0\\ k_{23} & k_{24} & 0\\ 0 & 0 & k_{32}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\\ \frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix}k_{15} & 0 & 0\\ k_{25} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -k_{35}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x}\\ 0\\ \frac{\partial f_1}{\partial y}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}k_{18} & 0 & 0\\ k_{28} & 0 & 0\\ 0 & 0 & -k_{38}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial f_2}{\partial y}\\ 0\\ \frac{\partial f_2}{\partial x}\end{bmatrix}. \tag{3.19}$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$k_{11}=\frac{A_{220}}{\Psi},\ k_{12}=-\frac{A_{120}}{\Psi},\ k_{13}=\frac{A_{120}A_{211}-A_{111}A_{220}}{\Psi},k_{14}=\frac{A_{120}A_{221}-A_{121}A_{220}}{\Psi},$$

$$k_{15}=\frac{A_{250}A_{120}-A_{150}A_{220}}{\Psi},\ k_{18}=\frac{A_{280}A_{120}-A_{180}A_{220}}{\Psi},k_{21}=-\frac{A_{210}}{\Psi},\ k_{22}=\frac{A_{110}}{\Psi},$$

$$k_{23}=\frac{A_{111}A_{210}-A_{211}A_{110}}{\Psi},\ k_{24}=\frac{A_{111}A_{210}-A_{221}A_{110}}{\Psi},k_{25}=\frac{A_{150}A_{210}-A_{250}A_{110}}{\Psi}, \tag{3.20}$$

$$k_{28}=\frac{A_{180}A_{210}-A_{280}A_{110}}{\Psi},\ k_{31}=\frac{1}{A_{660}},\ k_{32}=-\frac{2A_{661}}{A_{660}},\ b_{35}=_{660},\ b_{38}=\frac{A_{380}}{A_{660}},$$

$$\Psi=A_{110}A_{220}-A_{120}-A_{210}$$

Bağıntı (3.19), denklem (3.16)'ya ikame edildiğinde, Airy gerilme fonksiyonu ve çökme fonksiyonuna bağlı moment bileşenlerinin ifadeleri şu şekle dönüşür:

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ 0 & 0 & l_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_{13} & l_{14} & 0 \\ l_{23} & l_{24} & 0 \\ 0 & 0 & l_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} l_{15} & 0 & 0 \\ l_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} \\ 0 \\ \frac{\partial f_1}{\partial y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{18} & 0 & 0 \\ l_{28} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_{38} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2}{\partial y} \\ 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} \end{bmatrix}. \tag{3.21}$$

Bağıntı (3.21)'in içerdiği semboller şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} &l_{11} = A_{111}k_{11} + A_{121}k_{21},\ l_{12} = A_{111}k_{12} + A_{121}k_{22},\ l_{13} = A_{111}k_{13} + A_{121}k_{23} + A_{112} \\ &l_{14} = A_{111}k_{14} + A_{121}k_{24} + A_{122},\ l_{15} = A_{111}k_{15} + A_{121}k_{25} + A_{151}, \\ &l_{18} = A_{111}k_{18} + A_{121}k_{28} + A_{181}, l_{21} = A_{211}k_{11} + A_{221}k_{21},\ l_{22} = A_{211}k_{12} + A_{221}k_{22}, \\ &l_{23} = A_{211}k_{13} + A_{221}k_{23} + A_{212}, l_{24} = A_{211}k_{14} + A_{221}k_{24} + A_{222}, \\ &l_{25} = A_{211}k_{15} + A_{211}k_{25} + A_{251},\ l_{28} = A_{211}k_{18} + A_{221}k_{28} + A_{281}, \\ &l_{31} = A_{661}k_{31},\ \ l_{32} = A_{661}k_{32} + 2A_{662},\ \ l_{35} = A_{351} - A_{661}k_{35}, l_{38} = A_{381} - A_{661}k_{38} \end{aligned} \tag{3.22}$$

Düzlem içi dış basınç yükü etkisi altındaki plakların stabilite denklemleri temel kaynaklarda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Eslami, 2018):

$$\frac{\partial M_{11}}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial y} - Q_1 = 0 \tag{3.23}$$

$$\frac{\partial M_{21}}{\partial x} + \frac{\partial M_{22}}{\partial y} - Q_2 = 0 \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x}+\frac{\partial Q_2}{\partial y}+N_{11}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{12}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+N_{22}^0\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \tag{3.25}$$

Burada başlangıç momentler sıfıra eşit olduğunda, N_{11}^0, x doğrultusunda ve N_{22}^0, y doğrultusunda basınç kuvvetleri olup N_{12}^0 burulma kuvvetidir.

Plağın deformasyon uygunluk denkleminin ise aşağıdaki gibi ifade edildiği bilinmektedir (Eslami, 2018):

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{011}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \varepsilon_{022}}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 \varepsilon_{022}}{\partial x\partial y}=0 \tag{3.26}$$

Bağıntı (3.19) ve (3.21) ifadeleri (3.23)-(3.26) denklemlerine ikame edildiğinde aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned} &h(l_{11}-l_{31})\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}+hl_{12}\frac{\partial^4 F}{\partial x^4}-l_{13}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-(l_{14}+l_{32})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2} \\ &+l_{15}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x^3}+l_{35}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x\partial y^2}+l_{18}\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^2\partial y}+l_{38}\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^2\partial y}-\delta_3\frac{\partial f_1}{\partial x}=0 \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned} &hl_{21}\frac{\partial^4 F}{\partial y^4}+h(l_{22}-l_{31})\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}-(l_{32}+l_{23})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}-l_{24}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ &+l_{35}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x\partial y^2}+l_{25}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x\partial y^2}+l_{38}\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^2\partial y}+l_{28}\frac{\partial^3 f_2}{\partial y^3}-\delta_4\frac{\partial f_1}{\partial y}=0 \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$h\left[k_{11}\frac{\partial^4 F}{\partial y^4}+(k_{12}+k_{21}+k_{31})\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}+b_{22}\frac{\partial^4 F}{\partial x^4}\right]-b_{23}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$$

$$-\left(k_{24}+k_{13}-k_{32}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}-k_{14}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}+k_{25}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x^3}+k_{15}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x\partial y^2} \tag{3.29}$$

$$+k_{35}\frac{\partial^3 f_1}{\partial x\partial y^2}+k_{28}\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^2\partial y}+k_{38}\frac{\partial^3 f_2}{\partial x^2\partial y}+k_{18}\frac{\partial^3 f_1}{\partial y^3}=0$$

$$\delta_3\frac{\partial f_1}{\partial x}+\delta_4\frac{\partial f_2}{\partial y}+N_{11}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{12}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+N_{22}^0\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \tag{3.30}$$

Basınç yükü etkisi altındaki nanokompozit plağın, klasik plak teorisi çerçevesinde, stabilite denklemi aşağıdaki şekli alır (Eslami, 2018):

$$\frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2}+2\frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2}+N_{11}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{12}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+N_{22}^0\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \tag{3.31}$$

Moment bileşenleri için (3.21) bağıntıları stabilite denklemi (3.23)-(3.25)'te ve orta yüzeyin deformasyon bileşenleri için (3.19) bağıntıları deformasyon uygunluk denklemi (3.26)'te yerine yazıldığında, fonksiyonel olarak değişen yapıya sahip nanokompozitlerden oluşan dikdörtgen plakların klasik kabuk teorisi çerçevesinde temel denklemleri aşağıdaki şekli alır:

$$l_{12}\frac{\partial^4 F}{\partial x^4}+2(l_{12}-l_{31})\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}+l_{12}\frac{\partial^4 F}{\partial y^4}-l_{13}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-2(l_{14}+l_{32})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}-l_{13}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}$$

$$+N_{11}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2N_{12}^0\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+N_{22}^0\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \tag{3.32}$$

$$k_{11}\frac{\partial^4 F}{\partial x^4}+2(k_{12}+k_{31})\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}y^2+k_{11}\frac{\partial^4 F}{\partial y^4}-k_{14}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}-2(k_{13}-k_{32})\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}-k_{14}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=0 \tag{3.33}$$

Nanokompozit dikdörtgen plağa çift eksenli yönlü basınç yükü etkidiğini dikkate aldığımızda, zar kuvvetler şu şekilde ifade edilecektir (Bkz., Şekil 3.1):

$$N_{11}^0 = -P_1,\ N_{22}^0 = -P_2,\ \ N_{12}^0 = 0 \tag{3.34}$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Çözüm Prosedürü

Karbon nanotüplerle takviye edilen dikdörtgen plağın kenarları basit mesnetli sınır koşullarına tabidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Ambartsumian, 1964):

$$\begin{aligned} &x = 0 \text{ ve } a \text{ olduğunda } w = M_{11} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0 \\ &y = 0 \text{ ve } b \text{ olduğunda } w = M_{22} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0. \end{aligned} \tag{4.1}$$

(4.1) sınır koşullarını sağlayan yaklaşım fonksiyonları aşağıdaki gibi aranmaktadır (Ambartsumian, 1964):

$$\begin{aligned} F &= \bar{F} \sin(i_1 x) \sin(j_1 y), \\ w &= \bar{w} \sin(i_1 x) \sin(j_1 y), \\ f_1 &= \bar{f}_1 \cos(i_1 x) \sin(j_1 y), \\ f_2 &= \bar{f}_2 \sin(i_1 x) \cos(j_1 y) \end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada $i_1 = \frac{i\pi}{a}$ ve $j_1 = \frac{j\pi}{b}$ burkulma modu parametreler olup, bu parametrelerin içerdiği *i*, boyuna doğrultudaki yarım dalga sayısını, *j* ise enin doğrultudaki dalga sayısını göstermekte olup $\bar{F}, \bar{w}, \bar{f}_1, \bar{f}_2$ bilinmeyen genliklerdir.

(4.2) bağıntıları (3.27)-(3.30) denklemlerinde yerine yazılıp Galerkin yöntemi uygulandığında, aşağıdaki 4×4 matris denklemi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} s_{11} & -s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & -s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & -s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F} \\ \bar{w} \\ \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Burada geçerli olan tanımlar şu şekildedir:

$$s_{11} = \left[\left(l_{11} - l_{31} \right) j_1^{\,2} + l_{12} i_1^{\,2} \right] i_1^{\,2} h, \quad s_{12} = \left[\left(l_{14} + l_{32} \right) j_1^{\,2} + l_{13} i_1^{\,2} \right] i_1^{\,2}$$

$$s_{13} = \left[l_{15} i_1^{\,2} + l_{35} j_1^{\,2} + \delta_3 \right] i_1, \quad s_{14} = (l_{18} + l_{38}) j_1 i_1^{\,2},$$

$$s_{21} = \left[l_{21} j_1^{\,2} + \left(l_{22} - l_{31} \right) i_1^{\,2} \right] j_1^{\,2} h, \; s_{22} = \left[\left(l_{32} + l_{23} \right) i_1^{\,2} + l_{24} j_1^{\,2} \right] j_1^{\,2},$$

$$s_{23} = (l_{25} + l_{35}) i_1 j_1^{\,2}, \; s_{24} = \left[l_{28} j_1^{\,2} + l_{38} i_1^{\,2} + \delta_4 \right] j_1,$$

$$s_{31} = \left[k_{22} i_1^{\,4} + \left(k_{12} + k_{21} + k_{31} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} + k_{11} j_1^{\,4} \right] h,$$

$$s_{32} = k_{23} i_1^{\,4} + \left(k_{24} + k_{13} + k_{32} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} + b_{14} j_1^{\,4},$$

$$s_{33} = \left[k_{25} i_1^{\,2} + (k_{15} + k_{35}) j_1^{\,2} \right] i_1, \quad s_{34} = j_1 \left[(k_{28} + k_{38}) i_1^{\,2} + k_{18} j_1^{\,2} \right],$$

$$s_{41} = 0, \quad s_{42} = P_1 i_1^{\,2} + P_2 j_1^{\,2}, \quad s_{43} = \delta_3 i_1, \quad s_{44} = \delta_4 j_1. \tag{4.4}$$

Denklemler sistemi (4.4)'ün sıfırdan farklı çözümün olması için katsayılardan oluşan determinant sıfıra eşitlenir:

$$\begin{vmatrix} s_{11} & -s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & -s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & -s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{vmatrix} = 0 \tag{4.5}$$

Denklem (4. 5)'in sol tarafındaki determinantının açılımı yapıldığında, kritik eksenel yük için aşağıdaki ifade bulunur:

$$P_1 i^2 + P_2 j^2 = \frac{s_{41}t_1 + s_{43}t_3 + s_{44}t_4}{t_2} \tag{4.6}$$

Burada $s_{pq}(p=4, q=1,2,...,4)$ katsayıları 3×3 kare matrislerin determinantları olup aşağıdaki ifadelerden bulunur:

$$t_1 = -\begin{vmatrix} s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{32} & r_{33} & s_{34} \end{vmatrix}, t_2 = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{33} & s_{34} \end{vmatrix}, t_3 = -\begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{34} \end{vmatrix}, t_4 = \begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{vmatrix} \tag{4.7}$$

$P_2 = \delta P_1 = \delta P$ olduğunda, KDPT çerçevesinde çift eksenli kritik yükün ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$P_{12kdt}^{kr} = \frac{s_{41}t_1 + s_{43}t_3 + s_{44}t_4}{t_2(i^2 + \delta j^2)} \tag{4.8}$$

Burada δ pozitif sayı olup sıfırdan bire değişen yük paramatresidir.

Özel durumlarda, eğer $P_2 = 0$ ise, dikdörtgen plaka sadece x noktasında tek eksenli yüke maruz kalır ve FSDPT içindeki x doğrultusunda tek eksenli kritik basınç yükü aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$P_{1kdt}^{kr} = \frac{s_{41}t_1 + s_{43}t_3 + s_{44}t_4}{t_2 i^2} \tag{4.9}$$

Özel durumlarda, eğer $P_1 = 0$ ise, dikdörtgen plaka sadece x noktasında tek eksenli yüke maruz kalır ve FSDPT içindeki y doğrultusunda tek eksenli kritik basınç yükü aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$P_{2kdt}^{kr} = \frac{s_{41}t_1 + s_{43}t_3 + s_{44}t_4}{t_2 j^2} \tag{4.10}$$

Kayma deformasyonlu plak teorisi çerçevesinde (4.8)-(4.10) ile tanımlanan kritik yüklerin boyutsuz değerleri için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır:

$$\bar{P}_{12kdt}^{kr} = \frac{P_{12kdt}^{kr}}{Y^m h},\ \bar{P}_{jkdt}^{kr} = \frac{P_{jkdt}^{kr}}{Y^m h},\ j = 1, 2 \tag{4.11}$$

Bağıntı (4.2)'nin birinci ve ikincisini, (3.35) ve (3.36) denklemlerinde yerine yazıp Galerkin yöntemi uygulandığında, klasik plak teorisi çerçevesinde kritik yük için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$P_{12kpt}^{kr} = \frac{\Delta}{i^2 + \delta j^2} \tag{4.12}$$

Burada şu tanım geçerlidir:

$$\begin{aligned}\Delta = \Big\{ &\Big[l_{13} i_1^{\,4} + \left(l_{14} + 2l_{32} + l_{23} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} + l_{24} j_1^{\,4} \Big] - \Big[l_{12} i_1^{\,4} + l_{21} j_1^{\,4} \\ &+ \left(l_{11} - 2l_{31} + l_{22} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} \Big] \frac{\Big[k_{23} i_1^{\,4} + \left(k_{13} - k_{32} + k_{24} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} + k_{14} j_1^{\,4} \Big]}{k_{22} i_1^{\,4} + \left(k_{12} + k_{31} + k_{21} \right) i_1^{\,2} j_1^{\,2} + k_{11} j_1^{\,4}} \Big\}\end{aligned} \tag{4.13}$$

Klasik plak teorisi çerçevesinde x ve y eksenleri doğrultusunda kritik yüklerin boyutlu değerleri için aşağıdaki ifadeler KDPT'ye benzer şekilde elde edilmektedir:

$$P_{1kpt}^{kr} = \frac{\Delta}{t_2 i^2}, P_{2kpt}^{kr} = \frac{\Delta}{t_2 j^2} \tag{4.14}$$

Bağıntı (4.13) ve (4.14) ile tanımlanan KPT çerçevesinde kritik yüklerin boyutsuz değerleri için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır:

$$\bar{P}_{12kpt}^{kr} = \frac{P_{12kpt}^{kr}}{Y^m h}, \ \bar{P}_{qkpt}^{kr} = \frac{P_{jkpt}^{kr}}{Y^m h}, \ q = 1,2 \tag{4.15}$$

4.2. Karşılaştırmalar

Önerilen yöntemin doğruluğu, plakaların üç farklı burkulma analiz örnekleri üzerinden incelenmiş ve diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Birinci örnekte, KDPT kullanılarak, çeşitli en-boy ve kalınlık-boy oranları için kayma deformasyonlu homojen izotropik malzemeden oluşan plakların boyutsuz kritik yük değerleri Akhavan vd. (2009) çalışmasında elde edilen uygun değerlerle kıyaslanmıştır (Bkz., Çizelge 4.1). Plakların geometrik ölçüleri ve kritik yüke karşı gelen dalga sayıları (i, j) çizelge içinde sunulmuştur. Akhavan vd. (2009) çalışmasında kayma gerilme katsayısı için $K = 5/6$ kullanmış, fakat tez çalışmasında kayma gerilme şekil fonksiyonu için, $\bar{\Gamma}(z) = \frac{d\Gamma(z)}{dz} = 1 - 4z^2$ parabolik fonksiyonu kullanıldığından kayma gerilme katsayısına ihtiyaç kalmamıştır. Karşılaştırmalarda kullanılan malzeme özellikleri Akhavan vd. (2009) çalışmasından alınmıştır ve şu şekildedir:

$$Y_{qq} = Y_m = 7 \times 10^{10} \, \mathrm{N/m^2}, \ \ \nu_{12} = \nu_{21} = \nu_m = 0.3, \ G_{0qp} = \frac{Y_{0m}}{2(1+\nu_m)} \ (q = 1,2, \ p = 2,3).$$

Akhavan vd. (2009) çalışmasında KDPT çerçevesinde kritik yükün boyutsuz değeri için $\bar{P}_{1kdt}^{kr} = P_{1kdt}^{kr} \frac{b^2}{D_0 \pi^2}$ ifadesi kullandığı için biz de karşılaştırmada (4.6) ifadesinin bu şeklini kullandık. Burada $D_0 = \frac{Y_m h^3}{12(1-\nu_m^2)}$ sembolü eğilme sertliğini göstermektedir.

