

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EKSENEL YÖNDE FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
KISA KİRİŞLERİN BURKULMA VE SERBEST TİTREŞİM
ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

SAVAŞ EVRAN

DENİZLİ, OCAK - 2015

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



EKSENEL YÖNDE FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
KISA KİRİŞLERİN BURKULMA VE SERBEST TİTREŞİM
ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

SAVAŞ EVRAN

DENİZLİ, OCAK - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Savaş Evran tarafından hazırlanan “Eksenel Yönde Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kısa Kirişlerin Burkulma ve Serbest Titreşim Analizi ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.01.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Yasin Yılmaz


.....

Üye
Prof. Dr. Muzaffer Topçu
Pamukkale Üniversitesi


.....

Üye
Prof. Dr. Osman Asi
Uşak Üniversitesi


.....

Üye
Doç. Dr. Hasan Çallıoğlu
Pamukkale Üniversitesi


.....

Üye
Yrd. Doç. Dr. Veysel Alkan
Pamukkale Üniversitesi


.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
29.01/2015 tarih ve 04/17... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


.....

Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tez alışması Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (PAUBAP) tarafından 2011BSP013 ve 2013FBE007 nolu projeler ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



SAVAŞ EVRAN

ÖZET

**EKSENEL YÖNDE FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KISA
KIRIŞLARIN BURKULMA VE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ
DOKTORA TEZİ
SAVAŞ EVRAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. YASİN YILMAZ)

DENİZLİ, OCAK - 2015

Bu doktora tezinde, eksenel yönde tabakalı olarak fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) dikdörtgen kesit alanına sahip kısa kirişlerin burkulma ve serbest titreşim davranışı sayısal ve deneysel olarak değişik sınır şartları altında incelenmiştir. Kirişler % 99.8 saflıkta Alüminyum (Al) ve %99.9 saflıkta Silisyum Karbür (SiC) tozlarının farklı ağırlık oranları kullanılarak toz metalurji yöntemi ile üretilmiştir. Eksenel yönde tabakalı FD kirişlerin her bir tabakasına ait Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerlerini bulabilmek için farklı Al ve SiC içeriğine sahip homojen kirişler üretilmiş ve bu kirişler çekme gerilme testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda maksimum Elastisite Modül ve Çekme Gerilme değerlerinin %15 SiC içeriğine sahip kirişe kadar yükseldiği, daha yüksek SiC içeriğine sahip kirişlerde ise düşüş eğilimine geçtiği görülmüştür. Dolayısıyla burkulma ve titreşim analizlerinde maksimum %15'e kadar SiC içeren kiriş numuneleri değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca kirişlerin yoğunluk hesaplamaları deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin deneysel burkulma ve serbest titreşim analizleri sırasıyla INSTRON 8801 test cihazı ve DEWESoft™ titreşim ölçüm cihazı DEWE-43A ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçların doğruluğunu tespit etmek için tüm kirişler Timoshenko kiriş teorisine göre ABAQUS® ve ANSYS® sonlu elemanlar programlarında modellenmiş ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre burkulma analizinde maksimum % 46,6739 ve serbest titreşim analizinde ise %13 fark gözlemlenmiştir. Sonuçlar arasında meydana gelen farklılıkları belirleyebilmek için farklı %SiC içeriğine sahip homojen ve tabakalı kirişlerin sertlik deneyleri, taramalı elektron mikroskop (SEM) ve optik mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre %Al ve %SiC ağırlık oranlarındaki derecelendirmenin ve tabaka sıralanışının kirişlerin burkulma davranışı ile temel frekansına olan etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Bu tezde sunulan tüm sonuçlar Al ve SiC sistemleri kullanılarak yapılan FD kirişler hakkında bilgi elde etmek için referans olarak kullanılabilir.

ANAHTAR KELİMELELER: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM), Burkulma, Serbest Titreşim, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

BUCKLING AND FREE VIBRATION ANALYSIS OF AXIALLY FUNCTIONALLY GRADED SHORT BEAMS

PH.D THESIS

SAVAŞ EVRAN

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR:ASST. PROF. YASİN YILMAZ)

DENİZLİ, JANUARY 2015

In this Ph.D. thesis, buckling and free vibration behaviors of axially layered functionally graded (FG) short beams with a rectangular cross section are investigated numerically and experimentally under various boundary conditions. The beams are produced by powder metallurgy technique using different weight fractions of 99.8 % pure Aluminum (Al) and 99.9 % pure Silicon Carbide (SiC) powders. In order to determine Elastic Modulus and Maximum Tensile Stress values of each layer of axially layered FG beams, homogeneous beams consist of different Al and SiC content are fabricated and these beams are subjected to tensile testing. According to the test results, it is observed that Maximum Elastic Modulus and Tensile Stress values increase up to 15% SiC content beam sample and decrease for beams that have higher %SiC content than 15%. Therefore, the beams containing up to 15% SiC are evaluated for buckling and vibration analysis. In addition, the beam density calculations are performed experimentally. Experimental buckling and free vibration analysis of the beams are carried out by INSTRON 8801test device and DEWESoft™ vibration measurement instrument DEWE-43A, respectively. In order to detect the accuracy of experimental results, all beams are modeled according to Timoshenko beam theory in ABAQUS® and ANSYS® finite element based programs and numerical analysis are performed. Numerical results obtained are compared with experimental results. According to the comparison of results, maximum 46,6739 % difference for buckling analysis and 13% difference for free vibration analysis are observed. In order to determine differences occurred between results, hardness experiments, scanning electron microscope (SEM) and optical microscope analysis of homogeneous and axially layered FG beams are performed. According to the analysis results, effect of gradation of %SiC weight fractions and arrange in order of layers to buckling behavior and fundamental frequency of the beams are tried to be explained. All results presented in the thesis can be used as a reference to obtain information about FG beams made of Al and SiC systems.

KEYWORDS: Functionally Graded Material (FGM), Buckling, Free Vibration, Finite Element Method

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 FDM'lerin Genel Kullanım Alanları	4
1.2 Farklı Alanlarda Kullanılan FDM Yapıların Burkulma ve Titreşimi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar	5
1.3 Literatür Özeti	6
2. HOMOJEN TİMOSHENKO KİRİŞ TEORİSİ	20
2.1 Burkulma Yüğü Hesapları	20
2.2 Serbest Titreşim Hesapları	24
3. KİRİŞLERİN ÜRETİMİ	28
3.1 Kirişleri Oluşturan Katkı Maddeleri.....	29
3.2 Tek Tabakalı Homojen Kirişlerin Üretimi	30
3.3 Eksenel Yönde FD Tabakalı Kısa Kirişlerin Üretimi	31
3.4 Tozların Hazırlanması	33
3.5 Tozların Karıştırılması	34
3.6 Tozların Kalıp İçerisinde Sıkıştırılması.....	37
3.7 Sinterleme İşlemi.....	40
4. DENEYSEL ANALİZ	44
4.1 Çekme Deneyi	44
4.2 Yoğunluk Hesapları.....	47
4.3 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi.....	49
4.4 Optik Mikroskop Analizi.....	52
4.5 Sertlik Analizi.....	56
4.6 Burkulma ve Titreşim Deneyleri	58
4.6.1 Burkulma Deneyleri	60

4.6.2	Serbest Titreşim Deneyleri.....	61
5.	SAYISAL ANALİZ	64
5.1	Burkulma Analizi	64
5.1.1	ABAQUS Sonlu Elemanlar Program Sonuçları	65
5.1.2	ANSYS Sonlu Elemanlar Program Sonuçları.....	68
5.2	Serbest Titreşim Analizi	73
5.2.1	Serbest Titreşim İçin ANSYS Sonuçları.....	73
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	77
6.1	Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	77
6.2	Değerlendirme	78
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
8.	KAYNAKÇALAR	85
9.	EKLER	112
10.	ÖZGEÇMİŞ	113

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Malzeme özellikleri dikey yönde değişen FDM	2
Şekil 1.2: Malzeme özelliklerinin (a) tabakalı (b) sürekli değişimi	3
Şekil 2.1: Sınır şartları (a) C-C ve (b) C-F	20
Şekil 2.2: λ_1 ile h/L değerlerinin polinom grafiği	27
Şekil 3.1: Fonksiyonel Dereceli Malzemenin TM ile imalat akış şeması	29
Şekil 3.2: Homojen kiriş	31
Şekil 3.3: Eksenel yönde beş tabakalı olarak derecelendirilmiş FD kiriş.....	31
Şekil 3.4: Hassas terazi	33
Şekil 3.5: Kullanılan tozlar (a) Alüminyum (b) Silisyum Karbür (c) Çinko Stearate	34
Şekil 3.6: Planet Tip Karıştırıcı (a) durağan durumda (b) çalışır durumda	35
Şekil 3.7: Planet Karıştırıcının kaplarına konulan toz karışımları.....	36
Şekil 3.8: Karıştırma sonrası elde edilen homojen dağıtılmış toz karışımları.....	36
Şekil 3.9: İmal edilen kalıp	37
Şekil 3.10: Hidrolik pres	38
Şekil 3.11: Tozların hidrolik pres ile sıkıştırılması	39
Şekil 3.12: Sıkıştırma sonrasında elde edilen kiriş numunesi	39
Şekil 3.13: Argon gaz atmosferli yatay tüp fırını	40
Şekil 3.14: Sinterleme işlemi sürecinde fırın sıcaklığının zamana bağlı değişimi	41
Şekil 3.15: Tüp fırına konulan numuneler	42
Şekil 3.16: Farklı karışım oranları kullanılarak üretilen homojen kirişler	42
Şekil 3.17: Eksenel yönde tabakalı FD kirişler	43
Şekil 3.18: Kirişleri derecelendirmek için kullanılan aparat	43
Şekil 4.1: Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı	45
Şekil 4.2: Homojen kirişlerin Elastisite Modülü değerleri	46
Şekil 4.3: Homojen kirişlerin Maksimum Çekme Gerilme değerleri.....	46
Şekil 4.4: SEM görüntüleri (a) SiC partikül kümeleşmesi (b) çatlaklar.....	49
Şekil 4.5: Tabakalar arası SEM görüntüleri (a) %5-%10 SiC, (b) %10-%15 SiC, (c) %15-%20 SiC, (d) %20-%25 SiC, (e) %20-%0 SiC, (f) %20-%40 SiC.....	50
Şekil 4.6: Optik Mikroskop	52
Şekil 4.7: (a) %5 SiC ve (b) %10 içerikli tabakalardaki SiC partikül görüntüleri	53
Şekil 4.8: (c) %15 SiC ve (d) %20 SiC içerikli tabakalardaki partikül görüntüleri ..	53
Şekil 4.9: (e) %25 SiC ve (f) %30 SiC içerikli tabakalardaki partikül görüntüleri ...	54
Şekil 4.10: (g) %35 SiC ve (h) %40 içerikli tabakalardaki SiC partikül görüntüleri	54
Şekil 4.11: (a) %5 SiC ve (b) %10 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar	55
Şekil 4.12: (c) %15 SiC ve (d) %20 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar	55
Şekil 4.13: (e) %25 SiC ve (f) %30 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar.....	55
Şekil 4.14: (g) %35 SiC ve (h) %40 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar....	56
Şekil 4.15: Sertlik ölçüm cihazı.....	56
Şekil 4.16: Brinell sertlik sonuçları	57
Şekil 4.17: Burkulma deneylerine ait görüntüler.....	60
Şekil 4.18: Titreşim ölçüm cihazı.....	62
Şekil 4.19: Kiriş 5 için ivmelenme yanıtı ve frekans spektrumu.....	63

Şekil 5.1: Eksenel yönde beş tabakalı olarak derecelendirilmiş FD kiriş.....	64
Şekil 5.2: ABAQUS programında Kiriş 4'e ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli	66
Şekil 5.3: ABAQUS programında Kiriş 4'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli.....	66
Şekil 5.4: ABAQUS programında Kiriş 6'ya ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli ...	67
Şekil 5.5: ABAQUS programında Kiriş 8'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli.....	67
Şekil 5.6: ANSYS programında Kiriş 4'e ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli	69
Şekil 5.7: ANSYS programında Kiriş 4'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli	69
Şekil 5.8: ANSYS programında Kiriş 6'ya ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli	70
Şekil 5.9: ANSYS programında Kiriş 8'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli	70
Şekil 5.10: Boyutsuz burkulma değerlerinin karşılaştırılması.....	72
Şekil 5.11: C-F sınır şartlı homojen kiriş.....	73
Şekil 5.12: C-F sınır şartlı eksenel yönde FD tabakalı kiriş	73
Şekil 5.13: Kiriş 4 için 1. Mod şekli.....	75
Şekil 5.14: Kiriş 7 için 1. Mod şekli.....	75

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Timoshenko kirişlerde kritik yükler ve stabilite kriterleri	23
Tablo 2.2: Homojen kiriş için boyutsuz burkulma değerleri	23
Tablo 2.3: 1. Mod için boyutsuz frekans değerleri	26
Tablo 2.4: Homojen kiriş için boyutsuz temel frekans değeri	27
Tablo 3.1: Al ve SiC tozlarının genel özellikleri	30
Tablo 3.2: Kiriş numunelerini oluşturan % SiC oranları	32
Tablo 4.1: %SiC oranlarına bağlı deneysel ve teorik yoğunluk değerleri	48
Tablo 4.2: Kiriş konfigürasyonları	59
Tablo 4.3: C-C sınır şartlı kirişlerin deneysel boyutsuz burkulma sonuçları.....	61
Tablo 4.4: C-F sınır şartlı kirişlerin deneysel boyutsuz temel frekans sonuçları.....	63
Tablo 5.1: ABAQUS programında kritik ve boyutsuz burkulma sonuçları.....	65
Tablo 5.2: ANSYS programında kritik ve boyutsuz burkulma sonuçları.....	68
Tablo 5.3: ANSYS programında kirişlere ait temel frekans sonuçları	74
Tablo 5.4: Boyutsuz temel frekans değerlerinin karşılaştırılması.....	76
Tablo 6.1: C-C sınır şartlı kirişlerin boyutsuz burkulma sonuçları.....	77
Tablo 6.2: C-F sınır şartlı kirişlerin boyutsuz temel frekans sonuçları.....	78

SEMBOL LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
C-C	: Tutulu Tutulu Sınır Şartı
C-F	: Tutulu Serbest Sınır Şartı
C₃₆H₇₀O₄Zn	: Çinko Stearate Formülü
°C	: Santigrat Derece
E	: Elastisite Modülü
E_{ef}	: Efektif Elastisite Modülü
FD	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
I	: Atalet Momenti
L	: Kiriş Uzunluğu
Mesh	: Toz Partikül Büyüklüğü
MPa	: Megapascal (Gerilme-Basınç Birimi)
mm	: milimetre (Uzunluk Ölçü Birimi)
N	: Newton (Ağırlık Birimi)
Ni	: Nikel
NiCr	: Nikel Krom
P	: Burkulma Yüğü
R_m	: Maksimum Çekme Gerilmesi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SiC	: Silisyum Karbür
Ti	: Titanyum
TM	: Toz Metalurjisi
Ti₃SiC₂	: Titanyum Silisyum Karbür
V	: Hacim
ZrO₂	: Zirkonyum Dioksit
λ	: Lambda (Boyutsuz Doğal Frekans)
ω	: Temel Frekans
$\bar{\omega}$: Boyutsuz Temel Frekans
α	: Boyutsuz Burkulma Değeri

ÖNSÖZ

Doktora çalışması süresince bilgi ve tecrübelerini paylaşan, yardımlarını esirgemeyen ve çalışmanın oluşmasında büyük katkıları olan doktora tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yasin Yılmaz'a,

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve bana inanan değerli kardeşim Özgür Evran'a,

Desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılarak üretilen kiriş yapılar nükleer ve uzay sanayi, otomotiv sektörü, makine elamanları gibi endüstrinin farklı alanlarında farklı uygulamalara tabi olabilmektedir. Dolayısıyla bu yapıların dinamik ve statik davranışını belirleyebilmek mühendislik alanı için büyük önem arz etmektedir.

Metal, polimer, seramik, kompozit gibi mevcut malzemelerin kullanımı ile üretilen kirişler ortam şartlarına elveriş gösteremeyebileceği gibi istenilen talepleri de tam olarak karşılayamayabilir. Bu gibi olumsuz durumların meydana gelmesi ilgili bilim insanlarını yeni malzeme arayışlarına yöneltmiştir.

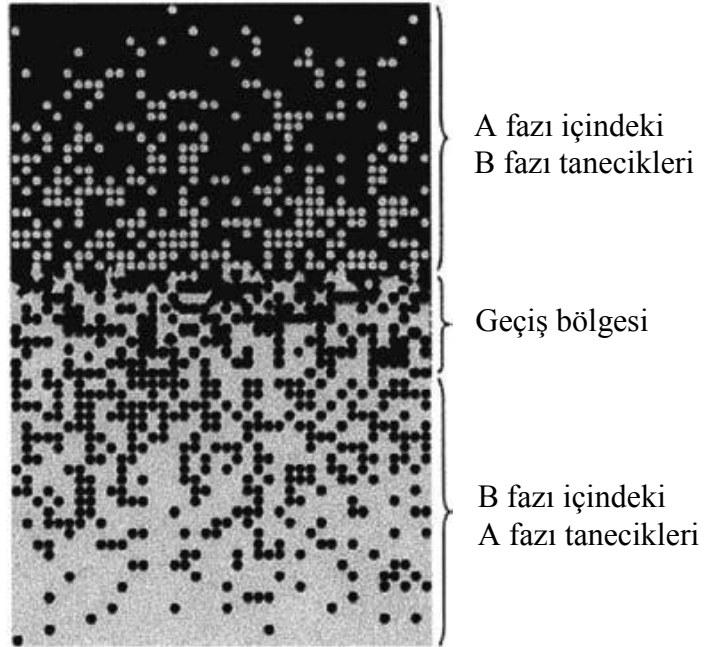
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), 1984 yılında Japonya'nın Sendai bölgesinde malzeme bilimi ile ilgilenen bilim adamları tarafından termal bariyer malzeme hazırlama aracı olarak önerilmiş ve bundan sonra fonksiyonel derecelendirme teknolojisi kullanarak yüksek performanslı ısıya dayanıklı malzemeler geliştirmek için çaba verilmeye devam edilmiştir [1]. İlerleyen yıllarda, bu yeni konseptin (FDM) çeşitli yönlerini ele alan birçok derleme çalışma [2-8] yapılarak literatürde yaygınlaşması sağlanmıştır.

Genellikle yüksek sıcaklıklara uyum sağlayabilmesi için üretilen bu malzemelerin [1, 9] bulunmasından sonra, FD kirişlerde termal stres analizi [10], FDM'den yapılmış kirişlerde termomekanik burkulma analizi [11], FD plakalarda termal burkulma analizi [12], FD kabuk ve plakaların termomekanik analizi [13] gibi sıcaklığa bağlı birçok çalışma farklı kullanım alanları için yapılmıştır. Ancak sonraki yıllarda bu malzemeler, sadece sıcaklığın etkisi altında kalan alanlarda değil normal ortam şartlarında kullanılmaya başlanmış [9] ve Fonksiyonel Dereceli Kiriş, Plaka, Kabukların modellenmesi ve analizi üzerine çalışmalar yapılmıştır [14, 15].

