

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKSENEL FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PARABOLİK
ÇUBUKLARIN YER DEĞİŞTİRME TÜRÜ VE KARIŞIK SONLU ELEMAN
YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eyüp YILMAZ

HAZİRAN 2022

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKSENEL FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PARABOLİK
ÇUBUKLARIN YER DEĞİŞTİRME TÜRÜ VE KARIŞIK SONLU ELEMAN
YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eyüp YILMAZ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Eyüp YILMAZ

...../...../.....

ÖZET

EKSENEL FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PARABOLİK ÇUBUKLARIN YER DEĞİŞTİRME TÜRÜ VE KARIŞIK SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ

Eyüp YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ

Haziran 2022, 39 sayfa

Bu tezin amacı, Timoshenko çubuk kuramına bağlı eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik düzlem kirişlerin statik analiz davranışını karışık sonlu eleman yöntemi kullanarak incelemektir. İki düğüm noktasına sahip olan eğrisel sonlu eleman, her düğüm noktasında 12 adet değişken içermektedir. Bunlardan üçü yer değiştirmeleri, üçü kesit dönmelerini, üçü kuvvetleri, ikisi eğilme momentini ve biri ise burulma momentini göstermektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme metal-matris ve seramik-parçacık malzemelerden oluşmaktadır. Seramik ve metal malzemelerin hacim oranları kiriş eksenine boyunca değişmektedir. Etkin malzeme özellikleri (elastisite modülü ve Poisson oranı) karışım kuralına göre belirlenmiştir. Düşeyde düzgün yayılı yük etkisindeki eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş düzlem parabolik kirişin statik davranışı, farklı sınır koşulları, malzeme değişim parametreleri ve seramik-parçacıklar için kirişin yer değiştirmeleri, kesit dönmeleri ve mesnet tepkileri üzerinden detaylı olarak irdelenmiştir. Ayrıca hem karışık sonlu eleman hem de yer değiştirme türü sonlu eleman (ANSYS BEAM188) yöntemi üzerinden edilen sonuçlar için yakınsama analizi yapılmıştır ve her iki sonlu eleman yönteminden elde edilen sonuçların yakınsama performansları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, parabolik kiriş, statik analiz, sonlu eleman yöntemi

ABSTRACT

STATIC ANALYSIS OF AXIALLY FUNCTIONALLY GRADED PARABOLIC RODS VIA DISPLACEMENT TYPE AND MIXED FINITE ELEMENT METHODS

EYÜP YILMAZ

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Merve ERMİŞ

June 2022, 39 pages

The objective of this thesis is to investigate the behaviour of the static analysis of axially functionally graded parabolic planar beams using mixed finite element method based on Timoshenko beam theory. A two-noded curved mixed finite element has 12 field variables at each node. These variables denote three displacements, three cross-sectional rotations, three forces, two bending moments and a torque, respectively. The functionally graded material is composed of ceramic-particle material and metal-matrix material. The volume fraction of ceramic and metal materials varies along the beam axis. The effective material properties (modulus of elasticity and Poisson's ratio) of the functionally graded material are determined according to the rule of mixture. The parametric analysis of the axially functionally graded parabolic beam subjected to a vertical uniformly distributed load is investigated different boundary conditions, material variation parameters, and ceramic-inclusions over the displacement, cross-sectional rotations, and support reactions in detail. Also, a convergence analysis is performed for both the results obtained from using mixed finite element and displacement-type finite element method (ANSYS BEAM188) and the convergence performance are discussed over the results obtain by both finite element methods.

Keywords: axially functionally graded material, parabolic beam, static analysis, finite element method

TEŞEKKÜR

Bana yüksek lisans tez çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle yardımcı olan, destekleyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ'e, ANSYS programında bilgi ve deneyimleriyle bana katkıda bulunan Gökay AYDOĞAN ve Oğuzhan KIR'a, bu zamana kadar eğitimime ve öğrenimime bilgi, fikir ve öğretileriyle katkıda bulunan diğer tüm ilkokul, ortaokul, lise, lisans ve yüksek lisans eğitimi veren hocalarıma teşekkürü borç bilirim. Ayrıca beni her zaman destekleyen ve sürekli gelişimimde destekçi olan annem Emine YILMAZ'a, babam Rasim YILMAZ'a ve kardeşim Ömer Faruk YILMAZ'a desteklerinden dolayı sonsuz sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
2.1. Metal ve seramik malzeme içeriğine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler	4
2.2. Eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş düzlem eğrisel kirişler	5
3. EKSENEL FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PARABOLİK ÇUBUK İÇİN FONKSİYONEL VE SONLU ELEMAN FORMÜLASYONU	9
3.1. Parabolik çubuk geometrisi	9
3.2. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme modeli	10
3.3. Sonlu eleman formülasyonu	11
3.3.1. Fonksiyonel ve karışık sonlu eleman formülasyonu	11
3.3.2. Yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi.....	12
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	13
4.1. Yakınsama Analizi	13
4.2. Parametrik Analiz.....	21
4.2.1. Malzeme değişim parametresinin (n_h) etkisi	23
4.2.2. Seramik malzemesinin etkisi	27
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
KAYNAKLAR.....	33
ÖZGEÇMİŞ	39

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3.1. Seramik-parçacık ve metal-matris malzeme özellikleri	10
Çizelge 4.1. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$). ...	21
Çizelge 4.2. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$). .	21
Çizelge 4.3. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için A noktasındaki kuvvet (T_z^A) ve momentler (M_t^A ve M_n^A).....	22
Çizelge 4.4. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için B noktasındaki kuvvet (T_z^B) ve momentler (M_t^B ve M_n^B).....	22

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3.1. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik kiriş	8
Şekil 3.2. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş eğrisel kirişin elastisite modülünün normalize edilmiş yay boyu s / S oranına göre değişimi	10
Şekil 4.1. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirmesine ($u_z^{\max}$) ait yakınsama analizi.	14
Şekil 4.2. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki kuvvete (T_z^A) ait yakınsama analizi.	14
Şekil 4.3. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_x^A) ait yakınsama analizi.	15
Şekil 4.4. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_y^A) ait yakınsama analizi	15
Şekil 4.5. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki kuvvete (T_z^B) ait yakınsama analizi.	16
Şekil 4.6. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki momente (M_x^B) ait yakınsama analizi.	16
Şekil 4.7. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki momente (M_y^B) ait yakınsama analizi.	17
Şekil 4.8. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirmesi ($u_z^{\max}$) ait yakınsama analizi.	18
Şekil 4.9. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki kuvvete (T_z^A) ait yakınsama analizi.	18
Şekil 4.10. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_x^A) ait yakınsama analizi.	19
Şekil 4.11. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_y^A) ait yakınsama analizi.	19
Şekil 4.12. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}, Q_t^{\max}, Q_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)	24

Şekil 4.13. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^A, M_t^A, M_n^A) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)	24
Şekil 4.14. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^B, M_t^B, M_n^B) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre).....	25
Şekil 4.15. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-serbest)	25
Şekil 4.16. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre).....	27
Şekil 4.17. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^A, M_t^A, M_n^A) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)	27
Şekil 4.18. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^B, M_t^B, M_n^B) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)	28
Şekil 4.19. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-serbest).....	28

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$r(\varphi)$	Konum vektörü
$\chi(\varphi)$	Eğrilik
s	Yay boyu
S	Toplam yay boyu
$c(\varphi)$	Yay boyunun gradyenti
φ	Yatay açı
L	Kiriş açıklığı
H	Kiriş yüksekliği
n_e	Sonlu eleman sayısı
x,y,z	Kartezyen koordinat takımı
t,n,b	Frenet koordinat takımı
E	Elastisite modülü
ν	Poisson oranı
n_h	Malzeme değişim parametresi
ε	Geometrik sınır koşulu
σ	Dinamik sınır koşulu
$\mathbf{u}$	Yer değiştirme vektörü
$\mathbf{\Omega}$	Kesit dönmesi vektörü
$\mathbf{T}$	Kuvvet vektörü
$\mathbf{M}$	Moment vektörü
$\mathbf{q}$	Yayıllı kuvvet vektörü
$\mathbf{m}$	Yayıllı moment vektörü
$\mathbf{I}$	Eylemsizlik moment vektörü
$\mathbf{C}_\gamma, \mathbf{C}_\kappa$	Kompliyanans matrisleri

Kısaltmalar

Açıklamalar

EFD	Eksenel Fonksiyonel Derecelendirilmiş
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme (bileşim malzemesi), farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip en az iki veya daha fazla sayıda malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu malzemedir. Üretilen bu yeni bileşim malzemesi olduğu bileşen malzemelerinden farklı özelliklere sahip olmaktadır [1]. Kompozit malzemeler bünyesinde bulunan bileşim malzemelerinin üstün özelliklerini bir araya getirerek ihtiyaca uygun (daha dayanıklı, daha hafif, vb.) özellikte malzemeler olması sebebiyle izotrop homojen malzemelere göre oldukça fazla tercih edilmektedir [2-5].

Gelişen teknoloji ile kompozit malzemelerin üretimi kolaylaşmış ve bu durum kompozit malzemelerin kullanımını da yaygınlaştırmıştır. Örneğin, uçaklar, uzay araçları, nükleer reaktörler gibi alanlarda ani sıcaklık değişimi ve darbe türü yüklemeler gibi durumlar, geleneksel kompozit malzemelerde (ör. tabakalı kompozit yapılar) çatlaklara veya katmanlar arası ayrılmalara neden olabilmektedir [6].

Bu durum bilim insanlarını yeni nesil kompozit malzemelerin üretimi arayışına yönlendirmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM), arzu edilen doğrultuda malzeme özelliklerinin sürekli bir fonksiyona bağlı olarak değişkenlik gösterdiği yeni nesil bir malzeme türüdür [7]. FDM'ler en az iki veya daha fazla malzemenin birleşmesiyle ortaya çıkan ve en iyi formları ile birleşerek farklı özellik gösteren, yapı içerisinde enine veya boyuna kademeli olarak değişmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir [8].

Bu tezin amacı, düşey doğrultuda kiriş düzlemine dik düzgün yayılı yük etkisindeki aksel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) parabolik kirişlerin statik analizini karışık sonlu eleman yöntemi ve yer değiştirme sonlu eleman yöntemlerini karşılaştırmalı olarak kullanarak incelemektir. Karışık sonlu eleman formülasyonu, iki düğüm noktalı eğrisel eleman üzerinden tanımlanmıştır. Yer değiştirme sonlu eleman yöntemi için ise, ANSYS paket programının global yapıda bir boyutlu kiriş elemanı BEAM188 kullanılmıştır. Yer değiştirme türü ve karışık sonlu eleman yöntemi sonuçları düşeyde düzgün yayılı yük etkisindeki EFD parabolik kirişin yer değiştirmeleri ve mesnet

tepkileri üzerinden irdelenmiştir. Daha sonra, parametrik analiz kapsamında farklı seramik-parçacık malzemeler, malzeme değişim parametreleri ve sınır koşullarının EFD düzlem parabolik kirişlerin statik davranışı üzerindeki etkisi kirişin yer değiştirmeleri, kesit dönmeleri ve mesnet tepkileri üzerinden detaylı olarak incelenerek özgün örnekler literatüre sunulmuştur.



2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin tarihçesinden bahsedecek olursak, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) 1972 yılında polimer malzemelerde kullanımı hakkında ilk defa fikir ortaya konulmuştur ancak yeterli alt yapıya sahip olunamadığı için herhangi bir malzemede kullanımına dahil olmamış olup, bu süreçten itibaren araştırma konusu olarak çalışmalarına devam edilmiştir [9]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler ilk olarak 1983 yılında Japonya’da uzay mekiğinin tasarımı sırasında dikkate alınmıştır. Japon şirket grubu olan Sendai Grup 1984’te bünyesindeki Japon bilim insanları tarafından geliştirilerek havacılık ve uzay araçlarında termal bariyer kaplama malzemesi olarak ilk defa üretilmiştir [10,11]. 1985 yılından itibaren FDM başlı başına bir kavram olarak kabul edilmiştir ve 1986 yılından itibaren FDM ile ilgili çalışmaların sayısını artırmak için bu konudaki bilim ve teknolojiyi destekleyen özel koordinasyon fonları verilmeye başlanmıştır. 1987 yılında Japonya Eğitim ve Bilim Bakanlığı desteğiyle, bilim insanları, üniversite, enstitü ve anonim şirketleri ve bünyesindeki araştırmacıları bir araya getirerek “Research on the Generic Technology of FGM (Functionally Graded Material) Development for Thermal Stress Relaxation” adı altında FDM araştırmalarını desteklemek amacıyla bir araştırma projesi yürütülmüştür. Bu proje sayesinde, birçok FDM üretim tekniği ve malzeme çeşidi bulunmuştur. FDM’ler 1990 yılında işlevsel birinci sınıf malzemeleri konu alan uluslararası konferansta konu olmaya başlamış ve günümüze kadar birçok araştırma ve konferans konuşmalarına konu olmuştur [12]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin uygulama alanları oldukça geniştir. Bu uygulama alanlarına örnek verilecek olursa [12];

Uzay ve havacılık alanında uygulamaları; roket nozülü, rotor tahrik mili, döner fırlatıcılar, iniş dişlisi kapıları, uzay aracı kafes giriş yapı, teleskop ölçüm cihazları, gaz türbin uygulamaları, sensör ve enerji uygulamaları, yüksek sıcaklık içeren ortam içerisinde kullanılan hareketli kanatlar, cihaz uygulamaları için yarı iletken yapıların yapısında kullanılmaktadır.

Makine ve ekipman uygulamaları; kesme aleti ara parçaları, rüzgâr türbini kanatları, basınçlı kaplar, delme motoru şaftı, yakıt depoları, makine parçaları, dizüstü bilgisayar çantaları, yangın söndürücüler, gözlük çerçeveleri, X ışını masaları, MRI tarayıcı kriyojenik borular, yarış bisikleti, tenis racketleri, müzik enstrümanları olarak sıralanabilir.

Biyomedikal alanında uygulamalar; yapay diş kökü üretimi ve diş implantları, kemik kırıldak onarımı, suni deri, biyokompozit kaplamalar örnek olarak verilebilir.

Savunma sanayisi alanında uygulamalar; zırhlı araçların plak formundaki yapısında, balistik performans malzemelerinin yapısında, kılavuz çubukları, hassas silindir ve borular, ateşleme pimleri gibi veya kurşun geçirmez yelekler olarak sıralanabilir.