Çizelge 4.1 tez çalışmasında elde edilen sonuçların Akhavan vd. (2009) çalışma sonuçları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. Kayma deformasyonlu homojen izotropik plakların boyutsuz kritik burkulma yükü ($\bar{P}_{1kdt}^{kr}$) değerlerinin mukayesesi

	$\bar{P}_{1kdt}^{kr}/10\,,\,(i,\,j)$					
	Akhavan vd. (2009)			Tez çalışması		
a/h	$b=0.5a$	$b=a$	$b=2a$	$b=0.5a$	$b=a$	$b=2a$
10	3.244(2,1)	3.745(1)	5.966(1)	3.221(2,1)	3.737(1)	5.959(1)
100	3.939(2,1)	3.946(1)	6.166(1)	3.939(2,1)	3.946(1)	6.166(1)
1000	3.947(2,1)	3.948(1)	6.169(1)	3.948(2,1)	3.947(1)	6.166(1)

İkinci örnekte, KDPT ve KPT çerçevesinde, çeşitli en-boy, kalınlık-boy oranları ve ortotropi oranları için homojen ortotropik plakların boyutsuz kritik yükü $\bar{P}_{1kdt}^{kr}=P_{1kdt}^{kr}\dfrac{b^2}{D_{11}\pi^2}$ değerleri Ambartsumian (1964) monografisinde sunulan kritik yük değerleri ile mukayese edilmek için Çizelge 4.2 oluşturulmaktadır. Burada $D_{11}=\dfrac{Y_{11}h^3}{12(1-\nu_{12}\nu_{21})}$ geleneksel kompozitin eğilme sertliğidir. Karşılaştırmalarda, Ambartsumian (1964) monografisinden alınmış $\dfrac{Y_{11}}{Y_{22}}=\dfrac{\nu_{12}}{\nu_{21}}=\lambda_1,\ \dfrac{Y_{11}}{Y_{12}}=\lambda_2,$ $\dfrac{Y_{22}}{Y_{13}}=\dfrac{Y_{22}}{Y_{23}}=\lambda_3$ bağıntıları ve $\eta_q=5.0\ (q=1,2)$, $\nu_{12}=0.3$ ve $b/h=10$ verileri kullanılmaktadır. $\lambda_3=0$ sütununa karşı gelen değerler klasik plak teorisi çerçevesinde elde edilmektedir. Kritik yüke karşı gelen dalga modu $(i,\,j)=(1,1)$ olduğundan dolayı çizelgede yer almamaktadır. Çizelge 4.2'de sunulan boyutsuz kritik yük değerlerinin Ambartsumian (1964) monografisinde sunulan değerlerle hemen-hemen çakıştığı görülmektedir. Son satırdaki değerler boy-en oranına göre tek eksenli boyutsuz kritik yükün en küçük değerini, yani $\left[\tilde{P}_1^{kr}\right]_{\min}$ değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.2. Homojen ortotropik dikdörtgen plakların boyutsuz kritik yükü değerlerinin Ambartsumian (1964) monografisindeki değerler ile mukayesesi

	$\bar{P}_1^{kr}, (i, j)$					
	Ambartsumian (1964)			Tez çalışması		
	KPT	KDPT		KPT	KDPT	
h/a	$\lambda_3 = 0$	$\lambda_3 = 2.0$	$\lambda_3 = 5.0$	$\lambda_3 = 0$	$\lambda_3 = 2.0$	$\lambda_3 = 5.0$
0.35	9.093	7.682	6.241	9.0934	7.6817	6.2408
0.95	2.194	2.105	1.984	2.1941	2.1046	1.9840
1.25	1.858	1.799	1.716	1.8581	1.7985	1.7165
1.95	1.929	1.881	1.814	1.9291	1.8812	1.8138
2.55	2.360	2.306	2.230	2.3599	2.3063	2.2304

Üçüncü örnekte, KDPT ve KPT çerçevesinde, çeşitli V_{knt}^* değerleri için FD-KNT plakların boyutsuz kritik yük değerleri $\tilde{P}_1^{kr} = P_1^{kr} \dfrac{b^2}{Y_m h^3}$ ifadesinden bulunur ve değerleri Zhang vd. (2015d) makalesindeki kritik yük değerleri ile mukayese edilir (Bkz., Çizelge 4.3). Zhang vd. (2015d) çalışmasında elemansız tabanlı geliştirilmiş hareketli en küçük kareler-Ritz yöntemi uygulayarak kritik yükün sayısal değerlerini elde etmiştir. Bu karşılaştırmada aşağıdaki nanokompozit malzeme özellikleri kullanılmaktadır (Zhang vd., 2015d): $Y_m = 2.1$ GPa, $V_{knt}^* = 0.11, \eta_1 = 0.142, \eta_2 = \eta_3 = 0.934$, $V_{knt}^* = 0.14$, $\eta_1 = 0.15$, $\eta_2 = \eta_3 = 0.941$, $V_{knt}^* = 0.17$, $\eta_1 = 0.150$, $\eta_2 = \eta_3 = 1.381$. Ayrıca plağın geometrik boyutları şu şekildedir: $h = 0.002\ m$, $a/b = 1$, $b = 100h$. Kritik yüke karşı gelen dalga modu $(i, j) = (1,1)$ olduğundan dolayı çizelgede yer almamaktadır. Çizelge 4.3'de sunulan boyutsuz kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) monografisinde sunulan değerleri ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3. Değişik V_{knt}^{*} 'ler için FD-KNT plakların kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) çalışmasındaki değerlerle karşılaştırılması

Desen çeşitleri	KNT hacim fraksiyonu	Kritik yük, $\tilde{P}_1^{kr} = P_1^{kr} \frac{b^2}{Y_m h^3}$		
		Zhang vd. (2015d)	Tez çalışması KPT	Tez çalışması KDPT
UD	11	39.1158	39.7783	39.3402
	14	49.0816	50.0554	49.3814
	17	57.4776	61.1029	60.4527
OD	11	21.3316	21.5974	21.4746
	14	26.3572	26.7474	26.5653
	17	31.2163	32.8956	32.7232
XD	11	56.7373	58.000	57.0376
	14	71.5516	73.4253	71.9172
	17	83.6142	89.456	87.980

Dördüncü örnekte, KDPT çerçevesinde, farklı kalınlık-en oranları için FD-KNT plakların boyutsuz kritik yük değerleri, $\tilde{P}_1^{kr} = P_1^{kr} \frac{b^2}{Y_m h^3}$, Zhang vd. (2015d) makalesindeki kritik yük değerleri ile mukayese edilir. Zhang vd. (2015d) çalışmasında elemansız tabanlı geliştirilmiş hareketli en küçük kareler-Ritz yöntemi uygulayarak kritik yükün değerlerini elde etmiştir (Çizelge 4.4). Bu karşılaştırmada şu nanokompozit malzeme özellikleri kullanılmaktadır Zhang vd.(2015d): $Y_{11}^{knt} = 5.6466 \times 10^{12}\,\text{Pa}$, $Y_{22}^{knt} = 7.08 \times 10^{12}\,\text{Pa}$, $Y_{12}^{knt} = 1.9445 \times 10^{12}\,\text{Pa}$, $\nu_{12}^{cnt} = 0.175$, $\rho_{knt} = 1400\,\text{kg/m}^3$, $Y_m = 2.1\text{GPa}, \nu_m = 0.34, \rho_m = 1150\,\text{kg/m}^3$, $V_{knt}^{*} = 0.11$, $\eta_1 = 0.142$, $\eta_2 = \eta_3 = 0.934$. Ayrıca plağın geometric boyutları şu şekildedir: $h = 0.002$ m, $a/b = 1$, $h/b = 0.02, 0.05, 0.1$. Kritik yüke karşı gelen dalga modu $(i, j) = (1,1)$ olduğundan dolayı çizelgede yer almamaktadır. Çizelge 4.4'de sunulan tüm h/b oranları için boyutsuz kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) monografisinde sunulan değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4. Değişik kalınlık-en oranı için FD-KNT plakların kritik yük değerlerinin Zhang vd. (2015d) çalışmasındaki değerlerle karşılaştırılması

h/b	KNT hacim fraksiyonu	$\tilde{P}_{1kdt}^{kr}$	
		Zhang vd. (2015d)	Tez çalışması KDPT
0.02	UD	37.7998	38.083
	FD-O	20.9312	21.115
	FD-X	54.0305	54.336
0.05	UD	30.9221	31.166
	FD-O	18.7618	18.910
	FD-X	40.8422	40.889
0.1	UD	18.9783	19.113
	FD-O	13.8356	13.868
	FD-X	22.1612	22.025

4.3. Sayısal Analizler

Bu alt bölümde, KNT kaynaklı nanokompozit plakların kritik yük analizleri sunulmaktadır. KNT ile güçlendirilmiş polimetil metakrilattan (PMMA) oluşan nanokompozitin özellikleri Çizelge 4.5'de sunulmuştur (Shen, 2009).

Çizelge 4.5. Nanokompoziti oluşturan bileşenlerin özellikleri ve verimlilik parametreleri

KNT'nin mekanik ve geometrik özellikleri	PMMA'nın mekanik özellikleri	Verimlilik parametreleri
$Y_{11}^{knt}=5.6466\times10^{12}\,\text{Pa},$ $Y_{22}^{knt}=7.08\times10^{12}\,\text{Pa},$ $Y_{12}^{knt}=1.9445\times10^{12}\,\text{Pa},\ \nu_{12}^{knt}=0.175,$ $\rho_{knt}=1400\,\text{kg/m}^3, a_{knt}=9.26\,\text{nm},$ $r_{knt}=0.68\ \text{nm},\ h_{knt}=0.067\text{nm}$	$Y_m=2.5\,\text{GPa},$ $\nu_m=0.34$ $\rho_m=1150\,\text{kg/m}^3$	η_1=0.137, η_2=1.022, η_3=0.7η_2 *at* V_{knt}^*=0.12; η_1=0.142, η_2=1.626, η_3=0.7η_2 *at* V_{knt}^*=0.17; η_1=0.141, η_2=1.585, $\eta_3^{(k)}$=0.7η_3 *at* V_{knt}^*=0.28

Enine kayma deformasyon şekil fonksiyonları olarak şunlar kullanılmaktadır: Parabolik kayma gerilme şekil fonksiyonu $\tilde{\Gamma}_i(z_1)=1-4z_1^2(i=1,2)$, kosinüs hiperbolik fonksiyonu $\tilde{\Gamma}_i(z_1)=\cosh\left(z_1\right)-\cosh(1/2)$, uniform fonksiyonu $\tilde{\Gamma}_i(z_1)=1$ (Ambartsumian, 1964; Aydoğdu, 2009; Eslami, 2018). Burada şu tanım geçerlidir: $\tilde{\Gamma}_i(z_1)=\dfrac{\mathrm{d}\Gamma_i(z)}{dz}$. KDPT ve KDT çerçevesinde, nanokompozit plakların kritik yükünün

minumum değerleri, (24) ve (27) denklemleri i ve j dalga sayılarına göre minimize edilerek bulunur. Ayrıca, kayme gerilmeleri ve KNT desenlerinin kritik yüke etkileri yüzde olarak aşağıdaki ifadelerden bulunur:

$$\frac{\bar{P}_{1kpt}^{kr}-\bar{P}_{1kdt}^{kr}}{\bar{P}_{1kpt}^{kr}}\times 100\% \text{ ve } \frac{\bar{P}_{FD}^{kr}-\bar{P}_{UD}^{kr}}{\bar{P}_{UD}^{kr}}\times 100\%$$

Maple ve Exell bilgisayar programları kullanılarak sayısal analizler yapılarak, çizelgeler oluşturulmakta ve grafikler çizilmektedir.

Plak karakteristikleri h=0.002m; $a/b=1$; $b/h=20$; $\delta=0.5, V_{knt}^{*}=0.28$ olduğunda değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları kullanılarak UD, OD, VD ve XD desenli nanokompozitlerden oluşan plakların x ve y yönlerindeki ve çift eksenli basınç yüklerinin kritik değerleri bulunmuş ve KDPT ve KPT çerçevesinde elde edilen kritik basınç yüklerinin değerleri Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8'de karşılaştırılarak şekil fonksiyonlarının etkileri tartışılmıştır. Farklı yönlerdeki eksenel ve çift eksenel yüklerin kritik değerlerinin bulunmasında Çizelge 4.6-4.8'nin birinci sütununda yer alan dört farklı kayma deformasyon şekil fonksiyonları kullanılmıştır. Kullanılan kayma deformasyon şekil fonksiyonları şunlardır: a) $\Gamma(z)=z\left(1-\frac{4z^2}{3h^2}\right)$ veya parabolik şekil fonksiyonu $\frac{d\Gamma(z)}{dz}=1-4z_1^2$, b) $\Gamma(z)=h\sinh\left(\frac{z}{h}\right)-z\sinh\left(\frac{1}{2}\right)$ veya kosinüs hiperbolik şekil fonksiyonu $\frac{d\Gamma(z)}{dz}=\cosh(z_1)-\sinh(0.5)$, c) $\Gamma\left(z\right)=z$ veya uniform şekil fonksiyonu $\frac{d\Gamma(z)}{dz}=1$, d) n $\Gamma(z)=\frac{h}{\pi}\sin\left(\frac{\pi z}{h}\right)$ veya kosinüs şekil fonksiyonu $\frac{d\Gamma(z)}{dz}=\cos(\pi z_1)$. Basınç yüklerinin kritik değerlerine karşı gelen boyuna dalga sayıları bire eşit olduğu için çizelgelerde yer almamaktadır.

$\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu Çizelge 4.6'da sunulmaktadır. Bu çizelgede kullanılan geometrik veriler şunlardır: h=0.002, $a/b=1$, b/h=20, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.6 incelendiğinde, VD, OD ve XD

desenlerinin $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerine UD desenine kıyasla etkileri parabolik kayma şekil fonksiyon için %22.39, %37.35 ve (-%25.73) olduğu görülmektedir. Uniform kayma şekil fonksiyonu için söz konusu etkiler %23.17, %38.62 ve (-%28.97); Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için %23.27, %38.8 ve (-%29.61); kosinüs kayma şekil fonksiyonu için %22.32, %37.44 ve (-%25.4) olduğu görülmektedir. Bu oranlar KPT çerçevecinde VD için %7, OD deseni için %9 ve XD deseni için %11 civarında daha belirgin olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6 incelendiğinde, parabolik kayma şekil fonksiyonun $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerine KPT'ye kıyasla etkisi UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %27.25, %19.23, %14.18 ve %38.06; Uniform kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %23.79, %16.26, %11.68 ve %33.46; Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %23.24, %15.75, %11.30 ve %32.64; kosinüs kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %23.24, %15.75, %11.3 ve %32.64 olduğu görülmektedir. Kayma deformasyonun $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yüküne etkisi parabolik ve kosinüs fonksiyonları için aynı çeşit desenlerde yaklaşık aynı olmasına rağmen Uniform ve kosinüs hiperbolik fonksiyonları için söz konusu etki %2.7 ile %5 arasında daha az olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu

	$\bar{P}_1^{kr} \times 10, (j_{kr})$							
Kayma şekil fonksiyonları	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
Parabol	1.434(1)	1.971(1)	1.113(1)	1.378(1)	0.896(1)	1.044(1)	1.803(1)	2.911(1)
Uniform	1.502(1)	1.971(1)	1.154(1)	1.378(1)	0.922(1)	1.044(1)	1.937(1)	2.911(1)
Kosinüs hiperbolik	1.513(1)	1.971(1)	1.161(1)	1.378(1)	0.926(1)	1.044(1)	1.961(1)	2.911(1)
Kosinüs	1.429(1)	1.971(1)	1.110(1)	1.378(1)	0.894(1)	1.044(1)	1.792(1)	2.911(1)

$\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu Çizelge 4.7'de sunulmaktadır. Bu çizelgede kullanılan geometrik veriler şunlardır: h=0.002 m, $a/b=1$, b/h=20, $V_{knt}^{*}=0.28$ Bu çizelge incelendiğinde, parabolik kayma

şekil fonksiyonun $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerine KPT'ye kıyasla etkisi UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %18.46, %14.9, %10.92 ve %24.07; Uniform kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %15.55, %12.5, %9.17 ve %19.83; Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %14.97, %12.16, %8.73 ve %19.06; kosinüs kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %18.61, %15.09, %10.92 ve %24.40 olduğu görülmektedir. Kayma deformasyonun $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yüküne etkisi parabolik ve kosinüs fonksiyonları için aynı çeşit desenlerde yaklaşık aynı olmasına rağmen Uniform ve kosinüs hiperbolik fonksiyonları için söz konusu etki %3.7 ile %5.4 arasında daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7 incelendiğinde, VD, OD ve XD desenlerinin UD desenine kıyasla $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerine etkileri parabolik kayma şekil fonksiyon için %11.41, %27.27 ve (-%24.24) olmaktadır. Uniform kayma şekil fonksiyonu için %12.04, %28.4 ve (-%26.68); Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için %12.31, %28.55 ve (-%27); kosinüs kayma şekil fonksiyonu için %11.43, %27.14 ve (-%23.93) olduğu görülmektedir. Bu oranlar KPT çerçevesinde VD için %3, OD deseni için %5 ve XD deseni için %7 civarında daha belirgin olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7. $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu

Kayma şekil fonksiyonları	$\bar{P}_2^{kr} \times 10, (j_{kr})$							
	UD		VD		OD		XD	
Parabol	0.561(2)	0.688(3)	0.497(2)	0.584(2)	0.408(2)	0.458(2)	0.697(2)	0.918(3)
Uniform	0.581(2)	0.688(3)	0.511(2)	0.584(2)	0.416(2)	0.458(2)	0.736(2)	0.918(3)
Kosinüs hiperbolik	0.585(2)	0.688(3)	0.513(2)	0.584(2)	0.418(2)	0.458(2)	0.743(2)	0.918(3)
Kosinüs	0.560(2)	0.688(3)	0.496(2)	0.584(2)	0.408(2)	0.458(2)	0.694(2)	0.918(3)

Çizelge 4.8'de $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu gösterilmektedir. Bu çizelgede kullanılan geometrik veriler şunlardır: h=0.002, $a/b=1$, b/h=20, $\delta=0.5$, $V_{knt}^{*}=0.28$. VD, OD ve XD desenlerinin $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerine UD desenine kıyasla etkileri parabolik kayma şekil fonksiyon için %11.37, %27.27ve (-%24.33) olmaktadır. Uniform kayma

şekil fonksiyonu için %12.13, %28.39 ve (-%26.58); Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için %12.31, %28.59 ve (-%26.9); kosinüs kayma şekil fonksiyonu için %11.29, %27.15 ve (-%23.79) olduğu görülmektedir. Bu oranlar KPT'de VD için %7, OD deseni için %8 ve XD deseni için %13.5 civarında daha belirgin olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.8 incelendiğinde, parabolik kayma şekil fonksiyonun $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerine KPT'ye kıyasla etkisi UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %21.92, %14.9, %10.82 ve %31.06; Uniform kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %19.1, %12.58, %9.16 ve %27.28; Kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %18.58, %12.2, %8.69 ve %26.61; kosinüs kayma şekil fonksiyonu için UD, VD, OD ve XD desenli plaklarda sırasıyla %18.58, %12.2, %8.69 ve %26.6 olduğu görülmektedir. Kayma deformasyonun $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yüküne etkisi parabolik ve kosinüs fonksiyonları için aynı çeşit desenlerde yaklaşık aynı olmasına rağmen Uniform ve kosinüs hiperbolik fonksiyonları için söz konusu etki %2.9 ile %4.8 arasında daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.8. $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün KPT çerçevesinde ve değişik kayma deformasyon şekil fonksiyonları için kritik değerleri ve burkulma modu

Kayma şekil fonksiyonları	$\bar{P}_{12}^{kr} \times 10, (j_{kr})$							
	UD		VD		OD		XD	
Parabol	0.748(2)	0.958(2)	0.663(2)	0.779(2)	0.544(2)	0.610(2)	0.930(2)	1.349(2)
Uniform	0.775(2)	0.958(2)	0.681(2)	0.779(2)	0.555(2)	0.610(2)	0.981(2)	1.349(2)
Kosinüs hiperbolik	0.780(2)	0.958(2)	0.684(2)	0.779(2)	0.557(2)	0.610(2)	0.990(2)	1.349(2)
Kosinüs	0.746(2)	0.958(2)	0.662(2)	0.779(2)	0.543(2)	0.610(2)	0.925(2)	1.349(2)