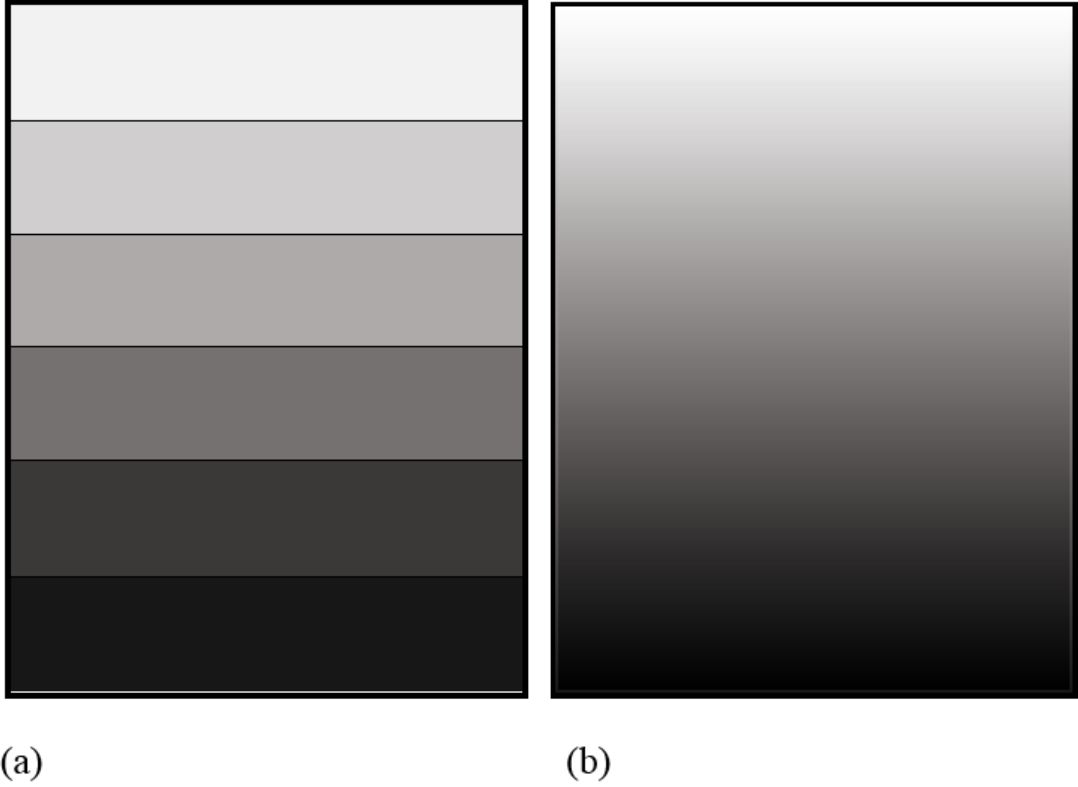
FDM'leri yapısal olarak doğada bulunan bambuların yapısına benzetebiliriz [16-19]. Bu konsept bir malzemeden başka bir malzemeye belirli bir dereceye bağlı mikro yapıyı değiştirmek sureti ile kompozit bir malzeme elde etmektir. Böylece her

iki malzemenin iyi özelliklerine sahip bir malzeme oluşturulması sağlanır [20]. FDM yapıyı oluşturan bu derecelendirme, aksenal yönde [21-25] kalınlık yönünde [26-29] ve bunun yanı sıra silindirik yapılarda radyal yönde olabilmektedir [30]. Bu derecelendirilmiş yapıyı oluşturabilmek için birçok çalışmada farklı modeller kullanılmaktadır. Bu modellerden bazıları Mori-Tanaka [31, 32] ve kendi içinde tutarlı bir homojenleştirme (self-consistent) modellerdir [33, 34].

Farklı malzeme özelliklerinin birleşmesi ile meydana gelen bu yeni malzeme (FDM) içerisinde mevcut bulunan her bir malzemenin değişik fonksiyonu vardır ve yapı bütününe değişik katkılar sağlamaktadır [35]. Bu tip malzemelere bir örnek Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Malzeme özellikleri dikey yönde değişen FDM [35].



Şekil 1.2: Malzeme özelliklerinin (a) tabakalı (b) sürekli değişimi [36].

Şekil 1.2’ de görüldüğü gibi derecelendirme tabakalı veya sürekli şekilde olabilmektedir. Bunun yanı sıra FDM’ler tabakalı ve sürekli olarak kullanıldığı gibi farklı uygulama alanları için sandviç yapıda [37-41] kullanımları da mevcuttur.

FDM’ler belli bir geometri boyunca bir veya daha fazla yönde sürekli değişen kompozisyon dağılımlarına sahip ve farklı malzeme özelliklerine barındıran iki veya daha fazla fazdan oluşan gelişmiş homojen olmayan kompozit malzemelerin yeni bir sınıfı olarak tanımlayabiliriz [42].

Bu malzemeler (FDM) geleneksel tabakalı kompozit yapılar ile karşılaştırıldığında, FDM den yapılmış yapıların malzeme özelliklerinin belirgin ara yüzleri olmaması, stres konsantrasyon olaylarını büyük ölçüde azaltır veya tamamen ortadan kaldırır [43]. Malzeme özelliklerindeki bu düzenli değişim ara yüz çatlama, soyulma ve kalıntı gerilmelerin oluşumunu engelleyebilir [44] ve ısıl gerilmeler, artık gerilmeler, gerilme konsantrasyon faktörlerini de azaltır [45]. Böylece yapısal bütünlük arzu edilen bir seviyeye ulaştırılır [44]. Aksi durumda, ara yüzeyde herhangi bir derecelendirilmiş malzeme olmadığında ise statik, dinamik veya termal yüke bağlı aşırı yüklenme şartlarında malzemede ayrılmalar meydana gelme olasılığı

vardır. Dolayısıyla, malzeme ara yüzleri arasında ani değişimler yerine dereceli değişimler seçilerek bu sorunlar ortadan kaldırılabilir [45].

1.1 FDM'lerin Genel Kullanım Alanları

Günümüzde, bu yeni malzemeler yaygın olarak yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kullanılmaktadır [44]. Tipik olarak bir FDM seramik ve metalden imal edilebilir [46-48]. Metal-Seramik kullanımı ile yapılan FDM'ler, metal ve seramik malzemelerinin olumlu özelliklerinin sinerjik olarak birleşimidir. Buradaki seramik malzeme, metal malzemeyi korozyon ve oksidasyona karşı korur ayrıca termal bariyer özellik sergiler [49]. Bununla birlikte seramik malzemeler düşük bir ısı iletkenliğe sahip oldukları için mükemmel bir ısı direnci olarak görev yapar. Metal malzeme ise iyi bir kırılma tokluğuna sahip olduğu için kullanılır [44]. Böylece arzu edilen yapısal bütünlük korunarak, yüksek kırılma tokluğu ve ısı direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahip malzeme elde edilir [50].

Bu malzemelerin kullanımına bir örnek verilecek olursa, uzay mekiğinin dünya atmosferine yeniden giriş sırasında, FDM ile yapılmış döşemeler ısı kalkanları olarak kullanılmaktadır. Bu döşemeler seramik ve metalden oluşur ve böylece aynı anda termal koruma ve yük taşıma kapasitesi sağlanır [51]. Sonuç olarak bakıldığında bu malzemeler yüksek sıcaklık değerlerinde yapısal hata olmaksızın dayanabilmektedirler [49].

FDM'lerin malzeme özelliklerindeki dereceli değişim, farklı uygulamalar ve çalışma ortamları için uygun olabilir. Bu yüzden pek çok uygulamada FDM tercih edilir hale gelmiştir [52]. Özellikle mikro elektronik, havacılık ve yüksek sıcaklık uygulamalarındaki yeni teknolojilerin taleplerini karşılamak için malzeme bilimi ve mühendisliği, geliştirilmiş özellikleri olan yeni malzemeler üzerine sürekli araştırma yapmaktadır [53]. FDM'ler ve derecelendirme kavramı geniş bir uygulama alanıyla ilgilenir; FD aktüatörler [54, 55], termal bariyer kaplamalar [56, 57], havacılık uygulamaları [58], gaz türbin uygulamaları [59], sensor ve enerji uygulamaları [60], cihaz uygulamaları için yarı iletkenler [61], kesici takımlar [62-65], biyomedikal uygulamalar [66] ve bu alanlarda gözenekli biyomalzemeler [67], diş implantları [68-70] ve yapay diş kökü üretimi [71], biyokompozit kaplamalar [72], askeri

uygulamalar [73, 74], yüksek sıcaklık içeren ortamlarda kullanılan hareketli kanatlar [75, 76], balistik performans uygulamaları [77, 78] gibi. Görüldüğü üzere FDM'den yapılan yapılar geniş bir alanda kullanılmaktadır.

1.2 Farklı Alanlarda Kullanılan FDM Yapıların Burkulma ve Titreşimi Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar

FDM'lerin ortaya çıkışından bu yana bu yeni malzemeler birçok farklı uygulamaya tabi olmuştur. Bu uygulama alanlarına bakıldığı zaman plaka ve kabuk yapılar üzerine geniş çalışmalar mevcuttur.

Mühendislik uygulamalarında kiriş, plak ve kabuk temel yapılarıdır. FDM den oluşan yapıları incelemek için öncelikle esneklik katsayısı, termal genleşme katsayısı, ısı iletkenlik katsayısı gibi FDM eşdeğer malzeme özelliklerini anlamak gerekir [79]. Yapılan çalışmalara bakıldığı zaman, Wang ve diğ. (2009) FDM dairesel levhaların serbest eksenel simetrik titreşimi incelemiştir [80]. Pradyumna ve Bandyopadhyay (2008) yüksek mertebeden formülasyon kullanılarak FD kavisli panellerin serbest titreşim analizini değerlendirmişlerdir [81]. Haddadpour ve diğ. (2007) termal etkiler dahil olmak üzere fonksiyonel dereceli silindirik kabukların serbest titreşim analizini ele almışlardır [82]. Patel ve diğ. (2005) yüksek mertebede teorisi kullanılarak fonksiyonel dereceli eliptik silindirik kabukların serbest titreşimini incelenmiştir [83]. Abrate (2006) fonksiyonel dereceli plakaların serbest titreşim, burkulma ve statik deplasmanlarını incelemiştir [84]. Matsunaga (2009) fonksiyonel dereceli malzemeden yapılmış dairesel silindirik kabukların serbest titreşim ve stabilitesini yüksek mertebeden bir deformasyon teorisine göre incelenmiştir [85]. Kadoli ve Ganesan (2006) birinci dereceden kayma deformasyon teorisine bağlı yarı analitik sonlu elemanlar kullanılarak fonksiyonel dereceli silindirik kabukların termal burkulma ve serbest titreşiminde bir teorik analiz sunmuşlardır [86]. Sepiani ve diğ. (2010) statik ve periyodik eksenel kuvvetlere maruz iki katmanlı bir FD silindirik kabuğun serbest titreşim ve burkulması incelenmiştir [87]. Sheng ve Wang (2010) fonksiyonel dereceli piezoelektrik silindirik kabukların termoelastik titreşim ve burkulmasını incelemiştir [88]. Bhangale ve diğ. (2006) fonksiyonel dereceli kesik konik kabukların doğrusal

termoelastik burkulma ve serbest titreşim davranışını incelenmişlerdir [89]. Najafzadeh ve Heydari (2008) radyal basınç altında yüksek mertebeden kayma deformasyonu plaka teorisine dayalı fonksiyonel dereceli dairesel plakaların burkulması için tam bir çözüm öne sürmüşlerdir [90]. Dolayısıyla açık literatürde de görüldüğü üzere plak ve kabuk yapılar üzerine burkulma ve titreşim çalışmaları geniş yer edinmektedir.

1.3 Literatür Özeti

FDM ile yapılan malzemelerde istenilen özelliklere sahip yapıları tasarlayabilmek için malzemelerin elastik modülünün sürekli ve düzgün değişim sergilemesi gerekmektedir [91]. Bu özelliğinden dolayı bu malzemenin yapılmış plaka, kabuk, kiriş gibi yapılar mühendislik alanında oldukça yaygın kullanılmaktadır.

FD kirişler havacılık, otomotiv endüstrileri ve makine elemanlarında kullanımından bu yana bunların dinamik davranışını anlamak önem arz etmektedir [92]. Geniş bir kullanım alanına sahip olan bu FD kirişler ilerleyen zamanlarda değişik amaçlarda kullanılmak üzere birçok farklı çalışma yapılmış [93-100] ve literatürde yaygınlaşması sağlanmıştır.

FDM'den yapılmış kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizini inceleyebilmek için öncelikle genel kiriş çeşitleri üzerinden yapılan mevcut çözüm yöntemlerini incelemek gerekmektedir.

Farklı kiriş çeşitleri üzerinden yapılan çalışmalara bakıldığında zaman, kiriş analizlerinin çözümlenmelerinde birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları; kapalı form çözümler [101-105], diferansiyel quadrature metodu (DOM) ve bu metottun modifiye edilmiş hali [106-112], dinamik rijitlik yöntemi [113], fonksiyonel pertürbasyon yöntemi [114], yarı-ters yöntem [115], sonlu elemanlar yöntemi [116, 117], varyasyonel iterasyon yöntemi [118, 119], integral denklem yaklaşımı [120], sonlu farklar yöntemi [121, 122], fredholm integral tekniği [123] gibi.

Yukarıda görüldüğü gibi homojen olmayan, basamaklı, değişken kesit alanlı, FD gibi farklı kiriş analizleri için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise ele alınan kirişlerin sayısal analizleri için ANSYS ve ABAQUS sonlu elemanlar tabanlı programlardan yararlanılmış ve Timoshenko kiriş teorisi kullanılmıştır.

Genel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış kirişlerin burkulma ve titreşimi üzerine yapılan çalışmalara bakıldığı zaman ise;

Elishakoff ve Candan (2001) yaptıkları çalışmada üniform olmayan kirişlerin serbest titreşimini farklı sınır şartları altında incelemişlerdir. Bu kirişler kendi ekseni boyunca homojen olmayan malzeme yoğunluğu ve elastik modüle sahiptir. Temel doğal frekans için kapalı-form ifadeler elde edilmişler ve aynı doğal frekansı paylaşan kirişlerin sonsuz sayıda olduğunu göstermişlerdir [124].

Elishakoff ve GuÉDÉ (2004) çalışmalarında aksenal derecelendirilmiş kirişin titreşimi ele almışlar ve kirişin doğal frekansı için yeni kapalı form çözümler elde etmişlerdir [125].

Caliò ve Elishakoff (2004) çalışmalarında farklı sınır koşullarına sahip homojen kirişlerin burkulma ve titreşim analizlerinde trigonometrik fonksiyonlardan faydalanmışlar ve bu trigonometrik fonksiyonların bazı aksenal yönde derecelendirilmiş kirişlerde de geçerli olduğunu göstermişlerdir [126].

Caliò ve Elishakoff (2005) aksenal dereceli kiriş-kolonlar için kapalı-form çözümleri ele almışlardır [101].

Wu ve diğ. (2005) çalışmalarında yarı-ters yöntemden faydalanmışlar ve bu yöntemi anti-simetrik titreşim moduna sahip aksenal yönde fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin analizi için kullanmışlardır. [91].

Shafiee ve diğ. (2006) malzeme özellikleri kalınlık boyunca değiştiği varsayılan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış kavisli kirişlerin mekanik burkulmalarını incelemişlerdir. Mekanik yükler altında kavisli kirişlerin denge ve stabilite denklemleri elde edilerek izotropik malzemeli kirişler için literatürde benzer çalışmalar ile doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda farklı açılar dahilinde FDM den yapılmış kavisli kiriş için burkulma yükü, izotrop metalik kavisli

kiriş için karşılık gelen burkulma değerinden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir [127].

Aydogdu ve Taskin (2007) çalışmalarında elastisite modülü güç ve üssel yasaya göre kalınlık boyunca değiştiği kabul edilen basit mesnetli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimini ele almışlardır. Temel denklemlerin çözümünde Hamilton prensibi, frekansların elde edilmesinde Navier tip çözüm yöntemi ve analizlerde farklı yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri ile klasik kiriş teorilerini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ele aldıkları yöntemin kullanılabilir olduğunu açıklamışlardır [92].

Yang ve Chen (2008) Kenar çatlığına sahip fonksiyonel derecelendirilmiş farklı sınır koşullarındaki kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizlerini incelemiştir. Kirişin kritik burkulma yükü, doğal frekans ve bunlara karşılık gelen mod şekillerini analitik olarak hesaplamışlardır. Kirişin malzeme özellikleri kalınlık boyunca üstel olarak değiştiği varsayılmıştır. Çalışmalarında farklı sınır şartlarına bağlı olarak kenar çatlığının sayısı ve konumunun analiz sonuçlarına olan etkilerini incelemişler ve ele aldıkları sınır şartları karşılaştırılarak kenar çatlığı ile olan ilişkisini açıklamışlardır [128].

Kapuria ve diğ. (2008) Tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin eğilme ve serbest titreşim tepkisini teorik model ve deneysel doğrulama ile incelemiştir. Kiriş elemanının malzeme özelliği kalınlık boyunca değiştiği kabul edilmiştir. Kirişleri iki farklı yöntem kullanarak üretmişlerdir. Bunlardan birincisi toz metalurjisi yöntemi ile 3 ve 5 tabakalı Al/SiC tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş, ikincisi yöntem ise termal spreyleme tekniği ile 5 tabakalı Nikel-Alümina (Ni/Al₂O₃) tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerdir. Son olarak sonlu elemanlar tabanlı zigzag teorisini kullanarak serbest titreşim ve statik eğilme yanıtlarını ortaya koymuşlardır [129].

Xiang ve Yang (2008) çalışmalarında ısı iletimini de göz önüne alarak tabakalı FDM Timoshenko kirişin farklı sınır şartları altında serbest ve zorlanmış titreşimini incelemiştir. Ele alınan kiriş homojen temel tabaka üzerine, malzeme bileşenlerinin hacim oranları bakımından kalınlık yönünde bir güç yasası dağılımı ile takip eden iki homojen olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş tabakadan

oluşturulmuştur. Sıcaklık değişiminin etkisini eklemek için, ilk stres durumu serbest ve zorlanmış titreşim analizleri öncesi bir termo-elastik analiz ile belirlemişlerdir. Çalışmada Timoshenko kiriş teorisi ve diferansiyel quadrature yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda ise frekans parametreleri farklı mod sayılarına bağlı olarak literatürde mevcut çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Gösterilen çözüm yönteminin etkili ve uygulanması kolay olduğunu belirtmişlerdir [130].

Piovan ve Sampaio (2008) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış aksel olarak hareket eden kirişlerin titreşimini incelemişler ve bir formülasyon geliştirmişlerdir. Yapısal model Bernoulli-Euler hipotezine dayanmaktadır. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlar ve çalışma sonucunda kullanılan formülasyon değişken uzunluktaki kiriş elemanda kullanıldığında çok iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [131].

Singh ve Li (2009) yaptıkları çalışmada aksel yönde homojen ve homojen olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş sütunların burkulma yükünü hesaplama yeteneğine bağlı düşük boyutlu matematiksel bir model sunmuşlardır. Matematik modelde kapalı-form transandantal fonksiyonlar ve sayısal çözüm tekniği açıklamışlar ve çeşitli sınır konfigürasyonları için tahmini burkulma yüklerini sunmuşlardır [132].

Sina ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmada kiriş özellikleri malzeme bileşenlerinin hacim oranları bakımından basit bir güç kanunu takiben kalınlık yönünde değiştiği kabul edilen fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizini yapmak için geleneksel birinci dereceden kayma deformasyon kiriş teorisinden farklı yeni bir kiriş teorisini kullanmışlar ve kirişin yanal normal gerilme değeri sıfır olarak kabul etmişlerdir. Hareket denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak hesaplanmıştır. Doğal frekans ve mod şekillerini kesin bir metot ile bulmuşlardır. Çalışmada farklı sınır şartları kabul edilmiş ve karşılaştırmalar farklı kiriş teorileri arasında yapmışlardır. Ayrıca, doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerinde sınır koşulları, hacim oranı ve kayma deformasyon etkilerini incelemişlerdir [133].

Oyekoya ve diğ. (2009) Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak burkulma ve titreşim analizini incelemişlerdir.

Çalışmalarında Reissner-tipi eleman ile bir Mindlin tipi eleman formüle edilmiş ve fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit yapının titreşim ve burkulma analizinde kullanmışlardır. Tasarım optimizasyon süreci gösteriminde bir metodik yaklaşım ele almışlardır. Farklı fiber dağılım durumları için yapılan titreşim ve burkulma analizinin yanı sıra fiber dağılımı etkilerini de incelemişlerdir [134].

Maalawi (2009) aksenal derecelendirme kavramını kullanarak elastik kolon optimizasyonunu ele almışlardır. Bu optimizasyon modelinde ince cidarlı elastik kolonlar kullanmışlar ve toplam kütle sabit kalacak şekilde maksimum yükü taşıyabilecek kolon tasarımını yapmışlardır. Mevcut kolonların malzeme özellikleri ve cidar kalınlıkları aksenal yönde değişmektedir. Çalışmalarında iki tip model kullanılmışlardır. Birinci modelde iki farklı malzemedan oluşan, mekanik ve fiziksel özelliklerinin aksenal doğrultuda parçalı olarak değişen kolonlar ve ikinci modelde ise düzgün homojen izotropik malzemedan üretilmiş ve kalınlığı aksenal yönde değişen kolonlar üretmişlerdir. Bu kolonlar farklı sınır koşulları altında analizini gerçekleştirmişlerdir [135].