Enerji sanayisinde uygulama alanları incelenecek olursa; soğutma sistemlerindeki buharlaştırıcı boruları, termal güç jeneratörleri, enerji dönüştürme cihazları, katot malzemeleri ve nükleer enerji malzemeleri yapımında kullanılmaktadır. Elektronik malzeme/yapılar uygulamaları; yakıt hücreleri, vakum anahtar boruları, elektrik kontağı malzemeleri, ısı emicisi, entegre devreler, yarı iletken cihazlar ve elektronik alt tabakalar olarak sıralanabilir.

Otomotiv endüstrisi alanındaki uygulamaları; fren motorları, motor pistonları, silindir gömlekleri, kasnaklar, şok emiciler, el çarkları, doğalgaz (CNG) depolama silindirleri, yarış arabası frenleri sıralanabilir [13].

2.1. Metal ve seramik malzeme içeriğine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretiminde sıklıkla karşımıza çıkan metal ve seramik malzemeler incelenecek olursa: Metal malzemeler; yüksek kırılma tokluğuna sahiptir, ayrıca diğer bir malzeme olan seramiğe kıyasla ani sıcaklık değişimine daha dayanıklıdır. Ancak, yüksek sıcaklıktaki ortamlarda dayanıklılığı seramik malzeme kadar iyi değildir. Seramik malzemeler; düşük yoğunlukta olması, yüksek sıcaklığa karşı dayanımı, malzemeler arası sürtünme direncine sahip olmasının yanı sıra metal malzemeyi korozyona ve oksidasyona karşı korumakta olup kılıf görevi görmektedir. Ancak, kırılma tokluğu ve termal şok dirençleri de oldukça düşüktür [13-14]. Seramik ve metal malzemeden oluşan FDM, metal fazdan seramik faza geçişi ile ortaya bazı önemli özellikler çıkmaktadır. Bu özellikler, yüksek mukavemet, elektrik geçirgenliği

ve işlenebilirlik özelliklerinin yanı sıra, malzemede fiziksel ve kimyasal farklılıklardan doğabilecek ani reaksiyonları en aza indirebilecek şekilde özelliklere sahip malzemelerdir [15].

Matris malzeme kompozit malzemenin yapısındaki bileşenleri (seramik, plastik, metal vb.) bir arada tutarak uyum içinde kalmasını sağlayan maddedir. Metal matrisli kompozit malzeme yapısında metal bulunan iki veya daha fazla malzemeden oluşan kompozit malzemelerdir. Partikül takviyeli metal matris kompozit malzemeler diğer fiber kompozit malzemeler ile kıyaslandığında üretim açısından daha tasarruflu, fiziksel olarak aşınma direnci bir hayli yüksek olması ve aynı zamanda yüksek sıcaklık ortamında daha dayanıklı olabilmesi tercih edilme konusunda önceliğe sahiptirler [14].

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin güçlendirilmesinde kullanılan seramik malzemelerin sayısı oldukça fazla olup, bunları dört ana başlık altında toplayacak olursak: Karbür seramikler (B_4C , SiC , WC , TiC), Nitrür seramikler (Bor Nitrür, Silisyum Nitrür, Sialon, TiN , AlN), Silikat seramikleri (Porselen Silikat, Magnezyum Silikat, Müllit), Oksit seramikler (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , ZnO , MgO , TiO_2) şeklindedir [12].

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde takviye amaçlı kullanılan seramik malzemeler kullanım yüzdeleri ile birlikte sunulacak olursa: SiC (Silisyum Karbür) % 39, Al_2O_3 (Alüminyum Oksit) % 20, B_4C (Bor Karbür) % 9, ZrO_2 (Zirkonyum dioksit) % 8, Si_3N_4 (Silisyum Nitrür) % 6, WC (Tungsten karbür) % 5, Al_3Zr (Zirkonyum Alüminid) % 4, TiC (Titanyum Karbür) % 2 ve diğerleri % 7 olarak verilmiştir. Bu malzemelerin kullanım yüzdeleri, 2003 yılı ile 2019 yılları arası baz alınarak yazılmıştır [12].

2.2. Eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş düzlem eğrisel kirişler

İzotrop homojen malzemeden oluşan eğrisel düzlem kirişlerin yapısal analiz (statik, dinamik, burkulma vb.) davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları [16-42] olarak sıralanabilir. Eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş eğri eksenli düzlem kirişler ile ilgili yapılan çalışmalara ait literatür bilgi ise aşağıda sunulmuştur.

Rajesakaran [43] tarafından, değişken kesitli eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) eğri eksenli kirişlerin statik ve serbest davranışı kayma ve dönel eylemsizlik etkilerini dikkate alarak sonlu eleman yöntemine dayalı diferansiyel dönüşüm eleman yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.

EFD kirişlerin ve kemerlerin doğal titreşim davranışının optimizasyonu ile ilgili problem, Tsiatas ve Charalampakis [44] tarafından çalışılmıştır.

Aslan vd. [45] tarafından, EFD değişken dairesel kesite sahip dairesel çubukların düzlem dışı zorlanmış titreşim davranışı Laplace uzayında ve tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Noori vd. [46] tarafından, EFD değişken kesite sahip parabolik kemerlerin düzlem içi serbest ve zorlanmış titreşim davranışını Laplace uzayında ve tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile ele alınmıştır.

Lee ve Lee [47] tarafından, EFD dairesel kemerlerin düzlem içi serbest titreşimini davranışı deneme öz değer yöntemi ile geliştirilmiş doğrudan integral yöntemi kullanarak incelenmiştir.

Temel ve Noori [48] tarafından, EFD değişken kesitli sikloid kirişlerin serbest titreşim ve zorlanmış titreşim davranışlarını tamamlayıcı fonksiyon yöntemi ile ele alınmıştır.

Bilgisayar tabanlı sonlu eleman paket programı ANSYS'in kiriş sonlu elemanı BEAM188 veya üç boyutlu katı sonlu elemanı SOLID186 kullanılarak, EFD eliptik kirişlerin statik analiz ve serbest titreşim davranışları sırasıyla Aydoğan vd. [49] ve Kır vd. [50] tarafından incelenmiştir.

Aktı vd. [51] tarafından Timoshenko çubuk kuramına bağlı EFD daire eksenli düzlem kirişlerin statik analiz davranışı karışık sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Aribas vd. [52] tarafından, EFD süper eliptik kirişlerin statik davranışı normal ve kayma gerilmeleri üzerinden karışık sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Ermiş vd. [53] tarafından, Timoshenko çubuk kuramına bağlı EFD eliptik düzlem kirişlerin statik ve serbest titreşim davranışı karışık sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Yazarın bilgisi dahilinde, literatürde karışık sonlu eleman yöntemi kullanılarak eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik kirişlerin statik analizini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.



3. EKSENEL FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PARABOLİK ÇUBUK İÇİN FONKSİYONEL VE SONLU ELEMAN FORMÜLASYONU

Bu bölümde, eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik düzlem kirişin statik analizine ait formülasyon bilgisi verilmiştir.

3.1. Parabolik çubuk geometrisi

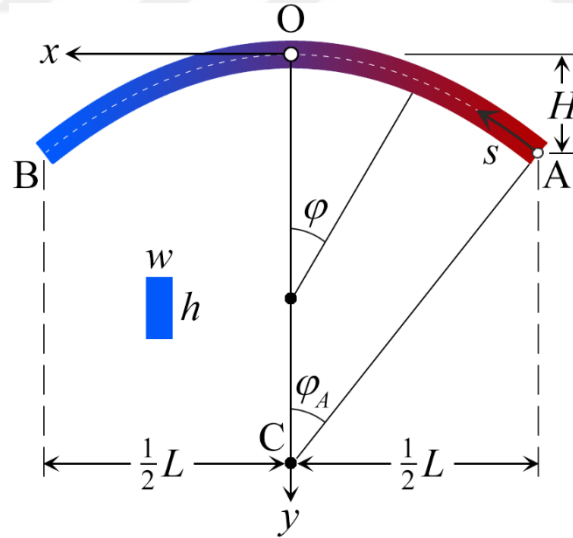
Kartezyen koordinat takımında, x ekseninden itibaren ölçülen φ açısı parametre olarak seçilerek x - y düzleminde bulunan düzlem eğrisel kirişe ait konum vektörü ifadesi yazılırsa:

$$\mathbf{r}(\varphi) = \{x(\varphi), y(\varphi)\} \quad (1)$$

Parabolik kirişin (Şekil 3.1.) x - y düzlemindeki bileşenleri,

$$x(\varphi) = \frac{1}{2}d \tan \varphi, \quad y(\varphi) = \frac{1}{4}d \tan^2 \varphi \quad (2)$$

olmak üzere, burada $\varphi_A \leq \varphi \leq \varphi_B$ ve $-\varphi_A = \varphi_B$ dir. $d = \frac{1}{4}L^2/H$ parametresinde, L kiriş açıklığını ve H ise kiriş yüksekliğini göstermektedir [54].



Şekil 3. 1. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik kiriş

Parabolik kirişin eğriliği $\chi(\varphi)$ ve yay boyu s nin gradyenti olan $c(\varphi)$ fonksiyonları konum vektörü cinsinden tanımlanırsa,

$$\chi(\varphi) = \|\mathbf{r}_{,ss}\|, \quad c(\varphi) = \|\mathbf{r}_{,\varphi}\|, \quad ds = c(\varphi) d\varphi \quad (3)$$

dir. Burada, virgülden sonraki alt indis ifadeleri sırasıyla s ve φ parametresine göre türevleri göstermektedir [55]. Kirişin toplam yay boyu uzunluğu S , de verilen yay boyu gradyenti $c(\varphi)$ yardımıyla $S = \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} c(\varphi) d\varphi$ formülü ile bulunur.

3.2. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme modeli

Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme dağılımı üssel fonksiyon olarak çubuk eksenini (s) boyunca fonksiyonel olarak değiştiği kabul edilmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden oluşan kompozit çubuğun etkin malzeme özellikleri karışım kuralına ([56,57]) göre tanımlanmıştır.

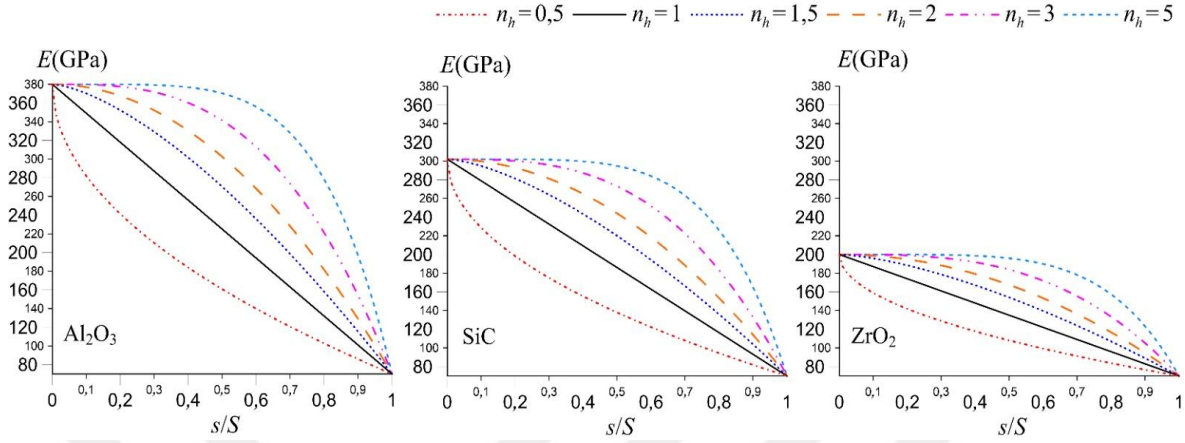
$$f(s) = f_0 + (f_1 - f_0) \left(\frac{s}{S} \right)^{n_h}, \quad 0 \leq s \leq S \quad (4)$$

Burada, f sırasıyla, etkin malzeme özelliklerinden elastisite modülünü ve Poisson oranını (E, ν), alt indis “0” ve “1” çubuk eksenini boyunca sırasıyla başlangıç ($s = 0$, A noktası) ve bitiş ($s = S$, B noktası) noktalarındaki kesitlerdeki malzemeleri göstermektedir. $n_h > 0$ malzeme değişim parametresidir. Bu tez kapsamında fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme seramik-parçacık ve metal-matris malzemeden oluşmaktadır. Kirişin başlangıç ve bitiş noktalarındaki kesitlerde malzemeler sırasıyla %100 seramik ve %100 metal malzemedir. Çalışma kapsamında, metal malzeme olarak alüminyum (Al) ve seramik malzeme olarak ise alümina (Al_2O_3), Zirkonyum dioksit (ZrO_2) ve Silisyum karbür (SiC) seçilmiş olup malzeme sabitleri elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Seramik-parçacık ve metal-matris malzeme özellikleri

Malzeme	E [GPa]	ν
Alüminyum (Al) [58]	70	0,3
Alümina (Al_2O_3) [58]	380	0,3
Zirkonyum dioksit (ZrO_2) [58]	200	0,3
Silisyum karbür (SiC) [59]	302	0,17

Parabolik kiriş boyunca elastisite modülünün değişimi, Çizelge 3.1’de verilen seramik-parçacık ve metal-matris malzemeler ve farklı malzeme değişim parametre değerleri ($n_h = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$ ve 5) değerleri için Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş eğrisel kirişin elastisite modülünün normalize edilmiş yay boyu s / S oranına göre değişimi

3.3. Sonlu eleman formülasyonu

Bu tez kapsamında, eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik düzlem kirişlerin statik analizi karışık sonlu eleman ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi (ANSYS-BEAM188) ile çözülmüştür.