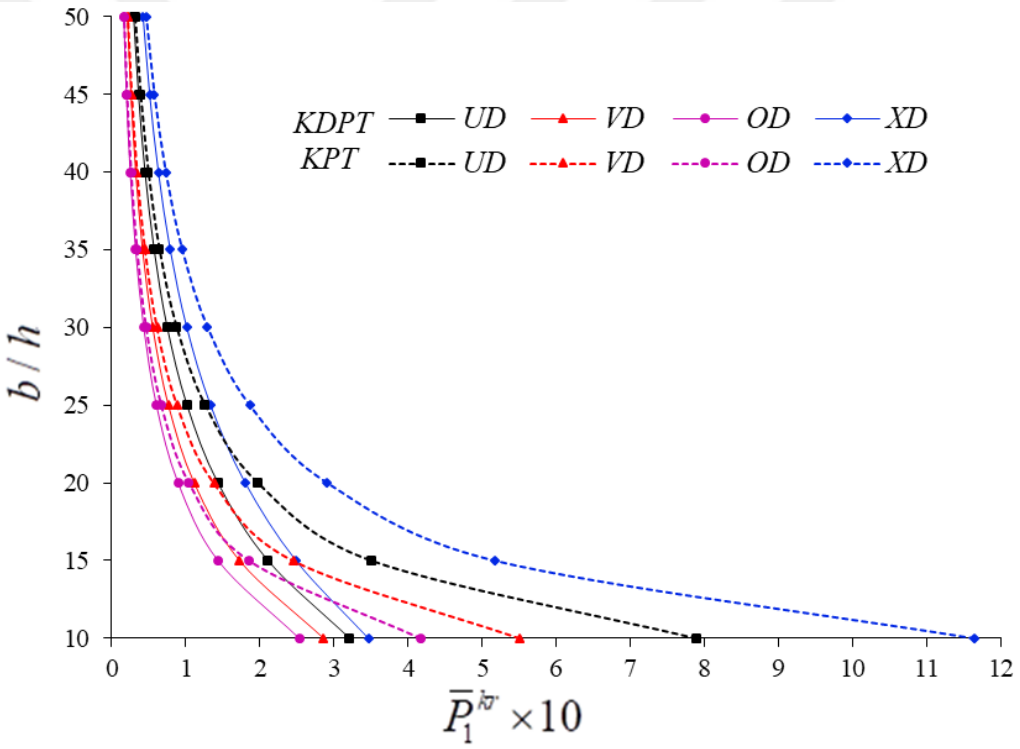
Çizelge 4.6-4.8'den enine kayma deformasyonları hesaba katıldığında UD, OD, VD ve XD desenli nanokompozitlerden oluşan plakların tek ve çift eksenli yüklerin kritik değerleri klasik plak teorisi çerçevesinde elde edilen uygun kritik değerlerden önemli derecede düşük olduğu görülmektedir. Basınç yüklerinin kritik değerlerine karşı gelen enine dalga sayısı x yönlü ve çift eksenli basınç yüklerinde her iki teori çerçevesinde aynı olduğu halde, y yönlü basınç yükü durumunda ise KDPT çerçevesinde KPT'ye kıyasla daha düşük değerler almaktadır. Basınç yüklerinin kritik değerleri parabolik

ve kosinüs kayma şekil fonksiyonlarında bir birine daha yakın olduğu görülürken Uniform ve kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonları için söz konusu kritik değerler birbirine daha yakın olduğu görülmüştür. $\bar{P}_1^{kr}$ yüküne karşı gelen j_{kr}, $\bar{P}_{12}^{kr}$ yüküne karşı gelen j_{kr}'ten o da $\bar{P}_2^{kr}$ yüküne karşı gelen j_{kr}'ten daha küçük olduğunu sayısal hesaplar ortaya koymaktadır. Görüldüğü gibi basınç yüklerinin kritik değerlerine kayma deformasyon etkisi bazı desenlerde aynı olmasına rağmen bazı desenlerde farklılık göstermektedir. Örneğin, XD desenli nanokompozit plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ yüklerine parabolik kayma şekil fonksiyonun etkisi sırasıyla %38.06, %24.07 ve %31.06 olduğu görülmektedir. $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ yüklerine OD desenli plakta enine kayma deformasyon etkisi sırasıyla%14.18, %10.92 ve %10.82, VD desenli plakta bu etki %19.23, %14.9 ve %31.06 ve UD desenli plakta ise %27.25, %18.46 ve %21.921 olduğu görülmektedir (Bkz., Çizelge 4.6-4.8).

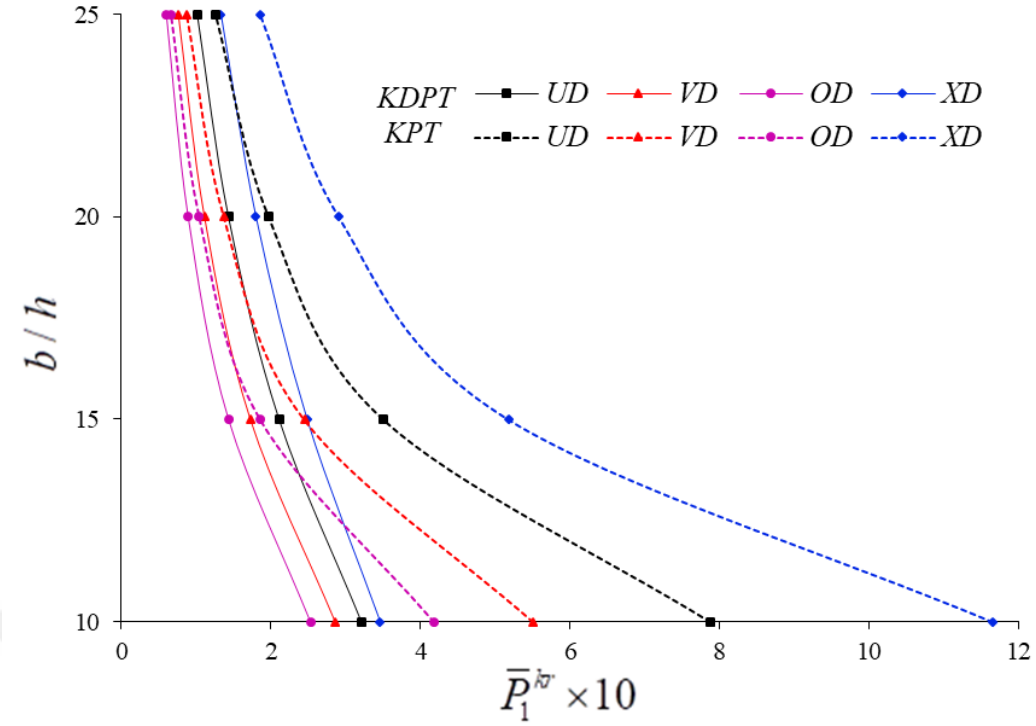
Kayma şekil fonksiyonu parabolik değiştiğinde UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi Çizelge 4.9, Şekil 4.1 ve 4.2'de sunulmaktadır. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002m, $a/b=1, V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.9, Şekil 4.1 ve 4.2 incelendiğinde, her iki teori çerçevesinde $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, burkulma modunun ise hep (1,1) olduğu görülmüştür. UD, VD, OD ve XD desenlerinin kritik burkulma yükünün değerlerine etkisi incelendiğinde, KPT çerçevesinde daha belirgin olmasına rağmen, örneğin VD deseni için o etki yaklaşık %30, OD için %47, XD için (-%47.7) olduğu halde b/h oranının değişiminden bağımsız olduğu görülmüştür. Enine kayma deformasyonlarının etkisinin göz önüne alınması b/h oranının artması ile desen etkilerinin arttığını ortaya koymayıp yanı sıra KPT ile mukayesede desen etkisin zayıflatmaktadır. Örneğin, b/h =10 için $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yüküne heterojen VD desen etkisi UD deseni ile mukayesede %10.84 iken o etki b/h =50 iken %28.62, OD desen etkisi b/h =10 için %21.21 ve b/h =50 için %45.12, heterojen XD desen etkisi ise b/h =10 için (-%7.88 ve b/h =50 için (-%42.76) olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.9. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_1^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi

b/h	$\bar{P}_1^{kr} \times 10,\ (i_{kr}, j_{kr}) = (1,1)$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
10	3.211(1)	7.884(1)	2.861(1)	5.512(1)	2.530(1)	4.178(1)	3.464(1)	11.645(1)
15	2.110(1)	3.504(1)	1.726(1)	2.450(1)	1.435(1)	1.857(1)	2.487(1)	5.176(1)
20	1.434(1)	1.971(1)	1.113(1)	1.378(1)	0.896(1)	1.044(1)	1.803(1)	2.911(1)
25	1.017(1)	1.261(1)	0.765(1)	0.882(1)	0.604(1)	0.668(1)	1.335(1)	1.863(1)
30	0.750(1)	0.876(1)	0.554(1)	0.612(1)	0.432(1)	0.464(1)	1.014(1)	1.294(1)
35	0.573(1)	0.644(1)	0.417(1)	0.450(1)	0.323(1)	0.341(1)	0.790(1)	0.951(1)
40	0.450(1)	0.493(1)	0.325(1)	0.344(1)	0.250(1)	0.261(1)	0.630(1)	0.728(1)
45	0.362(1)	0.389(1)	0.260(1)	0.272(1)	0.199(1)	0.206(1)	0.512(1)	0.575(1)
50	0.297(1)	0.315(1)	0.212(1)	0.220(1)	0.163(1)	0.167(1)	0.424(1)	0.466(1)



Şekil 4.1. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı



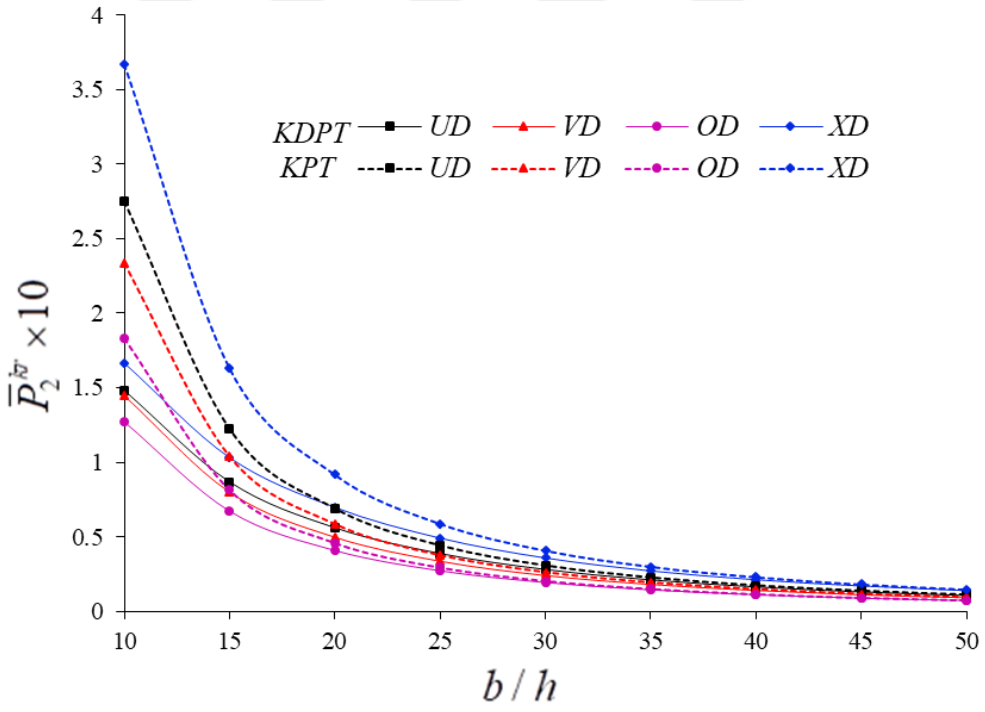
Şekil 4.2. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı

Kayma şekil fonksiyonu parabolik değiştiğinde UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi Çizelge 4.10, Şekil 4.3 ve 4.4'de sunulmaktadır. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002m, $a/b=1$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.10, Şekil 4.3 ve 4.4'de incelendiğinde, her iki teori çerçevesinde $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, boyuna dalga sayısının bire eşit olduğu (i_{kr} =1) ve enine dalga sayısı j_{kr} ise yavaş tempolu olsa da arttığı görülmüştür. UD, VD, OD ve XD desenlerinin kritik burkulma yükünün değerlerine etkisi incelendiğinde KPT çerçevesinde daha belirgin olmasına rağmen (VD deseni için o etki yaklaşık %15, OD için %33, XD için (-%33.5)) b/h oranının değişiminden bağımsızdır. $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerlerine kayma deformasyonlarının etkisinin göz önüne alınması desen etkilerini önemli derecede düşürmekle beraber, b/h oranının artmasına bağlıdır ve b/h oranı arttığında desen etkilerinin belirginliği artsa da KPT'deki etkinin çok altında kalmaktadır. Örneğin, UD deseni ile mukayesede, b/h=10 için $\bar{P}_2^{kr}$ basınç

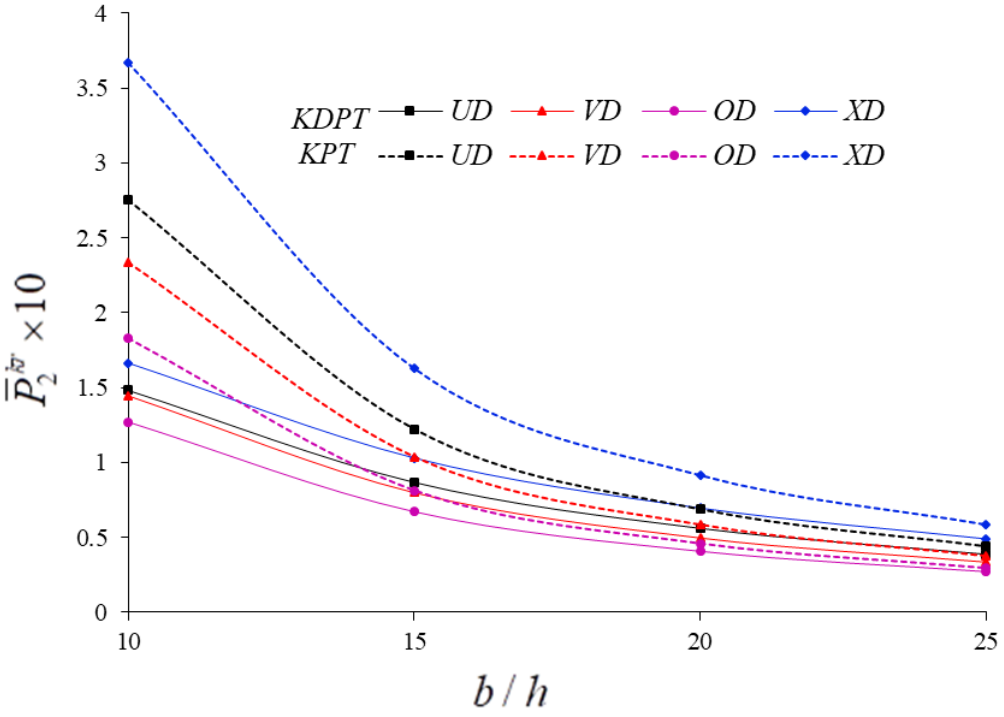
yüküne heterojen VD desen etkisi %2.43 iken o etki b/h =50 iken %14.15, OD desen etkisi b/h =10 için %14.24 ve b/h =50 için %32.08, heterojen XD desen etkisi ise b/h =10 için (-%12.35) ve b/h =50 için (-%31.13) olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi

b/h	$\bar{P}_2^{kr} \times 10,\ i_{kr}=1,\ (j_{kr})$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
10	1.482(2)	2.751(3)	1.446(2)	2.338(2)	1.271(2)	1.832(2)	1.665(2)	3.673(3)
15	0.868(2)	1.223(3)	0.799(2)	1.039(2)	0.672(2)	0.814(2)	1.031(2)	1.632(3)
20	0.561(2)	0.688(3)	0.497(2)	0.584(2)	0.408(2)	0.458(2)	0.697(2)	0.918(3)
25	0.388(2)	0.440(3)	0.336(2)	0.374(2)	0.272(2)	0.293(2)	0.491(3)	0.588(3)
30	0.281(3)	0.306(3)	0.240(2)	0.260(2)	0.193(2)	0.203(2)	0.358(3)	0.408(3)
35	0.211(3)	0.225(3)	0.180(2)	0.191(2)	0.144(2)	0.149(2)	0.271(3)	0.300(3)
40	0.164(3)	0.172(3)	0.140(2)	0.146(2)	0.111(2)	0.114(2)	0.212(3)	0.230(3)
45	0.130(3)	0.136(3)	0.111(2)	0.115(2)	0.088(2)	0.090(2)	0.170(3)	0.181(3)
50	0.106(3)	0.110(3)	0.091(2)	0.093(2)	0.072(2)	0.073(2)	0.139(3)	0.147(3)



Şekil 4.3. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı



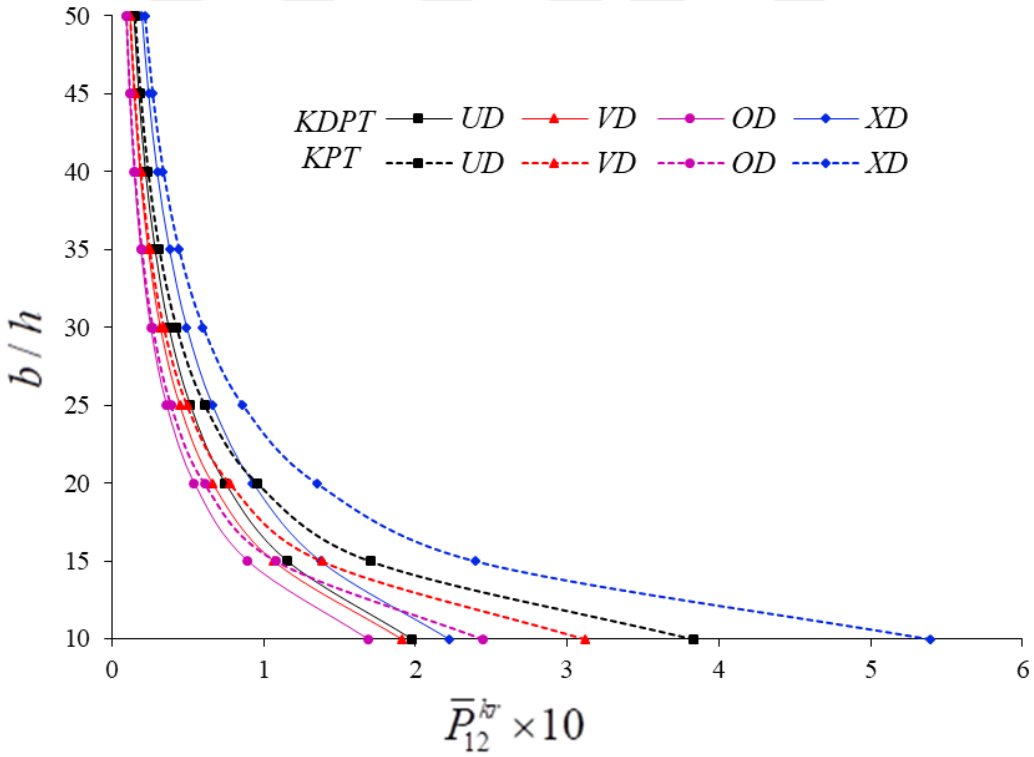
Şekil 4.4. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı

Kayma şekil fonksiyonu parabolik değiştiğinde UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi Çizelge 4.11, Şekil 4.5 ve 4.6'da sunulmaktadır. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002m, $a/b=1$, $\beta_0=0.5$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.11, Şekil 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, her iki teori çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, boyuna dalga sayısının çizelge içinde gösterildiği gibi bire eşit olduğu (i_{kr} =1) ve iki değer dışında enine dalga sayısı $j_{kr}=2$ olduğu görülmüştür. UD, VD, OD ve XD desenlerinin kritik burkulma yükünün değerlerine etkisi incelendiğinde KPT çerçevesinde daha belirgin olmasına rağmen (VD deseni için o etki yaklaşık %18, OD için %36, XD için (-%40) b/h oranının değişiminden bağımsızdır. $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerine kayma deformasyonlarının etkisinin göz önüne alınması desen etkilerini önemli derecede düşürmekle beraber, b/h oranının artmasına bağlıdır ve b/h oranı arttığında desen etkilerinin belirginliğini artırsa da KPT'deki etkinin çok altında