Huang ve Li (2010) üniform olmayan kesite sahip aksenal olarak fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimini farklı sınır şartları altında incelemişlerdir. Çalışmalarında değişken eğilme sertliği ve kütle yoğunluğuna sahip kirişlerin serbest titreşimlerinin doğal frekanslarını çözmek için Fredholm integral denklemlerini kullanmışlar ve buldukları nümerik sonuçların mevcut literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırarak yüksek doğruluğa sahip olduğunu göstermişlerdir. Buldukları mevcut sonuçların homojen olmayan, sivrilen kiriş yapıların optimum tasarımı için yararlı olacağını belirtmişlerdir [136].

Khalili ve diğ. (2010) hareketli yüklere maruz fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin dinamik davranışlarını incelemek için bir karma yöntem sunmuşlar ve bu yöntemin etkili ve güvenilir olduğu belirtmişlerdir. Teorik formülasyonlar Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanmakta ve sistemin hareket denklemleri Lagrange denklemlerinin kullanımına bağlı olarak elde edilmiştir. Çalışmada, sistemin dinamikleri üzerinde FD kirişin malzeme özellikleri, hareketli yükün ataleti ve hızın etkileri araştırılmış ve sistemin dinamik davranışı üzerinde bu parametrelerin önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir [137].

Anandakumar ve Kim (2010) üç boyutlu homojen ve fonksiyonel derecelendirilmiş ankastre kirişin modal davranışı Rayleigh-Ritz yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemiştir [138].

Şimşek (2010) farklı kiriş teorileri kullanılarak hareket eden bir kütleyle maruz kalan fonksiyonel dereceli kirişin titreşim analizini incelemiştir. Hareketli bir kütle sebebiyle fonksiyonel dereceli basit destekli kirişin titreşimi Euler-Bernoulli, Timoshenko ve üçüncü derece kayma deformasyon kiriş teorileri kullanılarak araştırmıştır. Kirişin malzeme özellikleri güç kanunu formuna göre, kalınlık yönünde sürekli olarak değişmektedir. Hareket denklemleri sistemi Lagrange denklemleri kullanılarak bulunmuştur. Çalışma, mevcut literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılarak doğruluğunu ispatlamıştır [20].

Huang ve Li (2010) FDM'lerden yapılmış dairesel kolonların burkulma davranışını analiz etmek için yeni bir metod sunmuşlardır. Çalışmada dairesel kesitte, yüzey sınır koşulu ve kayma deformasyonunu aynı anda dikkate alarak dairesel sütunların analizinde mevcut çalışmalardan önemli bir fark ortaya koyduklarını belirtmişlerdir. Dönme ve çökme değerlerini bulabilmek için üç boyutlu elastisite teorisindeki denge denklemlerinden faydalanarak iki adet denklem elde etmişler ve bu bulunan denklemleri tek bir denkleme dönüştürmüşlerdir. Euler-Bernoulli, Timoshenko ve Reddy-Bickford kiriş teorileri sonuçları ile yaptıkları çalışma sonuçları karşılaştırılarak yöntemin etkinliğini teyit etmişlerdir [139].

Mahi ve diğ. (2010) farklı sınır şartları altında, malzeme özellikleri kalınlık boyunca güç yasası dağılımına, üstel yasası dağılımı veya sigmoid yasası dağılımına göre değişen fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin sıcaklığa bağlı serbest titreşim analizi için analitik bir yöntem sunmuşlardır. Çalışmada kullanılan bu teorik formülasyon klasik kiriş teorisi, birinci dereceden kayma deformasyon teorisi ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri içermektedir. Hareket denklemlerini Hamilton prensibi yardımıyla, frekans denklemlerini ise farklı sınır şartları için analitik temel diferansiyel denklemleri çözerek hesaplanmışlardır. Son olarak çalışmada sunulan tüm sonuçlar yaklaşık nümerik yöntemlerin doğruluğunu kontrol etmek için bir referans olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [44].

Ke ve diğ. (2010) Timoşhenko kiriş teorisi ve von Kármán geometrik nonlineerliğine dayalı tek duvarlı karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş ve kalınlık yönünde fonksiyonel derecelendirilmiş nanokompozit kirişlerin doğrusal olmayan serbest titreşimini incelemişlerdir. Farklı sınır şartları altında ele alınan kirişlerin doğrusal olmayan titreşim frekansları elde etmek için Ritz yöntemi ve direkt iteratif yöntem kullanmışlardır [140].

Ansari ve diğ. (2011) malzeme özellikleri Mori-Tanaka şemasına göre kalınlık yönünde dereceli olduğu varsayılan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış mikro kirişlerin serbest titreşim özellikleri gerginlik gradyan (strain gradient) Timoshenko kiriş teorisine göre incelemişlerdir. Hamilton prensibi kullanarak, ilgili sınır koşulları ile birlikte hareket denklemleri, boyut etkisi de dahil olmak üzere FDM mikro kirişlerin serbest titreşim analizini ele almışlardır. Ayrıca FDM mikro kirişlerin doğal frekanslarında kiriş kalınlığı, boyutsuz uzunluk ölçek parametresi ve narinlik oranı etkilerini belirtmek için ayrıntılı bir parametrik çalışma sunmuşlardır [141].

Yousefi ve Rastgoo (2011) fonksiyonel derecelendirilmiş uzamsal eğri kirişlerin serbest titreşim analizleri için kalınlık-eğrilik etkilerini de dikkate alarak bir formülasyon sunmuşlardır. Ele alınan FD kirişlerin malzeme özellikleri kavis yönünde derecelenecek şekilde kabul edilmiş ve farklı sınır şartları için incelemeler yapmışlardır. Doğal frekansları elde etmek için birinci dereceden kayma deformasyon teorisi ve Ritz yöntemine dayalı temel denklemler kullanmışlardır. Çalışmada izotropik düzlemsel kavisli kirişler ile FD düzlemsel kavisli kirişlere ait frekans parametrelerini karşılaştırmışlar ve farklı sınır şartları altında FD düzlemsel kavisli kirişlerin frekans parametrelerinin daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir [142].

Hein ve Feklistova (2011) çeşitli sınır koşulları ve eksenel yönde değişken kesite sahip üniform olmayan ve fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin titreşim analizini incelemişlerdir. FD kirişlerin malzeme özellikleri, kesit alanındaki değişim gibi eksenel yönde olacak şekilde değerlendirilmiş, Euler-Bernoulli teorisi ve Haar matrisleri kullanılarak incelemeler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar neticesinde Haar wavelet yaklaşımının farklı şekil, rijitlik, kütle yoğunluğu, küçük veya büyük

öteleme ve dönme sınır katsayılı kirişler için frekansları hesaplama yeteneğine sahip olduğunu göstermişlerdir [143].

Alshorbagy ve diğ. (2011) fonksiyonel derecelendirilmiş bir kirişin serbest titreşim davranışını farklı sınır şartları için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak nümerik analizini incelemişler ve Euler-Bernoulli kiriş teorisinden faydalanmışlardır. Çalışmalarında ele aldıkları kirişlerin malzeme özellikleri enine ve aksenal olacak şekilde güç kanunu yardımı ile derecelendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda, kirişin dinamik davranışında belirtmiş oldukları etkenlerin ne kadar önemli olduğunu göstermişler ve kullanılan modeli daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırarak doğruluğunu göstermişlerdir [116].

Shahba ve diğ. (2011) başka çalışmalardan farklı olarak klasik ve klasik olmayan sınır şartlarına sahip aksenal fonksiyonel dereceli konik Timoshenko kirişlerin serbest titreşim ve stabilite analizini sonlu elemanlar yaklaşımı kullanarak incelenmişlerdir. Çalışmada nümerik bir örnek ile hesaplama yapmışlar ve örnekte saf alüminyum ile zirkonyum malzemelerini ele alarak derecelendirmişlerdir [144].

Wei ve diğ. (2012) kenar çatlağına sahip fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizi için analitik bir yöntem ele almışlardır. Çalışmada istenilen sayıda çatlaklara sahip Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerin serbest titreşim analizi, geliştirilen yöntemle göre ortak bir yöntem kullanılarak yapılabileceğini ve önerilen prosedürün bu avantajları, çatlak sayısı arttıkça daha belirgin olacağını açıklamışlardır. Ayrıca bu çalışmanın hasarlı yapıların tasarımı ve kontrolü için yararlı olabileceğini belirtmişlerdir [145].

Wattanasakulpong ve diğ. (2012) deneysel doğrulamaya bağlı kalınlık yönünde tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizini farklı sınır şartları altında incelemişlerdir. Çalışmada geliştirilmiş üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisi, tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin titreşim analizini çözmek için uygulamışlardır. Çalışma sonunda deneysel ve teorik temel frekans değerlerini göstermişler ve deneysel çalışmada elde edilen sonuçların, teorik çalışmaya bağlı elde edilen sonuçlardan düşük olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca eklenen kütle konum etkisi frekans sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve

bu yüzden küçük kiriş tasarlanırken kütle dağılımı göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır [146].

Thai ve Vo (2012) fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin eğilme ve serbest titreşimi için çeşitli üst düzey kayma deformasyon kiriş teorileri geliştirmişlerdir. Hareket ve sınır koşulları denklemleri Hamilton prensibinden türetilmiştir. Analitik çözümler basit mesnetli bir kiriş için incelemiştir. Çalışma sonunda bulunan sonuçlar geliştirilen teorilerin geçerliliğini doğrulamak için mevcut çözümler ile karşılaştırmışlardır [147].

Şimşek ve diğ. (2012) hareketli bir harmonik yükün etkisi altında malzeme özellikleri aksel yönde değişen fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin dinamik davranışını incelemiştir. Çalışmada basit mesnetli aksel fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş ele alınmış, Euler-Bernoulli kiriş teorisi ve Newmark yönteminden yararlanılmıştır. Hareket denklemi Lagrange denklemleri kullanarak elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, hareketli yükün hızı, eksitasyon frekansı ve malzeme dağılımının kirişin dinamik tepkisi üzerindeki etkilerini incelemiştir [148].

Shahba ve Rajasekaran (2012) aksel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış konik Euler-Bernoulli kirişlerin serbest titreşimi ve stabilitesini incelemiştir. Çalışmada farklı sınır şartları ele alınmış, boyuna ve enine titreşimin yapısal davranışını belirlemek için iki farklı yöntem kullanmışlardır [111].

Aydogdu ve diğ. (2013) aksel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin burkulması için yarı-ters yöntem hakkında ispat niteliğinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, ele aldıkları denkleme ilave bir terimin eklenmesi gerektiğini ve böylece hatalı sonuçların meydana gelmesinin önleneceğini belirtmişlerdir [149].

Şimşek ve Reddy (2013) malzeme özellikleri kiriş kalınlığı yönünde değişen ve Mori-Tanaka homojenizasyon tekniği ile tahmin edilebilen fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişlerin statik eğilme ve serbest titreşimini modifiye edilmiş çift stres teorisi ve çeşitli yüksek mertebeden kiriş teorilerine göre

incelemişlerdir. Temel denklemler ve ilgili sınır koşulları Hamilton prensibi kullanılarak hesaplamışlar ve Navier tipi çözüm basit destekli sınır şartları için geliştirmişlerdir. Ayrıca, çalışma sonucunda Poisson etkisinin dahil edilmesi statik deplasmanların azalmasına ve titreşim frekansının artmasına sebep olacağını göstermişlerdir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yayınlanan sonuçlar ile mevcut formülasyonunun geçerliliğini kurmak için karşılaştırmışlardır [150].

Su ve diğ. (2013) fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim davranışını Bernoulli-Euler teorisine dayanan dinamik rijitlik matrisi formüle etmek suretiyle incelenmişlerdir. Çalışmada, kiriş malzeme özellikleri kalınlık yönünde sürekli olarak değiştiği varsayılmış ve Hamilton ilkesini, serbest titreşimde doğal sınır şartları ve hareket diferansiyel denklemleri türetmek için kullanmışlardır. Nümerik sonuçlar, sonlu elemanlar ve diğer yaklaşık yöntemleri doğrulamak için kriter çözümler oluşturabileceğini belirtmişlerdir [151].

Li ve diğ. (2013) çeşitli sınır şartları altında aksel homojen olmayan kirişlerin serbest titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen tüm sonuçlar sabit kalınlık ve üssel olarak azalan genişliği sahip üniform olmayan kirişler için geçerli olduğunu göstermişlerdir [152].

Huang ve diğ. (2013) farklı sınır şartları altında üniform olmayan kesite sahip aksel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko kirişlerin serbest titreşimi incelemek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Ele alınan yaklaşımın etkinliğini, homojen ve homojen olmayan Timoshenko kirişler için mevcut literatürdeki diğer nümerik sonuçlar ile çalışmanın nümerik sonuçları karşılaştırılarak teyit edilmiştir. Ortaya konulan yöntem sayesinde doğal frekansların bulunmasında hızlı bir yakınmasa olduğunu ve nümerik doğruluğun yüksek olduğunu belirtmişlerdir [153].

Pradhan ve Chakraverty (2013) Rayleigh-Ritz yönteminden yararlanılarak Euler ve Timoshenko fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimini farklı sınır şartları altında incelemişlerdir. Ele alınan kirişlerin malzeme özellikleri kalınlık doğrultusunda değiştiği kabul edilmiştir. Analiz, klasik ve birinci dereceden kayma deformasyon kiriş teorileri dayanmaktadır. Çalışmanın amacı doğal frekanslarda kiriş teorileri, narinlik oranları ve bileşen hacim fraksiyonlarının

etkilerini incelemektir. Çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırmışlar ve geçerliliğini referans şeklinde belirtmişlerdir [154].

Nguyen ve diğ. (2013) bu çalışmada, aksel yüklenmiş dikdörtgen FD kirişlerin statik ve serbest titreşimini incelemiştir. Çalışmada birinci dereceden kayma deformasyon kiriş teorisinden yararlanılmışlardır. Hareket denklemleri Hamilton prensibinden türetilmiş ve analitik çözümler basit mesnetlenmiş FD kirişler için sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen teorisinin geçerliliğini doğrulamak için mevcut çözümler ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca çalışmada, poisson oranı etkisinin dahil edilmesi kiriş yer değiştirmesinde yani deplasmanlar üzerinde bir azalmaya, doğal frekanslar ve burkulma yüklerinde bir artışa yol açtığını göstermişlerdir. Bu sunulan model sayesinde, sabit aksel kuvvet altında FD kirişlerin statik ve serbest titreşim analizinde etkili ve uygun bir model oluşturacağını öne sürmüşlerdir [155].

Vo ve diğ. (2014) FD sandviç kirişlerin burkulma ve titreşim analizini farklı sınır şartları altında kayma deformasyon teorisinin farklı bir yönü ile incelemiştir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmışlardır. Hareket ve sınır koşullarını tanımlayan denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak türetmişlerdir. Çalışmaları sonucunda sınır şartları, çekirdek kalınlığı, güç-yasası endeksi ve yayılma-boy oranı etkilerinin bu tür kirişler için önemli role sahip olduğunu açıklamışlardır. Bunun yanı sıra yapmış oldukları modelin doğru ve güvenilir sonuçlar sağlayabileceğini belirtmişlerdir [156].

Hadji ve diğ. (2014) FD kirişlerin statik ve serbest titreşim analizi için yüksek mertebeden bir kayma deformasyon kiriş teorisi geliştirmişlerdir. Frekansları elde etmek için Navier tipi çözüm yöntemini kullanılmışlardır. Bunun yanı sıra hareket denklemleri kullandıkları yüksek mertebeden kayma deformasyon kiriş teorisine bağlı olarak Hamilton prensibi ile türetmişlerdir. Yapmış oldukları çözümün doğruluğunu mevcut çalışmalar ile karşılaştırarak göstermişleridir [157].

Li ve diğ. (2014) FD kirişlerin serbest titreşimini klasik ve birinci dereceden kayma deformasyon kiriş teorileri kullanarak farklı sınır şartları için incelemiştir [158].

Zhang (2014) FD kirişlerin termal burkulma sonrası ve lineer olmayan titreşim davranışı fiziksel nötral yüzey kavramı, von Karman gerinim-deplasman ilişkileri ve yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi kullanarak analizini gerçekleştirmiştir. FD kirişlerin malzeme özellikleri kalınlık boyunca değiştiği ve sıcaklığa bağlı olduğu kabul etmiştir. Farklı sınır şartları, termal çevre koşulları ve hacim fraksiyon endeksinin etkilerini Ritz yöntemiyle ayrıntılı olarak ele almıştır [159].

Yang ve diğ. (2014) fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin serbest titreşim analizini farklı sınır şartları altında meshfree sınır etki alanı integral denklem yöntemi ile incelemiştir. Çalışmalarında iki farklı sandviç kiriş modeli ele almışlardır. Bu kirişlerden biri homojen yüz levhalı ve orta bölgesi FD çekirdekli diğeri ise FD yüzey levhalı ve orta bölgesi homojen çekirdekli. Çalışmalarının sonucunda ele almış oldukları yöntemin yüksek doğruluğa sahip olduğunu belirtmişlerdir [160].

Zhang ve diğ. (2014) fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenen yapılmış boyut-bağımlı bir kiriş modeli geliştirmişler ve modelde üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisini kullanmışlardır. Ayrıca modelde mikro ölçek ve kayma deformasyon etkilerininide kullanmışlardır. Çalışmada kullandıkları FD mikro kirişlerin mekanik özellikleri kalınlık yönünde Mori-Tanaka homojenizasyon tekniğine göre kalınlık boyunca değiştiği varsayılmıştır. Basit mesnetli sınır koşullu FD mikro kirişlerin burkulma, serbest titreşim ve eğilme problemleri için analitik çözümleri Navier metot kullanılarak elde edilmişlerdir. Kirişlere ait sınır şartları ve hareket denklemlerini ise Hamilton prensiplerinden türetmişlerdir. Çalışma sonunda elde ettikleri verileri literatürde mevcut bulunan sonuçlar ile karşılaştırarak doğruluğunu belirtmişlerdir [161].

Rajasekaran ve Tochaei (2014) en düşük mertebeden diferansiyel kuadratür elemanlar yöntemi ile diferansiyel dönüşüm elemanlar yöntemlerini kullanarak aksenal yönde fonksiyonel derecelendirilmiş konik Timoshenko kirişlerin serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir [162].

Fard (2014) çalışmasında fonksiyonel derecelendirilmiş çekirdeğe sahip sandviç eğri kirişlerin yüksek mertebeden serbest titreşim analizini ele almıştır [163].

Celebi ve Tutuncu (2014) fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin kesin doğal frekansını düzlem elastisite teorisi kullanarak tespit etmişlerdir. Kiriş kalınlığı ve kısalığının serbest titreşim davranışına olan etkilerini incelenmiştir. Çalışmaları sonucunda, ele aldıkları yöntemi literatürde mevcut bulunan kiriş teori sonuçları ile karşılaştırmışlar ve yöntemlerinin doğruluğunu göstermişlerdir [164].

Zenkour ve Abbas (2014) çift dışbükey / içbükey sandviç kirişlerin yüksek doğrulukta doğal frekanslarını analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında seramik ve metal malzeme özelliklerinden yararlanmışlardır. Ana denklemleri ve sınır şartlarının elde edilmesinde toplam enerjinin minimum ilkesinin dinamik versiyonunu kullanmışlardır [165].

Mashat ve diğ. (2014) FD kirişlerin serbest titreşim analizi için çeşitli deplasman teorilerine dayalı tek boyutlu sonlu elemanlar kullanmışlardır [166].

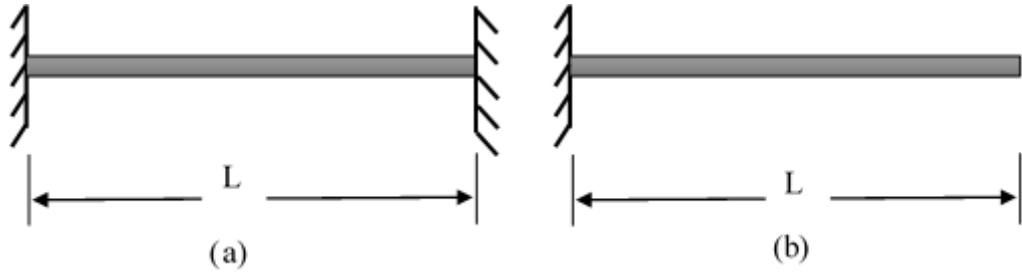
Açık literatürde görüleceği üzere şu ana kadar FD kirişler üzerine birçok çalışma olmasına rağmen Al/SiC sistemleri kullanılarak toz metalurji yöntemi ile üretilmiş eksenel yönde tabakalı olarak FD kısa kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizini deneysel ve sayısal olarak birlikte inceleyen bir çalışma mevcut değildir.