3.3.1. Fonksiyonel ve karışık sonlu eleman formülasyonu

Homojen izotrop helisel çubukların serbest titreşim ve statik analizine ait fonksiyonel Omurtag ve Aköz 1992 [60] ve Eratlı vd. 2016 [61] çalışmalarında verilmiştir. Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş üç boyutlu uzay çubukların serbest titreşimine ait fonksiyonel Ermis 2021’de [62] verilmiştir. EFD uzay çubukların statik analizine ait fonksiyonel aşağıda sunulmuştur.

$$\mathbf{I}(\mathbf{y}) = -\left[\mathbf{u}, \mathbf{T}_{,s} \right] + \left[\mathbf{t} \times \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{T} \right] - \left[\mathbf{M}_{,s}, \boldsymbol{\Omega} \right] - \frac{1}{2} \left[\mathbf{C}_{\kappa}(s) \mathbf{M}, \mathbf{M} \right] - \frac{1}{2} \left[\mathbf{C}_{\gamma}(s) \mathbf{T}, \mathbf{T} \right] \left\{ \begin{array}{l} -\left[\mathbf{q}, \mathbf{u} \right] - \left[\mathbf{m}, \boldsymbol{\Omega} \right] + \left[\left(\mathbf{T} - \hat{\mathbf{T}} \right), \mathbf{u} \right]_{\sigma} + \left[\left(\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}} \right), \boldsymbol{\Omega} \right]_{\sigma} + \left[\hat{\mathbf{u}}, \mathbf{T} \right]_{\varepsilon} + \left[\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{M} \right]_{\varepsilon} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Burada , t, n ve b sırasıyla Frenet koordinat takımının teğet, normal ve binormal vektörleri olmak üzere, $\mathbf{u}(u_t, u_n, u_b)$ yer değiştirme vektörünü, $\boldsymbol{\Omega}(\Omega_t, \Omega_n, \Omega_b)$ kesit dönmesi vektörünü, $\mathbf{T}(T_t, T_n, T_b)$ kuvvetleri, $\mathbf{M}(M_t, M_n, M_b)$ moment vektörünü, $\mathbf{q}(q_t, q_n, q_b)$ yayılı yük vektörünü, $\mathbf{m}(m_t, m_n, m_b)$ yayılı moment vektörünü, A kesit

alanını, $\mathbf{I}(I_t, I_n, I_b)$ eylemsizlik moment vektörünü, $C_\gamma(s)$ ve $C_\kappa(s)$ kompliyans matrislerini göstermektedir. Denklem (5)'de verilen fonksiyonelde köşeli parantezler iç çarpımları ifade etmekte olup, şapkalı terimler sınırlardaki bilinen değerleri ifade etmektedir ve alt indis ε ve σ ise sırasıyla geometrik ve dinamik sınır koşullarını göstermektedir. İki düğüm noktasına sahip eğrisel eleman her bir düğüm noktasında toplamda 12 adet değişkene sahiptir. Frenet koordinat takımında tanımlanan bu değişkenlerden üçü yer değiştirmeleri, üçü kesit dönmelerini, üçü kuvvetleri ve ikisi eğilme momentini biri ise burulma momentini göstermektedir. x - y düzleminde tanımlanan eğrisel çubuk için, Frenet koordinat takımındaki binormal doğrultu b , Kartezyen koordinat takımındaki z eksenini çakışmaktadır.

3.3.2. Yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi

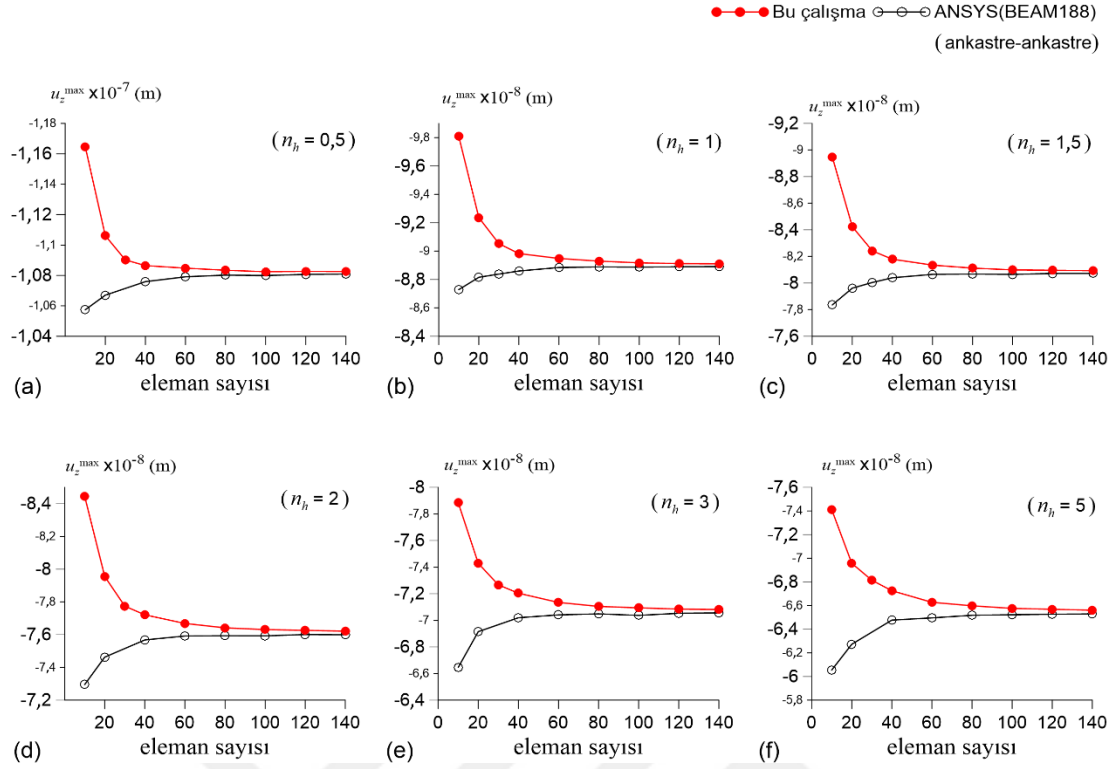
Bu tez kapsamında, yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi için bilgisayar tabanlı sonlu eleman programı olan ANSYS kullanılarak eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) parabolik kirişin düzgün yayılı yük etkisindeki statik davranışı incelenmiştir. ANSYS BEAM188; İnce ve orta derecede yükseklik/uzunluk oranı bulunan kiriş yapılarını analiz etmek amacıyla kullanılır. Timoshenko kiriş teorisi üzerinden kayma deformasyonu etkilerini de hesaba katarak formüle edilmiştir. Global yapıda 2 adet düğüm noktasına sahip bir boyutlu kiriş eleman her bir düğüm noktasında 6 adet serbestlik derecesi bulunur: Bunlardan üçü x , y ve z doğrultularında ötelenmeler olup, diğer üçü ise x , y ve z eksenleri etrafında kesit dönmeleridir [63].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

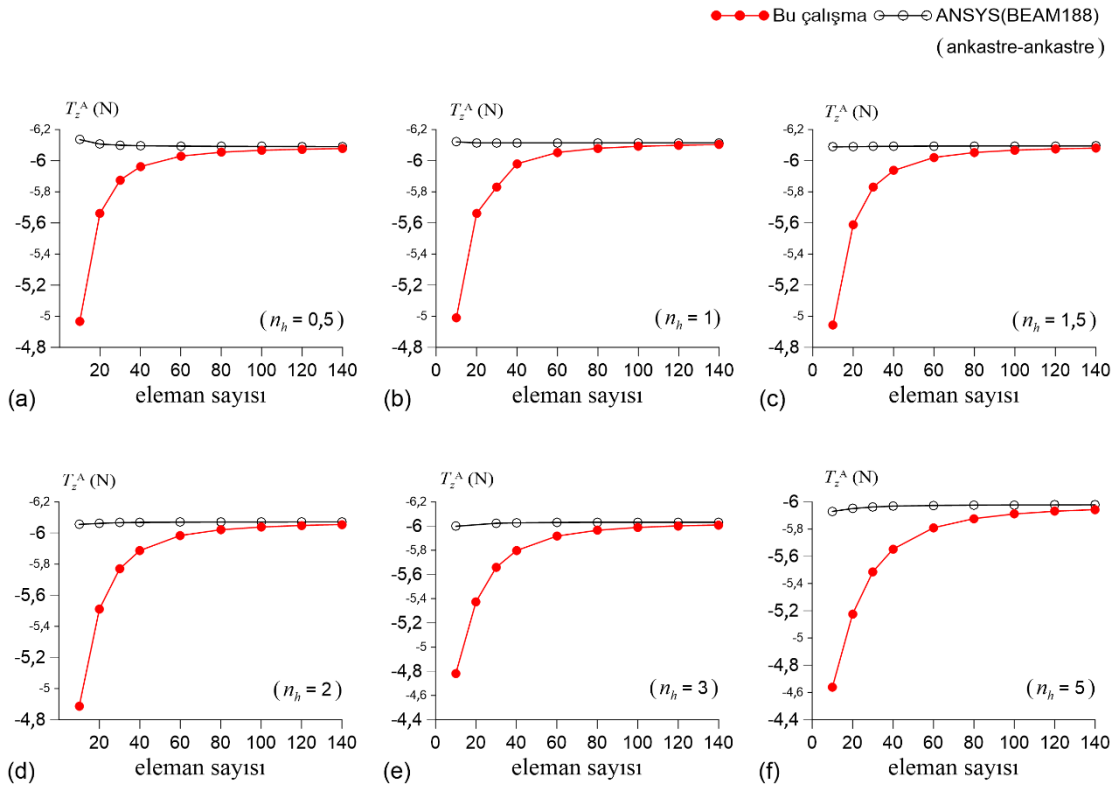
Sayısal örneklerde, eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş (EFD) parabolik kirişin düzgün yayılı yük etkisindeki statik analiz davranışı farklı malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$ ve 5), farklı seramik malzemeler (Alümina (Al_2O_3), Zirkonyum dioksit (ZrO_2), Silisyum karbür (SiC)) ve farklı sınır koşulları (ankastre-ankastre, ankastre-serbest) için incelenmiştir. Tüm örneklerde parabolik kirişin geometrik ve kesit özellikleri sabit tutulmuştur (Şekil 3.1.). Kiriş açıklığı $L = 10\text{m}$ ve kiriş yüksekliği $H = 2\text{m}$ 'dir. Dikdörtgen kesitin genişliği $w = 0,5\text{m}$ ve kiriş yüksekliği ise $h = 0,4\text{m}$ 'dir. Düzgün yayılı yükün şiddeti ise $q_z = -1\text{N/m}$ 'dir. Sayısal sonuçlar, yakınsama analizi ve parametrik analiz olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. ANSYS çözümlerinde elemandaki malzeme özellikleri eğrisel kirişin iki düğüm noktasındaki malzeme özelliklerinin ortalaması olarak alınmıştır.

4.1. Yakınsama Analizi

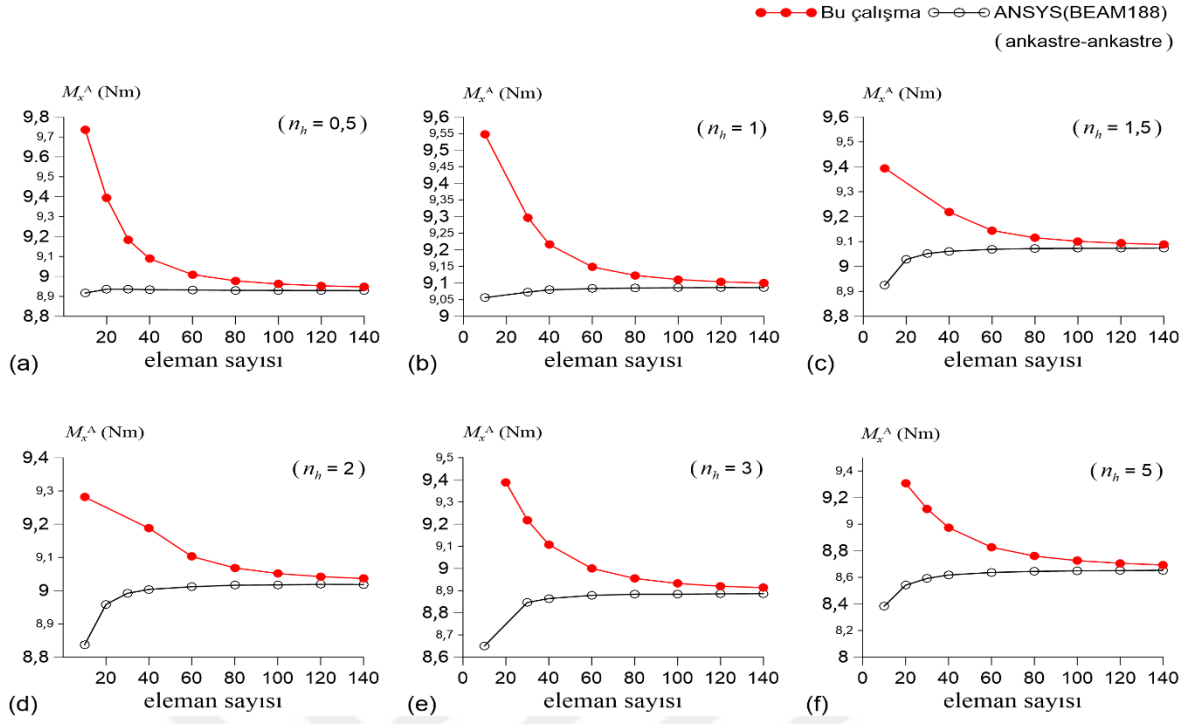
Yakınsama analizi hem yer değiştirme türü (ANSYS-BEAM188) hem de karışık sonlu eleman yöntemi kullanılarak EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirme $u_z^{\max}$ ile mesnet noktalarındaki (A ve B) kuvvet (T_z) ve momentler (M_x , M_y) üzerinden yapılmıştır. Yakınsama analizinde malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$ ve 5) seçilmiş olup seramik malzeme Alümina (Al_2O_3) ve sınır koşulları ise ankastre-ankastre ve ankastre-serbesttir. Ankastre–ankastre sınır koşulu için karışık sonlu eleman yöntemi ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi (ANSYS-BEAM188) elde edilen sonuçlarına ($u_z^{\max}$, T_z^A , M_x^A , M_y^A , T_z^B , M_x^B , M_y^B) ait grafikler sırasıyla Şekil 4.1.- 4.7. arasında sunulmuştur. Sonlu eleman sayısı 10 ile 140 adet arasında değişmektedir. Hem karışık sonlu eleman yöntemi hem de yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi için 120 adet sonlu eleman kullanılarak elde edilen sonuçlar 140 adet sonlu eleman üzerinden elde edilen sonuçlara göre normalize edilerek yüzde farklar hesaplanmıştır. Yüzde farkların mutlak değerce en büyük değeri karışık sonlu eleman yöntemi ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi için sırasıyla % 0,12 ve % 0,4'tür.