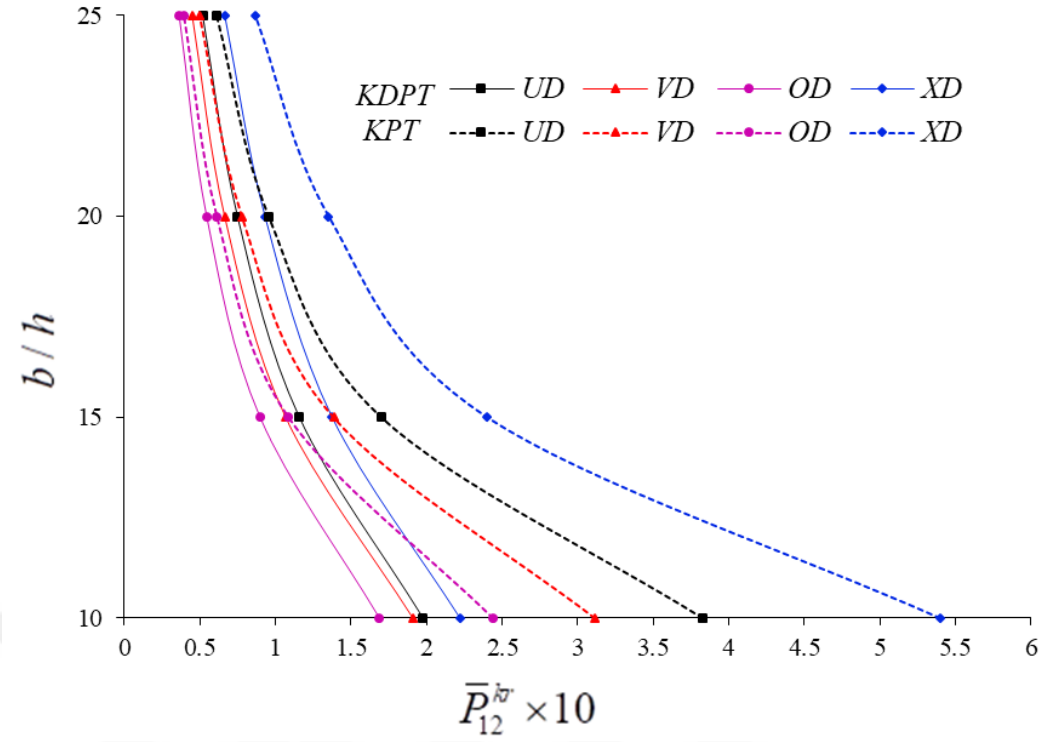
kalmaktadır. Örneğin; UD deseni ile mukayesede, b/h =10 ve 50 için $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yüküne VD, OD ve XD desenlerinin etkisi sırasıyla %3.44 ve %17.12, %14.63 ve %34.25 ve (-%12.35) ve (-%36.3) olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.11. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun b/h oranına göre değişimi

b/h	$\bar{P}_{12}^{kr}\times 10,\ i_{kr}=1,\ j_{kr}=2$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
10	1.976(2)	3.831(2)	1.908(1)	3.117(2)	1.687(1)	2.442(2)	2.220(2)	5.397(2)
15	1.157(2)	1.703(2)	1.066(2)	1.385(2)	0.897(2)	1.085(2)	1.374(2)	2.399(2)
20	0.748(2)	0.958(2)	0.663(2)	0.779(2)	0.544(2)	0.610(2)	0.930(2)	1.349(2)
25	0.518(2)	0.613(2)	0.448(2)	0.499(2)	0.362(2)	0.391(2)	0.664(2)	0.863(2)
30	0.376(2)	0.426(2)	0.320(2)	0.346(2)	0.257(2)	0.271(2)	0.494(2)	0.600(2)
35	0.285(2)	0.313(2)	0.240(2)	0.254(2)	0.191(2)	0.199(2)	0.380(2)	0.441(2)
40	0.222(2)	0.239(2)	0.186(2)	0.195(2)	0.148(2)	0.153(2)	0.299(2)	0.337(2)
45	0.178(2)	0.189(2)	0.148(2)	0.154(2)	0.118(2)	0.121(2)	0.242(2)	0.266(2)
50	0.146(2)	0.153(2)	0.121(2)	0.125(2)	0.096(2)	0.098(2)	0.199(2)	0.216(2)

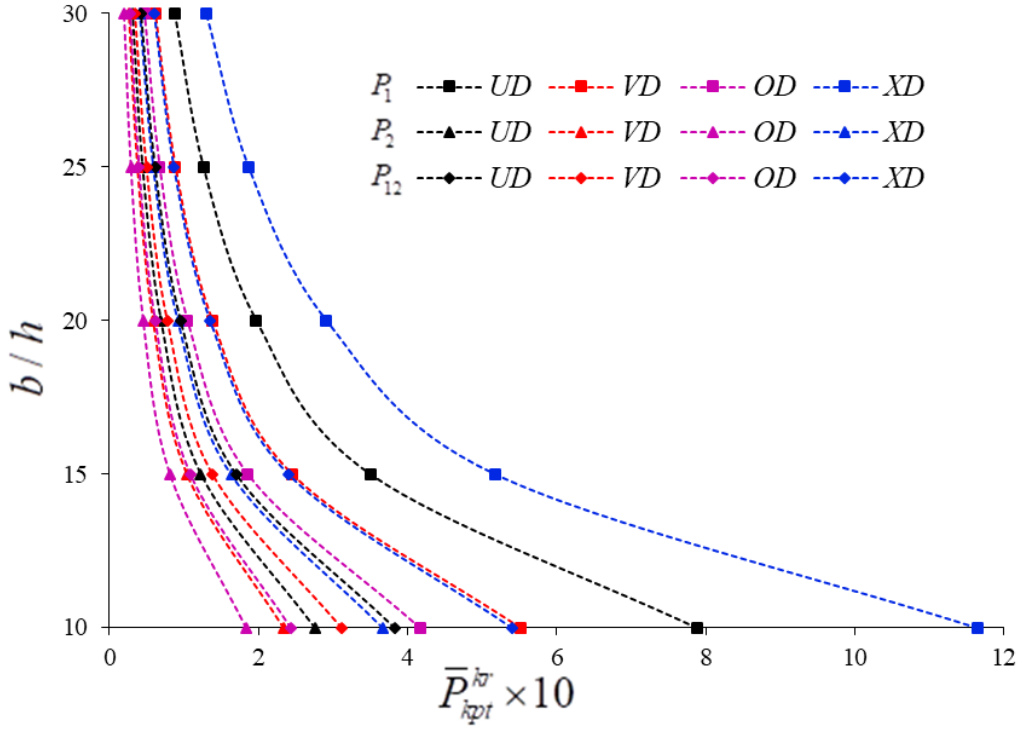


Şekil 4.5. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının 10'dan 50'ye kadar değişimine göre dağılımı

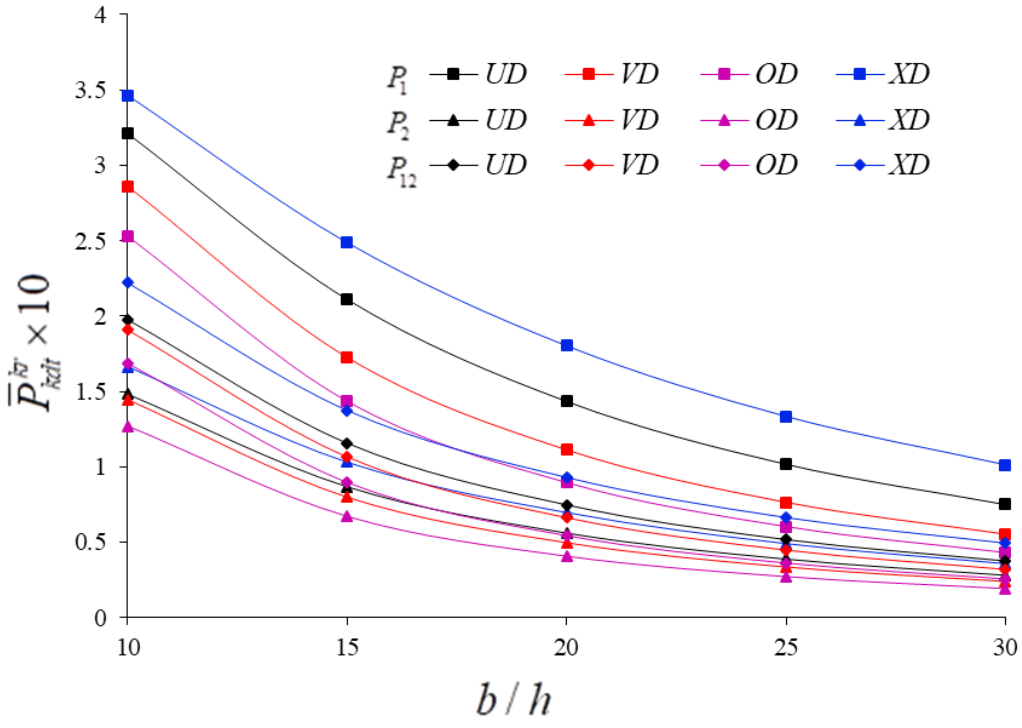


Şekil 4.6. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 25'e kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11 bir arada kullanılarak, KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ yüklerinin değerlerinin b/h oranının değişimine bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8'de çizilerek mukayese edilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi tüm desenlerde nanokompozit plakların kritik yüklerinin en küçük değeri y doğrultusundaki basınç yükünde elde edilmekte iken en büyük minimum kritik yük değerleri x doğrultusundaki basınç yükünün varlığında ortaya çıkmaktadır. Çift eksenli yüklerin kritik değerleri tek eksenli yüklerin kritik değerleri arasında değişmektedir. UD, VD, OD ve XD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri kendi aralarında mukayese edildiğinde en belirgin desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$ için OD profilinde olduğu ve b/h oranın artışının bu etkiyi daha da artırdığı görülmektedir. Örneğin; KDPT çerçevesinde b/h = 10'dan 30'a arttığında $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine OD desen etkisi sırasıyla %21.21'den %42.40'a, %14.24'ten %31.32'ye ve %14.63'ten %31.65'e artmaktadır. KPT çerçevesinde ise $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine OD desen etkisi b/h oranından bağımsız olup yaklaşık sabit kalır ve sırasıyla %47, %33 ve %36 olmaktadır.

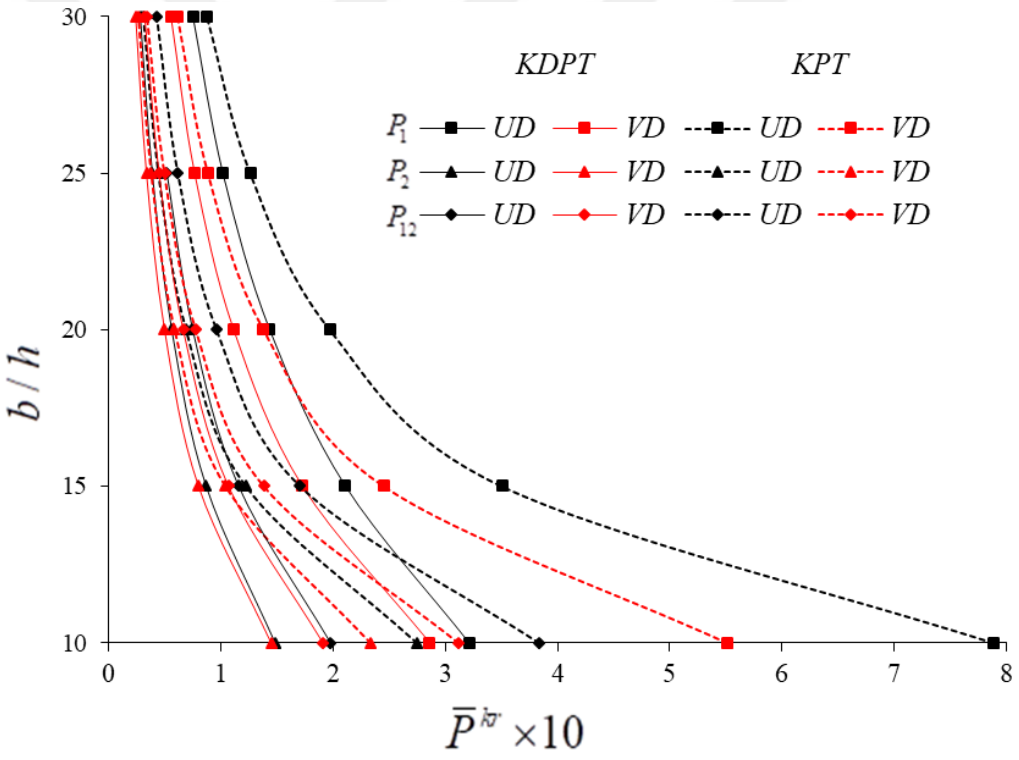


Şekil 4.7. KPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 30'a kadar değişimine göre dağılımı



Şekil 4.8. KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'dan 30'a kadar değişimine göre dağılımı

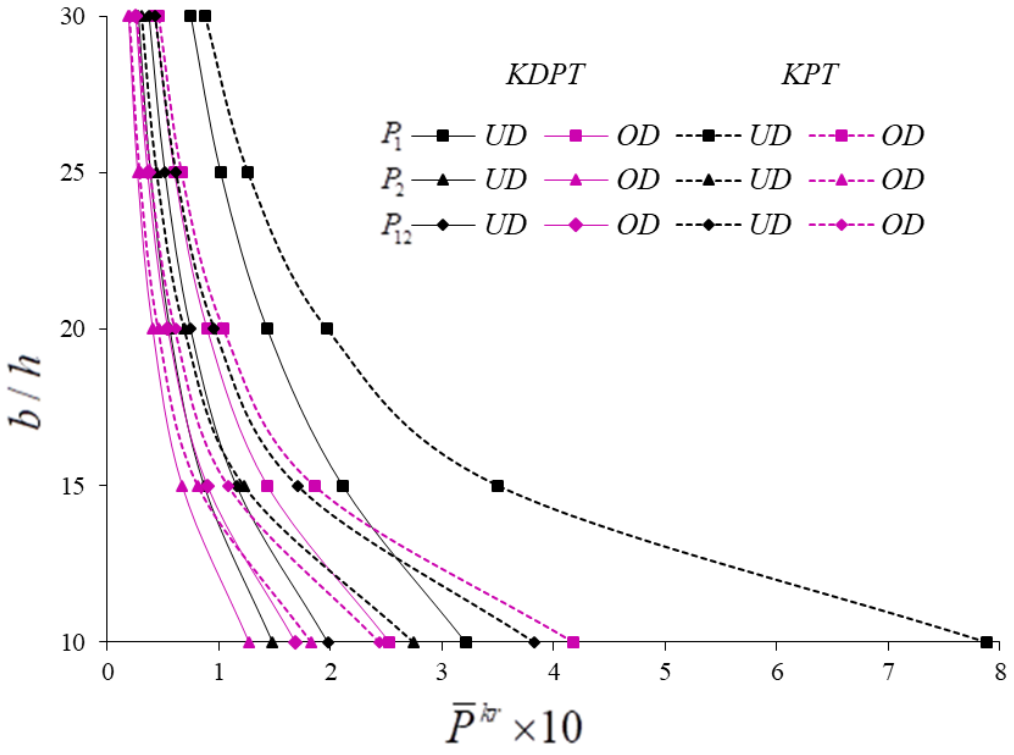
Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11 bir arada kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.9'da çizilerek mukayese edilmektedir. Klasik kabuk teorisi kullanıldığında elde edilen $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri enine kayma deformasyon teorisindeki değerlerden b/h'ın küçük değerlerinde daha belirgin iken, bu oran arttığında aradaki fark azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, VD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi UD'ye kıyasla b/h 10'dan 30'a arttığında artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini $\bar{P}_1^{kr}$'de olup %10.90 ile %26.13 arasında değişmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla etkisi VD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$'inde olup b/h 10'dan 30'a arttığında azalmakta ve %48.10'dan %9.48'e azalmaktadır.



Şekil 4.9. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11 verileri bir arada kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.10'da çizilerek mukayese edilmektedir. Klasik kabuk teorisi kullanıldığında OD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri enine kayma

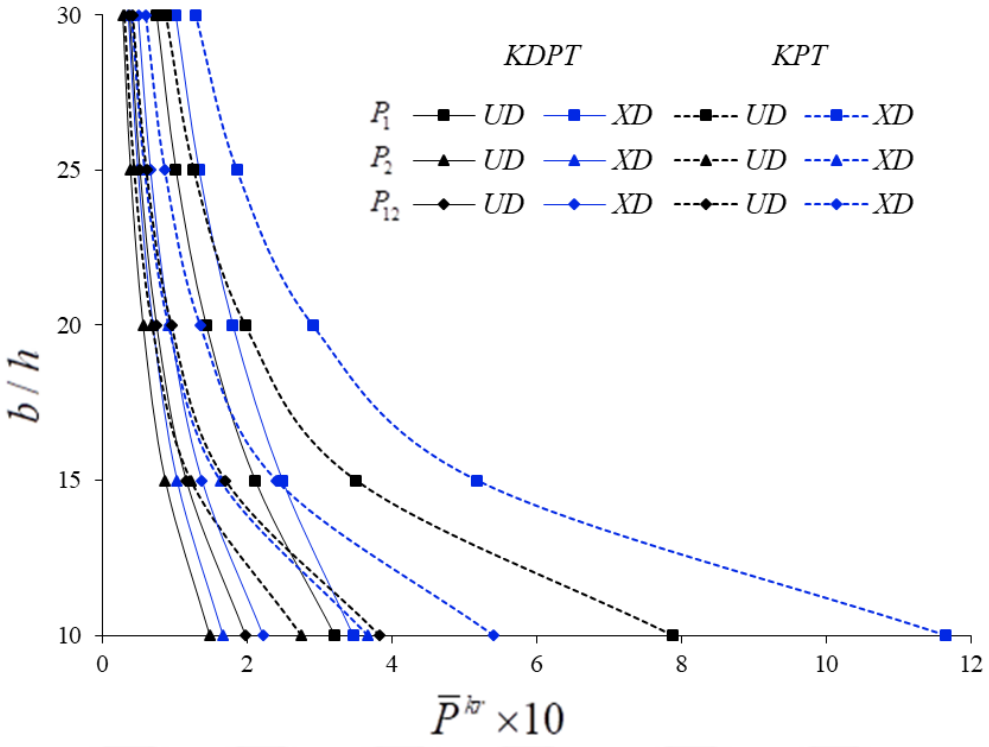
deformasyon teorisindeki değerlerden b/h'ın küçük değerlerinde daha belirgin iken, bu oran arttığında aradaki fark azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, OD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi UD'ye kıyasla b/h 10'dan 30'a arttığında artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini $\bar{P}_1^{kr}$'de olup %21.21 ile %42.40 arasında değişmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla etkisi OD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$'de olup b/h 10'dan 30'a arttığında azalmakta ve %39.45'ten %6.90'a azalmaktadır.



Şekil 4.10. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11 kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.11'de çizilerek mukayese edilmektedir. KPT ve KDPT çerçevesinde, XD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri b/h'ın artmasıyla azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, XD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi UD'ye kıyasla b/h 10'dan 30'a arttığında artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini $\bar{P}_2^{kr}$'de olup (-%12.35 ile (-%27.40) arasında değişmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla

etkisi XD desenli plağın x doğrultusundaki basıncın kritik değerlerine olup b/h 10'dan 30'a arttığında %70.25'dan %21.64'e kadar azalmaktadır.



Şekil 4.11. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin b/h oranının 10'den 30'a kadar değişimine göre dağılımı

Nanokompozit plakların $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ değerleri ve burkulma modunun a/b oranına göre dağılımı Çizelge 4.12, Şekil 4.12 ve 4.13'te sunulmaktadır. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki şu şekildedir h=0.002m, $b/h=20$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.12, Şekil 4.12 ve 4.13 incelendiğinde $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ basınç yüklerinin kritik değerleri a/b oranı arttığında sürekli azalırken, $(i_{kr}, j_{kr})=(1,1)$ olduğu görülmüştür.