Bu doktora tezinde, eksenel yönde tabakalı FD dikdörtgen kesit alanına sahip kısa kirişlerin burkulma davranışı ve serbest titreşim analizi sayısal ve deneysel olarak değişik sınır şartları altında incelenmiştir. Bu tez yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde FDM'ler hakkında genel bilgiler verilmiş ve literatür özeti sunulmuştur. İkinci bölümde, Timoshenko kiriş teorisine göre homojen kirişlerin boyutsuz burkulma ve temel frekans değerleri teorik olarak hesaplanmıştır. Üçüncü bölümde, homojen ve eksenel yönde tabakalı olarak FD kirişlerin tasarımları yapılmış ve bu kirişler %99,8 saflıkta Al ile %99,9 saflıkta SiC tozlarının farklı ağırlık oranları kullanılarak toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Dördüncü bölümde, kirişler için deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, homojen kirişler Instron 8801 test cihazı ile işleme tabi tutulmuş ve nümerik model için eksenel yönde tabakalı FD kirişlerin her tabakasına ait elastisite modülleri bulunmuştur. Bununla birlikte sayısal analizde kullanılmak üzere her bir tabakanın yoğunluk değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal analiz

sonuçlarında meydana gelen farkları açıklayabilmek için tabakalar optik mikroskop, Brinell sertlik testi ile incelenmiş ve komşu tabakalar arasında ağırlıkça %SiC miktarındaki ani ve homojen geçişe bağlı olarak meydana gelen çatlak oluşumları SEM yöntemi ile analiz edilmiştir. Tüm kirişlerin burkulma davranışları deneysel olarak Instron 8801 test cihazı ile tutulu-tutulu (C-C) sınır şartı altında serbest titreşim analizleri ise DEWESoft™ titreşim cihazı DEWE-43A ile tutulu-serbest (C-F) sınır şartı altında incelenmiştir. Beşinci bölümde, homojen ve eksenel yönde tabakalı FD kirişlerin değişik sınır şartları için sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum %15'e kadar SiC barındıran her kiriş numunesi burkulma analizi için Timoshenko kiriş teorisine göre ANSYS ve ABAQUS sonlu elemanlar paket programında C-C ve C-F sınır şartıyla, serbest titreşim analizi için C-F sınır şartıyla ANSYS sonlu elemanlar paket programında modellenmiştir. Altıncı bölümde deneysel ve sayısal burkulma davranışı ile serbest titreşim analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Son olarak yedinci bölümde bu çalışmadan çıkarılan sonuç ve öneriler açıklanmıştır.

2. HOMOJEN TİMOHENKO KİRİŞ TEORİSİ

Bu bölümde homojen kirişlere ait boyutsuz burkulma yükleri ile boyutsuz temel frekans değerleri Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu teori Euler-Bernoulli kiriş teorisinin geliştirilmiş halidir. Euler-Bernoulli kiriş teorisi, uygulanan kuvvet sonucu kirişte meydana gelen dönme ve kayma faktörlerinin oluşturmuş olduğu etkileri içermemektedir. Ancak Timoshenko kiriş teorisi bu faktörleri hesaplamalara katmıştır. Dolayısıyla Euler-Bernoulli kiriş teorisine nazaran Timoshenko kiriş teorisi daha hassas sonuçlar vereceği düşünülmüş ve hesaplamalarda bu teori kullanılmıştır. Bu teorinin kullanımına bağlı olarak kirişlerin burkulma davranışı için C-C ve C-F sınır şartları kullanılırken temel frekans hesaplamalarında C-F sınır şartı kullanılmıştır. Kullanılan sınır şartları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Sınır şartları (a) C-C ve (b) C-F [167].

2.1 Burkulma Yükü Hesapları [168]

Engesser–Timoshenko kiriş teorisine göre eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren denklemler sırasıyla (2.1) ve (2.2)’de verilmiştir.

$$M = EI \frac{d\phi}{d\bar{x}} \quad (2.1)$$

$$Q = K_s GA \left(\phi + \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}} \right) \quad (2.2)$$

Bu eşitliklerde \bar{x} kolon tabanından uzunlamasına ölçülen koordinatı, M eğilme momenti, E elastisite modülünü, I atalet momentini, Q enine kesme kuvvetini, \emptyset Timoshenko kolonda dönmeyi, \bar{w} enine yer değiştirmeyi, K_s kayma düzeltme katsayısını, K_sGA efektif kayma rijitliğini ifade etmektedir. Euler sütunlardaki gibi denge denklemleri (2.3) ve (2.4)'de verilmiştir.

$$\frac{dM}{d\bar{x}} = Q \quad (2.3)$$

$$\frac{dQ}{d\bar{x}} = P \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{x}^2} \quad (2.4)$$

Bu denklemlerde P aksel basma yükünü ifade etmektedir. Denklem (2.1) ve (2.2) denklem (2.3) ve (2.4)'de yerine yazılarak temel denklemler (2.5) ve (2.6)'da gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$EI \frac{d^2\emptyset}{d\bar{x}^2} = K_sGA \left(\emptyset + \frac{d\bar{w}}{d\bar{x}} \right) \quad (2.5)$$

$$K_sGA \left(\frac{d\emptyset}{d\bar{x}} + \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{x}^2} \right) = P \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{x}^2} \quad (2.6)$$

Denklem (2.5)'in türevi alındıktan sonra denklem (2.6)'nın kullanımına bağlı olarak denklem (2.7) elde edilir.

$$EI \frac{d^3\emptyset}{d\bar{x}^3} = P \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{x}^2} \quad (2.7)$$

Denklem (2.6)'nın düzenlenmesi ile denklem (2.8) elde edilir.

$$\frac{d\emptyset}{d\bar{x}} = - \left(1 - \frac{P}{K_sGA} \right) \frac{d^2\bar{w}}{d\bar{x}^2} \quad (2.8)$$

Bu bulunan denklem, denklem (2.7)'de yerine yazılmak suretiyle denklem (2.9) bulunur.

$$\frac{d^4w}{dx^4} + \bar{k} \frac{d^2w}{dx^2} = 0 \quad (2.9)$$

Burada $x = \bar{x}/L$ ve $w = \bar{w}/L$ ifade etmektedir ve bu değerleri denklem (2.9)'da yerine yazıldıktan sonra \bar{k} değeri,

$$\bar{k} = \frac{\frac{PL^2}{EI}}{1 - \frac{P}{K_s GA}} \quad (2.10)$$

şekline dönüşmüştür. Denklem (2.5)'in türevinin alınması ve denklem (2.7)'nin kullanılması sonucunda denklem (2.11) elde edilir.

$$\frac{d^3\phi}{dx^3} + \bar{k} \frac{d\phi}{dx} = 0 \quad (2.11)$$

Denklem (2.9) ve (2.11)'in genel sonucu (2.12a) ve (2.12b) denklemlerinde verildiği gibidir.

$$w = C_1 \sin\sqrt{\bar{k}}x + C_2 \cos\sqrt{\bar{k}}x + C_3 x + C_4 \quad (2.12a)$$

$$\phi = -C_1 \frac{P}{EI\sqrt{\bar{k}}} \cos\sqrt{\bar{k}}x + C_2 \frac{P}{EI\sqrt{\bar{k}}} \sin\sqrt{\bar{k}}x - C_3 \quad (2.12b)$$

Timoshenko kiriş için tutulu ve serbest uç sınır şartları sırası ile denklem (2.13a) ve (2.13b)'de verildiği gibidir.

$$\bar{w} = 0 \text{ ve } \phi = 0 \quad (2.13a)$$

$$\frac{d\phi}{dx} = 0 \text{ ve } EI \frac{d^2\phi}{dx^2} + P \frac{d\bar{w}}{dx} = 0 \quad (2.13b)$$

Bu sınır şartları denklem (2.12a) ve (2.12b)'de ikame etmek suretiyle (2.14)'de gösterilen matris elde edilir ve özdeğer denklem (2.14)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$[A]\{C\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte [A] matrisinin determinantının yok olmasıyla stabilite ölçütü belirlenir. Timoshenko kiriş teorisine göre C-C ve C-F sınır şartlarına ait kritik burkulma yüklerini ve stabilite ölçütünü veren eşitlikler Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Bu tabloda yer alan denklemlerde E elatiside modulünü, I atalet momentini, L kiriş boyunu, A kiriş kesit alanını, G kayma modulünü ve Ks kayma düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

Tablo 2.1: Timoshenko kirişlerde kritik yükler ve stabilite kriterleri

Sınır Şartları	Stabilite Ölçütü	Kritik yük
C-C	$\sin \frac{\sqrt{k}}{2} = 0$	$P_{\text{kritik}} = \frac{\frac{4\pi^2 EI}{L^2}}{1 + \frac{4\pi^2 EI}{K_s GAL^2}}$
C-F	$\cos \sqrt{k} = 0$	$P_{\text{kritik}} = \frac{\frac{\pi^2 EI}{4L^2}}{1 + \frac{\pi^2 EI}{4K_s GAL^2}}$

Ele alınan kirişlerin kesit alan şekilleri dikdörtgen oldukları için K_s değeri aşağıda verildiği gibidir.

$$K_s = \frac{10(1 + \nu)}{12 + 11 \nu} \quad (2.15)$$

Boyutsuz burkulma sonuçları veren denklem (2.16)'da verilmiştir.

$$\alpha = \frac{PL^2}{EI} \quad (2.16)$$

burada ν poisson oranını ifade etmektedir. G kayma modülü,

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.17)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kiriş boyu 55mm, kalınlık 10mm, yükseklik 7,2mm ve poisson oranı 0,33 olarak alınmıştır. Bu veriler kullanılarak Timoshenko kiriş teorisine göre hesaplanan boyutsuz burkulma değeri Tablo 2.2'de verildiği gibidir.

Tablo 2.2: Homojen kiriş için boyutsuz burkulma değerleri

Kiriş Tipi	Boyutsuz Burkulma Değerleri (α)	
	C-C	C-F
Homojen Kiriş	33,5632	2,4405

2.2 Serbest Titreşim Hesapları [153]

Timoshenko kiriş teorisine göre boyuna yer değiştirme u ve sehim w olarak ifade edilerek eşitlik (2.18) ve (2.19) elde edilir.

$$u = u_0(x, t) + z\varphi(x, t) \quad (2.18)$$

$$w = w(x, t) \quad (2.19)$$

$$u_0 = 0 \quad (2.20)$$

Burada $u_0(x,t)$ orta düzlemdeki boyuna yer değiştirmeyi ifade etmektedir ve eksenel yükleme olmadığı durumlarda ortadan kalkar. φ ise kesit alanındaki dönmeyi ifade etmektedir. Ayrıca bu eşitliklerdeki yer değiştirme (w) ve dönme (φ) sırasıyla boylamsal koordinat x ile zaman t 'nin fonksiyonlarıdır. Dolayısıyla kinematik ilişkileri kullanarak normal ve kayma şekil değiştirme denklemleri sırasıyla ϵ_{xx} ve γ_{xz} şeklinde ifade edilebilir.

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = z \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.21)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} + \varphi \quad (2.22)$$

bünye denklemleri (2.23) ve (2.24)'de gösterildiği gibi alınır.

$$\sigma_{xx} = E(x)\epsilon_{xx} = zE(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.23)$$

$$\tau_{xz} = G(x)\gamma_{xz} = G(x) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \varphi \right) \quad (2.24)$$

burada σ_{xx} ve τ_{xz} normal ve kayma gerilmelerini $E(x)$ ve $G(x)$ ise x 'e bağlı normal ve kayma modülünü ifade etmektedir. Kirişin herhangi bir x pozisyonundaki eğilme momenti (M) ve kayma kuvveti (Q) sırasıyla (2.25) ve (2.26)'da verildiği gibidir.

$$M = \int_A \sigma_{xx} z dA \quad (2.25)$$

$$Q = \int_A \tau_{xz} dA \quad (2.26)$$

Bu eşitliklerde A , x 'e bağlı kiriş kesit alanını ifade etmektedir. Denklem (2.23) ve (2.24) kullanımına bağlı olarak denklem (2.25) ve (2.26)'nın integrali alınmış hali denklem (2.27) ve (2.28)'de görüldüğü gibidir.

$$M = E(x)I(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.27)$$

$$Q = \kappa G(x)A(x) \left(\varphi + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.28)$$

Bu denklemlerde κ kayma düzeltme faktörünü ve I atalet momenti ifade etmektedir. Timoshenko kiriş teorisi dikkate alındığında kesit alanında oluşan kayma gerilmesi uniform olmadığından kiriş alanındaki kesme kuvvetini hesaplayabilmek için κ kayma düzeltme faktörü denkleme eklenmelidir. Dolayısıyla hareket denklemleri (2.29) ve (2.30)'da verildiği gibidir.

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.30)$$

Bu denklemlerde yer alan ρ kiriş kütle yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem (2.23) ve (2.24), denklem (2.29)'da yerine ikame edildikten sonra her iki taraf z ile çarpılır ve kesit alanı boyunca integre edilerek denklem (2.31) elde edilir.

$$\frac{\partial M}{\partial x} = Q + \rho(x)I(x) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (2.31)$$

Benzer şekilde denklem (2.30) kesit alanı boyunca integre edilince denklem (2.32) elde edilir.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \rho(x)A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q \quad (2.32)$$

Bu denklemde q , kirişin yanal yüzeyinde ve z eksenine doğrultusunda yayılı yükü ifade etmektedir. Denklem (2.27) ve (2.28) sırasıyla denklem (2.31) ve (2.32) içerisinde yerleştirilince (2.33) ve (2.34) eşitliğinde gösterildiği gibi temel denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E(x)I(x) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = \kappa G(x)A(x) \left(\varphi + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \rho(x)I(x) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa G(x)A(x) \left(\varphi + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = \rho(x)A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.34)$$

Tutulu uç ve serbest uç için kullanılan sınır şartları sırasıyla eşitlik (2.35) ve (2.36)'da gösterildiği gibidir.

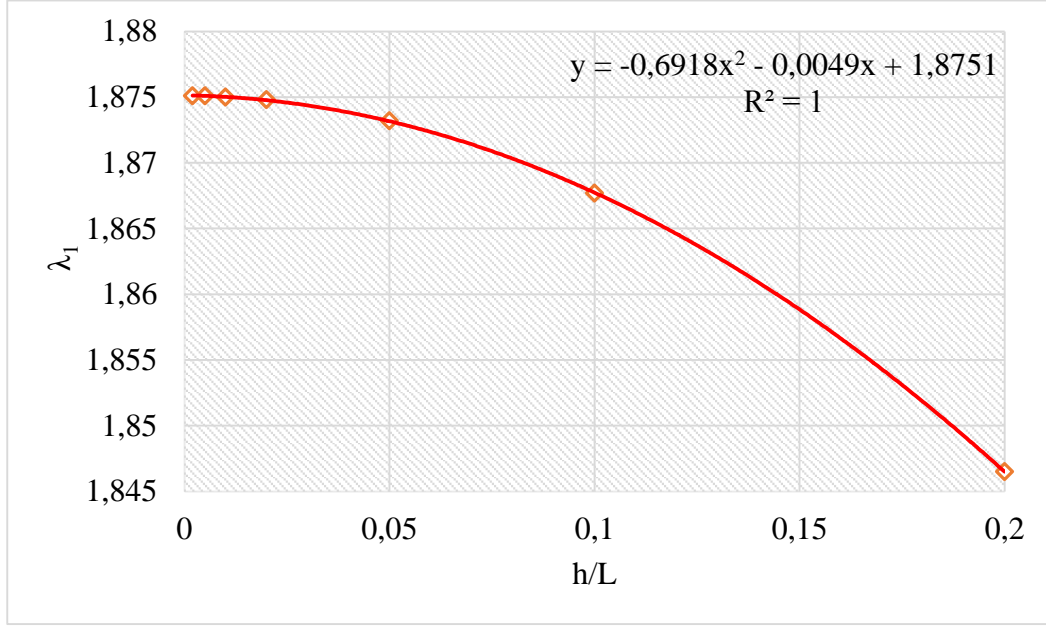
$$w=0, \varphi=0, x=0 \quad (2.35)$$

$$M=0, Q=0, x=L \quad (2.36)$$

Bu sınır şartlarından anlaşılacağı üzere kiriş uzunluğunun $x=0$ olduğu konumda kirişte yer değiştirme ve dönme mevcut değildir. Benzer şekilde $x=L$ olduğu durumlarda ise moment (M) ve kesme kuvveti (Q) sıfırdır. Kocatürk ve Şimşek (2005) değişik sınır şartları altında farklı kalınlık ve uzunluk oranlarına bağlı Timoshenko kirişlerin ilk sekiz Mod değerine göre boyutsuz titreşim analizini ele almışlardır [167]. Çalışmasının bir bölümünde yer alan C-F sınır şartına bağlı boyutsuz temel frekans değerleri Tablo 2.3'de gösterildiği gibidir. Bu tabloda λ_1 , 1. Mod değerine bağlı boyutsuz frekans parametresini, h kiriş kalınlığını ve L kiriş uzunluğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada serbest titreşim analizi için kiriş yüksekliği 7,7mm, kalınlığı 10mm ve uzunluğu 55mm olarak alınmıştır. Tablo 2.3'de bu kiriş ölçülerine karşılık gelen λ_1 ve h/L değerleri olmadığı için Tablo 2.3'de yer alan veriler Şekil 2.1'de gösterildiği gibi polinom grafik olarak çizilmiş ve h/L değeri hesaplanmıştır.

Tablo 2.3: 1. Mod için boyutsuz frekans değerleri

h/L	λ_1
0,002	1,8751
0,005	1,8751
0,01	1,8750
0,02	1,8748
0,05	1,8732
0,1	1,8677
0,2	1,8465



Şekil 2.2: λ_1 ile h/L değerlerinin polinom grafiği

Şekil 2.2'de, λ_1 ile h/L değerlerine bağlı çizilen polinom grafiği kullanılarak elde edilen denklem (2.37)'de gösterildiği gibidir.

$$y = -0,6918x^2 - 0,0049x + 1,8751 \quad (2.37)$$

Bu denkleme bağlı olarak $h/L=0,14$ değeri yaklaşık 1,8608 olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu değer kullanılarak homojen kirişin Timoshenko kiriş teorisine dayalı C-F sınır şartı için teorik olarak hesaplanan boyutsuz temel frekans değeri Tablo 2.4'de gösterildiği gibidir. Boyutsuz doğal frekans değerleri,

$$\lambda^2 = \frac{\rho A \omega^2 L^4}{EI} \quad (2.38)$$

formülü [167] ile hesaplanmıştır. Bu formülde λ boyutsuz doğal frekansı, ρ yoğunluğu, ω dairesel temel frekansı, L kiriş boyunu, E Elastisite Modülünü, I Atalet Momentini ifade edecek şekilde ele alınmıştır.

Tablo 2.4: Homojen kiriş için boyutsuz temel frekans değeri

Kiriş Tipi	Boyutsuz Temel Frekans Değeri (λ^2)
Homojen Kiriş	3,4625

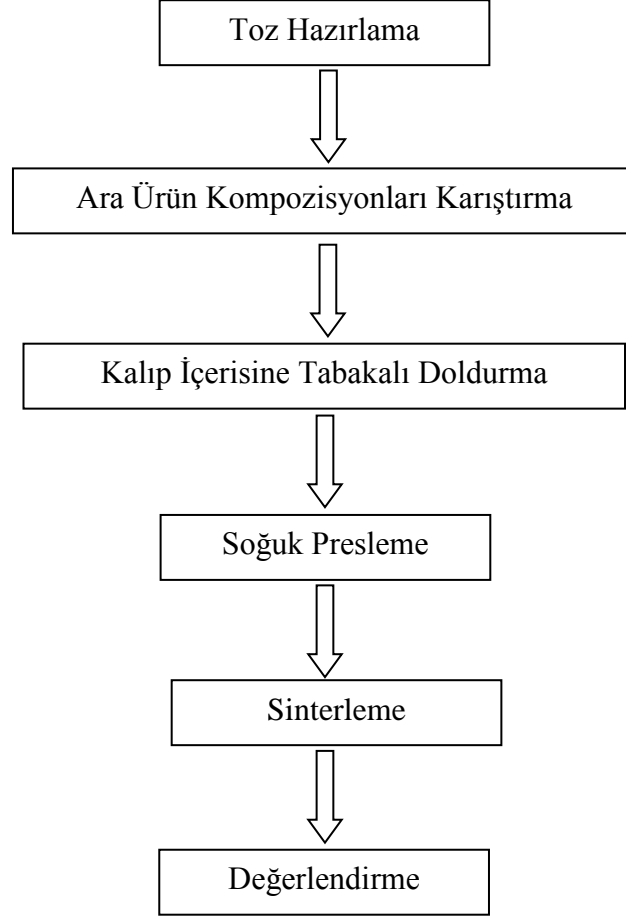
3. KİRİŞLERİN ÜRETİMİ

FDM'ler, malzeme mühendisliği ve diğer uygulamalarda çok önemli bir yeri vardır ama bazı uygulamalarda bu malzemelerin üretim maliyeti engelleyici rol oynamaktadır [3]. Dolayısıyla üretilecek FDM için seçilecek üretim yöntemi maliyeti açısından uygunluk taşıyacak bir metot olması gerektiği gibi amaca da hizmet etmelidir.