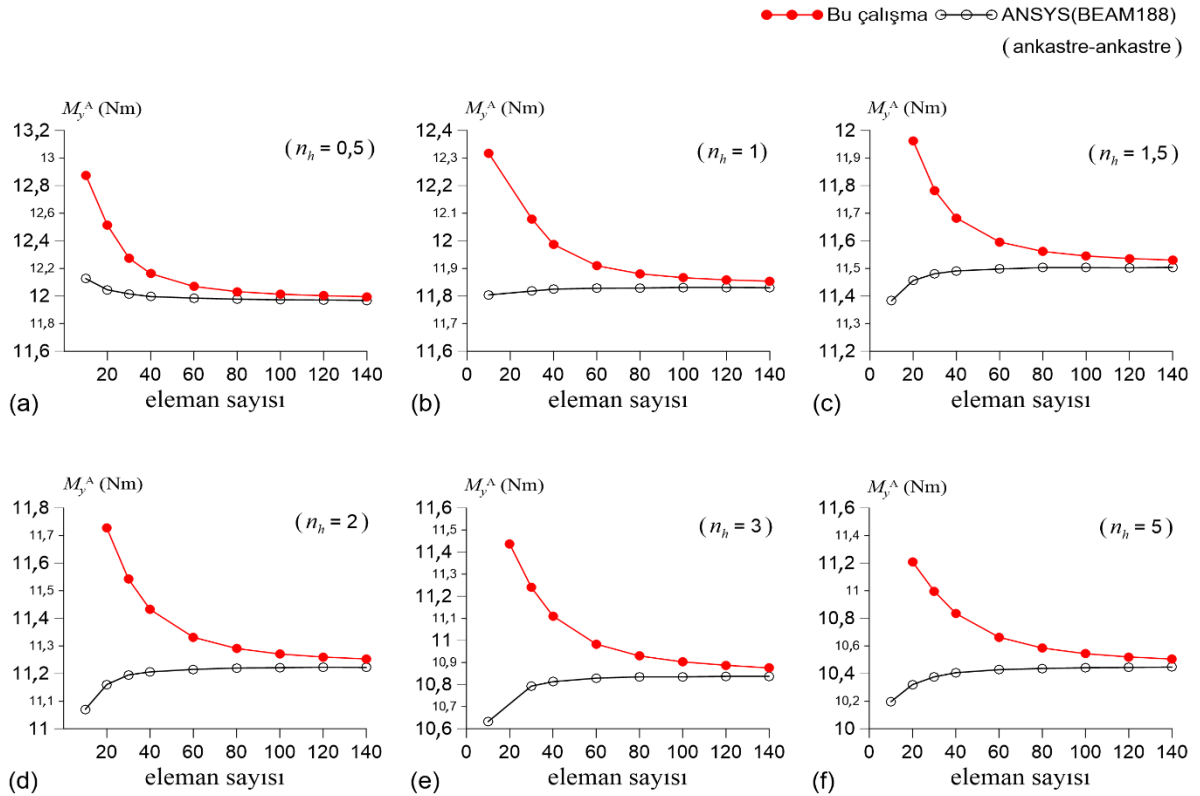
Şekil 4.1. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirmesine ($u_z^{\max}$) ait yakınsama analizi.



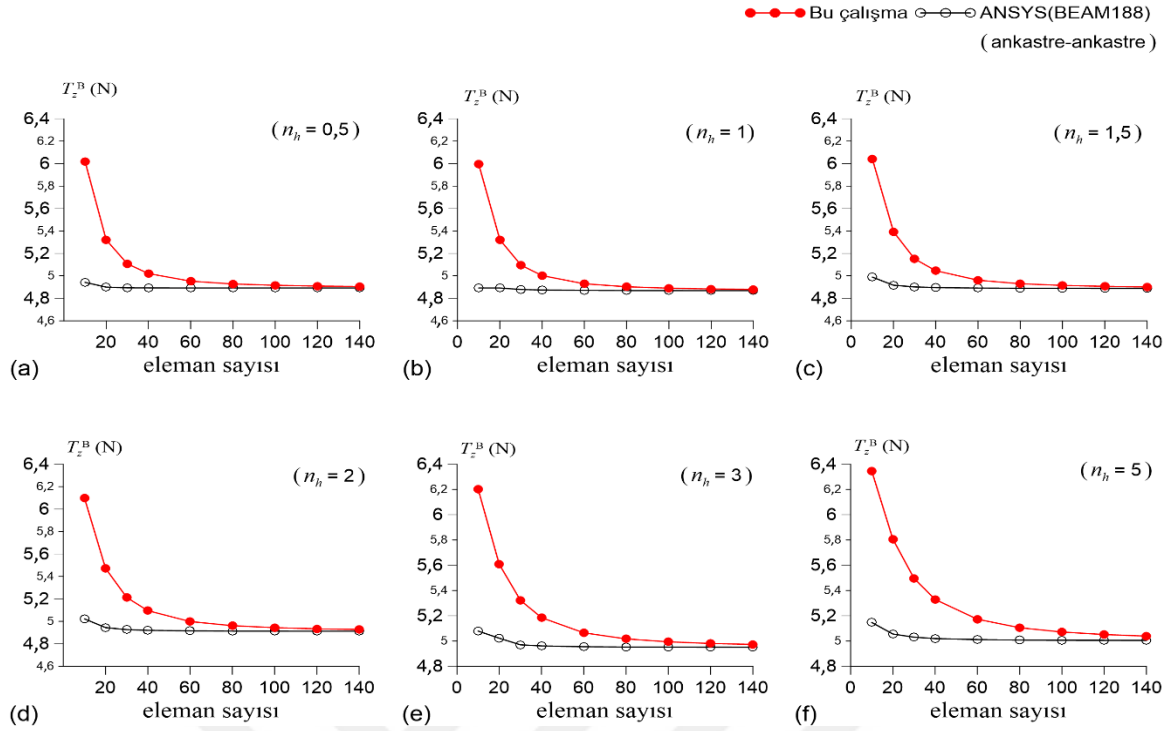
Şekil 4.2. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki kuvvete (T_z^A) ait yakınsama analizi.



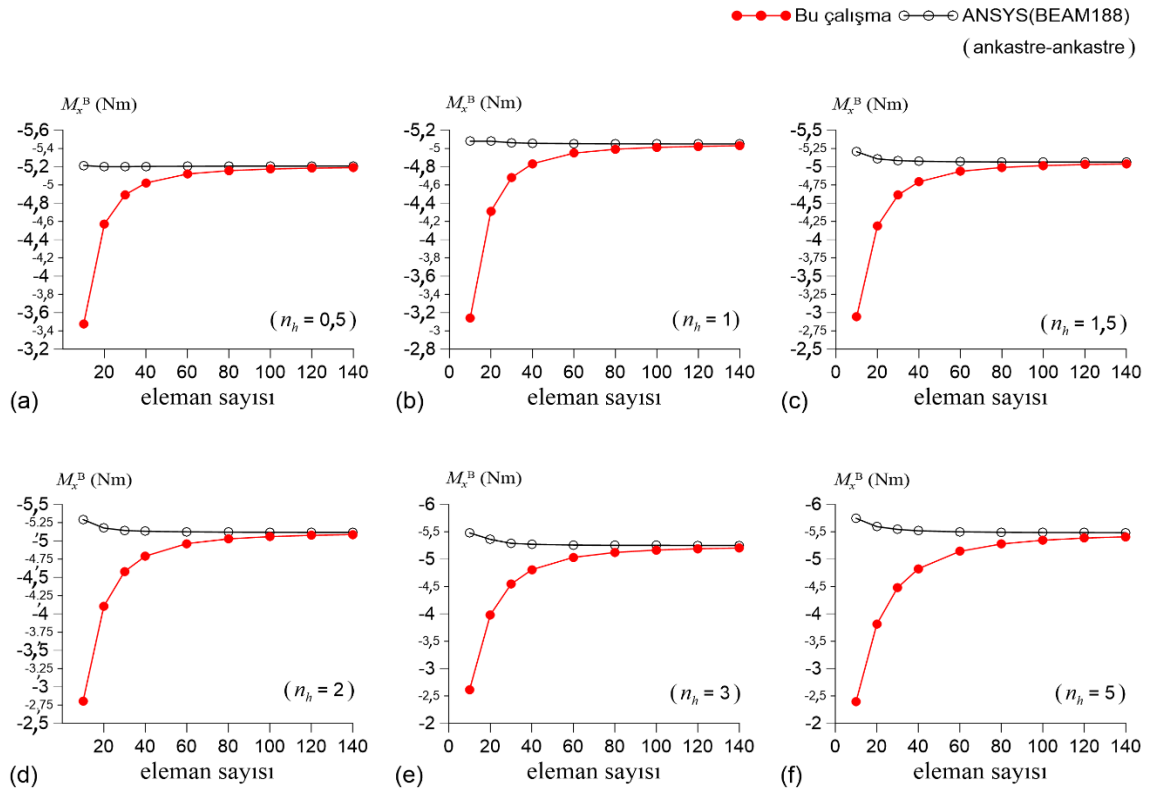
Şekil 4.3. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_x^A) ait yakınsama analizi.



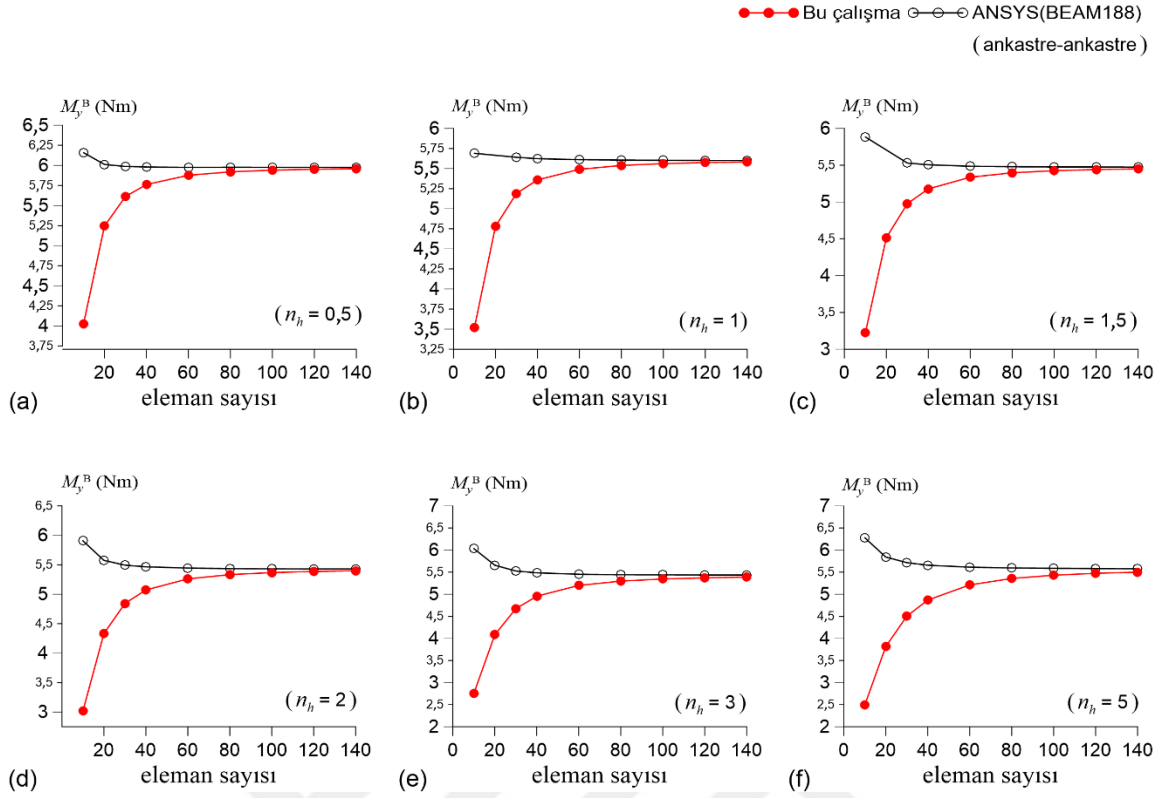
Şekil 4.4. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_y^A) ait yakınsama analizi



Şekil 4.5. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki kuvvete (T_z^B) ait yakınsama analizi.

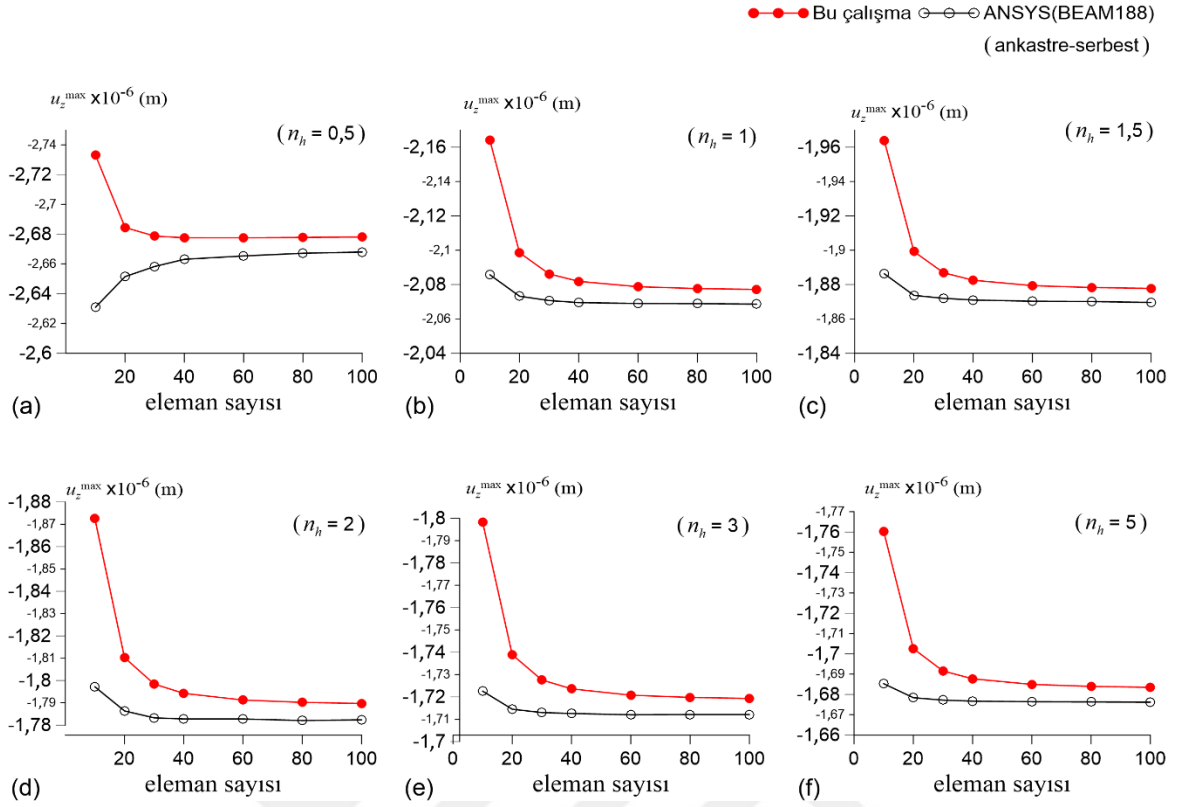


Şekil 4.6. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki momente (M_x^B) ait yakınsama analizi.