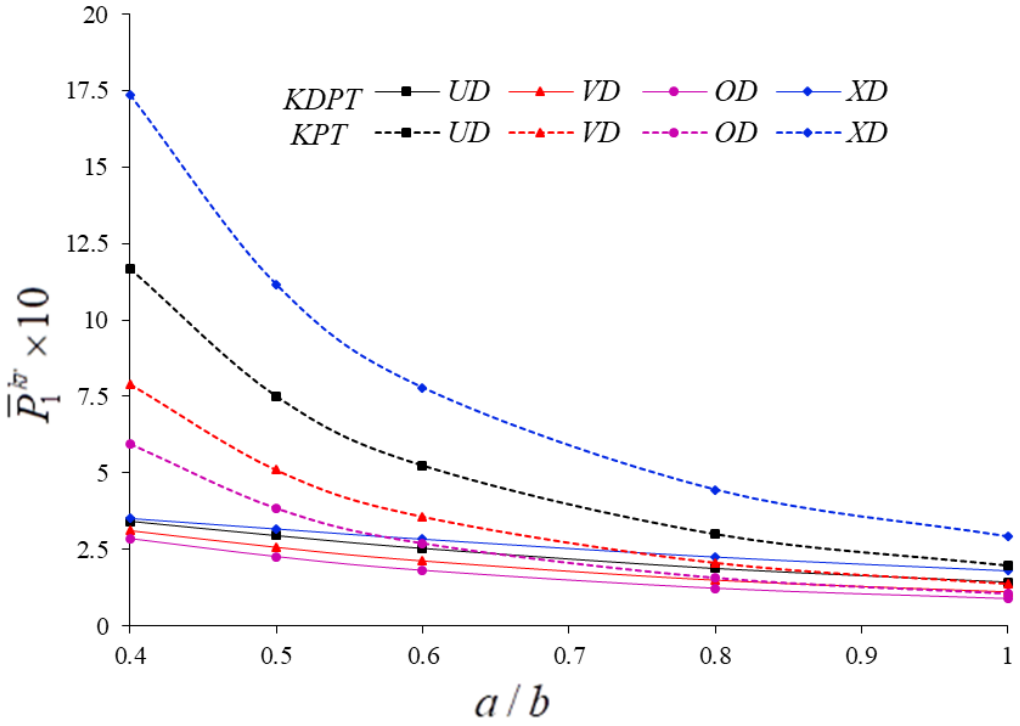
Nanokompozit plakların $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ değerleri ve burkulma modunun a/b oranına göre dağılımı Çizelge 4.12, Şekil 4.12 ve 4.13'te sunulmaktadır. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki şu şekildedir h=0.002m, $b/h=20$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.12, Şekil 4.12 ve 4.13 incelendiğinde $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ basınç yüklerinin kritik değerleri a/b oranı arttığında sürekli azalırken, $(i_{kr}, j_{kr})=(1,1)$ olduğu görülmüştür.

UD, VD, OD ve XD desenlerinin $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ kritik burkulma yüklerinin değerlerine etkisi incelendiğinde, $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ değerlerine desen etkilerinin $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ değerlerinden daha belirgin olduğu görülmüştür. UD desenli plağın kritik yükleri ile kıyaslandığında, a/b oranının sıfırdan üçe artışına bağlı olarak $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$'ye fonksiyonel değişen desen etkileri parabolik şekilde, yani önce artıp maksimum değerine ulaşarak sonra azalırken, $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$'ye desen etkileri ise sürekli azalmaktadır. VD, OD ve XD desenli plaklar ele alındığında, $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$'ye azami etkinin, VD ve OD için a/b=1.2'de sırasıyla %22.87 ve %38.70, XD için ise a/b=2.0'de (-%34.88) olduğu görülmüştür. Söz konusu desenli plakların $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ değerlerine en düşük etkinin, VD için %4.76 ile a/b =3'te, OD deseni için %16.48 ve XD deseni için (-%2.63) ile a/b=0.4'te meydana geldiği gözlenmiştir.

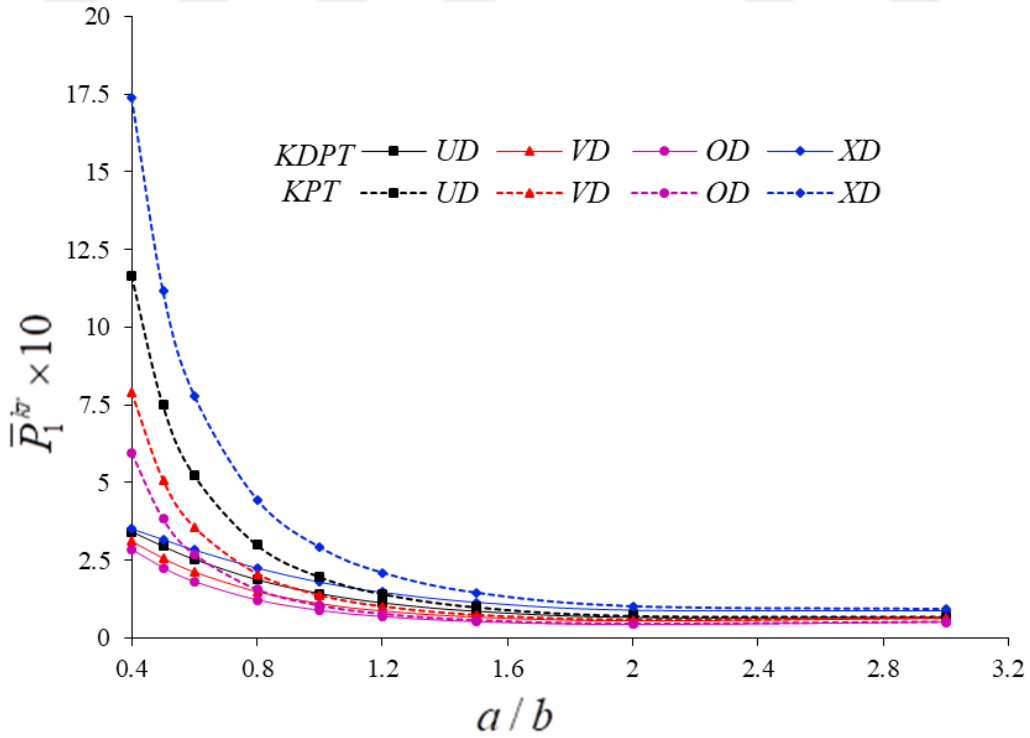
Enine kayma deformasyonun x yönündeki basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki zayıflayarak $a/b \geq 3$'te etkisiz hale gelmektedir. Dolayısıyla $a/b > 3$ için klasik kabuk teorisi kullanılabilir fikri ağırlık kazanmaktadır. Detaylara girince a/b=0.4 için x yönündeki basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyon etkisi UD, VD, OD ve XD için sırasıyla% 70.64, %60.59, %51.89 ve %79.79 olurken, a/b=3'te söz konusu etkiler sırasıyla %2.33, %1.54, %1.15 ve %3.6'ya kadar düşmektedir.

Çizelge 4.12. $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ basınç yüklerinin kritik değerleri ve burkulma modunun a/b oranına bağlı dağılımı

	$P_1^{kr} \times 10,\ (i_{kr}, j_{kr}) = (1,1)$							
a/b	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.4	3.422(1)	11.655(1)	3.115(1)	7.904(1)	2.858(1)	5.940(1)	3.512(1)	17.378(1)
0.5	2.953(1)	7.492(1)	2.570(1)	5.094(1)	2.269(1)	3.831(1)	3.169(1)	11.162(1)
0.6	2.535(1)	5.234(1)	2.125(1)	3.570(1)	1.820(1)	2.688(1)	2.835(1)	7.789(1)
0.8	1.880(1)	2.996(1)	1.497(1)	2.064(1)	1.232(1)	1.558(1)	2.252(1)	4.446(1)
1.0	1.434(1)	1.971(1)	1.113(1)	1.378(1)	0.896(1)	1.044(1)	1.803(1)	2.911(1)
1.2	1.137(1)	1.425(1)	0.877(1)	1.017(1)	0.697(1)	0.775(1)	1.476(1)	2.092(1)
1.5	0.866(1)	0.999(1)	0.679(1)	0.744(1)	0.536(1)	0.572(1)	1.156(1)	1.448(1)
2.0	0.668(1)	0.718(1)	0.559(1)	0.584(1)	0.443(1)	0.458(1)	0.901(1)	1.012(1)
3.0	0.672(1)	0.688(1)	0.640(1)	0.650(1)	0.517(1)	0.523(1)	0.885(1)	0.918(1)



Şekil 4.12. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı



Şekil 4.13. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 3'e kadar değişimine bağlı değişimi

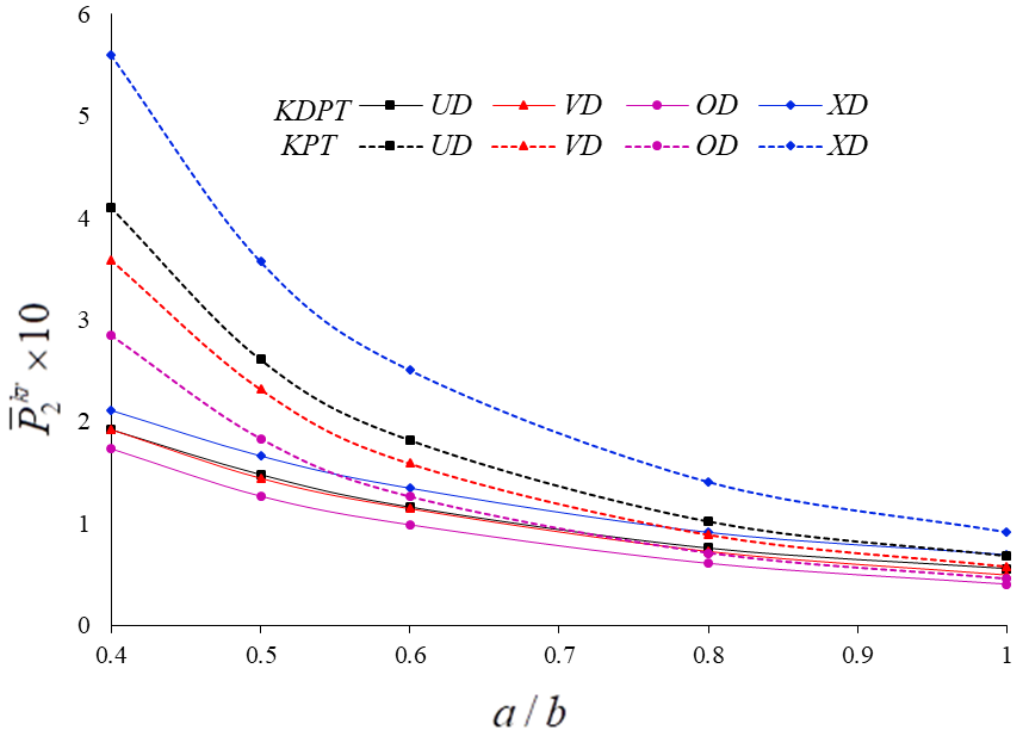
Kayma şekil fonksiyonu parabolik değiştiğinde, UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ değerleri ve burkulma modunun a/b oranına bağlı dağılımı Çizelge 4.13, Şekil 4.12 ve 4.13'te sunulmaktadır. Sayısal hesaplarda şu veriler kullanıldı: h=0.002m, $b/h=20$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.13, Şekil 4.14 ve 4.15 incelendiğinde, her iki teori çerçevesinde y ekseni doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerleri a/b oranının artmasıyla azalmakta, boyuna dalga sayısı hep bir değerini almakta (i_{kr} =1) iken j_{kr} ise önce azalmakta ve $a/b \geq 2.0$ olduğunda ise bir sayısına sabitlenmektedir.

UD, VD, OD ve XD desenlerinin $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ değerlerine etkileri kendi aralarında incelendiğinde, $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ değerlerine desen etkilerinin daha belirgin olduğu görülmüştür. UD desenli plağın kritik yükleri ile diğer desenler kıyaslandığında, a/b oranı 0.4'ten 3.0'e arttığında $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$'ye FG-KNT değişen desen etkileri önce artıp maksimum değerine ulaşarak sonra azalırken, $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$'ye tüm desen etkilerinde bir düzensizlik söz konusudur. VD, OD ve XD desenli plaklar ele alındığında, $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$'ye en büyük etkinin, tüm desenlerde a/b =2.0 de meydana geldiğini ve VD, OD ve XD için etkilerin sırasıyla %16.17, %33.53 ve (-%34.73) olduğu görülmüştür. Söz konusu desenli plakların $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ değerlerine en düşük etkinin, VD için (-%0.05) ,OD için %9.73 ve XD için (-%9.83) ile a/b =0.4'te meydana geldiği gözlenmiştir.

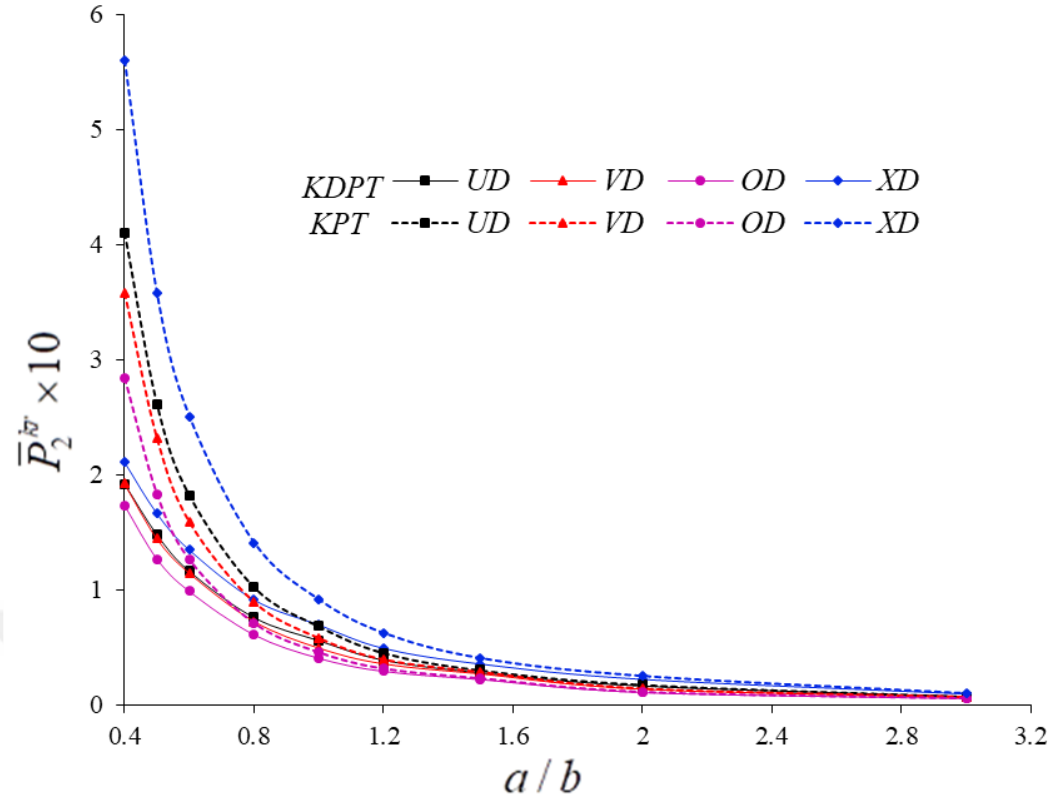
Enine kayma deformasyonunun y yönündeki basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki $a/b=3$'te oldukça zayıflamaktadır. Örneğin, a/b =0.4 için y yönündeki basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyon etkisi UD, VD, OD ve XD için sırasıyla %53.17, %46.33, %38.99 ve %62.32 iken, a/b =3'te söz konusu etkiler sırasıyla %1.32, %1.39, %1.72 ve %3.9'a kadar azalmaktadır.

Çizelge 4.13. $\bar{P}^{kr}_{2kdt}$ ve $\bar{P}^{kr}_{2kpt}$ değerleri ve burkulma modunun a/b oranına göre değişimi

a/b	$P_2^{kr}\times 10,\ i_{kr}=1,\ (j_{kr})$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.4	1.922(5)	4.104(6)	1.923(5)	3.583(6)	1.735(5)	2.844(6)	2.111(5)	5.602(7)
0.5	1.482(4)	2.615(5)	1.446(4)	2.319(5)	1.271(4)	1.832(4)	1.665(4)	3.575(5)
0.6	1.164(4)	1.824(4)	1.147(4)	1.592(4)	0.990(4)	1.264(4)	1.349(4)	2.508(4)
0.8	0.761(3)	1.026(3)	0.728(3)	0.896(3)	0.612(3)	0.711(3)	0.915(3)	1.411(3)
1.0	0.561(2)	0.688(3)	0.497(2)	0.584(2)	0.408(2)	0.458(2)	0.697(2)	0.918(3)
1.2	0.391(2)	0.456(2)	0.359(2)	0.398(2)	0.294(2)	0.316(2)	0.494(2)	0.627(2)
1.5	0.281(2)	0.306(2)	0.272(2)	0.289(2)	0.223(2)	0.232(2)	0.358(2)	0.408(2)
2.0	0.167(1)	0.180(1)	0.140(1)	0.146(1)	0.111(1)	0.114(1)	0.225(1)	0.253(1)
3.0	0.075(1)	0.076(1)	0.071(1)	0.072(1)	0.057(1)	0.058(1)	0.098(1)	0.102(1)



Şekil 4.14. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı



Şekil 4.15. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 3'e kadar değişimine bağlı değişimi

Dört çeşit KNT takviyeli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun a/b oranına bağlı dağılımı Çizelge 4.14, Şekil 4.16 ve 4.17'de gerçekleştirilmiştir. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002m, $b/h=20$, $\delta=0.5$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.14, Şekil 4.16 ve 4.17 incelendiğinde, a/b oranı arttığında $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ değerlerinin sürekli azaldığı görülürken, enine dalga sayısının önce azaldığı ve $a/b \geq 1.5$ için bire eşit olduğu saptanmıştır. Ayrıca boyuna dalga sayısının çizelge içinde gösterildiği gibi hep bire eşit olduğu (i_{kr} =1) olduğu görülmüştür.