FDM üretiminin birçok yöntemi vardır. Kieback ve diğ. (2003) FDM üretim teknikleri hakkında bilgiler veren ve geniş içeriğe sahip bir çalışma yapmışlardır [169]. İlerleyen zamanlarda birçok çalışmada bu üretim yöntemlerinden çoğu kullanılmıştır. Genel bilinen malzeme üretim yöntemlerinin kullanımına bağlı olarak, FDM üretimi, FDM üzerine ve genel malzemeler üzerine kaplama yöntemleri gibi birçok farklı üretim ve işleme yöntemleri literatürde geniş yer edinmektedir.

Yapılan çalışmalar üzerinden bakılacak olunursa, ele alınan yöntemler ve türleri genel olarak; Toz Metalurjisi Yöntemi [170-173], Santrifüj Döküm [174-178], şerit döküm [179-181], Plazma Sprey ve çeşitleri [182-185], Termal Sprey [186], düşük vakum yoluyla Doğrudan Buhar Biriktirme (DVD) [187], Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) [188], Kimyasal Buhar Sızdırma (CVI) [189], Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve çeşitleri [190-192], Kendi Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi (SHS) [193], Lazerle Kaplama [194, 195], Kıvılcım Plazma Sinterleme [196, 197], Elektroforetik Biriktirme [198-202], Tiksotropik Döküm [203], Elektromanyetik Ayırma Yöntemi [204], Sıcak Pres [205], sürtünme-karıştırma işleme [206, 207] gibi metotlardır.

Bu çalışmada, homojen ve aksel yönde FD tabakalı kirişlerin üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Aynı üretim yöntemini ve Al/SiC sistemini kullanarak yapılan çalışmalarda açık literatürde mevcuttur [129]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin toz metalurji yöntemi ile üretimini şematik olarak Şekil 3.1'deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 3.1: Fonksiyonel Dereceli Malzemenin TM ile imalat akış şeması [208].

3.1 Kirişleri Oluşturan Katkı Maddeleri

Bu çalışmada toz metalurji yöntemi ile tek tabakalı homojen ve eksenel yönde FD tabakalı kirişler üretilmiştir. Her bir kiriş tabakası Al/SiC metal matris kompozitlerden oluşmaktadır. Genel olarak bakıldığında zaman Mkaddem ve El Mansori (2009) metal matris kompozitlerin yüksek sıcaklık uygulamaları için gelişmiş havacılık sahasında, gaz türbin motor parçaları ve araçlarda kabul gördüğünü belirtmişlerdir [209]. Bunun yanı sıra Al matrisli kompozitler yüksek dayanım, kontrollü ısıl genleşme katsayıları, geliştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri, gelişmiş rijitlik ve aşınma direnci, düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı takviyesiz malzemeler ile karşılaştırıldığında büyük avantajlara sahiptir [210]. Dolayısıyla Al matrisli kompozitlerin bir çeşidi olan SiC içerikli Al matrisli kompozitler açık literatürde görüleceği üzere fonksiyonel derecelendirmeyi içerisinde

barındıran birçok çalışmada [129, 211-216] yer edinmiştir. Bu çalışmalarda olduğu gibi kırışlerin üretimde iki temel toz kullanılmıştır. Bu tozlardan birisi Al diğeri ise SiC'dür. Üretim süresince kalıp yağlayıcı olarak Çinko Stearat tozu kullanılmıştır. Tozların temin edildiği firmadan alınan Al ve SiC genel özellikleri Tablo 3.1'de gösterildiği gibidir.

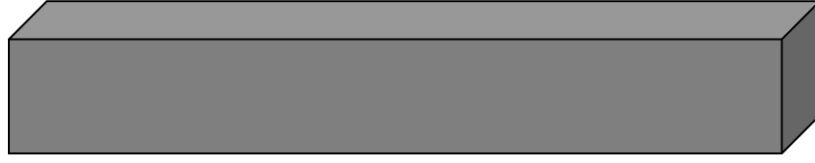
Tablo 3.1: Al ve SiC tozlarının genel özellikleri

Özellikler	Al	SiC
Formülü	13Al ^{26.98}	SiC ^{40.10}
Safılık	%99.8	%99.9
Partikül boyutu	-100 Mesh	<1500 Girit
Ergime noktası	660.1 °C	> 2000 °C
Yoğunluk	2.699 g/cm ³	3.217 g/cm ³
Mohs sertlik (20 °C)	2-2,9	9.2

Bu tozların kullanımına bağlı olarak kırış numuneleri üretilmiştir. Her bir kırış numunesinde ağırlıkça farklı oranlarda %SiC ve %Al kullanılmıştır. Böylelikle ağırlıkça %SiC ve %Al içeren kırışlerin burkulma ve titreşim analizlerinin kullanım miktarına(ağırlık) bağlı olarak nasıl bir değişim sergilediği de tespit edilmiştir.

3.2 Tek Tabakalı Homojen Kırışlerin Üretimi

Eksenel yönde FD tabakalı kırışlerin burkulma ve serbest titreşim analizlerini gerçekleştirebilmek için FD kırışlerin her bir tabakasına ait mekanik özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu mekanik özellikleri belirleyebilmek için ağırlıkça farklı %SiC içeriklerine sahip homojen kırış numuneleri üretilmiştir. Her bir homojen kırış numunesinden 6 adet üretilmiştir. Bu kırış numuneleri %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 SiC ağırlık oranlarına sahip olacak şekilde 9 farklı tiptedir. Şekil 3.2'de Al ve SiC tozları kullanılarak üretilen homojen kırış numunesi gösterilmiştir.

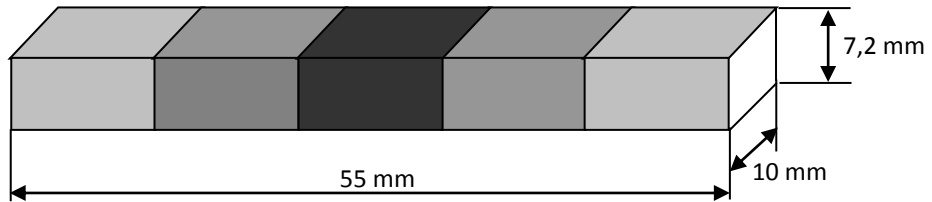


Şekil 3.2: Homojen kiriş

Yapılan çalışmalara bakıldığında Kapuria ve diğ. (2008) çalışmalarında ele aldıkları FDM’de seramik oranını %0 ile %40 arasında değiştirmişler ve toz metalürji yöntemini kullanmışlardır [129]. Dolayısıyla literatürde bu sistemleri, bu çalışmada olduğu gibi %40 SiC oranına kadar ele alan ve toz metalürji yöntemini kullanan bir çalışma mevcuttur.

3.3 Eksenel Yönde FD Tabakalı Kısa Kirişlerin Üretimi

FD kirişler beş tabakadan oluşmaktadır. Kirişi oluşturan tabakaların tozları, her bir tabakada ağırlıkça farklı yüzdelere sahip Al ve SiC içeriğine sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu toz karışımları kalıp içerisine eksenel yönde kademeli olarak yerleştirilmiştir. Böylece tabakaları oluşturan toz karışımları her bir tabaka için farklı mikroyapı ve mekanik özelliklerin oluşmasını sağlamıştır. Tasarlanmış olunan eksenel yönde FD tabakalı kirişin ölçüleri Şekil 3.3’de gösterildiği gibi uzunluk 55 mm, kalınlık 10 mm ve yükseklik 7,2 mm olacak şekilde düşünülmüş ve her bir kiriş numunesinden deneysel çalışmanın burkulma ve serbest titreşim analizinde kullanılmak üzere 6 adet üretilmiştir.



Şekil 3.3: Eksenel yönde beş tabakalı olarak derecelendirilmiş FD kiriş

Üretilen homojen ve aksel yönde FD tabakalı kirişleri oluşturan numuneler Tablo 3.2’de gösterildiği gibi 17 farklı tipte olacak şekilde değerlendirmeye alınmıştır.

Tablo 3.2: Kiriş numunelerini oluşturan % SiC oranları

Kiriş Tipleri	% SiC Oranları				
	Tabaka 1	Tabaka 2	Tabaka 3	Tabaka 4	Tabaka 5
Numune 1	%0 (Homojen Kiriş)				
Numune 2	%5 (Homojen Kiriş)				
Numune 3	%10 (Homojen Kiriş)				
Numune 4	%15 (Homojen Kiriş)				
Numune 5	%20 (Homojen Kiriş)				
Numune 6	%25 (Homojen Kiriş)				
Numune 7	%30 (Homojen Kiriş)				
Numune 8	%35 (Homojen Kiriş)				
Numune 9	%40 (Homojen Kiriş)				
Numune 10	%5	%10	%15	%10	%5
Numune 11	%10	%5	%15	%5	%10
Numune 12	%15	%10	%5	%10	%15
Numune 13	%10	%15	%5	%15	%10
Numune 14	%5	%15	%10	%15	%5
Numune 15	%15	%5	%10	%5	%15
Numune 16	%5	%10	%15	%20	%25
Numune 17	%0	%20	%40	%20	%0

Bu tablodan görüleceği üzere Al ve SiC kullanımına bağı olarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri ile mikroyapı karakterizasyonunu belirleyebilmek için 9 adet farklı homojen kırış numuneleri üretilmiştir. Numune 1'den Numune 9'a kadar olan tüm kırışler tek bir tabakadan oluşmaktadır ve ağırlıkça %SiC oranı, %0'dan %40'a kadar % 5 artacak şekilde üretilmiştir. Numune 10 ile Numune 17 arası ise aksel yönde FD tabakalı kırış numuneleridir. Bu kırış numunelerin ise her bir tabakası ağırlıkça farklı %SiC oranı içerecek şekilde 5 tabakadan meydana gelmektedir.

3.4 Tozların Hazırlanması

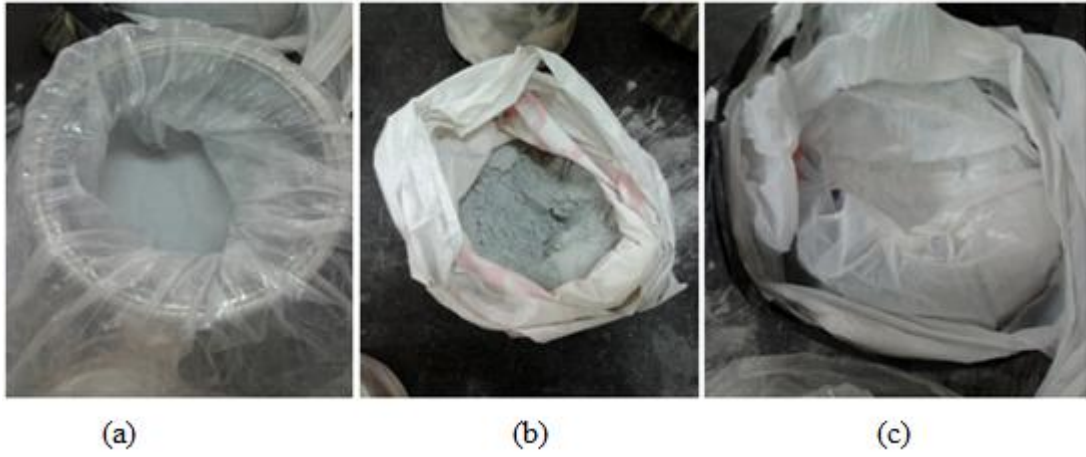
Eksel yönde FD tabakalı ve homojen kırışleri üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanımında kırış üretimi açısından tozların hazırlanması önemli bir faktör olduğu için detaylı bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Bu fizibilite çalışmasının en önemli kısımlarından biri tozların hassas tartılmasıdır. Al ve SiC tozları Şekil 3.4'de gösterilen Hassas Terazi ile toz miktarları ölçülerek her bir numune için ağırlıkça yüzde oranları ayarlanmıştır.



Şekil 3.4: Hassas terazi

Bu toz karışımına ek olarak yağlayıcı görevi üstlenmesi için Çinko Stearate ilavesi yapılmıştır. Çinko Stearate ilave yapılmasının başlıca amaçları kırışlerin üretim süresince kalıp yüzeyleri ile toz karışımının sürtünmesini azaltmak ve toz

partiküllerinin birbirleri ile olan sürtünmesini minimize ederek homojen bir karışımın oluşmasına yardımcı olmaktadır. Çalışmanın Sinterleme bölümünde fazla Çinko Stearate kullanıldığında yüzeylerde kabarcıklar oluştuğu ve yüzey kalitesinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden Al ve SiC toz karışım oranına bağlı olarak Çinko Stearate kullanılmıştır. Bu oranlar üretilecek numuneler için %SiC oranı toplam numune toz ağırlığının % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30 ve % 40'ı ve yağlayıcı toplam numune toz ağırlığının %2'si olacak şekilde hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır. Eksenel yönde FD tabakalı kirişleri üretebilmek için kullanılan Al, SiC ve yağlayıcı olarak kullanılan Çinko Stearat tozları Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Kullanılan tozlar (a) Alüminyum (b) Silisyum Karbür (c) Çinko Stearate

3.5 Tozların Karıştırılması

Kirişleri üretebilmek için kullanılan Al, SiC ve yağlayıcı olarak görev yapan Çinko Stearat tozları farklı özelliklere sahip olduğundan dolayı tozların homojen karıştırılması büyük önem arz edeceği düşünülmüştür. Nai ve Gupta (2002) yaptıkları çalışmada karıştırma hızının önemli bir faktör olduğu ve karıştırma hızındaki artışın, homojen bir karışımın oluşmasını sağlayacağı gibi SiC partiküllerinin homojen dağılımını arttıracığını belirtilmiştir [213]. Kirişler için hazırlanan toz karışımları Şekil 3.6'da gösterilen Öğütücü Bilyalı Değirmen (Planet Tip Karıştırıcı) vasıtasıyla sağlanmıştır.



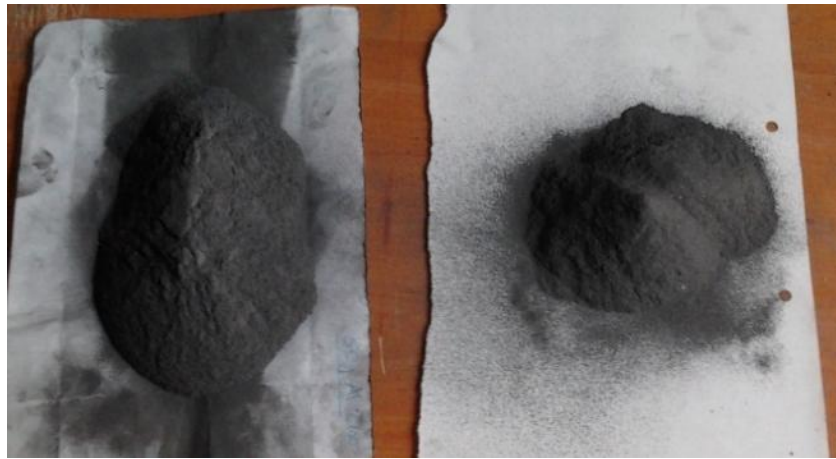
Şekil 3.6: Planet Tip Karıştırıcı (a) durağan durumda (b) çalışır durumda

Homojen karışımın mümkün olduğu kadar hassas olması deneysel çalışmanın doğruluğunu ve üretilecek kırıntı numunelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine doğrudan etkileyeceği düşünülmüştür. Bu yüzden homojen karışıma etki eden faktörler göz önüne alınmıştır. Bu faktörlerden başlıcaları tozların fiziksel özelliği, karıştırıcı makinenin karıştırma şekli ve yöntemi, karıştırıcıya konulan toz miktarları, karıştırıcının karıştırma hızı ve karıştırma süresi gibi etkenlerdir. Dolayısıyla toz karışımları Öğütücü Bilyalı Değirmen vasıtasıyla üç saat boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma süresince her yarım saatte bir ters yönde dönme gerçekleşmiştir. Ayrıca tozları koymuş olduğumuz kaplar Öğütücü Bilyeli Değirmene bağlı olduğu için kapların bağlı olduğu kısım kendi eksenin etrafında sağ tarafa dönerken kaplar kendi eksenin etrafında sol tarafa dönmektedir. Bunun yanı sıra her kabın içerisinde 12 mm ölçüsünde bilyeler bulunmaktadır. Bu bilyeler kabın içerisinde mevcut bulunan tozların homojen olarak karıştırılmasında önemli bir yer edinmektedir. Dolayısıyla Öğütücü Bilyeli Değirmene ait kaplar içerisindeki toz karışımları ile bilyelerin hacimleri toplam kap hacminin $3/4$ ' ünü geçmemesi gerekmektedir. Belirtilen hacim oranının aşılması sonucunda homojen bir karışım işleminin gerçekleşmeyeceği ve bu olumsuz durumun oluşması yapılacak analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilecektir.



Şekil 3.7: Planet Karıştırıcının kaplarına konulan toz karışımları

Dolayısıyla Şekil 3.7 de gösterildiği üzere, homojen bir karışımın olması ve toplam kap hacminin $3/4$ ' ünü geçmemesi gerektiği için toplam toz miktarı 50 gram olacak şekilde her bir kaba Al, SiC ve yağlayıcı olarak kullanılan Çinko Stearat tozları konulmuştur. Toplamda Öğütücü Bilyalı Değirmene ait dört adet kaptan 200 gram toz üretilmiştir. Üç saat boyunca Al, SiC ve yağlayıcı olarak kullanılan Çinko Stearat tozlarının homojen karıştırılması sonucu elde edilen toz karışımları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Karıştırma sonrası elde edilen homojen dağıtılmış toz karışımları

Deneyisel çalışmanın doğruluğunun yüksek olması için Öğütücü Bilyalı Değirmende karıştırılan tozlar oksijen veya diğer çevresel gazlardan etkilenmemesi için her bir kırıının imal edileceği miktarda toz üretilmiştir. Böylece ilk toz karışımından 200 gram elde edilmiş ve 200 gram toz miktarına bağlı kırıiler üretilmiştir. Tozlar bittikten sonra tekrardan toz üretimine devam edilmiştir.

3.6 Tozların Kalıp İçerisinde Sıkıştırılması

Kırıilerin üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin önemli kısımlarından biride tozların sıkıştırılması işlemidir. Bu toz karışımları Şekil 3.9'da gösterilen kalıp kullanımına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Üretim süresince kalıp boşluğu ve zımbalar kalıp yağlayıcı (Sumidera 460) ile yağlanmıştır. Kalıp yağlayıcının başlıca amaçları kırıileri oluşturan toz karışımlarının daha düzgün sıkışması, dişi ve erkek kalıp çalışma süresince yüzeylerde meydana gelebilecek sürtünmelerin en aza indirilmesi, kırış numunelerinin kalıp boşluğundan çıkartılması esnasında parçalanma ve yüzeylerde bozulmalar meydana gelmesinin önlenmesidir.



Şekil 3.9: İmal edilen kalıp

Hazırlanan toz karışımının kalıp içerisinde sıkıştırma işlemi Şekil 3.10'da gösterilen hidrolik pres vasıtası ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10: Hidrolik pres

Üretilen tozları sıkıştırma işleminde öncelikle üst zimba yukarı doğru çekilir. Bu sırada kalıp boşluğu ve zimba kalıp yağlayıcı (Sumidera 460) ile yağlanır. Daha sonra öğütücü bilyeli değirmende karıştırılan toz karışımı kalıp boşluğuna hassas bir şekilde doldurulur. Bu doldurma işlemi homojen kiriş numuneleri için tek tabaka olarak, FD tabakalı kirişlerde ise aksenel yönde kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Kalıp boşluğu toz karışımı ile doldurulduktan sonra üst zimba aşağı doğru indirilerek sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu sıkıştırma işleminde üst zimbanın kalıp boşluğunda bulunan toz karışımına uyguladığı basınç yaklaşık olarak 450 MPa'dır. Bu işlem Şekil 3.11'de gösterildiği gibi oda sıcaklığında 60 saniye boyunca devam etmiştir.