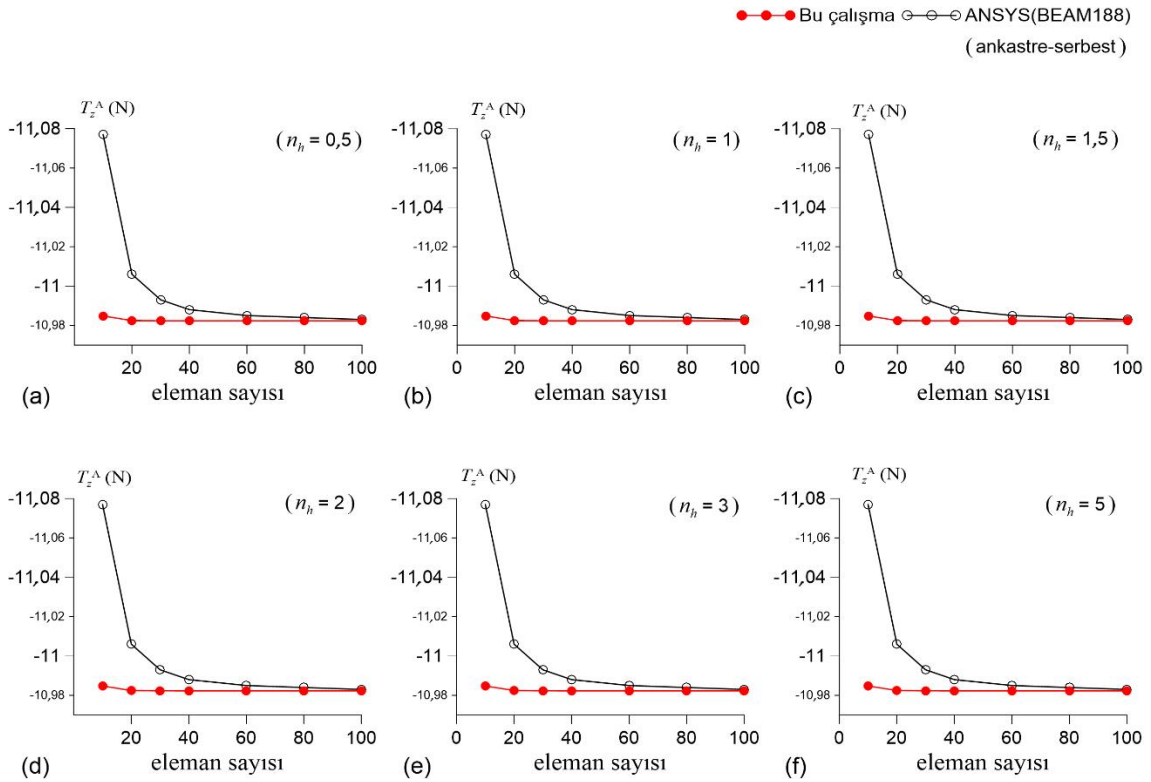


Şekil 4.7. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin B noktasındaki momente (M_y^B) ait yakınsama analizi.

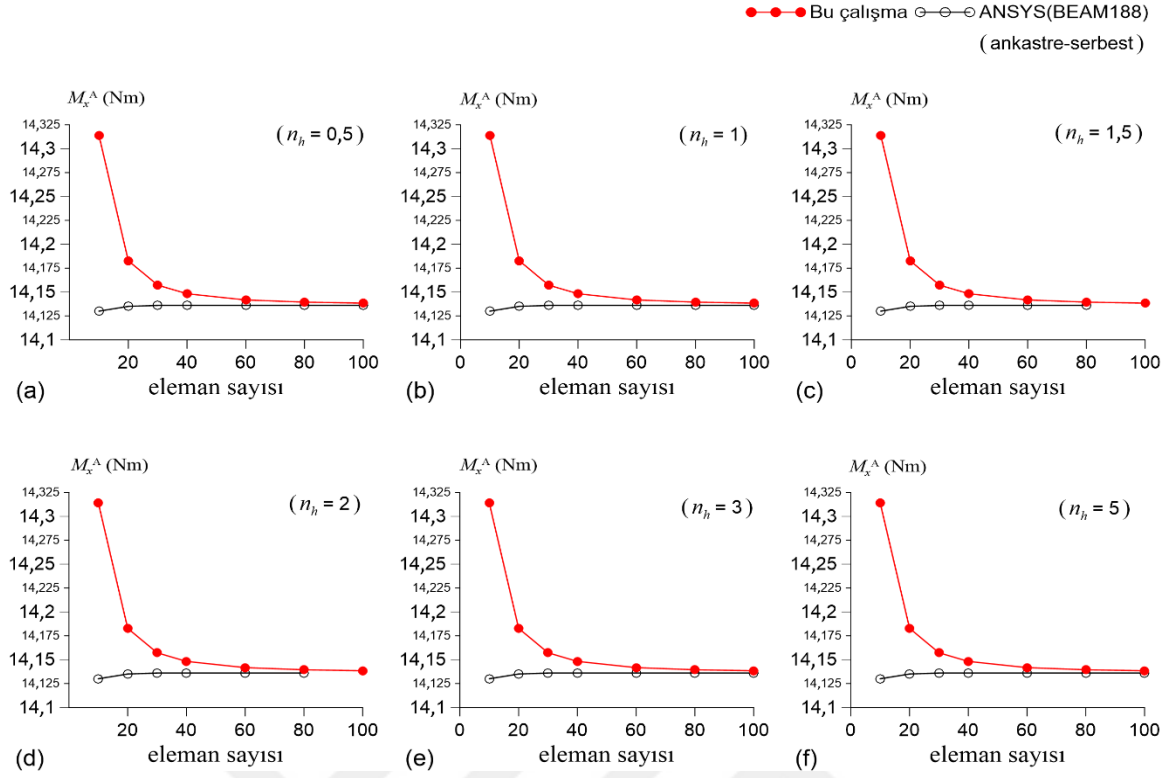
Ankastre–serbest sınır koşulu için karışık sonlu eleman yöntemi ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi (ANSYS-BEAM188) elde edilen sonuçlarına ($u_z^{\max}$, T_z^A , M_x^A , M_y^A) ait grafikler sırasıyla Şekil 4.8.-4.11. arasında sunulmuştur. Sonlu eleman sayısı 10 ile 100 adet arasında değişmektedir. Hem karışık sonlu eleman yöntemi hem de yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi için 80 adet sonlu eleman kullanılarak elde edilen sonuçlar 100 adet sonlu eleman üzerinden elde edilen sonuçlara göre normalize edilerek yüzde farklar hesaplanmıştır. Yüzde farkların mutlak değerce en büyük değeri karışık sonlu eleman yöntemi ve yer değiştirme türü sonlu eleman yöntemi için sırasıyla % 0,3 ve % 0,3'tür.



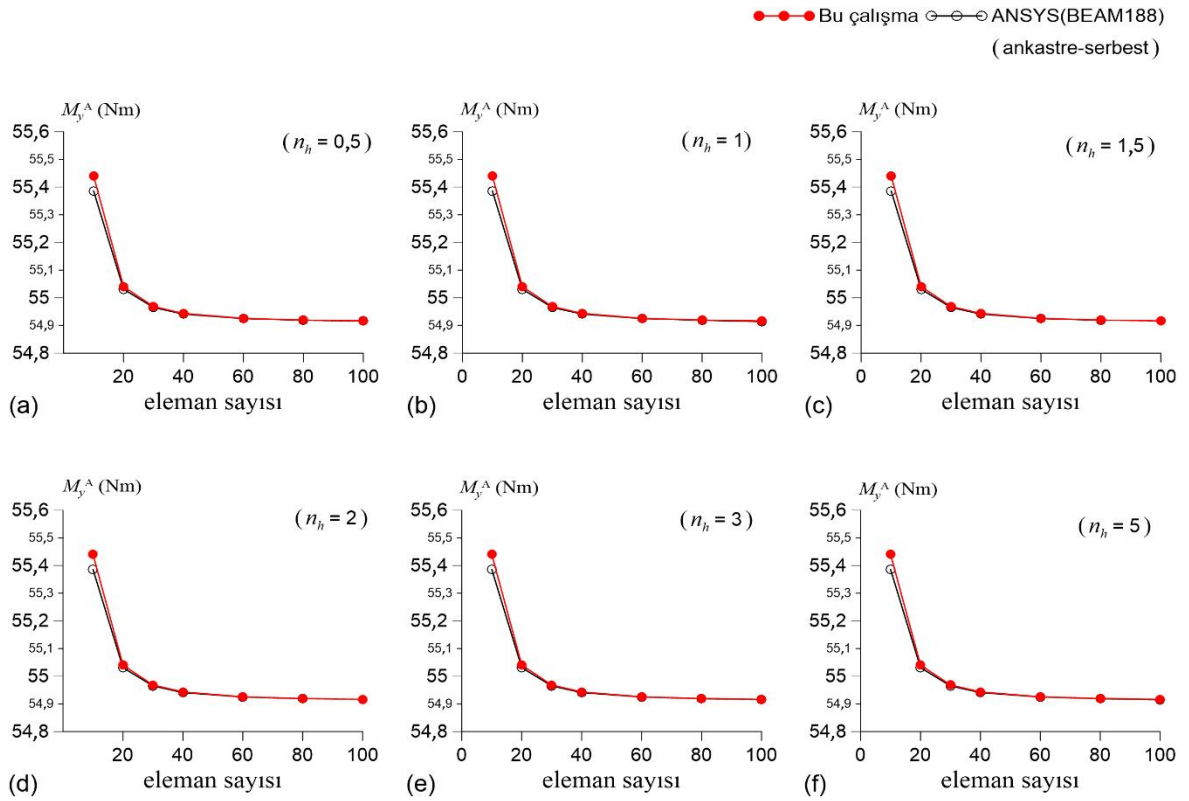
Şekil 4.8. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirmesi ($u_z^{\max}$) ait yakınsama analizi.



Şekil 4.9. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki kuvvete (T_z^A) ait yakınsama analizi.



Şekil 4.10. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_x^A) ait yakınsama analizi.



Şekil 4.11. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A noktasındaki momente (M_y^A) ait yakınsama analizi.

En büyük yer değiştirme ($u_z^{\max}$) ait yakınsama analizi sonuçları incelendiğinde ele alınan tüm malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) için,

- Hem ankastre-ankastre (Şekil 4.1) hem de ankastre serbest (Şekil 4.8) sınır koşulları için ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının karışık SEY sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir.

A noktasındaki kesme kuvvetine (T_z^A) ait yakınsama analizi sonuçları incelendiğinde ele alınan tüm malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) için,

- Ankastre-ankastre sınır koşulu için ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının karışık SEY sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.2.).
- Ankastre-serbest sınır koşulu için ise karışık SEY sonuçlarının ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.9.).

A noktasındaki momente (M_x^A) ait yakınsama analizi sonuçları incelendiğinde ele alınan tüm malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) için,

- Hem ankastre-ankastre (Şekil 4.3.) hem de ankastre-serbest (Şekil 4.10.) sınır koşulları için ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının karışık SEY sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir.

A noktasındaki momente (M_y^A) ait yakınsama analizi sonuçları incelendiğinde ele alınan tüm malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) için,

- Ankastre-ankastre sınır koşulu için ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının karışık SEY sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.4.).
- Ankastre-serbest sınır koşulu için ise hem karışık SEY sonuçlarının hem ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının yakınsama hızlarının hemen hemen aynı mertebelerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.11.).

Ankastre-ankastre sınır koşulu için B noktasındaki kesme kuvveti (T_z^B) ve momentlere (M_x^B ve M_y^B) ait yakınsama analizi sonuçları incelendiğinde ele alınan tüm malzeme değişim parametreleri ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) için ANSYS BEAM188 eleman sonuçlarının karışık SEY sonuçlarına göre daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir.

4.2. Parametrik Analiz

Bu bölümde, eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş parabolik kirişin statik davranışı üzerinde farklı seramik malzemeler (Alümina (Al_2O_3), Zirkonyum dioksit (ZrO_2), Silisyum karbür (SiC) ve malzeme değişim parametrelerinin ($n_h = 0,5;1;1,5;2;3$ ve 5) etkileri ankastre-ankastre ve ankastre serbest sınır koşulları üzerinden detaylı olarak irdelenmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$)

Seramik malzemeler	Yer değiştirme ve dönme	Malzeme değişim parametresi (n_h)					
		0,5	1	1,5	2	3	5
Alümina (Al_2O_3)	$u_z^{\max} \times 10^{-8}$ (m)	-10,826	-8,910	-8,093	-7,621	-7,081	-6,561
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	2,678	2,256	2,093	2,003	1,893	1,761
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	-3,373	-2,796	-2,521	-2,353	-2,146	-1,930
Silisyum karbür (SiC)	$u_z^{\max} \times 10^{-8}$ (m)	-12,354	-10,386	-9,525	-9,022	-8,438	-7,872
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	3,022	2,574	2,395	2,295	2,174	2,028
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	-3,781	-3,206	-2,927	-2,751	-2,530	-2,299
Zirkonyum dioksit (ZrO_2)	$u_z^{\max} \times 10^{-8}$ (m)	-15,466	-13,606	-12,752	-12,242	-11,636	-11,033
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	3,836	3,423	3,256	3,162	3,043	2,892
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-8}$ (rad)	-4,580	-4,064	-3,801	-3,629	-3,408	-3,167

Çizelge 4.2. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-serbest sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$)

Seramik malzemeler	Yer değiştirme ve dönme	Malzeme değişim parametresi (n_h)					
		0,5	1	1,5	2	3	5
Alümina (Al_2O_3)	$u_z^{\max} \times 10^{-6}$ (m)	-2,678	-2,077	-1,877	-1,789	-1,716	-1,683
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	1,882	1,465	1,330	1,271	1,225	1,203
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	3,438	2,619	2,330	2,198	2,085	2,033
Silisyum karbür (SiC)	$u_z^{\max} \times 10^{-6}$ (m)	-3,188	-2,517	-2,288	-2,186	-2,104	-2,062
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	2,320	1,862	1,710	1,643	1,591	1,565
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	4,049	3,145	2,819	2,668	2,543	2,480
Zirkonyum dioksit (ZrO_2)	$u_z^{\max} \times 10^{-6}$ (m)	-4,467	-3,730	-3,465	-3,343	-3,244	-3,192
	$\Omega_t^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	3,160	2,644	2,462	2,380	2,315	2,283
	$\Omega_n^{\max} \times 10^{-7}$ (rad)	5,608	4,640	4,267	4,089	3,936	3,856