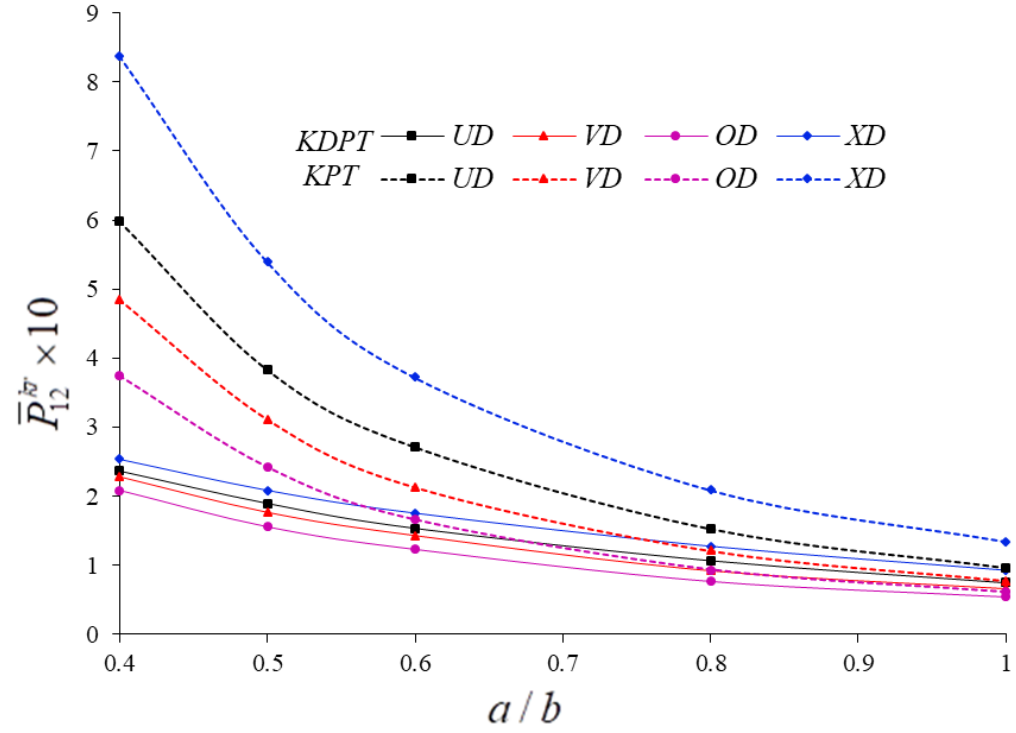
UD, VD, OD ve XD desenlerinin $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ değerlerine etkileri kendi aralarında incelendiğinde, $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ değerlerine desen etkilerinin daha belirgin olduğu görülmüştür. UD desenli plağın kritik yükleri ile diğer desenler kıyaslandığında, a/b oranı 0.4'ten

3.0'e arttığında $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$'ye FG-KNT değişen desen etkileri önce artıp sonra azalırken, $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$'ye tüm desen etkilerinde bir düzensizlik söz konusudur. VD, OD ve XD desenli plaklar ele alındığında, $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$'ye en büyük etkinin, tüm desenlerde $a/b=1.5$'de meydana geldiğini, VD, OD ve XD desenlerinin etkilerinin sırasıyla %21.81, %38.24 ve (-%34.53) olduğu görülmüştür. Söz konusu desenli plakların $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ değerlerine en düşük etkinin VD, OD ve XD için sırasıyla %3.51, %11.83 ve (-% 7.14) ile a/b =0.4'te meydana gelmektedir.

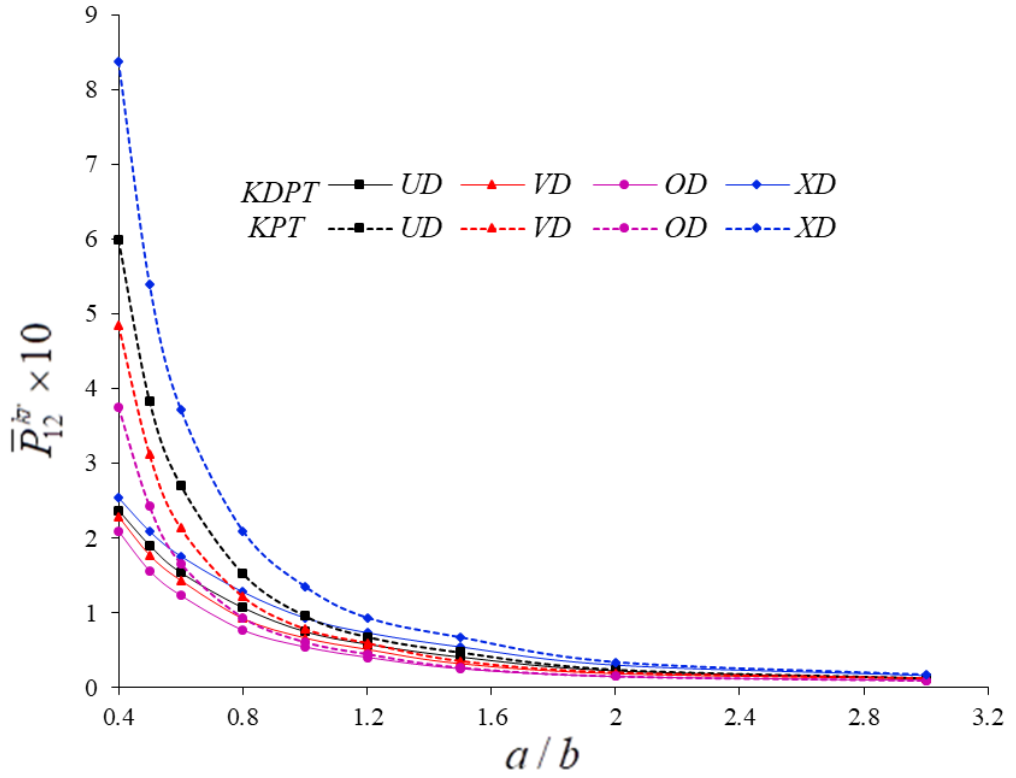
Enine kayma deformasyonunun çift eksenli basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki zayıflamaktadır. Örneğin, a/b=0.4 için $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyon etkileri UD, VD, OD ve XD için sırasıyla % 60.46, %52.92, %44.26 ve %69.73 tespit edilirken, a/b=3'te söz konusu etkiler sırasıyla %2.4, %1.7, %1.05 ve %3.6 olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.14. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun a/b oranına göre değişimi

	$\bar{P}_{12}^{kr}\times 10,\ i_{kr}=1,(j_{kr})$							
a/b	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.4	2.367(4)	5.986(5)	2.284(3)	4.851(4)	2.087(3)	3.744(4)	2.536(3)	8.377(6)
0.5	1.898(3)	3.831(4)	1.769(3)	3.117(4)	1.559(3)	2.422(3)	2.087(3)	5.397(4)
0.6	1.537(3)	2.708(4)	1.432(3)	2.134(3)	1.232(3)	1.660(3)	1.757(3)	3.723(4)
0.8	1.068(2)	1.523(3)	0.923(2)	1.213(2)	0.768(2)	0.936(2)	1.278(2)	2.094(3)
1.0	0.748(2)	0.958(2)	0.663(2)	0.779(2)	0.544(2)	0.610(2)	0.930(2)	1.349(2)
1.2	0.580(2)	0.677(2)	0.510(1)	0.591(2)	0.405(1)	0.450(1)	0.733(2)	0.931(2)
1.5	0.408(1)	0.470(1)	0.319(1)	0.350(1)	0.252(1)	0.269(1)	0.544(1)	0.668(2)
2.0	0.223(1)	0.239(1)	0.186(1)	0.195(1)	0.148(1)	0.153(1)	0.300(1)	0.337(1)
3.0	0.122(1)	0.125(1)	0.116(1)	0.118(1)	0.094(1)	0.095(1)	0.161(1)	0.167(1)

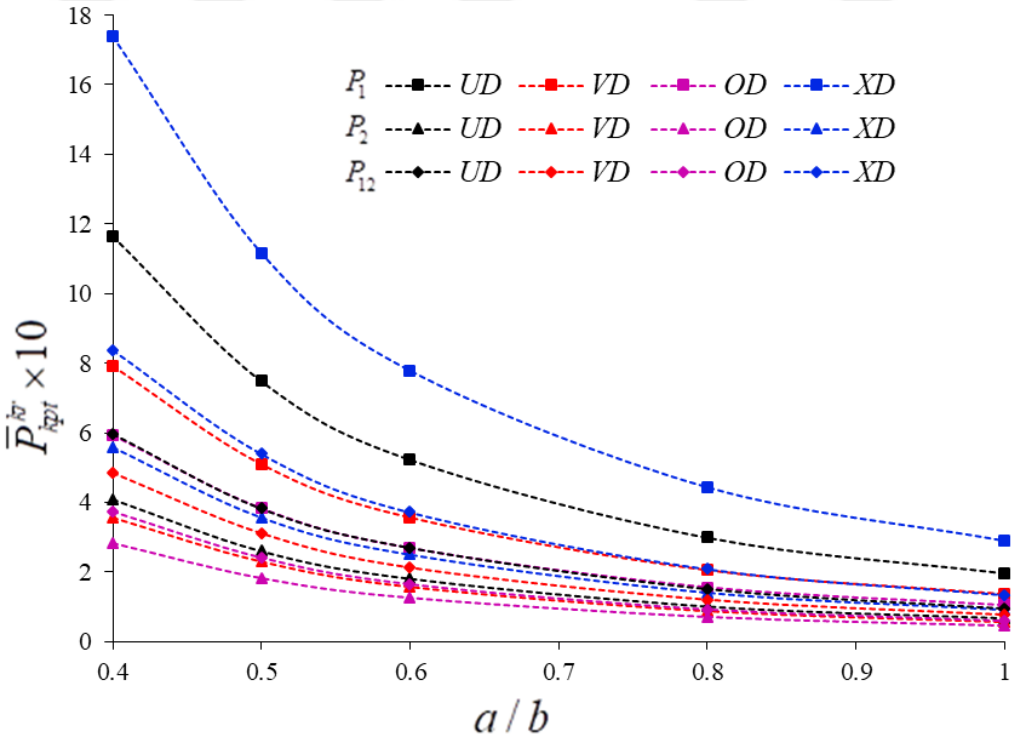


Şekil 4.16. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı

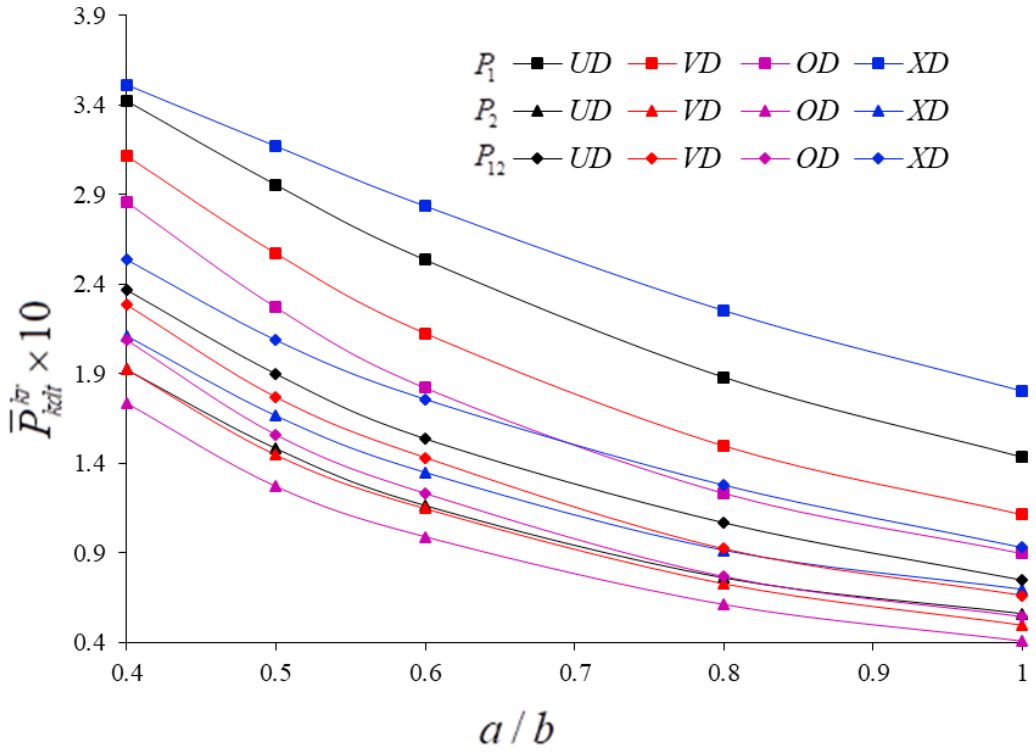


Şekil 4.17. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 3'e kadar değişimine bağlı değişimi

Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14 bir arada kullanılarak, KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ yüklerinin değerlerinin a/b oranının değişimine bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.17 ve 4.18'de çizilerek mukayese edilmektedir. Şekil 4.17 ve 4.18'den görüldüğü gibi $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri a/b oranı 0.4'ten 1'e kadar değiştiğinde sürekli azalmaktadır. VD, OD ve XD desenlerinin UD desenine kıyasla $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkileri a/b oranın 0.4'ten 1.0'e artışı ile KDPT çerçevesinde düzenli artarken, KPT çerçevesinde bir düzensizlik söz konusudur. En belirgin desen etkisi yine OD de ortaya çıkmaktadır. Örneğin; KDPT çerçevesinde a/b = 0.4'ten 1.0'e arttığında, $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine OD desenin etkisi sırasıyla %16.48'den %37.52'ye, %9.73'ten %27.27'ye ve %11.83'ten %27.27'ye artmaktadır. KPT çerçevesinde ise $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine OD desenin etkisi a/b oranı arttığında düzensiz bir etki sergilemektedir. Örneğin $\bar{P}_1^{kr}$ değerine etki %49.04'ten %47.03'e azalmakta, $\bar{P}_2^{kr}$ değerine düzensiz değişerek %30.7'den %33.43'e artmakta ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerine %37.45'den %36.33'e azalmaktadır.

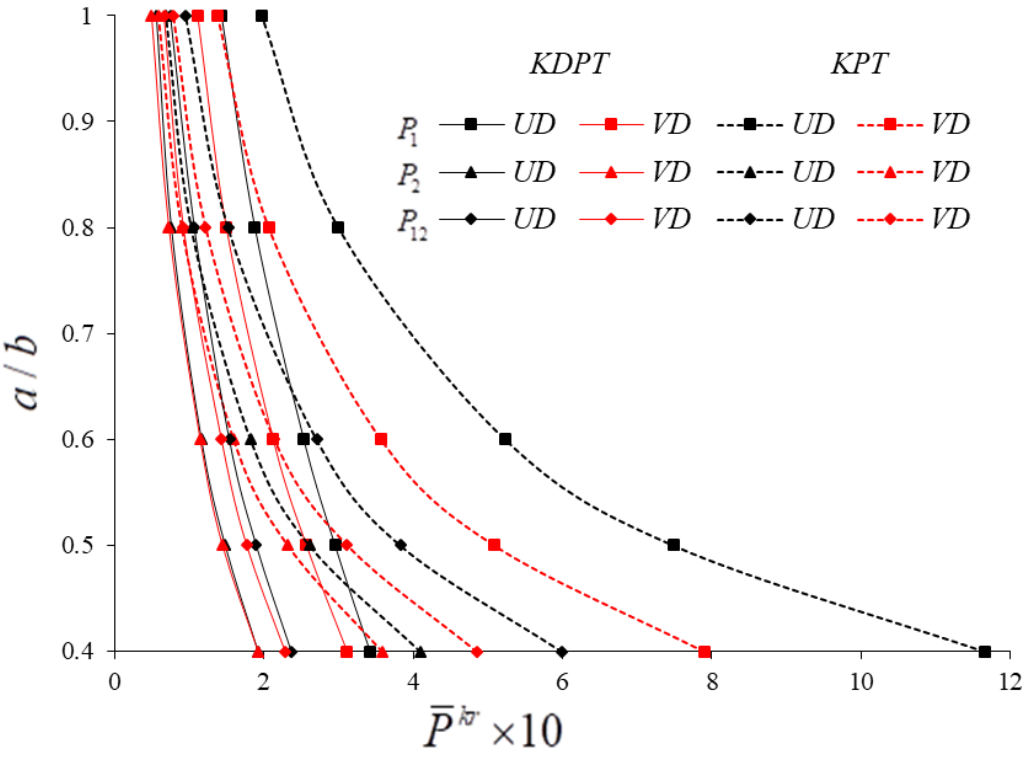


Şekil 4.18. KPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'ten 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı



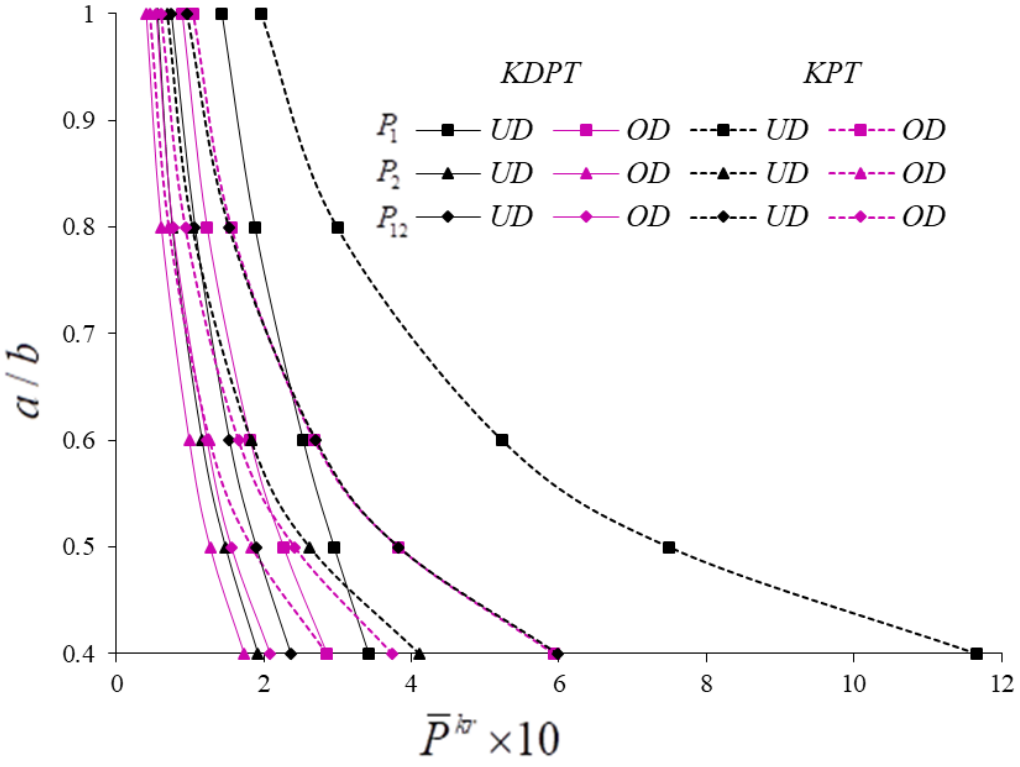
Şekil 4.19. KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14 bir arada kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.20'de çizilerek mukayese edilmektedir. Şekil 4.20 incelendiğinde, KPT ve KDPT çerçevesinde, VD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri a/b'ın artmasıyla azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, VD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi UD'ye kıyasla a/b 0.4'ten 1'e arttığında artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini $\bar{P}_1^{kr}$'de olup %8.97 ile %22.39 arasında değişmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla etkisi VD desenli plağın yine $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerine olup a/b oranı 0.4'ten 1'e arttığında %60.59'dan %19.23'e kadar azalmaktadır. $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkiler sırasıyla %46.33'ten %14.9'a ve %52.92'den %14.89'a kadar azalmaktadır.



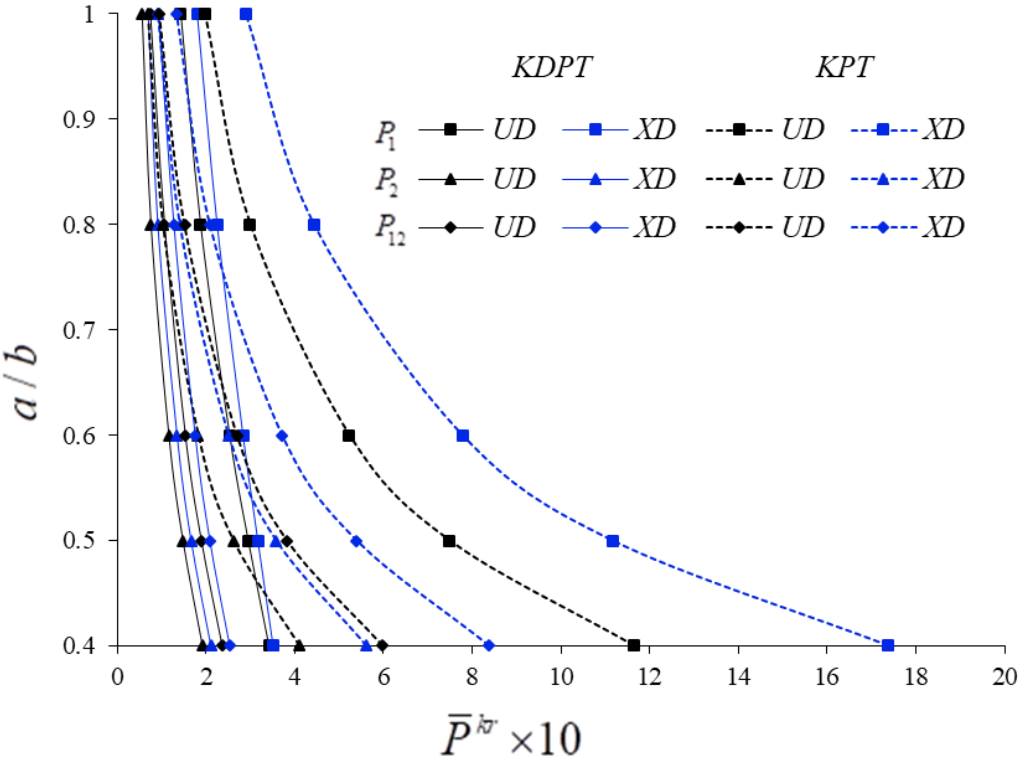
Şekil 4.20. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve VD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14 verileri bir arada kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.21'de çizilerek mukayese edilmektedir. Şekil 4.21'den görüldüğü gibi KPT ve KDPT çerçevesinde, OD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri a/b'ın artmasıyla azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, OD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi a/b 0.4'ten 1'e arttığında artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini $\bar{P}_1^{kr}$'de olup %16.48 ile %37.52 arasında değişmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla etkisi OD desenli plağın yine $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerine olup a/b oranı 0.4'ten 1'e arttığında %51.89'dan %14.18'e kadar azalmaktadır. $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkiler sırasıyla %38.99'dan %10.92'ye ve %44.26'dan %10.82'ye kadar azalmaktadır.