Şekil 3.11: Tozların hidrolik pres ile sıkıştırılması

Bu süre bittikten sonra üst zimba yukarı doğru çekilir ve alt zimbanın itici bir kuvvet uygulamasına bağlı olarak sıkıştırma sonrası üretilen numune kalıp boşluğundan çıkartılır.

Sıkıştırma işlemi sonrası elde edilen homojen ve aksel yönde tabakalı FD kiriş numunesinin almış olduğu son hali Şekil 3.12’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.12: Sıkıştırma sonrasında elde edilen kiriş numunesi

3.7 Sinterleme İşlemi

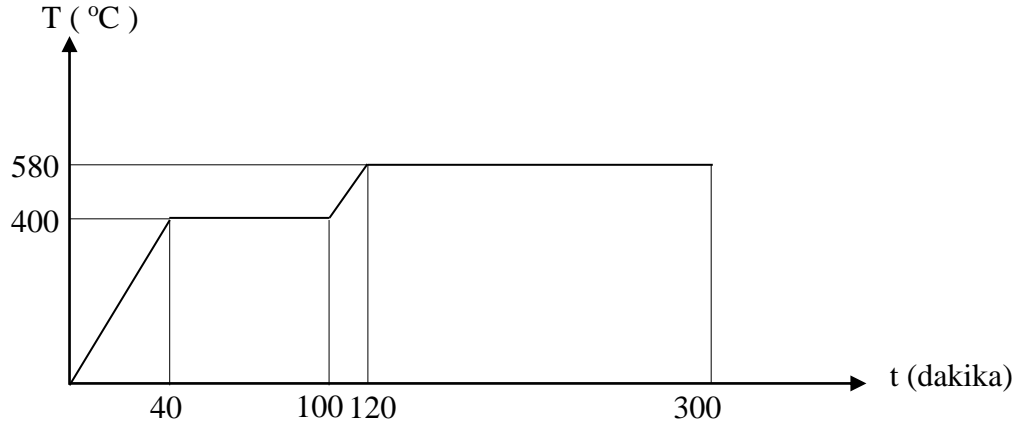
Üretilen toz karışımlarının yaklaşık 450MPa basınç altında 60 saniye boyunca oda sıcaklığında preslenmesi sonucu elde edilen homojen ve aksel yönde tabakalı FD kırıntı numunelerinin mukavemet özelliklerini arttırmak için sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işleminin gerçekleştiği Argon Gaz Atmosferli Fırın Şekil 3.13 de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.13: Argon gaz atmosferli yatay tüp fırını

Tozların sinterlenmeden sadece pres basıncına bağlı sıkıştırılması yeterli mekanik bağlanmayı meydana getirmede deneysel çalışmalar esnasında gözlemlenmiştir. Sinterleme işlemine tabi olmayan numunelerde zayıf bir bağlanma meydana gelmekte ve mukavemetleri çok düşük olmaktadır. Sinterleme işlemi olmaksızın üretilen kırıntı numunelerinde sadece tozların bir arada durduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla uygulanan en küçük bir dış kuvvet, kırıntı numunelerinin toz halinde dağılmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden sinterleme işlemi ile tozların atomları arasında güçlü bağlar oluşturulması ve gözenekli zayıf bağlarla bağlanmış yapı yerine mümkün olduğunca gözeneksiz homojen yapıya benzer bir yapı meydana getirilmeye çalışılmıştır. Sinterleme işlemi malzemenin ergime sıcaklığı göz önüne alınarak yapılmıştır. Dolayısıyla üretilen kırıntılara uygulanacak Sinterleme işlemi, kırıntı numunelerini oluşturan Al ergime sıcaklığının altında bir sıcaklık değerinde gerçekleştirilmiştir. Presleme sonrası kırıntı numunelerine uygulanan

Sinterleme işleminin zamana bağlı sıcaklık değişimi Şekil 3.14’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14: Sinterleme işlemi sürecinde fırın sıcaklığının zamana bağlı değişimi

Şekil 3.14 de görüldüğü üzere sinterleme sıcaklığı Al ergime sıcaklığının altındadır. Ayrıca sinterleme süresince kiriş numunelerinin içerisinde bulunan Çinko Stearat 335 °C civarında buharlaşarak kiriş numunesi bünyesinden tamamen atılır. Sinterleme işlemi Argon gaz atmosferli yatay tüp fırınında mevcut bulunan numunelere 40 dakika boyunca sıcaklık 400 °C ulaşmaya kadar sıcaklık artışına tabi tutulmuştur. Sıcaklık değişimi bu süre boyunca düzenli artarak devam etmiştir. Bu aşamada kiriş numunelerinin içerisinde bulunan Çinko Stearat 335 °C civarında buharlaşarak kiriş numunesi bünyesinden tamamen atılacağı düşünülmüştür. Sıcaklık değeri 400 °C ulaştığı zaman Argon gaz atmosferli yatay tüp fırınındaki numuneler 60 dakika boyunca 400 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Bu aşamadan sonra sıcaklık değeri tekrar arttırılmış ve 20 dakikada 400 °C den 580 °C sıcaklığa ulaşılacak şekilde sıcaklık değişimi meydana getirilmiştir. Numuneler 580 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra 180 dakika boyunca sıcaklık 580 °C sabit kalmak suretiyle Argon gaz atmosferli yatay tüp fırını içerisinde bekletilmiştir. Sinterleme için ayrılan yaklaşık toplam süre 300 dakikadır. Numuneler Argon gaz atmosferli yatay tüp fırını içerisinde birbiri ile temas etmeyecek ve her bir numuneye homojen sıcaklık dağılımı uygulanacak şekilde yerleştirme yapılmıştır. Böylece numuneler içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımına bağlı olarak malzeme içerisinde oluşacak yeni bağlar, her bir numune için eşit doğrulukta olacağı amaçlanmıştır. Şekil 3.15’de Sinterleme öncesi

kiriş numunelerinin Argon gaz atmosferli yatay tüp fırınına yerleştirilme düzeni gösterilmektedir.



Şekil 3.15: Tüp fırına konulan numuneler

Kiriş numunelerine Sinterleme işlemi uygulanmadan önce oksitlenmenin oluşmasını engellemek için sıcaklık arttırılmadan fırının içerisinde mevcut hava vakum pompası ile çekilmiş ve Sinterleme esnasında fırın içerisine 50 ml/d sabit debide düzenli bir akış olacak şekilde Argon Gazı verilmiştir. Argon gazı sayesinde oksitlenmenin önlenmesi amaçlanmıştır. Sinterleme sonrası üretilen homojen kirişler Şekil 3.16'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.16: Farklı karışım oranları kullanılarak üretilen homojen kirişler

Üretilen aksel yönünde FD tabakalı kiriş numuneleri Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Aksel yönünde tabakalı FD kirişler

FD kirişlerin üretimi için toz karışımlarının kalıp boşluğuna aksel yönünde tabakalı olarak yerleştirilmesinde kullanılan aparat Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18: Kirişleri derecelendirmek için kullanılan aparat

4. DENEYSEL ANALİZ

Çalışmanın bu bölümünde, ağırlıkça farklı %SiC içeriğine sahip numunelerin Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerlerini belirlemek için Tablo 3.2’de gösterilen homojen kiriş numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur. Bunun birlikte her bir tabakaya ait yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. FD kirişlerin komşu tabakaları arasında ağırlıkça %SiC miktarındaki ani ve homojen artışa bağlı olarak meydana gelen çatlak oluşumları ve üretim sırasında kalıp temas yüzeylerinde meydana gelen deformasyonlar SEM ile gözlemlenmiştir. Sozhamannan ve Prabu (2009) yaptıkları çalışmada metal matris kompozitlerin mekanik özelliklerinin gelişmesinde ara yüzün önemli bir faktör olacağından bahsetmişlerdir [217]. Bunun yanı sıra Tablo 3.2’de gösterilen kiriş numunelerinde SiC partiküllerinin dağılımı, büyüklüğü, şekli ve tabaka yüzeylerinde meydana gelen gözenekli yapılar optik mikroskop ile gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %SiC miktarındaki artışın tabakalarda meydana getirdiği sertlik değerleri Brinell sertlik test yöntemi ile analiz edilmiştir. Son olarak homojen ve eksenel yönde FD kiriş numunelerinin burkulma davranışı ve serbest titreşim analizi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalar bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.1 Çekme Deneyi

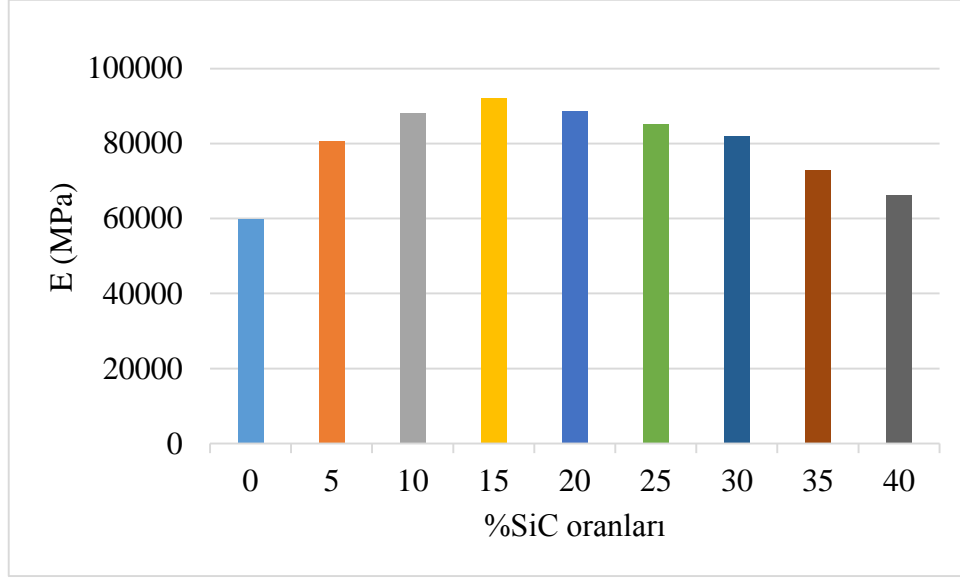
Çekme deneyinin başlıca amaçlarından biri malzemelerin kopma dayanımını belirlemektir. Deneye tabi tutulacak numune iki uçundan sabitlenerek çekmeye maruz bırakılır. Çekme süresince elde edilen veriler kaydedilir. Bu veriler sayesinde malzemede meydana gelen çekme gerilme değeri, maksimum uzama miktarı ve kesit alanındaki daralma ölçülür. Analiz sonrası cihazın vermiş olduğu sonuçlar yardımı ile malzemenin Elastisite Modül değeri hesaplanır. Dolayısıyla bu çalışmada eksenel yönde tabakalı olarak FD kiriş numunelerinin her bir tabakasına ait elastisite modül değerlerini belirleyebilmek için ağırlıkça farklı %SiC ve %Al tozu içeren homojen kiriş numuneleri çekme deneyine tabi tutulmuştur. Homojen kiriş numunelerin çekme deneyi Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde her bir tabaka için üç adet homojen kiriş numunesi

kullanılmıştır. Üç numuneden elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerleri bulunmuştur. Elde edilen Elastisite Modül değerleri, homojen ve eksenel yönde tabakalı olarak FD kirişlerin burkulma ve serbest titreşim hesapları için sayısal analiz bölümünde kullanılmıştır. Şekil 4.1 de Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerlerini bulmak için kullanılan Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı gösterilmiştir.

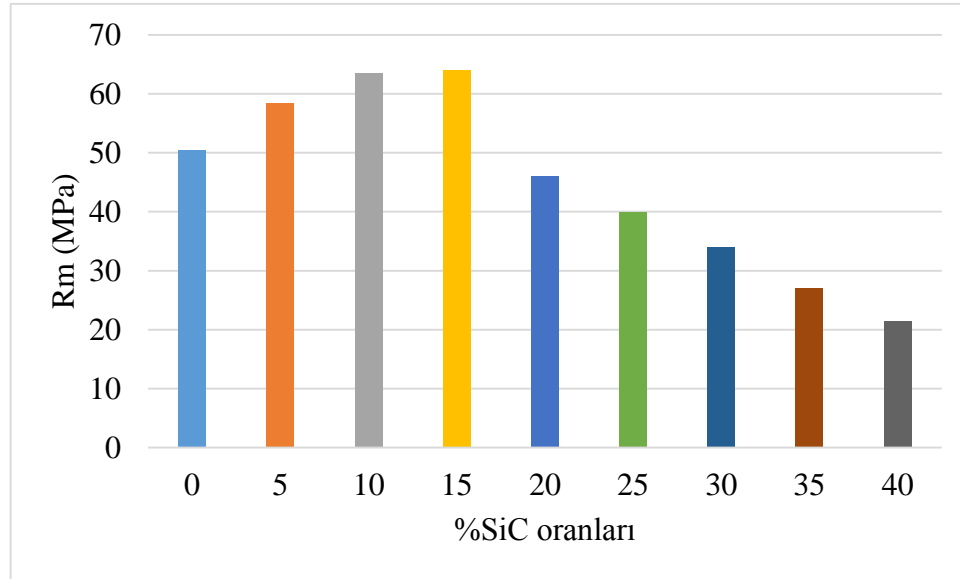


Şekil 4.1: Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı

Çekme kuvveti oda sıcaklığında Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı ile numunelerde kopma meydana gelene kadar 0.5mm/dak. hız ile uygulanmıştır. Numunelere uygulanan işlem süresince yük, uzama, gerilme ve şekil değiştirme gibi deneysel veriler kaydedilmiş ve bu deneysel verilere göre her bir numune için Elastisite Modülü değeri tespit edilmiştir. Homojen kirişler için ağırlıkça %SiC oranının değişimine bağlı olarak elde edilen Elastisite Modülü (E) ve Maksimum Çekme Gerilmesi (Rm) değerleri sırası ile Şekil 4.2 ve 4.3’ de gösterilmiştir. Örnek olarak saf Al ve %5 SiC içerikli numunelere ait çekme deney grafikleri EK A’da verilmiştir.



Şekil 4.2: Homojen kirişlerin Elastisite Modülü değerleri



Şekil 4.3: Homojen kirişlerin Maksimum Çekme Gerilme değerleri

Şekil 4.2 ve 4.3’ de gösterilen grafikler incelendiği zaman Elastisite Modülün ve Maksimum Çekme Gerilmesi değerleri %15 SiC oranına kadar artış göstermekte ancak %15 SiC oranından sonrası için bu artış değişerek düşüşe geçmektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında zaman, Neelima ve diğ. (2011) Al-SiC sistemleri içeren numuneler üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında kütle ağırlıkça farklı (%5, %10, %15 ve %20) %SiC oranları içeren numuneleri çekme gerilme deneyine tabi

tutmuşlar ve %15'e kadar SiC içeren numunelerde çekme gerilme değeri artış göstermiş ve bu değerden daha fazla %SiC barındıran malzemelerde çekme gerilme değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Çalışmaları sonucunda en yüksek çekme gerilme değerini %15 SiC oranı içeren numunede tespit edilmiştir [218]. Neelima ve diğ. (2011) yapmış oldukları çalışma, bu çalışmada yer alan çekme gerilme test sonucunun %15 SiC oranından sonra malzemelerde meydana gelen çekme gerilme değerlerindeki düşüşün doğruluğunu göstermiştir. Başka bir benzer çalışmada ise, El-Daly ve diğ. (2012) %100Al, %95Al-%5SiC ve %90Al-%10SiC içeren malzemeler ele alınmış ve %SiC miktarındaki artışa bağlı olarak elastisite ve kayma modül değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Maksimum değer %90Al-%10SiC malzemesinde ulaşılrken minimum değer %100Al malzemesinde elde edilmiştir [219]. Ayrıca başka konularda yapılan çalışmalara bakılınca %SiC oranları genellikle %20 değerine kadar kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir; Gupta ve Loke (2000) kullandıkları üretim tekniğinde %15-%20 arası SiC kullanımına bağlı başarılı bir derecelendirme elde etmişlerdir [220]. Benzer bir şekilde Nai ve Gupta (2002) ele aldıkları Al/SiC içerikli FDM yapıyı ağırlıkça %18 SiC oranının altındaki oranlarda başarılı bir şekilde sentezleme gerçekleştirmişlerdir [221]. Bu çalışmalardan da desteklenebileceği üzere %SiC oranındaki artış belli bir seviyeden sonra olumsuz etkenler meydana getirmektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın deneysel ve sayısal analiz kısımlarında %15'den yüksek SiC oranına sahip kirişler göz önüne alınmayıp işleme tabi tutulmamıştır.

4.2 Yoğunluk Hesapları

Sayısal analiz bölümünde, kirişlere ait temel frekans değerlerini ANSYS sonlu elemanlar tabanlı program yardımı ile analiz edebilmek için eksenel yönde FD tabakalı kirişleri oluşturan her bir tabakanın yoğunluk değerlerini bulmak gerekmektedir. Her bir tabakaya ait deneysel yoğunluk değerlerini bulabilmek için ağırlıkça farklı %SiC içeren homojen kirişler hassas terazi ile ağırlıkları tartılmış ve kumpas yardımı ile hacimleri ölçülmüştür. Ağırlık ve hacimleri ölçülen numuneler $d=m/V$ formülüne bağlı olarak yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu formülde d yoğunluğu, m kütleyi ve V hacmi ifade etmektedir. Teorik yoğunluk hesaplarında ise Al yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ ve SiC yoğunluğu $3,21 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Deneysel ve

teorik hesaplamalar sonucu elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tablodan görüleceği üzere %SiC miktarındaki artışa bağlı olarak deneysel yoğunluk değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Dolayısıyla % SiC miktarındaki artışa bağlı olarak malzeme içerisindeki gözenekliliğin arttığı görülmüştür.

Tablo 4.1: %SiC oranlarına bağlı deneysel ve teorik yoğunluk değerleri

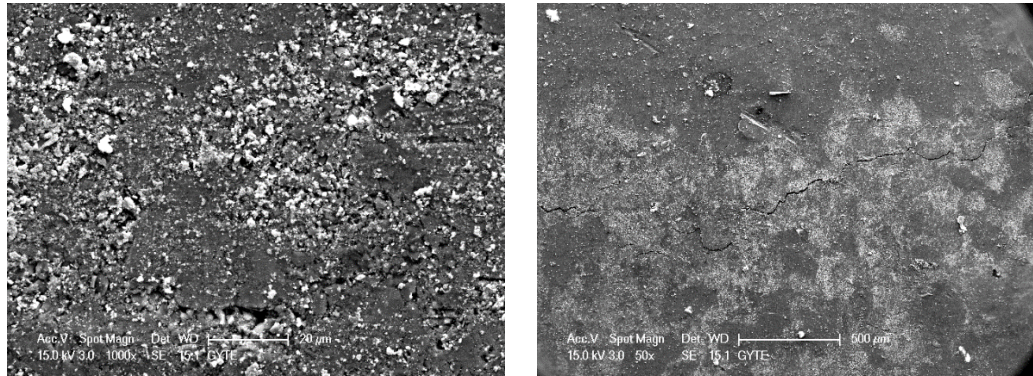
% SiC	Deneysel (g/cm ³)	Teorik (g/cm ³)	Gözeneklilik (%)
0	2,6554	2,7000	1,6519
5	2,6209	2,7255	3,8378
10	2,6152	2,7510	4,9364
15	2,5944	2,7765	6,5586
20	2,5624	2,8020	8,5510
25	2,5438	2,8275	10,0336
30	2,5250	2,8530	11,4967
35	2,4759	2,8785	13,9865
40	2,4464	2,9040	15,7576

Yapılan çalışmalara bakıldığında zaman Bhattacharyya ve diğ. (2008) çalışmalarında ele aldıkları sistemlerin deneysel ve teorik yoğunluklarının farklı çıktığını belirtmişlerdir [211]. Nikanorov ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada ağırlıkça %SiC miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerinde düşüşün meydana geldiğini bulmuşlardır [222]. Benzer bir şekilde Nai ve Gupta (2002) yaptıkları çalışmada ele aldıkları %SiC miktarına bağlı olarak, biriktirme(depozisyon) yönünde SiC partiküllerindeki ağırlıkça yüzde artışın gözeneklilik seviyesini arttıracak ve gözeneklilik seviyesindeki artışın yoğunluk değerlerinde düşüşün oluşmasına atfedilebileceğini belirtmişlerdir [221]. Benzer bir şekilde Gupta ve Loke (2000) yaptıkları çalışmada Al-SiC sistemlerine bağlı FDM üretmişler ve üretim sonucunda biriktirme (depozisyon) yönünde ağırlıkça %SiC partiküllerindeki artışın malzemenin yoğunluk değerinde düşüşe neden olduğunu saptamışlardır [220]. Izadi ve diğ. (2013) farklı %SiC (%4, %8, %16) hacim oranlarına sahip Al/SiC kompozitlerin teorik ve ölçüm sonucuna bağlı yoğunluk değerlerini karşılaştırmışlar ve ölçüm sonucu ortaya çıkan yoğunluk değeri %SiC hacim oranındaki artışa bağlı olarak azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir [223]. Başka bir çalışmada Zakeri ve Vakili-Ahrari Rudi (2013)

çalışmalarının bir bölümünde, SiC kullanımına bağlı üç farklı üretim yöntemini ele almışlar ve bu üretim yöntemlerinin bağlı yoğunluğa etkilerini incelemişlerdir. Ele aldıkları yöntemlerden biri olan toz metalurji tekniği ile üretilen malzemelerde gözenek oluşumuna rastlamışlardır [224]. Dolayısıyla yapılan çalışmalar ile bu çalışma karşılaştırıldığında elde edilen deneysel yoğunluk değerlerindeki düşmenin normal olabileceği desteklenmiştir. Sonuç olarak yoğunluk değerlerindeki düşüşün ana sebeplerinden bazıları üretim yöntemi ve malzeme içerisinde mevcut bulunan SiC partiküllerindeki artışa bağlı olarak üretim sonrası meydana gelen gözenekli yapının oluşmasıdır.