Ankastre-ankastre ve ankastre-serbest sınır şartına sahip EFD parabolik kirişin en büyük yer değiştirmesi ($u_z^{\max}$) ve kesit dönmelerine ($\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$) ait sonuçlar sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için A noktasındaki kuvvet (T_z^A) ve momentler (M_t^A ve M_n^A)

Seramik malzemeler	Kuvvet ve moment	Malzeme değişim parametresi (n_h)					
		0,5	1	1,5	2	3	5
Alümina (Al_2O_3)	T_z^A (N)	-6,078	-6,103	-6,081	-6,054	-6,009	-5,943
	M_t^A (Nm)	-0,507	-0,299	-0,106	0,027	0,166	0,226
	M_n^A (Nm)	14,956	14,941	14,681	14,432	14,061	13,634
Silisyum karbür (SiC)	T_z^A (N)	-5,995	-6,023	-6,005	-5,984	-5,947	-5,892
	M_t^A (Nm)	-0,391	-0,202	-0,025	0,097	0,220	0,270
	M_n^A (Nm)	14,418	14,429	14,205	13,985	13,657	13,277
Zirkonyum dioksit (ZrO_2)	T_z^A (N)	-5,851	-5,884	-5,877	-5,864	-5,839	-5,801
	M_t^A (Nm)	-0,248	-0,134	-0,017	0,065	0,151	0,188
	M_n^A (Nm)	13,482	13,549	13,406	13,254	13,020	12,740

Çizelge 4.4. Farklı seramik malzemelere göre ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin için B noktasındaki kuvvet (T_z^B) ve momentler (M_t^B ve M_n^B)

Seramik malzemeler	Kuvvet ve moment	Malzeme değişim parametresi (n_h)					
		0,5	1	1,5	2	3	5
Alümina (Al_2O_3)	T_z^B (N)	4,905	4,879	4,902	4,928	4,973	5,039
	M_t^B (Nm)	-0,330	-0,440	-0,529	-0,599	-0,697	-0,788
	M_n^B (Nm)	7,895	7,501	7,404	7,394	7,459	7,675
Silisyum karbür (SiC)	T_z^B (N)	4,987	4,959	4,977	4,999	5,036	5,090
	M_t^B (Nm)	-0,299	-0,399	-0,480	-0,546	-0,639	-0,727
	M_n^B (Nm)	8,326	7,942	7,839	7,822	7,871	8,063
Zirkonyum dioksit (ZrO_2)	T_z^B (N)	5,131	5,098	5,105	5,119	5,143	5,181
	M_t^B (Nm)	-0,261	-0,348	-0,419	-0,474	-0,548	-0,608
	M_n^B (Nm)	9,128	8,799	8,704	8,683	8,714	8,864

Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip EFD parabolik kirişin A ve B mesnet noktalarındaki (Şekil 3.1) kesme kuvveti (T_z), burulma (M_t) ve eğilme momenti (M_n) sonuçları sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

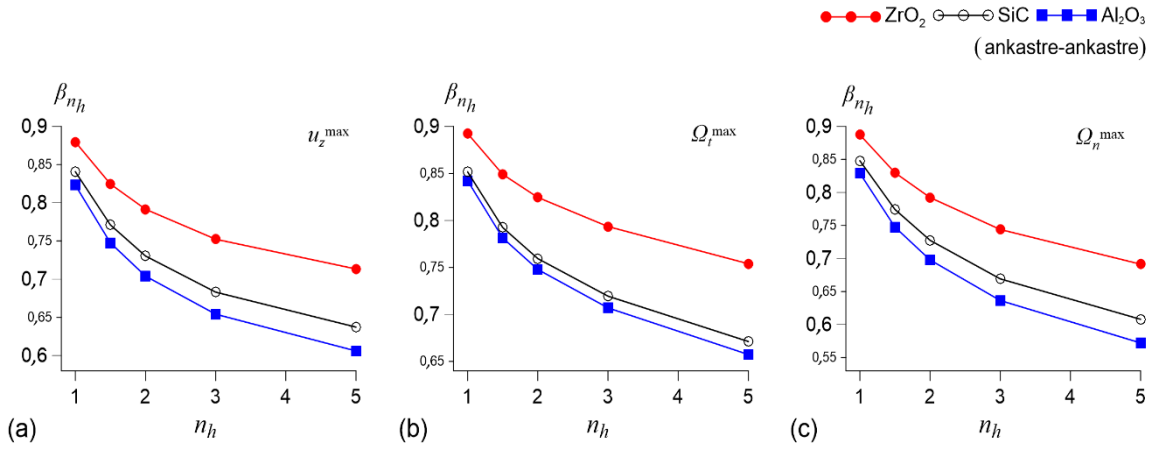
Ankastre-serbest sınır koşulu için A mesnet noktasındaki kesme kuvveti (T_z^A), burulma (M_t^A) ve eğilme momenti (M_n^A) sonuçları ele alınan tüm seramik malzemeler ve malzeme değişim parametreleri için aynıdır. T_z^A , M_t^A ve M_n^A ait değerler sırasıyla -10,9823N; -23,26504Nm ve 51,71229Nm'dir.

Seçilen parametreler için analiz sonuçları incelenecek olursa:

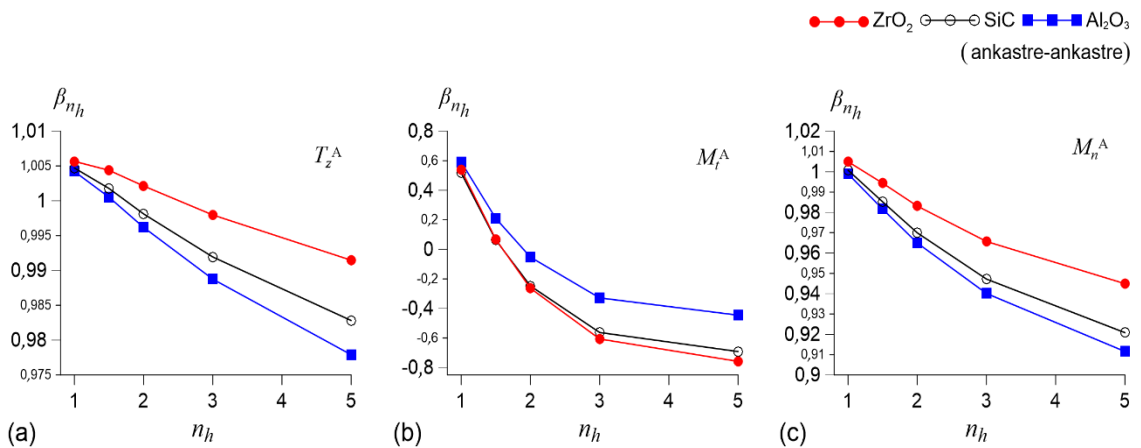
- Malzeme değişim parametresi (n_h) arttıkça, kiriş eksen boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin içeriği seramik açısından zengin malzeme haline gelmektedir (Şekil 3.2). Buna karşın, malzeme değişim parametresi (n_h) azaldıkça, kiriş eksen boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin içeriği metal açısından zengin malzeme haline gelmektedir (Şekil 3.2). Ele alınan her bir seramik malzemenin (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC) elastisite modülü değeri, metal malzemesinin (Al) elastisite modülünden daha yüksektir (Çizelge 3.1). Bu yüzden her bir seramik malzeme durumu için, en büyük yer değiştirme (u_z^{max}) ve kesit dönmelerine (Ω_t^{max} , Ω_n^{max}) ait sonuçların mutlak değerce en büyük değerlerini malzeme değişim parametresi $n_h = 0,5$ 'te alırken mutlak değerce en küçük değerlerini ise malzeme değişim parametresi $n_h = 5$ 'te almaktadır.
- Seramik ve metal malzemeye ait elastisite modülleri arasındaki oran (Γ), $\Gamma_s^E = \Gamma_s^E / \Gamma_{Al}^E$ (s: Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC) eşitliği ile hesaplanmıştır. Alümina (Al_2O_3), Zirkonyum dioksit (ZrO_2) ve Silisyum karbür (SiC) malzemelerine ait oranlar sırasıyla $\Gamma_{Al_2O_3}^E = 5,43$; $\Gamma_{SiC}^E = 4,31$ ve $\Gamma_{ZrO_2}^E = 2,86$ elde edilir. Malzeme değişim parametresi (n_h) sabit tutulduğunda ve Γ oranı arttıkça, en büyük yer değiştirme (u_z^{max}) ve kesit dönmelerine (Ω_t^{max} , Ω_n^{max}) ait sonuçlar mutlak değerce azalmaktadır. Mutlak değerce en küçük değerler Al_2O_3 için elde edilirken en büyük değerler ise ZrO_2 için elde edilmektedir.

4.2.1. Malzeme değişim parametresinin (n_h) etkisi

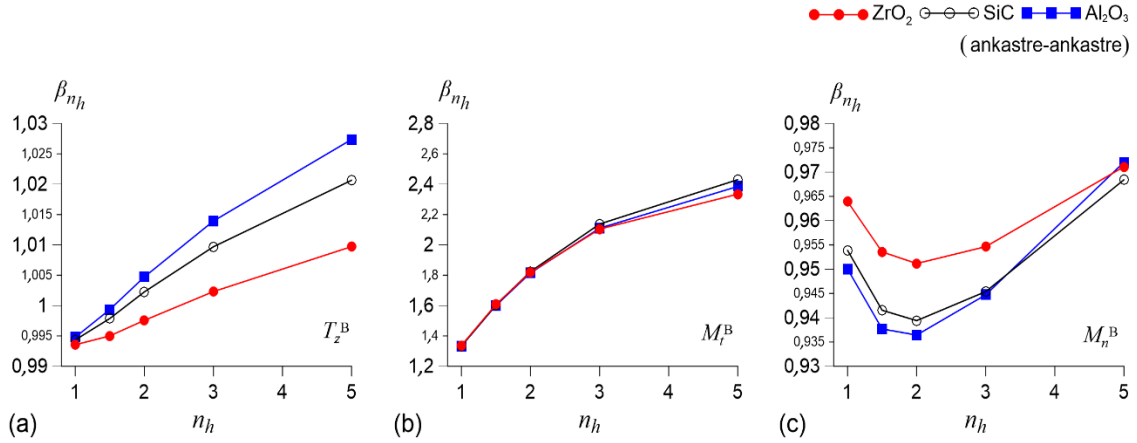
Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları üzerindeki etkisini incelemek için, malzeme değişim parametreleri $n_h = 1; 1,5; 2; 3; 5$ kullanılarak elde edilen sonuçlar $n_h = 0,5$ kullanılarak elde edilen sonuçlara göre her bir sınır koşulu ve seramik malzeme için $\beta_{n_h=i}^\Theta = \Theta_{n_h=i} / \Theta_{n_h=0,5}$ ($\Theta : u; T; M$ ve $i : 1; 1,5; 2; 3; 5$) eşitliği üzerinden hesaplanmıştır. Ankastre-ankastre ve ankastre-serbest sınır koşulları için elde edilen β_{n_h} oranlarının malzeme değişim parametresi (n_h) göre değişimi, sırasıyla, Şekil 4.12-4.14 ve Şekil 4.15'te sunulmuştur.



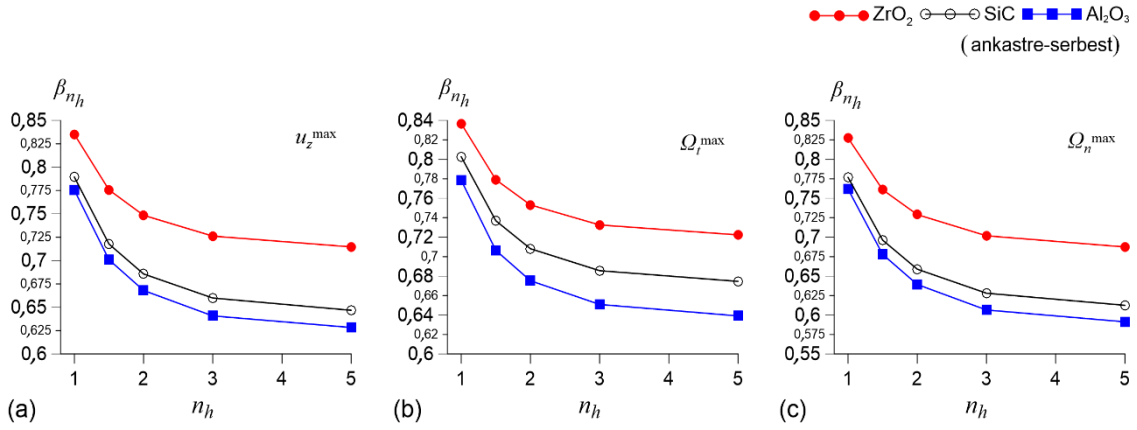
Şekil 4.12. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}, Q_t^{\max}, Q_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.13. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^A, M_t^A, M_n^A) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.14. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^B , M_t^B , M_n^B) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.15. Malzeme değişim parametresinin (n_h) EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-serbest)

Malzeme değişim parametresinin etkisi EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları üzerinden detaylı olarak incelenecek olursa:

- En büyük yer değiştirme ($u_z^{\max}$) ve kesit dönmeleri ($Q_t^{\max}$ ve $Q_n^{\max}$) için,
 - Her bir seramik malzeme içeriği için, hesaplanan her bir oranın $\beta_{n_h=i}^{\Theta}$ (burada Θ : $u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$ ve $i:1;1,5;2;3;5$) değeri hem ankastre-ankastre (Şekil 4.12.) hem de ankastre-serbest (Şekil 4.15.) sınır koşulları için değeri 1'den küçüktür. Her iki sınır koşulu için bu oranlar ($\beta_{n_h=i}^{u_z^{\max}}$, $\beta_{n_h=i}^{Q_t^{\max}}$ ve $\beta_{n_h=i}^{Q_n^{\max}}$) en büyük ve en küçük değerlerini, sırasıyla $i=1$ ve 5 'te almaktadır.
 - Her bir malzeme değişim parametresi değerine göre $\beta_{n_h=i}^{\Theta}$ (burada Θ : $u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$ ve $i:1;1,5;2;3;5$) oranları incelendiğinde, her iki sınır şartı durumu için en

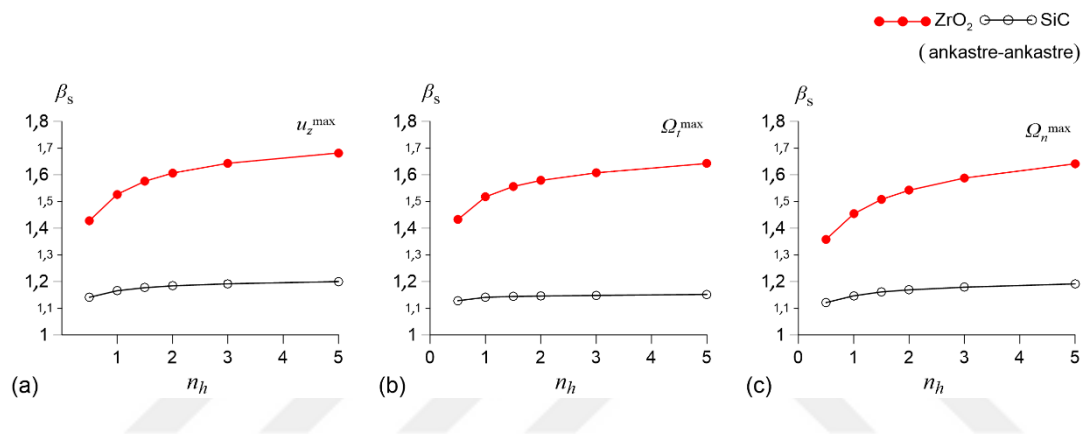
büyük ve en küçük değerlerini, sırasıyla, seramik malzemeler ZrO_2 ve Al_2O_3 'de almaktadır.