Şekil 4.21. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve OD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı

Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14 kullanılarak KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının değişimine bağlı grafikleri Şekil 4.22'de çizilerek mukayese edilmektedir. Şekil 4.22'den görüldüğü gibi KPT ve KDPT çerçevesinde, XD desenli plakların $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerleri a/b'ın artmasıyla azalmaktadır. KDPT çerçevesinde, XD desen etkisinin $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkisi a/b oranı 0.4'ten 1'e arttığında belirgin olarak artmakta ve bu etkiler içinde en belirgini a/b=0.8'a kadar $\bar{P}_2^{kr}$ değerlerinde olup (-%9.83) ile (-%20.24) arasında değişmektedir, fakat a/b=1 olduğunda ise en büyük etki $\bar{P}_1^{kr}$'de (-%25.73) olduğu görülmektedir. Enine kayma deformasyonun en fazla etkisi XD desenli plağın yine $\bar{P}_1^{kr}$ değerlerine olup a/b oranı 0.4'ten 1'e arttığında %79.79'dan %38.06'ya kadar azalmaktadır. $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerine etkiler sırasıyla %62.32'den %24.07'ye ve %69.73'ten %31.06'e kadar azalmaktadır.



Şekil 4.22. KPT ve KDPT çerçevesinde UD ve XD desenli plağın $\bar{P}_1^{kr}$, $\bar{P}_2^{kr}$ ve $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin a/b oranının 0.4'den 1.0'a kadar değişimine göre dağılımı

Değişik KNT profilleri ile güçlendirilen plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun δ parametresine bağlı dağılımı Çizelge 4.15 ve Şekil 4.23'de gerçekleştirilmiştir. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002, $b/h=20$, $a/b=1$, $V_{knt}^{*}=0.28$. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.23 mercek altına alındığında, δ parametresi arttığında $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ değerleri sürekli azalırken, enine dalga sayısının δ'ın küçük değerlerinde bire eşit olduğu ve bu parametrenin artışı ile ikide sabitlendiği görülmektedir. Ayrıca boyuna dalga sayısının yani i_{kr} =1 olduğu görülmüştür.

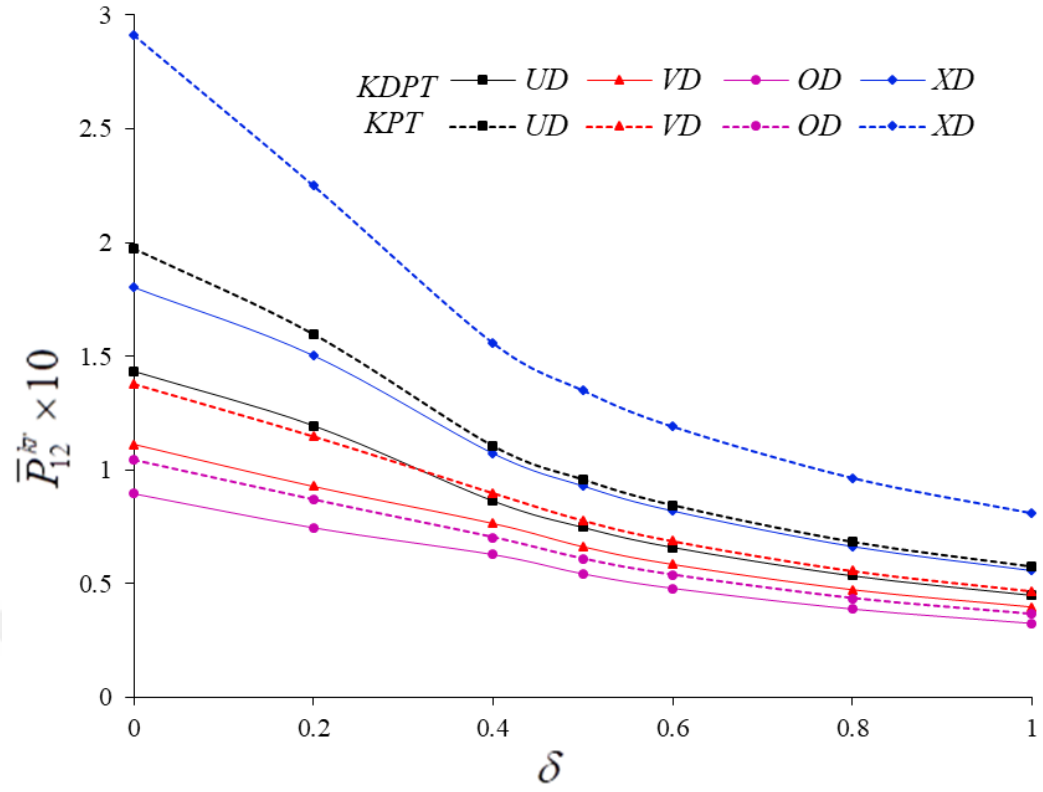
VD, OD ve XD desenli plakların kritik yük değerleri UD desenli plağın kritik yükleri ile kıyaslandığında, δ parametresinin 0.2'ten 1.0'e artısında $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$'ye FG-KNT desen etkileri önce artıp sonra azaldığı gözlenmiştir. VD, OD ve XD desenli plaklar ele alındığında, $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$'ye en büyük etkinin, tüm desenlerde δ =0.2'te meydana geldiğini ve VD, OD ve XD desenlerinin etkilerinin sırasıyla %22.34, %37.57 ve (-

%25.77) olduğu görülmüştür. Söz konusu desenli plakların $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ değerlerine en düşük etkinin, VD, OD ve XD için sırasıyla %11.36, %27.27 ve (-%24.11) ile δ=0.6'da meydana geldiği gözlenmiştir.

Enine kayma deformasyonunun çift eksenli basınç yükünün kritik değerine etkisi δ parametresinin oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup δ parametresinin artması ile söz konusu etki zayıflamaktadır. Örneğin, δ=0.2 için $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyon etkileri UD, VD, OD ve XD için sırasıyla % 25.12, %19.16, %14.25 ve %33.17 tespit edilirken, δ=1'te söz konusu etkiler sırasıyla %3.4, %4.3, %3.3 ve %2.3 civarında daha düşük olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.15. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun δ parametresine bağlı dağılımı

	$\bar{P}_{12}^{kr}\times 10,\ i_{kr}=1,(j_{kr})$							
δ	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0	1.434(1)	1.971(1)	1.113(1)	1.378(1)	0.896(1)	1.044(1)	1.803 (1)	2.911(1)
0.2	1.195(1)	1.596(2)	0.928(1)	1.148(1)	0.746(1)	0.870(1)	1.503 (1)	2.249(2)
0.4	0.864(2)	1.105(2)	0.765(2)	0.899(2)	0.628(2)	0.704(2)	1.073(2)	1.557(2)
0.5	0.748(2)	0.958(2)	0.663(2)	0.779(2)	0.544(2)	0.610(2)	0.930(2)	1.349(2)
0.6	0.660(2)	0.845(2)	0.585(2)	0.688(2)	0.480(2)	0.539(2)	0.820(2)	1.190(2)
0.8	0.535(2)	0.684(2)	0.474(2)	0.557(2)	0.389(2)	0.436(2)	0.664(2)	0.964(2)
1.0	0.449(2)	0.575(2)	0.398(2)	0.468(2)	0.326(2)	0.366(2)	0.558(2)	0.809(2)



Şekil 4.23. KPT ve KDPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli plağın $\bar{P}_{12}^{kr}$ değerlerinin δ parametresinin 0.2'den 1.0'a kadar değişimine bağlı değişimi

Değişik güçlendirici profiller için x ekseni doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun karbon nanotüp oranına V_{knt}^{*} 'ye göre değişimi Çizelge 4.16'da verilmektedir. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002, $b/h=20$, $a/b=1$. Çizelge 4.16'da sunulan değerler değerlendirildiğinde, V_{knt}^{*} 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, burkulma modunun ise $(i_{kr}, j_{kr})=(1,1)$ olduğu görülmektedir. UD profili ile kıyaslandığında, V_{knt}^{*} 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında, $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$ değerlerine homojen olmayan desenlerin etkileri zayıf fakat sürekli artarken, $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ değerlerine söz konusu etkiler önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, KDPT çerçevesinde V_{knt}^{*} =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{1kdt}^{kr}$ 'ye etkileri sırasıyla %22.97, %23.46 ve %22.39; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %38.29, %38.77 ve %37.52; XD profilli güçlendiriciler için (-%29.71), (-%30.72) ve (-%25.73) olduğu görülmektedir. Klasik

plak teorisi çerçevesinde, V_{knt}^{*}=0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda, VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{1kpt}^{kr}$'ye etkileri sırasıyla %28.89, %28.9 ve %30.1; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %45.17, %45.16 ve %47.03; XD profilli güçlendiriciler için (-%45.28), (-%45.56) ve (-%47.69) olduğu görülmektedir.

V_{knt}^{*} KNT oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında x doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyon etkileri tüm profiller için belirgin bir şekilde önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, V_{knt}^{*} =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda UD profilli güçlendiriciler için $\bar{P}_{1}^{kr}$'e kayma deformasyon etkileri sırasıyla %22.95, %20.5 ve %27.25; VD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler sırasıyla %16.58, %14.41 ve %19.23; OD profilli güçlendiriciler için sırasıyla %13.33, %11.24 ve %14.18; XD profilli güçlendiriciler için $\bar{P}_{1}^{kr}$'e kayna deformasyon etkileri sırasıyla %31.25, %28.6 ve %38.06 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.16. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{1}^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^{*}'ye bağlı dağılımı

	$\bar{P}_{1}^{kr}\times 10,\ (i_{kr}, j_{kr})=(1,1)$							
V_{knt}^{*}	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.12	0.653	0.848	0.503	0.603	0.403	0.465	0.847	1.232
0.17	0.993	1.249	0.760	0.888	0.608	0.685	1.298	1.818
0.28	1.434	1.971	1.113	1.378	0.896	1.044	1.803	2.911

Değişik güçlendirici profiller için y doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^{*}'ye göre değişimi Çizelge 4.17'de verilmektedir. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002, $b/h=20$, $a/b=1$. Çizelge 4.17'de sunulan değerler değerlendirildiğinde, V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, j_{kr}'in desenlere göre farklı değer aldığını ve $i_{kr}=1$ olduğu görülmektedir.

UD profili ile kıyaslandığında, V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında, $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ değerlerine homojen olmayan desenlerin etkileri düzensiz değişmektedir. Örneğin, KDPT çerçevesinde V_{knt}^{*} =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{2kdt}^{kr}$ 'ye etkileri sırasıyla %12.12, %11.55 ve %11.41 olarak düzenli azalırken; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %23.53, %24.02 ve %27.27 olarak düzenli artmakta; XD profilli güçlendiriciler için (-%19.49), (-%21.02) ve (-%24.24) olarak yine düzenli artmaktadır. Klasik plak teorisi çerçevesinde, V_{knt}^{*} =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda, VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{2kpt}^{kr}$ 'ye etkileri sırasıyla %17.47, %16.15 ve %15.12 düzenli azalmakta; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %30.42, %29.96 ve %33.43 olarak artıp azalmakta; XD profilli güçlendiriciler için (-%21.39), (-%30.16) ve (-%33.43) düzenli arttığı görülmektedir.

KNT oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında y doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerine kayma deformasyon etkileri UD, VD ve OD profillerinde belirgin bir şekilde önce azalıp sonra artmakta iken XD profilinde sürekli artmaktadır. Örneğin, V_{knt}^{*} =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda UD profilli güçlendiriciler için $\bar{P}_{2}^{kr}$ 'e kayna deformasyon etkileri sırasıyla %18.07, %15.76 ve %18.46; VD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler sırasıyla %12.77, %11.14 ve %14.9; OD profilli güçlendiriciler için sırasıyla %9.96, %8.61 ve %10.92 olarak azalıp arttığı; XD profilli güçlendiriciler için $\bar{P}_{2}^{kr}$ 'e kayna deformasyon etkileri sırasıyla %19.36, %21.67 ve %24.07 sürekli arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.17. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_2^{kr}$ basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^*'ye bağlı dağılımı

V_{knt}^*	$P_2^{kr} \times 10,\ i_{kr} = 1, (j_{kr})$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.12	0.272(2)	0.332(2)	0.239(2)	0.274(2)	0.208(2)	0.231(2)	0.325(2)	0.403(3)
0.17	0.433(2)	0.514(2)	0.383(2)	0.431(2)	0.329(2)	0.360(2)	0.524(2)	0.669(3)
0.28	0.561(2)	0.688(3)	0.497(2)	0.584(2)	0.408(2)	0.458(2)	0.697(2)	0.918(3)

Değişik güçlendirici profiller için $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun $V_{k\ n}^*$'ye göre değişimi Çizelge 4.18'de verilmektedir. Plak karakteristikleri ve KNT oranı aşağıdaki gibi sunulmaktadır: h=0.002, $b/h = 20,\ a/b = 1, \delta = 0.5$. Çizelge 4.18'de sunulan değerler ele alındığında, V_{knt}^* 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$ ve $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$ değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, j_{kr}'in genelde 2'ye eşit olduğu, fakat V_{knt}^* =0.17'de VD ve OD desenleri için farklı değer aldığını, i_{kr}'in ise bire eşit olduğu görülmektedir.

UD profili ile kıyaslandığında, V_{knt}^* 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında, çift eksenli kritik yük değerlerine homojen olmayan desenlerin etkileri düzensiz değişmektedir. Örneğin, KDPT çerçevesinde V_{knt}^* =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{12kdt}^{kr}$'ye etkileri sırasıyla %12.16, %12.13 ve %11.36; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %25.69, %29.81 ve %27.27; XD profilli güçlendiriciler için (-%19.89), (-%21.14) ve (-%24.33) olmaktadır. Klasik plak teorisi çerçevesinde, V_{knt}^* =0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda, VD profilli güçlendiricilerinin $\bar{P}_{12kpt}^{kr}$'ye etkileri sırasıyla %17.61, %16.18 ve %118.69 düzenli azalmakta; OD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler %30.47, %33.38 ve %36.33; XD profilli güçlendiriciler için (-%31.38), (-%31.92) ve (-%40.81) düzenli olduğu görülmektedir.

V_{knt}^{*} KNT oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında her iki eksen doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerine enine kayma deformasyonlarının etkileri x doğrultusundaki tek eksenli plaklarda olduğu gibi belirgin bir şekilde önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, V_{knt}^{*}=0.12, 0.17 ve 0.28 olduğunda UD profilli güçlendiriciler için $\bar{P}_{12}^{kr}$'e kayna deformasyon etkileri sırasıyla %18.28, %15.89 ve %21.92; VD profilli güçlendiriciler için söz konusu etkiler sırasıyla %12.88, %11.82 ve %14.89; OD profilli güçlendiriciler için sırasıyla %12.66, %11.38 ve %10.82; XD profilli güçlendiriciler için P_{1}^{kr}'e kayna deformasyon etkileri sırasıyla %25.43, %22.76 ve %31.06 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.18. KPT ve KDPT çerçevesinde $\bar{P}_{12}^{kr}$ çift eksenli basınç yükünün kritik değerleri ve burkulma modunun V_{knt}^{*}'ye bağlı dağılımı

V_{knt}^{*}	$\bar{P}_{12}^{kr}\times 10,\ i_{kr}=1,(j_{kr})$							
	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT	KDPT	KPT
	UD		VD		OD		XD	
0.12	0.362(2)	0.443(2)	0.318(2)	0.365(2)	0.269(1)	0.308(2)	0.434(2)	0.582(2)
0.17	0.577(2)	0.686(2)	0.507(1)	0.575(2)	0.405(1)	0.457(1)	0.699(2)	0.905(2)
0.28	0.748(2)	0.958(2)	0.663(2)	0.779(2)	0.544(2)	0.610(2)	0.930(2)	1.349(2)

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışmasında, düzlem içi basınç yükleri altındaki KNT takviyeli polimer dikdörtgen plakların burkulma davranışı KDPT çerçevesinde araştırılmıştır. İlk olarak karbon nanotüp ve nanokompozitler tanımlanmış olup, özellikleri, avantajları ve uygulama alanları ile ilgili genel ve temel bilgiler sunulmuştur. Karbon nanotüplerle güçlendirilen polimerlerin mikro-mekanik özellikleri matematiksel olarak modellenmiştir. Nanokompozit plakların bünyesel bağıntıları oluşturulduktan sonra stabilite ve şekil değiştirme uygunluk denklemleri KDPT çerçevesinde türetilmiştir. Somut sınır koşulları için yaklaşım fonksiyonları seçilerek temel denklemler çözülmekte ve düzlem içi kritik basınç yükleri için kapalı çözüm elde edilmiştir. Söz konusu ifadeler baz alınarak düzlem içi kritik basınç yüklerinin minimum değerleri sayısal olarak elde edilmiştir. KDPT çerçevesinde elde edilen ifadelerden özel halde KPT çerçevesinde FD-KNT desenli polimer plakların düzlem içi kritik basınç yükleri için ifade özel olarak bulunmaktadır.