4.3 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi

Analizlerde kullanılan kirişlerin mikro yapı özellikleri burkulma ve serbest titreşim analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilecektir. Ayyar ve Chawla (2006) herhangi bir malzemenin mekanik davranışının malzemenin mikro yapısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [225]. Dolayısıyla çalışmanın bu kısmında FD kirişleri oluşturan tabakaların birleşim yüzeyleri Philips XL 30 SFEG marka yüksek çözünürlüklü SEM ile incelenmiştir. Analiz için komşu tabakalar arası %SiC içeriğinde yumuşak düzenli geçiş (%5, %10, %15, %20, %25) ve ani düzenli geçiş (%0, %20, %40, %20, %0) olan FD kirişler seçilmiştir. Böylelikle tabakalar arasında ağırlıkça %SiC içerik artışının çatlak oluşumuna olan etkisi incelenmek istenmiştir. Şekil 4.4a'da SiC partiküllerinin kümeleşmesi ve Şekil 4.4b'de %20SiC-%40SiC içerikli yüzeylerde ani geçişe bağlı oluşan çatlaklar gösterilmiştir.

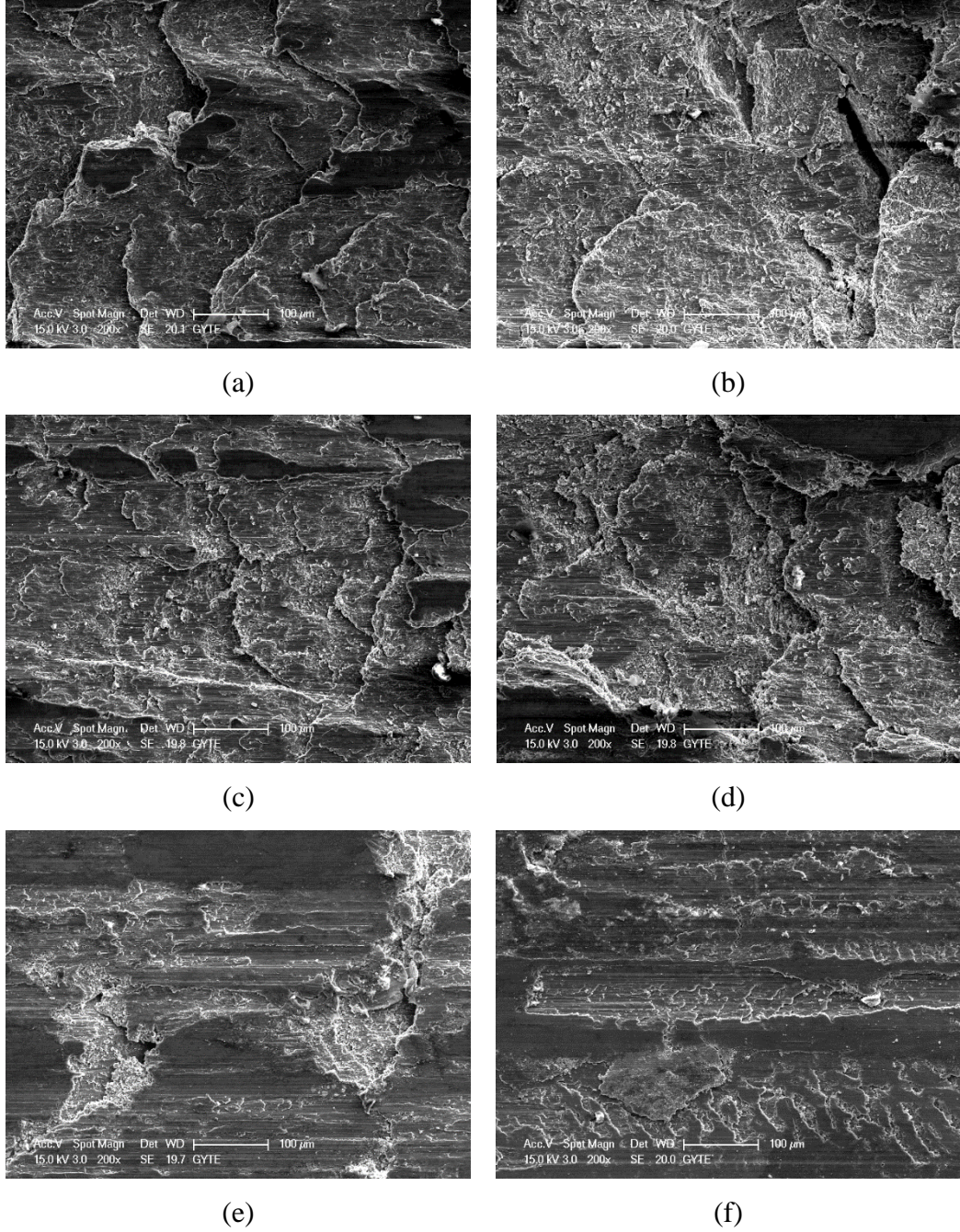


(a)

(b)

Şekil 4.4: SEM görüntüleri (a) SiC partikül kümeleşmesi (b) çatlaklar

Şekil 4.4a'da görüldüğü üzere SiC partiküllerinin kümeleşmesi SiC içeriğinin artışına bağlı olarak gerçekleşmiştir. Zakaria (2014) SiC hacim oranındaki artışına bağlı olarak kümeleşmenin arttığını açıklamışlardır [226]. Bu benzer çalışma tespit edilen bulguyu destekler niteliktedir. Bunun yanı sıra Şekil 4.5'de FD kirişlerin (Numune 16 ve Numune 17) komşu tabaka birleşim yüzeylerinden alınan görüntüler verilmiştir. Çatlak oluşumu ani SiC içerik değişimine bağlı olarak gerçekleşmiştir.

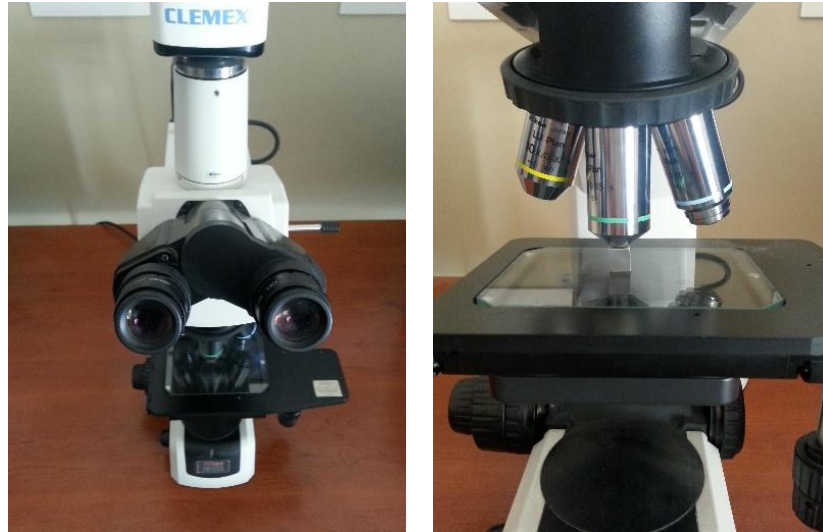


Şekil 4.5: Tabakalar arası SEM görüntüleri (a) %5-%10 SiC, (b) %10-%15 SiC, (c) %15-%20 SiC, (d) %20-%25 SiC, (e) %20-%0 SiC, (f) %20-%40 SiC

İncelenen yüzeyler, üretim sonucu kiriş ve kalıp temas alanları olan yan yüzeylerden gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla üretim sonucu kalıp boşluğundan kirişlerin çıkması ile birlikte yüzeyde sürtünmelerde meydana gelmiştir. Yapılan SEM analiz görüntülerinde bu sürtünen yüzeylerde meydana gelen deformasyon açık bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte FD kirişin (Numune 17) komşu tabaka birleşim yüzeylerinde ani SiC içerik artışına bağlı meydana gelen çatlak ve gözenekli yapılarda Şekil 4.5(e) ve Şekil 4.5(f)'de gösterilmiştir. Meydana gelen çatlaklar, gözenekli yapılar ve sürtünme sonrası oluşan kiriş yüzey deformasyonları kirişlerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecektir. Yapılan çalışmalara bakıldığı zaman, Chennakesava Reddy ve Zitoun (2010) partikül takviyeli herhangi bir metal matris kompozitin mekanik özellikleri partikül kusurları, partikül dağılımı, yüzey bozuklukları, partikül boyutu, partikül-matris yapışması gibi etkenlere bağlı olduğunu açıklamışlardır [227]. SEM analizi sonucunda aksenal yönde tabakalı olarak FD kirişleri oluşturan komşu tabakaların birleşim yüzeylerinde ani %SiC içerik artışına bağlı olarak çatlak ve gözenekli yapılar oluşmuştur. Gözenekli yapıların oluşmasında birçok etken rol oynayabilmektedir. Bu etkenlerden bazılarında yapılan çalışmalar üzerinden bakılacak olursa, Zakeri ve Vakili-Ahrari Rudi (2013) gözenek oluşumunda malzeme üretim yönteminin etken bir faktör olduğunu belirtmişlerdir [224]. Bunun yanı sıra gözenekli yapılar mekanik özellikleri etkileyebileceği gibi malzeme içerisinde oluşan çatlaklarda etkili bir faktör olabilmektedir. Myriounis ve diğ. (2010) yapmış oldukları çalışmada partikül takviyeli metal matris kompozitlerin kırılma özelliklerini içeren birkaç faktörden bahsetmişlerdir. Bu faktörler takviye hacim oranı, parçacık arası boşluk ve parçacık büyüklüğüdür [228]. Başka bir çalışmada Ayyar ve Chawla (2006) partikül takviyeli kompozitlerde partikül dağılımı, boyutu, morfolojisi ve oryantasyonu çatlak büyümesinde önemli bir yere sahip olduğunu belirtmişlerdir [225]. Mason ve Ritchie (1997) matris içerisinde partikül dağılımı ve morfolojisi yorulma çatlak büyümesinde önemli bir rol oynadığından bahsetmişlerdir [229]. Yapılan çalışmalardan anlaşılacağı üzere çatlak oluşumunda birçok etmen rol oynamaktadır. Bu etmenlerin etkisinde dahil edilerek ortaya çıkan gözenek ve çatlak yapılar aksenal yönde tabakalı olarak FD kısa kirişlerin burkulma davranışı ile serbest titreşim analizi sonuçlarını etkileyebilecektir.

4.4 Optik Mikroskop Analizi

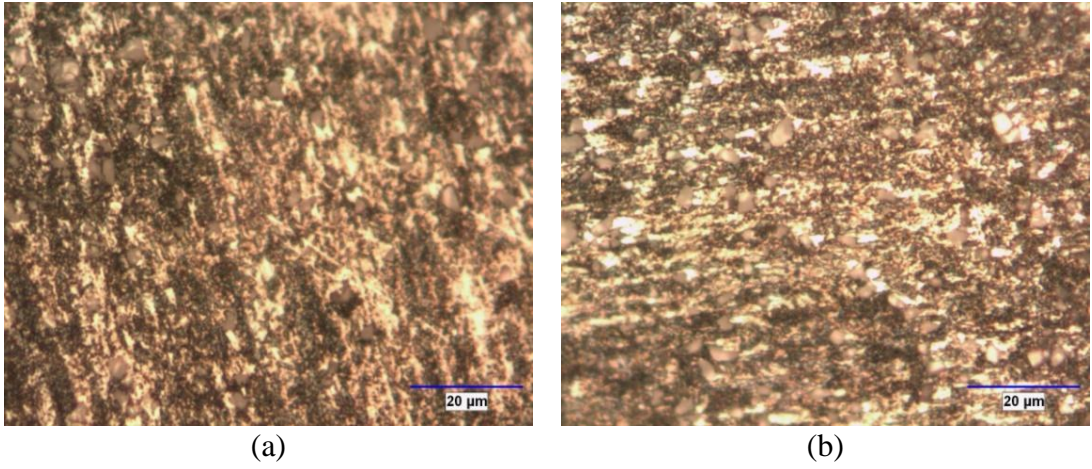
Al/SiC malzemelerinde SiC partiküllerinin dağılımını ve gözenekli yapı oluşumunu incelemek kirlişlerin burkulma davranışı ve serbest titreşim analizi için önem arz etmektedir. Dolayısıyla aksenel yönde tabakalı olarak FD kirlişlerin her bir tabakasinda mevcut bulunan SiC parçacıkları ve üretim sonrasında tabakalarda meydana gelen gözenekli yapılar optik mikroskop ile farklı ölçeklerde incelenmiştir. Her bir numune analiz öncesi yüzey temizliği yapılmış ve sonrasında silisyum karbür kağıt su zımparaları yardımı ile parlatılmıştır. Numune yüzeylerini parlatma işlemi için sırası ile 320, 1100, 2400 grits zımparalar suyla temas altında kullanılmıştır. Parlatılan numune yüzeyleri Şekil 4.6'da gösterilen Optik Mikroskop kullanımına bağlı olarak numune yüzeylerinde partikül dağılımları ve meydana gelen gözenekli yapı oluşumları analiz edilmiştir. Görüntüleme 200x büyütme oranı ile tabaka yüzeyinde oluşan gözenekli yapılar ve 1000x büyütme oranı ile SiC parçacıklarının dağılımını ve şekli gözlemlenmiştir.



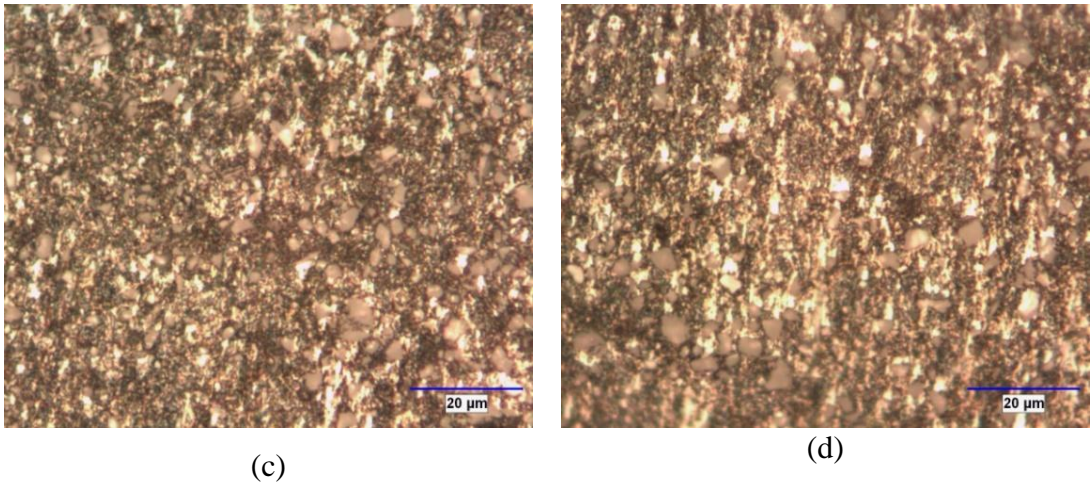
Şekil 4.6: Optik Mikroskop

Ağırlıkça farklı %SiC içeriğine sahip her bir numunenin malzeme içerisindeki partikülleri dağılımını Optik Mikroskop analizi sonucunda Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'da görüldüğü üzere incelenmiştir. İnceleme sonucunda tabakalar üzerinde mevcut bulunan SiC partikülleri yaklaşık olarak 2–6 μm aralığında ve genel olarak keskin kenarlara sahip partiküller şeklinde gözlemlenmiştir. Ayyar ve Chawla (2006) yaptıkları çalışmada keskin partikül kenarları stres konsantrasyon noktaları

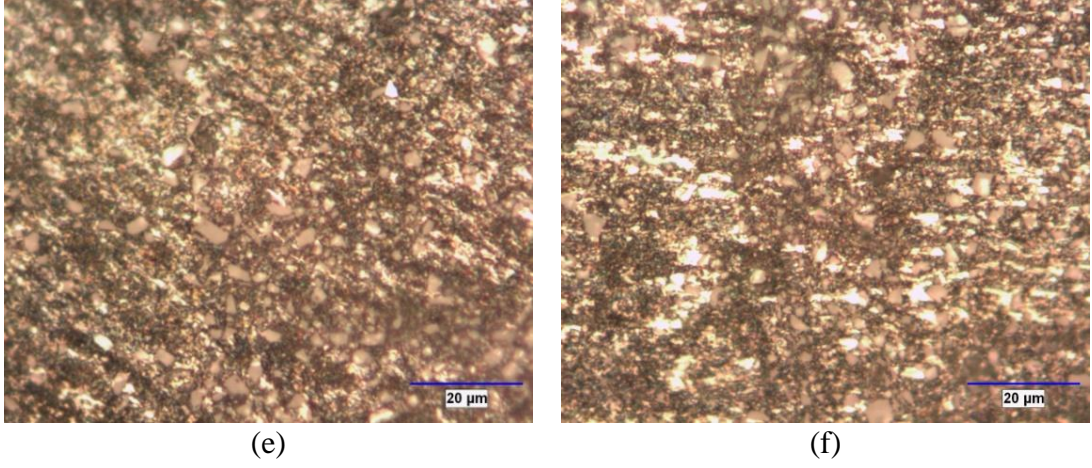
olduğunu açıklamışlardır [225]. Başka bir çalışmada Zakeri ve Vakili-Ahrari Rudi (2013) kullanılan yöntemle ilgili olarak SiC partiküllerinin boyutunun ve şeklinin malzeme mikroyapısında etkili olduğunu bulmuşlardır. Küçük parçacık boyutlu yüksek SiC içerikli malzemelerde akma sınırı, azami gerilme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerde artış yakalanabileceğini belirtmişlerdir [224]. Dolayısıyla kırıntı numunelerinde mevcut SiC partiküllerinin şekil özellikleri aksel yönde tabakalı olarak FD kırıntıların stres konsantrasyonu ve mekanik özellikleri bakımından önem arz etmektedir.