Ankastre-ankastre sınır koşuluna ait sonuçlar için,

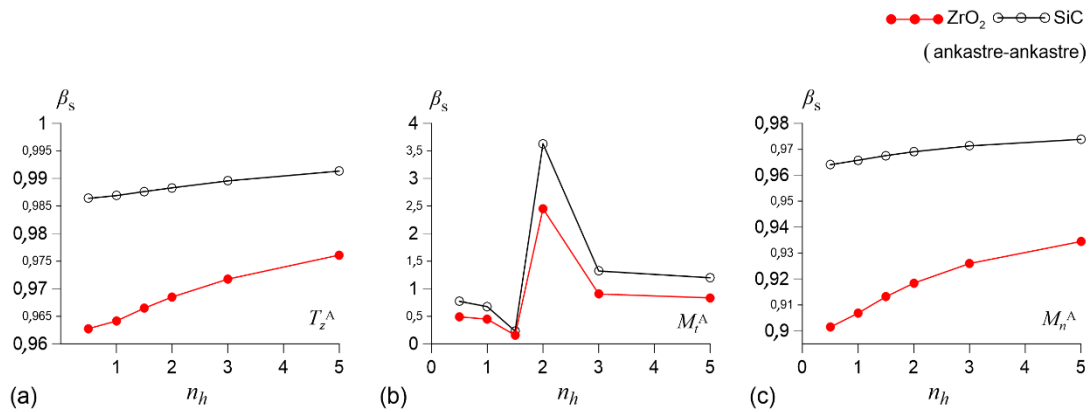
- A ve B noktalarındaki kesme kuvveti (T_z),
 - Her bir seramik malzeme içeriği için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), A noktasındaki kesme kuvvetine ait oran azalırken ($\beta_{n_h}^{T_z^A} \downarrow$) (Şekil 4.13.a); B noktasındaki kesme kuvvetine ait oran artmaktadır ($\beta_{n_h}^{T_z^B} \uparrow$) (Şekil 4.14.a).
 - Her bir malzeme değişim parametresi değeri için ele alınan tüm seramik malzemelere ait $\beta_{n_h}^{T_z}$ oranlar incelendiğinde, A noktasındaki kuvvete ait oranın $\beta_{n_h}^{T_z^A}$ (Şekil 4.13.a) en küçük ve en büyük değerleri, sırasıyla, seramik malzemeler ZrO_2 ve Al_2O_3 'de alırken; B noktasındaki kuvvete $\beta_{n_h}^{T_z^B}$ ait oranın (Şekil 4.14.a) en küçük ve en büyük değerleri ise, sırasıyla, seramik malzemeler Al_2O_3 ve ZrO_2 'de almaktadır.
- A ve B noktalarındaki burulma momenti (M_t),
 - Her bir seramik malzeme içeriği için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), A noktasındaki burulma momentine ait oranın mutlak değeri için, malzeme değişim parametresi $n_h = 1,5$ değerine kadar azaldığı ($|\beta_{n_h}^{M_t^A}| \downarrow$), $n_h = 1,5$ değerinden sonra ise ($|\beta_{n_h}^{M_t^A}| \uparrow$) arttığı görülmektedir (Şekil 4.13.b). B noktası için ise malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), burulma momentine ait oranın arttığı gözlemlenmiştir. ($\beta_{n_h}^{M_t^B} \uparrow$) (Şekil 4.14.b).
- A ve B noktalarındaki eğilme momenti (M_n),
 - Her bir seramik malzeme içeriği için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), A noktasındaki eğilme momentine ait oran azalırken ($\beta_{n_h}^{M_n^A} \downarrow$) (Şekil 4.13.c); B noktasındaki eğilme momentine ait oran malzeme değişim parametresi $n_h = 2$ değerine kadar azaldığı ($\beta_{n_h}^{M_n^B} \downarrow$), $n_h = 2$ değerinden sonra arttığı ($\beta_{n_h}^{M_n^B} \uparrow$) gözlemlenmiştir. (Şekil 4.14.c).

4.2.2. Seramik malzemesinin etkisi

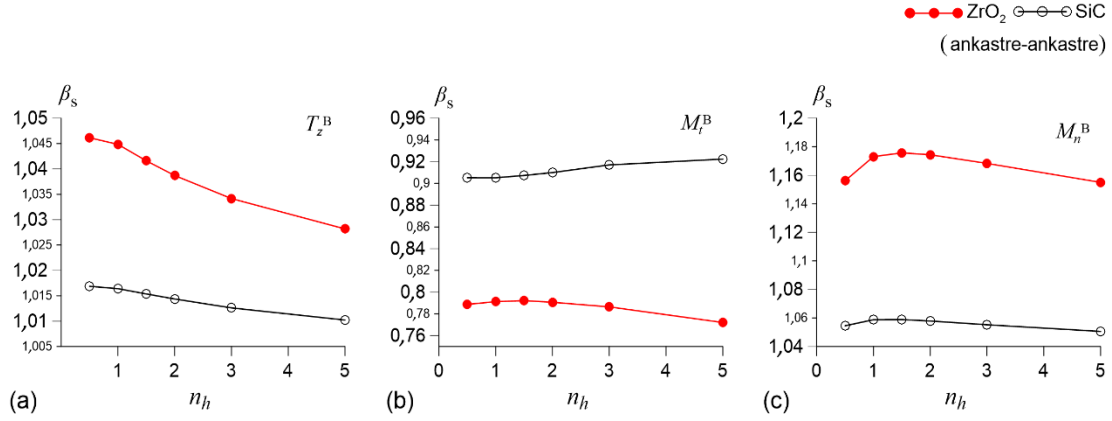
Seramik malzemesinin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları üzerindeki etkisini incelemek için, SiC ve ZrO₂ kullanılarak elde edilen sonuçlar Al₂O₃ kullanılarak elde edilen sonuçlara göre her bir sınır koşulu ve malzeme değişim parametresi (n_h) için $\beta_s^\Theta = \Theta_s / \Theta_{Al_2O_3}$ ($\Theta: u; T; M$ ve $s: SiC$ ve ZrO₂) eşitliği üzerinden hesaplanmıştır. Ankastre-ankastre ve ankastre-serbest sınır koşulları için elde edilen β_s oranlarının malzeme değişim parametresi (n_h) göre değişimi, sırasıyla, Şekil 4.16-4.18 ve Şekil 4.19’da sunulmuştur.



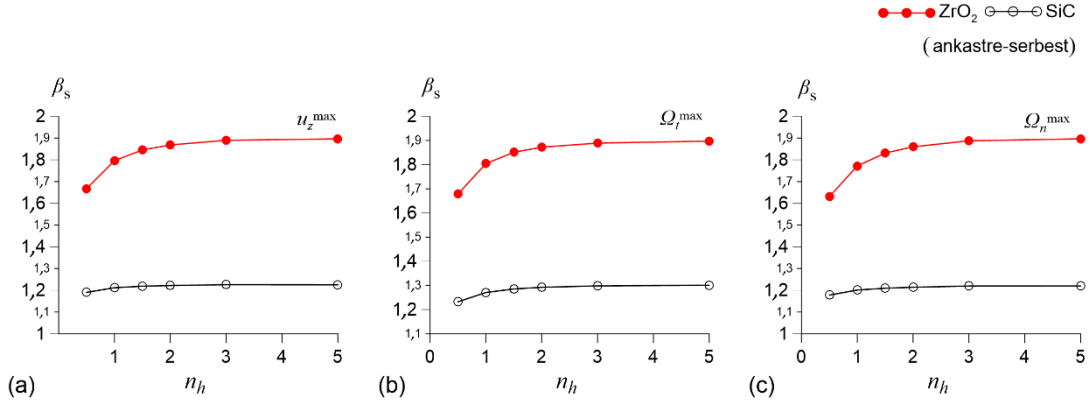
Şekil 4.16. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.17. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^A , M_t^A , M_n^A) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.18. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları (T_z^B , M_t^B , M_n^B) üzerindeki etkisi (ankastre-ankastre)



Şekil 4.19. Seramik malzemenin EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları ($u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$) üzerindeki etkisi (ankastre-serbest)

Seramik malzemenin etkisi EFD parabolik kirişin statik analiz sonuçları üzerinden detaylı olarak incelenecek olursa:

- En büyük yer değiştirme ($u_z^{\max}$) ve kesit dönmeleri ($Q_t^{\max}$ ve $Q_n^{\max}$) için,
 - Her bir malzeme değişim parametresi (n_h) için hesaplanan her bir oranın β_s^Θ (burada Θ : $u_z^{\max}$, $Q_t^{\max}$, $Q_n^{\max}$, ve, s: SiC ve ZrO₂) değeri hem ankastre-ankastre (Şekil 4.16.) hem de ankastre-serbest (Şekil 4.19.) sınır koşulları için 1'den büyüktür. Her iki sınır koşulu için bu oranlar ($\beta_s^{u_z^{\max}}$, $\beta_s^{Q_t^{\max}}$ ve $\beta_s^{Q_n^{\max}}$) en küçük ve en büyük değerlerini, sırasıyla, $n_h = 0,5$ ve 5'te almaktadır. Ayrıca, Zirkonyum dioksit (ZrO₂) için elde edilen bu oranlar ($\beta_s^{u_z^{\max}}$, $\beta_s^{Q_t^{\max}}$ ve $\beta_s^{Q_n^{\max}}$), Silisyum karbür (SiC) için elde edilen oranlardan daha büyüktür.

- Seramik malzeme ZrO_2 durumu: Malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), hem ankastre-ankastre hem de ankastre-serbest sınır koşullarına ait $\beta_{ZrO_2}^\Theta$ ($\Theta: u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) oranları artmaktadır (Şekil 4.16 ve 4.19). Buna ek olarak, n_h parametresi arttıkça, $\beta_{ZrO_2}^\Theta$ ($\Theta: u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) oranlarındaki artış hızı azalmaktadır. Ayrıca, malzeme değişim parametresi $n_h = 2$ 'den sonraki $\beta_{ZrO_2}^\Theta$ ($\Theta: u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) oranları, ankastre-serbest sınır koşulu için yaklaşık olarak aynı değerlere sahiptir.
- Seramik malzeme SiC durumu: Her iki sınır koşuluna ait β_{SiC}^Θ ($\Theta: u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) oranların malzeme değişim parametresinin değişiminden daha az etkilenmektedir. Ayrıca, malzeme değişim parametresi $n_h = 1$ 'den sonraki β_{SiC}^Θ ($\Theta: u_z^{\max}, \Omega_t^{\max}, \Omega_n^{\max}$) oranlar yaklaşık olarak aynı değerlere sahiptir.

Ankastre-ankastre sınır koşuluna ait sonuçlar için,

- A ve B noktalarındaki kesme kuvveti (T_z),
 - Her iki seramik malzeme (s:SiC ve ZrO_2) durumu için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), A noktasındaki kuvvetine ait oran artarken ($\beta_s^{T_z^A} \uparrow$) (Şekil 4.17.a); B noktasındaki kesme kuvvetine ait oran azalmaktadır ($\beta_s^{T_z^B} \downarrow$) (Şekil 4.18.a).
 - Ele alınan tüm n_h parametreleri için A noktasına ait $\beta_s^{T_z^A}$ oranları 1'den küçük değerler alırken (Şekil 4.17.a), B noktasına ait $\beta_s^{T_z^B}$ oranları 1'den büyük değerler almaktadır (Şekil 4.18.a).
 - Malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), hem A noktasındaki hem de B noktasındaki ($\beta_s^{T_z^A}, \beta_s^{T_z^B}$) oranları 1 değerine yaklaşmaktadır.
- A ve B noktalarındaki burulma momenti (M_t),
 - Her iki seramik malzeme (s:SiC ve ZrO_2) durumu için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), B noktasındaki burulma momentine ait oran SiC için artarken $\beta_s^{M_t^B} \uparrow$, ZrO_2 için azalmaktadır ($\beta_s^{M_t^B} \downarrow$) (Şekil 4.18.b).