Sayısal analizlerle elde edilen sonuçlar aşağıda aşağıda sıralanmıştır:

a.) Farklı kayma deformasyon fonksiyonları ele alındığında, enine kayma deformasyonları hesaba katıldığında UD, OD, VD ve XD desenli nanokompozitlerden oluşan plakların tek ve çift eksenli yüklerin kritik değerleri KPT çerçevesinde elde edilen uygun kritik değerlerden önemli derecede düşük olduğu görülmüştür.

b.) Farklı kayma deformasyon fonksiyonları ele alındığında, basınç yüklerinin kritik değerlerine karşı gelen enine dalga sayısı x yönlü ve çift eksenli basınç yüklerinde her iki teori çerçevesinde aynı olduğu halde, y yönlü basınç yükü durumunda ise KDPT çerçevesinde KPT'ye kıyasla daha düşük değerler alınmıştır.

c.) Farklı kayma deformasyon fonksiyonları ele alındığında, basınç yüklerinin kritik değerleri parabolik ve kosinüs kayma şekil fonksiyonlarında birbirine daha yakın olduğu görülürken uniform ve kosinüs hiperbolik kayma şekil fonksiyonları için söz konusu kritik değerler birbirine daha yakın olduğu görülmüştür.

d.) Farklı kayma deformasyon fonksiyonları ele alındığında, P_1^{kr} yüküne karşı gelen j_{kr}, P_{12}^{kr} yüküne karşı gelen j_{kr}'ten o da P_2^{kr} yüküne karşı gelen j_{kr}'ten daha küçük olduğunu sayısal hesaplar ortaya koymuştur.

e.) Farklı kayma deformasyon fonksiyonları ele alındığında, basınç yüklerinin kritik değerlerine kayma deformasyon etkisi bazı desenlerde aynı olmasına rağmen bazı desenlerde farklılık göstermiştir.

f.) Her iki teori çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların P_1^{kr} basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, burkulma modunun ise hep (1,1) olduğu görülmüştür.

g.) KPT çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenlerinin x ve y doğrultularında kritik burkulma yüklerinin değerlerine etkisi daha belirgin olmasına rağmen, b/h oranının değişiminden bağımsız olduğu görülmüştür.

h.) Enine kayma deformasyonlarının etkisinin göz önüne alınması b/h oranının artması ile x ve y doğrultularında kritik basınç yüklerinin değerlerine desen etkilerinin arttığını ortaya koymasının yanı sıra KPT ile mukayesede desen etkisini zayıflatmıştır.

i.) Her iki teori çerçevesinde UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların, P_2^{kr} basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, boyuna dalga sayısının bire eşit olduğu (i_{kr} =1) ve enine dalga sayısı j_{kr}'nin ise yavaş olsa da arttığı görülmüştür.

j.) Her iki teori çerçevesinde, UD, VD, OD ve XD desenli nanokompozit plakların P_{12}^{kr} çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerinin b/h oranının artışına bağlı olarak sürekli azaldığı, boyuna dalga sayısının bire eşit olduğu ve iki değer dışında enine dalga sayısı $j_{kr}=2$ olduğu görülmüştür.

k.) UD, VD, OD ve XD desenlerinin kritik burkulma yükünün değerlerine etkisi incelendiğinde KPT çerçevesinde daha belirgin olmasına rağmen b/h oranının değişiminden bağımsız olduğu görülmüştür.

l.) P_{12}^{kr} çift eksenli basınç yükünün kritik değerlerine kayma deformasyonlarının etkisinin göz önüne alınması desen etkilerini önemli derecede düşürmekle

beraber, b/h oranının artmasına bağlıdır ve b/h oranı arttığında desen etkilerinin belirginliğini arttırsa da KPT'deki etkinin çok altında kalmıştır.

m.) Nanokompozit plakların P_{1kdt}^{kr} ve P_{1kpt}^{kr} basınç yüklerinin kritik değerleri a/b oranı arttığında sürekli azalırken, $(i_{kr}, j_{kr}) = (1,1)$ olduğu görülmüştür.

n.) UD, VD, OD ve XD desenlerinin P_{1kpt}^{kr} değerlerine etkilerinin P_{1kdt}^{kr} değerlerinden daha belirgin olduğu görülmüştür.

o.) a/b oranının artışına bağlı olarak P_{1kdt}^{kr}'ye fonksiyonel değişen desen etkileri parabolik şekilde, yani önce artıp maksimum değerine ulaşarak sonra azalırken, P_{1kpt}^{kr}'ye desen etkileri ise sürekli azalmıştır.

p.) Enine kayma deformasyonun x yönündeki basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki zayıflayarak etkisiz hale gelmiştir.

q.) Her iki teori çerçevesinde, tüm desenlerde nanokompozit plakların y ekseni doğrultusundaki basınç yükünün kritik değerleri a/b oranının artmasıyla azalmakta, boyuna dalga sayısı hep bir değerini almakta (i_{kr} =1) iken j_{kr} ise önce azalmakta ve $a/b \geq 2.0$ olduğunda ise bir sayısına sabitlenmiştir.

r.) Enine kayma deformasyonunun y yönündeki basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki $a/b = 3$'te oldukça zayıflamıştır.

s.) Dört çeşit KNT takviyeli plağın P_{12kdt}^{kr} ve P_{12kpt}^{kr} değerlerinin a/b oranı arttığında sürekli azaldığı görülürken, enine dalga sayısının önce azaldığı ve $a/b \geq 1.5$ için bire eşit olduğu saptanmıştır.

t.) UD desenli plağın kritik yükleri ile diğer desenler kıyaslandığında, a/b oranı arttığında P_{12kdt}^{kr}'ye FG-KNT desen etkileri önce artıp sonra azalırken, P_{12kpt}^{kr}'ye tüm desen etkilerinde bir düzensizlik söz konusudur. P_{12kdt}^{kr} değerlerine en düşük etkinin, VD, OD ve XD için sırasıyla %3.51, %11.83 ve (-% 7.14) ile a/b=0.4'te meydana gelmiştir.

u.) Enine kayma deformasyonunun çift eksenli basınç yükünün kritik değerine etkisi a/b oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup a/b'nin artması ile söz konusu etki zayıflamıştır.

v.) δ parametresi arttığında P_{12kdt}^{kr} ve P_{12kpt}^{kr} değerleri sürekli azalırken, enine dalga sayısının δ 'ın küçük değerlerinde bire eşit olduğu ve bu parametrenin artışı ile ikide sabitlendiği görülmüştür.

w.) VD, OD ve XD desenli plakların kritik yük değerleri UD desenli plağın kritik yükleri ile kıyaslandığında, δ parametresinin 0.2'ten 1.0'e artışında P_{12kdt}^{kr} ve P_{12kpt}^{kr} 'ye FG-KNT desen etkileri önce artıp sonra azaldığı gözlenmiştir.

x.) VD, OD ve XD desenli plaklar ele alındığında, P_{12kdt}^{kr} 'ye en büyük etkinin, tüm desenlerde δ =0.2'te meydana geldiğini gözlenmiştir.

y.) Enine kayma deformasyonunun çift eksenli basınç yükünün kritik değerine etkisi δ parametresinin oranın küçük değerlerinde oldukça belirgin olup δ parametresinin artması ile söz konusu etki zayıflamıştır.

z.) Değişik güçlendirici profiller için, V_{knt}^{*} 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında P_{1kdt}^{kr} ve P_{1kpt}^{kr} değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, burkulma modunun ise $(i_{kr}, j_{kr}) = (1,1)$ olduğu görülmüştür.

aa.) V_{knt}^{*} 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında, UD profili ile kıyaslandığında, P_{1kpt}^{kr} değerlerine homojen olmayan desenlerin etkileri zayıf fakat sürekli artarken, P_{1kdt}^{kr} değerlerine söz konusu etkiler önce artıp sonra azalmıştır.

bb.) V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında x doğrultusundaki ve çift eksenli basınç yüklerinin kritik değerlerine enine kayma deformasyon etkileri tüm profiller için belirgin bir şekilde önce azalıp sonra artmıştır.

cc.) V_{knt}^{*} 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında P_{2kdt}^{kr} ve P_{2kpt}^{kr} değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, j_{kr} 'in desenlere göre farklı değer aldığını ve $i_{kr} = 1$ olduğu görülmüştür.

dd.) UD profili ile kıyaslandığında, V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında, P_{2kpt}^{kr} ve P_{2kdt}^{kr} değerlerine homojen olmayan desenlerin etkileri düzensiz değişmiştir.

ee.) V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında y doğrultusundaki ve cift eksenli basınç yüklerinin kritik değerlerine kayma deformasyon etkileri UD, VD ve OD profillerinde belirgin bir şekilde önce azalıp sonra artmakta iken XD profilinde sürekli artmıştır.

ff.) V_{knt}^{*} oranı 0.12'den 0.17'ye ve 0.17'den 0.28'e geçiş yaptığında P_{1kdt}^{kr} ve P_{1kpt}^{kr} değerlerinin sürekli arttığı görülmekte, j_{kr} 'in genelde 2'ye eşit olduğu, fakat V_{knt}^{*} =0.17'de VD ve OD desenleri için farklı değer aldığını, i_{kr} 'in ise bire eşit olduğu görülmüştür.

Gelecekte ele alınan problemin değişik zemin modelleri ve geometrik doğrusal olmayan durum göz önüne alınarak çözümü incelenecektir.

KAYNAKLAR

Akhavan, H, Hashemi, S.H., Taher, R.K., 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.

Ambartsumian, S. A. 1964. Theory of Anisotropic Plates; Strength, Stability, Vibration. Technomic Publishing Company, Stamford.

Avey, M., Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N. 2022a. Influence of Elastic Foundations and Thermal Environments on the Thermoelastic Buckling of Nanocomposite Truncated Conical Shells. Acta Mechanica, 233(2), 685-700.

Avey, M., Fantuzi, N., Sofiyev, A.H. 2022b. Mathematical Modeling and Analytical Solution of Thermoelastic Stability Problem of Functionally Graded Nanocomposite Cylinders Within Different Theories. Mathematics, 10(7), 1081.

Avey, M., Fantuzi, N., Sofiyev, A.H. 2022c. Thermoelastic Stability of CNT Patterned Conical Shells under Thermal Loading in the Framework of Shear Deformation Theory. Mechanics Advanced Materials and Structures, 1-14, 2022.

Avey, M., Fantuzzi, N., Sofiyev, A.H. 2022d. On the Solution of Thermal Buckling Problem of Moderately Thick Laminated Conical Shells Containing Carbon Nanotube Originating Layers. Materials, 15(21), 7427.

Aydogdu, M., 2009. A New Shear Deformation Theory for Laminated Composite Plates. Composite Structures, 89, 94–101.

Butt, H.A., Novikov, I.V., Krasbikov, D.V., Sulimov, A.V., Pal, A.K., Evlashin, S.A., Vorobei, A.M., Zuev, Y.I., Ostrizhiniy, D., Dzhurinskiy, D., Popov, Y.A., Parenago, O.O., Nasibulin, A.G. 2023. Binder-Free, Pre-Consolidated Single-Walled Carbon Nanotubes for Manufacturing Thermoset Nanocomposites. Carbon, 202, 450-463.

Dong, Y.H., Li, Y.H. 2017. A Unified Nonlinear Analytical Solution of Bending, Buckling and Vibration for the Temperature-Dependent FG Rectangular Plates Subjected to Thermal Load. Composite Structures, 159, 689-701.

Eslami, MR. Buckling and Postbuckling of Beams, Plates and Shells. Springer, Switzerland, 2018.

Fan, F., Safaei, B., Sahmani, S. 2021. Buckling and Postbuckling Response of Nonlocal Strain Gradient Porous Functionally Graded Micro/Nano-Plates via NURBS-Based Isogeometric Analysis. Thin-Walled Structures, 159, 107231.

Ginzburg, V.V., Hall, L.M. Theory and Modeling of Polymer Nanocomposites. Part of: Springer Series in Materials Science. Springer 2021.

Hawal, T.T., Patil, M.S., Siddalinga, S., Kulkarni, R.M. 2022. A Review on Synthesis, Functionalization, Processing and Applications of Graphene Based High Performance Polymer Nanocomposites. Current Nanoscience, (2), 167-181

Hoque, E., Kumar, R., Sharif, A. Advanced Polymer Nanocomposites: Science, Technology and Applications. Woodhead Publishing 2022.

Iijima, S. 1991. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. Nature, 354 (6348),56–58.

Iijima, S., Ichihashi, T. 1993. Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-Nm Diameter. Nature, 363(6430), 603–605.

Jerath, S. Structural Stability Theory and Practice: Buckling of Columns, Beams, Plates, and Shells. Wiley, 2020.

Joshi, U.A., Sharma, S.C., Harsha, S.P. 2011. Effect of Waviness on the Mechanical Properties of Carbon Nanotube Based Composites. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 43, 1453–1460.

Kar, K.K. Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I: Characteristics. Part of: Springer Series in Materials Science. Elsevier 2020.

Kienzler, R. 2004. Theories of Plates and Shells. Critical Review and New Applications. Springer 2004.

Kireitseu, M., Hui, D., Tomlinson, G. 2008. Advanced Shock-Resistant and Vibration Damping of Nanoparticle-Reinforced Composite Material. Composites Part B Engineering, 39, 128–38.

Kurahatti, R., Surendranathan, A., Kori, S. A., Singh, N., Kumar, A., Srivastava, S. 2010. Defence Applications of Polymer Nanocomposites. Defence Science Journal, 60(5), 551-563.

Kwon, H., Bradbury, C.R., Leparoux, M. 2011. Fabrication of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Aluminum Matrix Composite. Advanced Engineering Materials, 13, 325-329.

Lau, A.K.T., Hui, D. 2002. The Revolutionary Creation of New Advanced Materials—Carbon Nanotube Composites. Composites Part B Engineering, 33(4), 263–277.

Lei, Z.X., Liew, K.M., Yu, J.L. 2013. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates Using the Element-Free Kp-Ritz Method in Thermal Environment. Composite Structures, 106, 128–138.

Liew, K.M., Lei, Z.X., Yu, J.L., Zhang, L.W. 2014. Postbuckling of Carbon Nanotube-Reinforced Functionally Graded Cylindrical Panels under Axial Compression Using a Meshless Approach. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 268, 1–17.

Liew, K.M., Lei, Z.X., Zhang, L.W. 2015. Mechanical Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composites: A Review. Composite Structures, 120, 90–97.

Lu, J.P. 1997. Elastic Properties of Single and Multilayered Nanotubes. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 58(11), 1649–1652.

Moaseri, E., Karimi, M., Maghrebi, M., Baniadam, M. 2014. Fabrication of Multi-Walled Carbon Nanotube–Carbon Fiber Hybrid Material via Electrophoretic Deposition Followed by Pyrolysis Process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 60, 8-14.

Mylvaganam, K., Zhang, L.C. 2012. Fabrication and Application of Polymer Composites Comprising Carbon Nanotubes. Recent Patents on Nanotechnology, 1(1), 59-65.

Narayanan, R. Plated Structures. Stability and strength. CRC Press 2019

Qian, D., Dickey, E.C., Andrews, R., Rantell, T. 2000. Load Transfer and Deformation Mechanisms in Carbon Nanotubes-Polystyrene Composites. Applied Physics Letters, 76, 2868–2870.

Rad, M.H.G., Hosseini, S.M. 2022. Buckling Analysis of Multilayer FG-CNT Reinforced Nanocomposite Cylinders Assuming CNT Waviness, Agglomeration, and Interphase Effects Using the CUF-EFG Method. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 1-18.

Ray, S.S. Processing of Polymer-Based Nanocomposites: Introduction. Part of: Springer Series in Materials Science. Springer 2018.

Raza, S., Li, X., Soyekwo, F., Liao, D., Xiang, Y., Liu, C. 2021. A Comprehensive Overview of Common Conducting Polymer-Based Nanocomposites; Recent Advances in Design and Applications. European Polymer Journal, 160, 110773.

Sharma, S. Molecular Dynamics Simulation of Nanocomposites using BIOVIA Materials Studio, Lammps and Gromacs. Springer 2020.

Sharma, L.K., Grover, N., Bhardwaj, G. 2022. Buckling and Free Vibration Analysis of Temperature-Dependent Functionally Graded CNT-Reinforced Plates. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 1 175-192.

Shen, H.S. 2009. Nonlinear Bending of Functionally Graded Carbon Nanotubereinforced Composite Plates in Thermal Environments. Composite Structures, 9 9–19.

Shen, H.S. 2012. Thermal Buckling and Postbuckling Behavior of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Cylindrical Shells. Composites Part B Engineering, 43, 1030–1038.

Shen, H.S., Zhang, C.L. 2010. Thermal Buckling and Postbuckling Behavior of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates. Materials and Design, 3 3403–3411.

Sofiyev, A.H. 2020. On the Vibration and Stability Behaviors of Heterogeneous-CNTRC-Truncated Conical Shells under Axial Load in the Context of FSDT. Thin–Walled Structures, 15 106747.

Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N. 2022. Buckling Analysis of Shear Deformable Composite Conical Shells Reinforced by CNTs Subjected to Combined Loading on the Two-Parameter Elastic Foundation. Defence Technology, 18(2), 205-218.

Sofiyev, A.H., Tornabene, F., Dimitri, R., Kuruoglu, N. 2020a. Buckling Behavior of FG-CNT Reinforced Composite Conical Shells Subjected to a Combined Loading. Nanomaterials, 10(3), 419**.**

Sofiyev, A.H., Pirmamedov, I.T., Kuruoglu, N. 2020b. Influence of Elastic Foundations and Carbon Nanotube Reinforcement on the Hydrostatic Buckling Pressure of Truncated Conical Shells. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 41(7), 1011-1026.

Sofiyev, A.H., Bayramov, R.P., Heydarov, S.H. 2020c. The Stability of Composite Conical Shells Covered by Carbon Nanotube Reinforced Coatings under External Pressures. Acta Mechanica, 231(11), 4547-4562.

Spitalsky, Z., Tasis, D., Papagelis, K., Galiotis, C. 2009. Carbon Nanotube-Polymer Composites: Chemistry, Processing, Mechanical and Electrical Properties. Composite Structures, 90, 254–262.

Thostenson, E.T., Ren, Z., Chou, T.W. 2001. Advances in the Science and Technology of Carbon Nanotubes and Their Composites: a Review. Composites Science and Technology, 6 1899–1912.

Torabi, J., Ansari, R., Hassani, R. 2019. Numerical Study on the Thermal Buckling Analysis of CNT-Reinforced Composite Plates with Different Shapes Based on the Higher-Order Shear Deformation Theory. European Journal of Mechanics - A/Solids, 73, 144-160.

Ugural, A.C. 2017. Plates and Shells. Theory and Analysis, CRC Press, 2017.

Visakh, P. M., Morlanes, M.J.M. Nanomaterials and Nanocomposites: Zero- to Three-Dimensional Materials and Their Composites. Wiley-VCH 2016.

Wang, J.F., Cao, S.H., Zhang, W. 2021. Thermal Vibration and Buckling Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composite Quadrilateral Plate. European Journal of Mechanics - A/Solids, 85, 104105.

Wang, X.F., Huang, Z.M., Chen, L.S. 2011. Comparison Study on Transparent Composites with Different Patterns of Nanofiber Reinforcement. Fibers Polymers, 12, 359–365.

Wu, C.P., Li, H.Y. 2016. Three-Dimensional Free Vibration Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Plates with Various Boundary Conditions. Journal of Vibration and Control, 22 (1), 89-107.

Xiang, R. 2022. Atomic Precision Manufacturing of Carbon Nanotube-a Perspective. International Journal of Extreme Manufacturing, 4(2), 023001.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M. 2015a. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-Reinforced Composite Triangular Plates Using the FSDT and Element-Free IMLS-Ritz Method. Composite Structures, 120, 189–199.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M. 2015b. Vibration Characteristic of Moderately Thick Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composite Skew Plates. Composite Structures, 122, 172–183.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M. 2015c. Buckling Analysis of FG-CNT Reinforced Composite Thick Skew Plates Using an Element-Free Approach. Composites Part B Engineering, 75, 36–46.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M. 2015d. An Element-Free IMLS-Ritz Framework for Buckling Analysis of FG–CNT Reinforced Composite Thick Plates Resting on Winkler Foundations. Engineering Analysis with Boundary Elements, 58, 7-17.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M., Yu, J.L. 2014a. Static and Dynamic of Carbon Nanotube Reinforced Functionally Graded Cylindrical Panels. Composite Structures, 11 205–12.

Zhang, L.W., Lei, Z.X., Liew, K.M., Yu, J.L. 2014b. Large Deflection Geometrically Nonlinear Analysis of Carbon Nanotube-Reinforced Functionally Graded Cylindrical Panels. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 273, 1–18.

Zhou, H.Y., Li, W.Q., Yu, P. 2022. Carbon Nanotubes-Based Nanofluidic Devices: Fabrication, Property and Application. Chemistryopen, 11(11), e202200126.

Zhu, Y., Shi, P., Kang, Y., Cheng, B. 2019. Isogeometric Analysis of Functionally Graded Plates with a Logarithmic Higher Order Shear Deformation Theory. Thin-Walled Structures, 144, 106234.