- Ele alınan tüm n_h parametreleri için A noktasına ait $\beta_s^{M_i^A}$ oranları 1’den küçük ve büyük değerler alırken (Şekil 4.17.b), B noktasına ait $\beta_s^{M_i^B}$ oranları 1’den küçük değerler almaktadır (Şekil 4.18.b).
- A ve B noktalarındaki eğilme momenti (M_n)
 - Her iki seramik malzeme (s:SiC ve ZrO₂) durumu için malzeme değişim parametresi arttıkça ($n_h \uparrow$), A noktasındaki eğilme momentine ait oran artarken ($\beta_s^{M_n^A} \uparrow$) (Şekil 4.17.c); B noktasındaki eğilme momentine ait oran önce artıp daha sonra azalmaktadır (Şekil 4.18.c).
 - Ele alınan tüm n_h parametreleri için A noktasına ait $\beta_s^{M_n^A}$ oranları 1’den küçük değerler alırken (Şekil 4.17.c), B noktasına ait $\beta_s^{M_n^B}$ oranları 1’den büyük değerler almaktadır (Şekil 4.18.c).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Parametrik analiz kısmında, farklı malzeme değişim parametresini (n_h), seramik malzeme ve sınır koşullarının EFD parabolik kirişin statik davranışı üzerindeki etkisi en büyük yer değiştirmeler, kesit dönmeleri ve mesnet kuvvet ve momentleri üzerinden detaylı olarak incelenmiştir (Bölüm 4.2). Parametrik analize ait sonuçlar kısaca özetlenecek olursa:

- Yer değiştirmeler ve kesit dönmeleri: Malzeme değişim parametresi (n_h) arttıkça, kiriş eksen boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin içeriği seramik açısından zengin malzeme haline gelmektedir. Ayrıca her bir seramik malzemenin (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC) elastisite modülü değeri, metal malzemesinin (Al) elastisite modülünden yüksektir. Böylece, malzeme değişim parametresindeki (n_h) artış ile en büyük yer değiştirme ($u_z^{\max}$) ve kesit dönmelerine ($\Omega_t^{\max}$, $\Omega_n^{\max}$) ait sonuçlar mutlak değerce azalmaktadır. Bu sonuçlar ($u_z^{\max}$, $\Omega_t^{\max}$ ve $\Omega_n^{\max}$), mutlak değerce en küçük ve en büyük değerlerini, sırasıyla Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik malzemelerinde almaktadır.
- Ele alınan tüm seramik malzemeler dikkate alınarak ankastre-ankastre sınır koşuluna ait A ve B mesnet noktalarındaki kuvvet ve momentler, malzeme değişim parametresine göre incelendiğinde: Malzeme değişim parametresinin artmasıyla ($n_h \uparrow$), A noktasındaki kesme kuvveti azalırken $|T_z^A| \downarrow$, B noktasındaki kesme kuvveti $T_z^B \uparrow$ artmaktadır. Burulma momenti M_t ve eğilme momentinin M_n artış ya da azalışı değişkenlik göstermektedir.

Tez kapsamındaki yapı probleminin, farklı analiz türleri veya malzeme içerikleri için de yapı davranışının daha iyi anlaşılabilmesi adına ileride yapılacak olan çalışmalarda aşağıda sunulan konuların detaylı parametrik çalışmalar ile ele alınması önerilmektedir.

- EFD parabolik kirişin statik analiz davranışı farklı FD malzeme durumları (metal-metal, ya da, seramik-seramik) için incelenebilir.

- EFD parabolik kirişin stabilite analizi veya dinamik davranış (serbest titreşim ve zorlanmış titreşim) incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Url-1**<https://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit_malzemeler>, erişim tarihi 05.2011.
- [2] **Arıbaş, Ü. N., & Omurtag, M. H.** (2017). *Kompozit eğrisel kirişlerin statik ve dinamik analizinde burulma rijitliğinin etkisi*, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Uludağ Üniversitesi-Bursa, Türkiye,
- [3] **Caliri Jr, M. F., Ferreira, A. J., & Tita, V.** (2016). A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method. *Composite Structures*, 156, 63-77.
- [4] **Xu, Y., Zhu, J., Wu, Z., Cao, Y., Zhao, Y., & Zhang, W.** (2018). A review on the design of laminated composite structures: constant and variable stiffness design and topology optimization. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(3), 460-477.
- [5] **Jones, R. M.** (2018). *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- [6] **Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., ... & Zhang, D.** (2019). Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*, 216, 168-186.
- [7] **Avey, A.** (2017). *FDM kaplamalı zenginleştirilmiş metal çekirdekli tam koni kabuğun serbest titreşim analizi*. 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Uludağ Üniversitesi-Bursa, Türkiye,
- [8] **Akbaş, Ş. D.** (2018). Fonksiyonel derecelendirilmiş ortotropik bir kirişin statik ve titreşim davranışlarının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 69-82.
- [9] **Avey, A.** (2015). *Fonksiyonel değişimli malzemelerle (FDM'lerle) ilgili gelişmeler ve FDM içeren kabukların lineer olmayan stabilite ve titreşim analizleri*. 19. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi-Trabzon, Türkiye,
- [10] **Koizumi, M.** (1997). FGM activities in japan. *Use of Composites Multi-Phased and Functionally Graded Materials*, 28(1), 1-4. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(96)00016-9)
- [11] **Özdemir, Ö.** (2019). Vibration analysis of rotating timoshenko beams with different material distribution properties. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 272-286. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2019.198>
- [12] **Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D., & Ma, A.** (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, applications and future challenges. *Composites*

- [13] **Evran, S.** (2015). *Eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş kısa kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizi*. [PhD Thesis]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [14] **Onar, V., Uluköy, A., & Açikel, H.** (2014). Farklı kaynak akımlarında kaynak edilmiş alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin analizi. 3 rd International Conference on Welding Technologies and Exhibition (ICWET'14), 21-23 May 2014, Manisa-Türkiye.
- [15] **Piren, C.** (2012). *Çift yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş plakların üç boyutlu serbest titreşim analizi* [Master's Thesis]. Namık Kemal Üniversitesi.
- [16] **Love, A. E. H.** (2013). *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. Cambridge university press.
- [17] **İnan, M.** (1966). *Elastik çubukların genel teorisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [18] **İnan, M.** (1967). *Cisimlerin Mukavemeti*. İTÜ Yayını, İstanbul.
- [19] **Antman, S.S.** (1973). The theory of rods. In: Truesdell, C. (eds) *Linear Theories of Elasticity and Thermoelasticity*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-39776-3_6
- [20] **Cinemre, V.** (1982). Çubuk teorisinde yer ve şekil değiştirme ilişkileri. *İTÜ Dergisi*, 40(3-6).
- [21] **Balasubramanian, T. S., & Prathap, G.** (1989). A field consistent higher-order curved beam element for static and dynamic analysis of stepped arches. *Computers & Structures*, 33(1), 281-288. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(89\)90151-X](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90151-X)
- [22] **Rajasekaran Sundaramoorthy & Padmanabhan, S.** (1989). Equations of curved beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(5), 1094-1111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:5\(1094\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:5(1094))
- [23] **Naganarayana, B. P., & Prathap, G.** (1990). Consistency aspects of out-of-plane bending, torsion and shear in a quadratic curved beam element. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 30(3), 431-443. <https://doi.org/10.1002/nme.1620300304>
- [24] **Kim, Y. Y., & Kim, Y.** (2002). A one-dimensional theory of thin-walled curved rectangular box beams under torsion and out-of-plane bending. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53(7), 1675-1693. <https://doi.org/10.1002/nme.357>
- [25] **Tüfekçi, E.** (1994). *Eğri eksenli düzlemsel çubukların statik ve dinamik problemlerinin analitik çözümü* [PhD Thesis]. <https://doi.org/10.12989/sem.2006.22.2.131>
- [26] **Tufekci, E., & Arpacı, A.** (2006). Analytical solutions of in-plane static problems for non-uniform curved beams including axial and shear

- deformations. *Structural Engineering and Mechanics*, 22(2), 131-150. <https://doi.org/10.12989/sem.2006.22.2.131>
- [27] **Artan, R.** (1997). The analytical calculation of circular rods of variable cross-section by the initial values method. *Computers & Structures*, 62(3), 445-461. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(96\)00205-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(96)00205-2)
- [28] **Litewka, P., & Rakowski, J.** (1998). The exact thick arch finite element. *Computers & Structures*, 68(4), 369-379. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00051-0)
- [29] **Zupan, D., & Saje, M.** (2003). Finite-element formulation of geometrically exact three-dimensional beam theories based on interpolation of strain measures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(49), 5209-5248. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.07.008>
- [30] **Lin, K. C., & Hsieh, C. M.** (2007). The closed form general solutions of 2-D curved laminated beams of variable curvatures. *Composite Structures*, 79(4), 606-618. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.02.027>
- [31] **Gimena, F. N., Gonzaga, P., & Gimena, L.** (2008). Stiffness and transfer matrices of a non-naturally curved 3D-beam element. *Engineering Structures*, 30(6), 1770-1781. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.10.012>
- [32] **Gimena, L., Gimena, F. N., & Gonzaga, P.** (2008). Structural analysis of a curved beam element defined in global coordinates. *Engineering Structures*, 30(11), 3355-3364. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.011>
- [33] **Malekzadeh, P., & Karami, G.** (2003). Out-of-plane static analysis of circular arches by DQM. *International Journal of Solids and Structures*, 40(23), 6527-6545. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00412-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00412-8)
- [34] **Chen, C. N.** (2003). Out-of-plane deflection of nonprismatic curved beam structures solved by DQEM. *Advances in Engineering Software*, 34(5), 297-306. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(02\)00142-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(02)00142-4)
- [35] **Sheikh, A. H.** (2002). New concept to include shear deformation in a curved beam element. *Journal of structural engineering*, 128(3), 406-410. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:3\(406\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(406))
- [36] **Molari, L., & Ubertini, F.** (2006). A flexibility-based finite element for linear analysis of arbitrarily curved arches. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(8), 1333-1353. <https://doi.org/10.1002/nme.1497>
- [37] **Saffari, H., & Tabatabaei, R.** (2007). A finite circular arch element based on trigonometric shape functions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2007, 078507. <https://doi.org/10.1155/2007/78507>
- [38] **Aslan, T. A., Noori, A. R., & Temel, B.** (2017). Daire eksenli yapı elemanlarının tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile statik analizi.

- [39] **Doğruer, O. Y.** (1998). *Eğri eksenli düzlemsel kirişlerin düzlem dışı statik problemlerinin analitik çözümü* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [40] **Eroğlu, U.** (2014). *Eğri eksenli çubukların analizi için kesin çözüm yöntemi ile sonlu eleman formülasyonu* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [41] **Yiğit, Ö. Ö.** (2010). *Eğri eksenli değişken kesitli çubukların statik ve dinamik problemleri* [PhD Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [42] **Karaca, N.** (2014). *Düzlemsel çubukların taşıma ve rijitlik matrisi metodu ile statik ve dinamik analizi* [PhD Thesis]. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [43] **Rajasekaran, S.** (2014). Analysis of curved beams using a new differential transformation based curved beam element. *Meccanica*, 49(4), 863-886. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9835-3>
- [44] **Tsiatas, G. C., & Charalampakis, A. E.** (2017). Optimizing the natural frequencies of axially functionally graded beams and arches. *Composite Structures*, 160, 256-266. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.057>
- [45] **Aslan, T. A., Noori, A. R., & Temel, B.** (2018). A unified approach for out-of-plane forced vibration of axially functionally graded circular rods. *European Mechanical Science*, 2(2), 37-45. <https://doi.org/10.26701/ems.374524>
- [46] **Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B.** (2018). An efficient approach for in-plane free and forced vibrations of axially functionally graded parabolic arches with nonuniform cross section. *Composite Structures*, 200, 701-710. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.077>
- [47] **Lee, J. K., & Lee, B. K.** (2019). In-plane free vibration of uniform circular arches made of axially functionally graded materials. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(08), 1950084. <https://doi.org/10.1142/S0219455419500846>
- [48] **Temel, B., & Noori, A. R.** (2019). Out-of-plane vibrations of shear-deformable AFG cycloidal beams with variable cross section. *Applied Acoustics*, 155, 84-96. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.05.010>
- [49] **Aydoğan, G., Ermis, M., Aribas, U.N., Omurtag, M.H.** (2021). Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik kirişlerin sonlu eleman yöntemi ile serbest titreşim analizi. 22. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Çukurova Üniversitesi-Adana, Türkiye, 61-74. ISBN: 978-975-561-523-3.
- [50] **Kır, O., Ermis, M., Aribas, U.N., Omurtag, M.H.** (2021). Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik kirişlerin sonlu eleman

yöntemi ile statik analizi. 22. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Çukurova Üniversitesi-Adana, Türkiye, 46-60. ISBN: 978-975-561-523-3.

- [51] **Akti, Z., Ermis, M., Omurtag, M.H.** (2021). Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş daire eksenli kirişlerin karışık sonlu eleman yöntemi ile statik analizi. 22. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Çukurova Üniversitesi-Adana, Türkiye, 525-539. ISBN: 978-975-561-523-3.
- [52] **Aribas, U. N., Ermis, M., & Omurtag, M. H.** (2021). The static and stress analyses of axially functionally graded exact super-elliptical beams via mixed FEM. *Archive of Applied Mechanics*, 91(12), 4783-4796. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02033-w>
- [53] **Ermis, M., Aydoğan, G., Kır, O., Aribas, U.N., Omurtag, M.H.** (2022). The static and free vibration analyses of axially functionally graded elliptical beams via mixed FEM. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics* (2022) 5(1):22-39 DOI 10.31462/jseam.2022.01022039
- [54] **Tornabene, F., Fantuzzi, N., Baccocchi, M.** (2019). Refined shear deformation theories for laminated composite arches and beams with variable thickness: Natural frequency analysis. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 100, 24–47 <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2017.07.029>
- [55] **Ermis, M., & Omurtag, M. H.** (2017). Static and dynamic analysis of conical helices based on exact geometry via mixed FEM. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131-132, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.010>
- [56] **Voigt, W.** (1889). Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten isotroper körper. *Ann Phys.* 274(12):573–87. <https://doi.org/10.1002/andp.18892741206>
- [57] **Karami, B., Shahsavari, D., Janghorban, M., Li, L.** (2019). Influence of homogenization schemes on vibration of functionally graded curved microbeams. *Composite Structures* 216:67–79. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.089>
- [58] **Fu, T., Chen Z., Yu, H., et al** (2018). An analytical study of sound transmission through corrugated core FGM sandwich plates filled with porous material. *Compos Part B Eng* 151:161–172. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.010>
- [59] **Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M. K., Reddy, J. N.** (2014). Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates. *Compos Part B Eng* 59:21–32. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.022>
- [60] **Omurtag, M. H., & Aköz, A. Y.** (1992). The mixed finite element solution of helical beams with variable cross-section under arbitrary loading. *Computers & Structures*, 43(2), 325-331. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(92\)90149-T](https://doi.org/10.1016/0045-7949(92)90149-T)
- [61] **Eratli, N., Yilmaz, M., Darilmaz, K., & Omurtag, M. H.** (2016). Dynamic analysis of helicoidal bars with non-circular cross-sections via

mixed FEM. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 57(2), 221-238.
<https://doi.org/10.12989/SEM.2016.57.2.221>

- [62] **Ermış, M.** (2021). Eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş helislerin karışık sonlu eleman yöntemi ile serbest titreşim analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 319-327. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.823385>
- [63] **Ansys® Academic Research Mechanical, Mechanical APDL Release** (2021) R1, Element Reference, ANSYS, Inc.