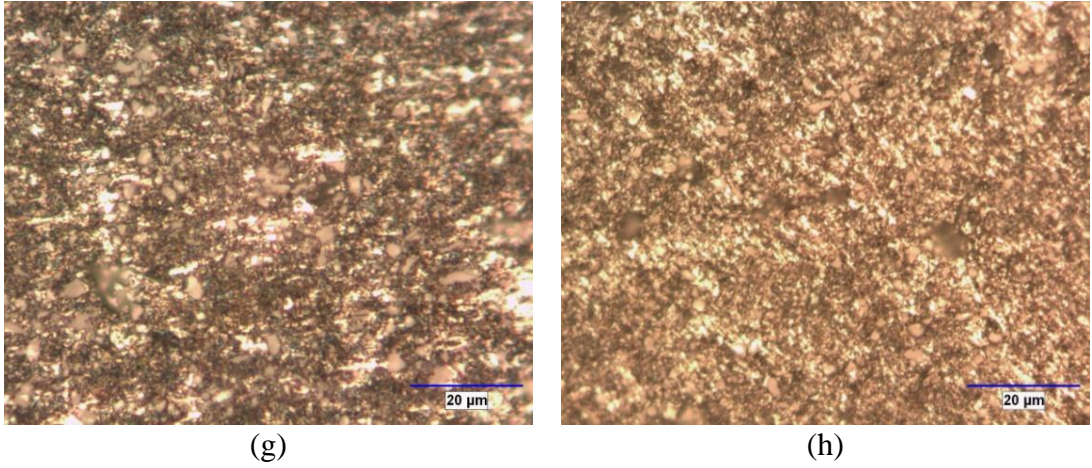
Şekil 4.7: (a) %5 SiC ve (b) %10 içerikli tabakalardaki SiC partikül görüntüleri



Şekil 4.8: (c) %15 SiC ve (d) %20 SiC içerikli tabakalardaki partikül görüntüleri

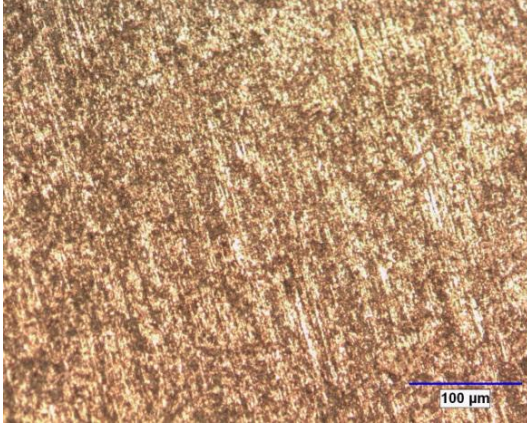


Şekil 4.9: (e) %25 SiC ve (f) %30 SiC içerikli tabakalardaki partikül görüntüleri

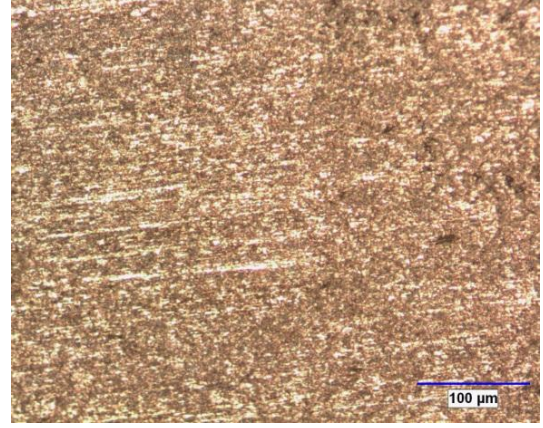


Şekil 4.10: (g) %35 SiC ve (h) %40 içerikli tabakalardaki SiC partikül görüntüleri

200x büyütme oranına bağlı Optik Mikroskop analizi sonucunda toz metarluji yöntemi ile üretilen kiriş numuneleri üzerinde gözenekli yapı oluşumuna rastlanmıştır. Oluşan bu gözenekli yapılardaki artış ve büyüme %SiC içerik miktarındaki artışa bağlı olarak gerçekleşmiştir. Nai ve Gupta (2002) yaptıkları çalışmada SiC parçacıklarının malzeme içerisinde gözenekli yapının oluşmasında etkili olabileceğini belirtmişlerdir [221]. Dolayısıyla bu çalışmada tespit edilen sonucu destekler niteliktedir. Üretim sonrası numune yüzeylerinde meydana gelen gözenekli yapılar Şekil 4.11, 4.12, 4.13 ve 4.14’de gösterildiği gibidir.

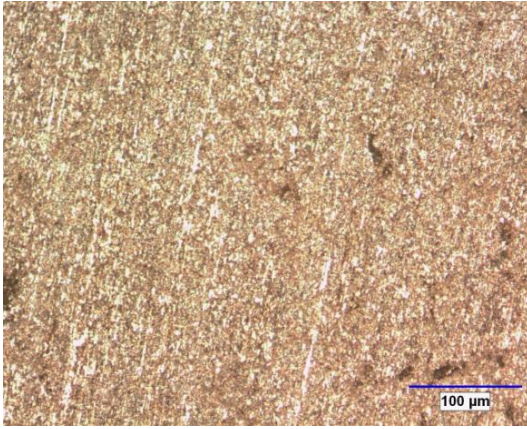


(a)

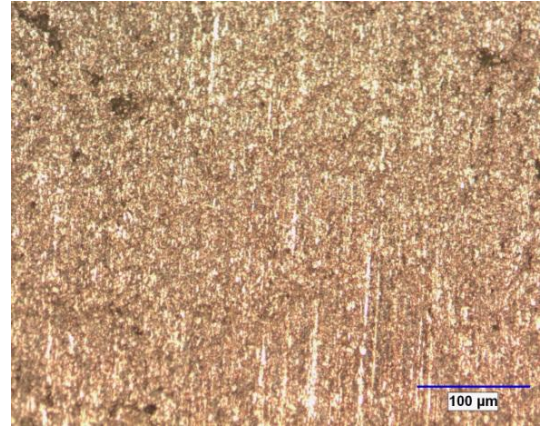


(b)

Şekil 4.11: (a) %5 SiC ve (b) %10 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar

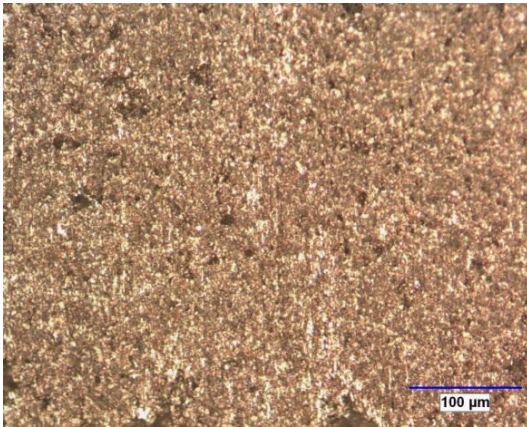


(c)

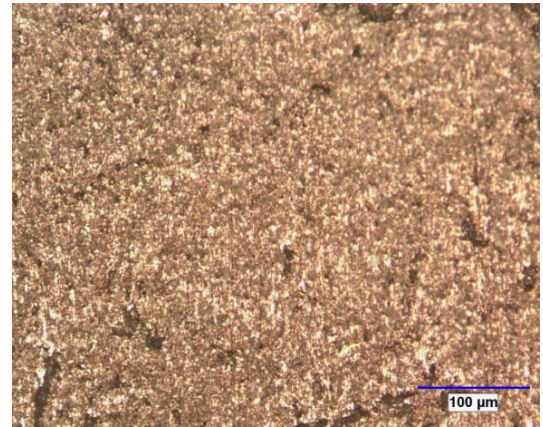


(d)

Şekil 4.12: (c) %15 SiC ve (d) %20 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar

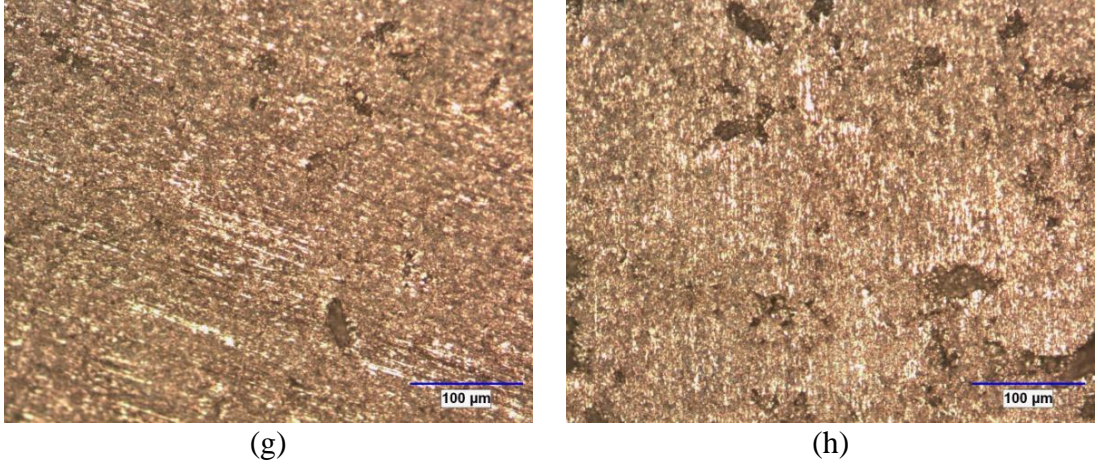


(e)



(f)

Şekil 4.13: (e) %25 SiC ve (f) %30 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar



Şekil 4.14: (g) %35 SiC ve (h) %40 SiC içerikli tabakalardaki gözenekli yapılar

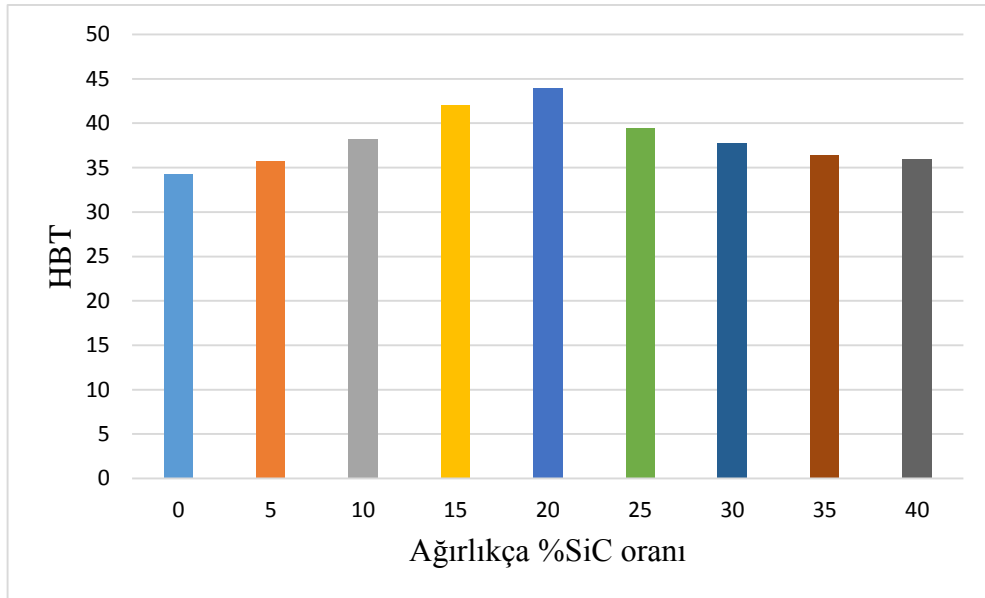
4.5 Sertlik Analizi

Farklı tabakalardan oluşan aksenal yönde FD kısa kirişlerin her bir tabakasına ait sertlik ölçüm testleri MEBA MHT-150RB model sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile ağırlıkça %SiC miktarındaki artışa bağlı olarak tabakalarda meydana gelen sertlik değişimleri analiz edilmiştir. Sertlik ölçümlerini gerçekleştiren cihaz Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Sertlik ölçüm cihazı

Analiz edilecek tüm numuneler optik mikroskop analizinde olduğu gibi sırasıyla 320, 1100 ve 2400 grits zımparalar ile sabit akışlı su altında yüzeyleri parlatılmıştır. Böylelikle analiz süresince numune yüzeyinde sertlik ölçümleri etkileyecek etkenlerin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra numunelerin bazı bölgelerinde SiC partiküllerinin kümeleşmesi sertlik ölçüm değerlerinin farklı çıkmasına sebep olabilecektir. Dolayısıyla yüzeyi parlatılmış her bir numune üzerinden farklı eşit noktalar belirlenerek toplamda 10 adet Brinell sertlik ölçüm testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ağırlıkça farklı %SiC içeren tabakaların Brinell sertlik değerleri belirlenmiştir. Analiz sırasında 2,5 mm çaplı yapay küresel elmas uç ve 62,5 kg uygulama yükü kullanılmıştır. HBT2.5/62.5 skala şartları altında her bir numuneye ait Brinell sertlik değerleri grafik olarak Şekil 4.16'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.16: Brinell sertlik sonuçları

Analiz sonucunda ağırlıkça % SiC oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. En düşük Brinell sertlik değeri, ağırlıkça %0 SiC içeren Al tabakada gerçekleşirken en yüksek değer ise %20 SiC içeriğine sahip tabakada tespit edilmiştir. Bu orana (%20 SiC) kadar sertlik değerlerinde artış gözlenirken bu değer sonrasında düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Sertliğin %20 SiC oranından sonra düşüş eğilimi göstermesinin başlıca nedenleri malzeme içerisindeki gözenekli yapının artması, partiküllerin birbirleri ile tam birleşmemesi

ve kullanılan üretim yöntemi olarak açıklanabilir. Açık literatürdeki yapılan çalışmalarda Meena ve diğ. (2013) ağırlıkça %SiC (%5, %10, %15 ve %20) miktarındaki artışın Al/SiC metal matris kompozitlerde sertlik değerinde artışa sebep olacağını açıklamışlardır [230]. Nai ve Gupta (2002) SiC partiküllerinin biriktirme yönünde ağırlıkça yüzde artışının mikrosertlik değerinde artışa neden olduğunu açıklamışlardır [221]. El-Kady ve Fathy (2014) çalışmalarında partikül boyutu ve içeriğinin malzeme sertliğine olan etkilerini araştırmışlar ve ağırlıkça %SiC (%0, %5 ve %10) oranının artışına bağlı olarak Vickers sertlik değerinde artış olduğunu tespit etmişlerdir [231]. Kaynak ve Boylu (2006) ele aldıkları çalışmada ağırlıkça % SiC partüküllerindeki (%0, %5, %10 ve %15) artışa bağlı olarak Al/SiC_p kompozitlerinin sertlik değerlerinde artış gerçekleştiğini belirlemişlerdir [232]. El-Daly ve diğ. (2012) çalışmalarında ise, %100Al, %95Al-%5SiC ve %90Al-%10SiC içeriğe sahip numunelerde %SiC miktarının artışına bağlı olarak malzeme sertliğinde artış gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik değeri %90Al-%10SiC içeriğe sahip numunede gözlenirken en düşük sertlik değeri %100Al içeriğine sahip numunede bulunmuştur. Ayrıca yumuşak yapıya sahip Al matris ile sert yapıya sahip SiC arasındaki elastisite modül farkının malzemenin gerilme durumunu etkileyebileceğini belirtmişlerdir [219]. Pal ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmanın bir bölümünde hacim oranı %0, %5, %10, %15 ve %20 kadar değişen SiC parçacık takviyeli Al/SiC kompozit malzemeleri ele almışlar ve SiC miktarının artışına bağlı olarak matris mikro sertlik değerlerinde artış gerçekleştiğini tespit etmişlerdir [233]. Dolayısıyla açık literatürdeki bu çalışmalar, ağırlıkça %20 SiC oranına kadar numunelerde meydana gelen Brinell sertlik değerlerindeki artışı destekler niteliktedir.

4.6 Burkulma ve Titreşim Deneyleri

Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen Maksimum Çekme Gerilme sonuçları, Elastisite Modül değerleri, SEM ve optik mikroskop analiz görüntüleri, yoğunluk hesaplamaları ve sertlik verilerine göre ağırlıkça maksimum %15'e kadar SiC içeren ve tabakalar arası ani geçişlere sahip olmayan simetrik yapıya sahip kiriş numunelerinin kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Dolayısıyla burkulma ve titreşim deneylerinde ağırlıkça %15'e kadar SiC içeren tabakaların farklı konfigürasyonlarından oluşan kiriş numuneleri ele alınmıştır. Bu kiriş

numunelerinden burkulma deneyleri için 30 adet ve titreşim deneyleri içinde 30 adet üretilmiştir. Simetrik yapıya sahip bu kiriş konfigürasyonları Tablo 4. 2’de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2: Kiriş konfigürasyonları

Kiriş Konfigürasyonları	% Al Ağırlık Oranları				
	Tabaka 1	Tabaka 2	Tabaka 3	Tabaka 4	Tabaka 5
Kiriş 1	%100 Al (Homojen Kiriş)				
Kiriş 2	%95 Al (Homojen Kiriş)				
Kiriş 3	%90 Al (Homojen Kiriş)				
Kiriş 4	%85 Al (Homojen Kiriş)				
Kiriş 5	%95 Al	%90 Al	%85 Al	%90 Al	%95 Al
Kiriş 6	%90 Al	%95 Al	%85 Al	%95 Al	%90 Al
Kiriş 7	%85 Al	%90 Al	%95 Al	%90 Al	%85 Al
Kiriş 8	%90 Al	%85 Al	%95 Al	%85 Al	%90 Al
Kiriş 9	%95 Al	%85 Al	%90 Al	%85 Al	%95 Al
Kiriş 10	%85 Al	%95 Al	%90 Al	%95 Al	%85 Al

Deneysel çalışma sonucu üretilen kiriş numuneleri kullanılarak elde edilen üç farklı burkulma yükleri eşitlik (4.1) ile boyutsuz değerlere dönüştürülür. Bu eşitlik, denklem (2.16)’da yer alan E parametresinin E_{ef} parametresi ile yer değiştirmesi sonucu elde edilir.

$$\alpha = \frac{PL^2}{E_{ef}I} \quad (4.1)$$

Bu formülde yer alan α boyutsuz burkulma değerini, P burkulma yükünü, E_{ef} Efektif Elastisite Modülünü, L Kiriş Boyunu ve I Atalet momentini temsil etmektedir. Benzer şekilde serbest titreşim analizi sonucunda elde edilen temel frekans değerleri,

$$\bar{\omega} = \omega L^2 \left(\frac{\rho_{ef}A}{E_{ef}I} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

formülü [234] kullanılarak boyutsuz değerlere dönüştürülmüştür. Burada ω dairesel temel frekans değerini, ρ_{ef} efektif yoğunluğu, E_{ef} efektif elastisite modülünü, I atalet momentini, A kiriş kesit alanını ve L kiriş boyunu ifade etmektedir.

Eksenel yönde FD tabakalı kirişlerin efektif malzeme özellikleri (P_{ef}), Efektif Elastisite Modülü ve kütle yoğunluğunda olduğu gibi kompozit malzemelerin basit karışım kuralına göre,

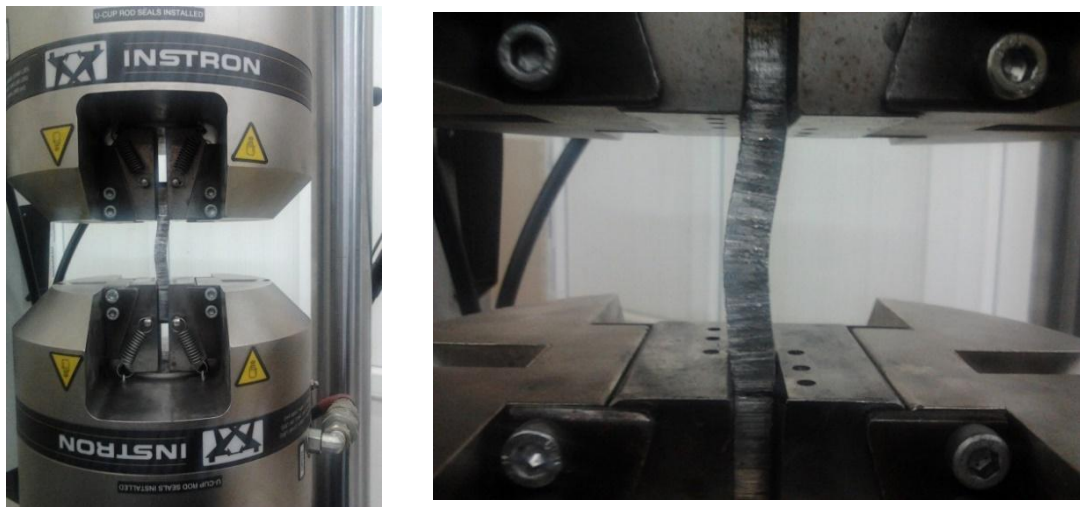
$$P_{ef} = \sum_{i=1} P_i V_{fi} \quad (4.3)$$

formülü [36] kullanılarak hesaplanmıştır. Burada P_i ve V_{fi} sırası ile malzeme özellikleri ve hacim oranlarıdır. Burada malzeme hacim oranları toplamı 1'e eşittir ve eşitlik (4.4)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\sum_{i=1} V_{fi} = 1 \quad (4.4)$$

4.6.1 Burkulma Deneyleri

Üretilen kirişlere ait burkulma deneyleri Şekil 4.17'de gösterilen Instron 8801 serisi Çeki-Bası Test Cihazı ile (C-C) sınır şartına bağlı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17: Burkulma deneylerine ait görüntüler

Boyutsuz burkulma değerlerini bulmak için her bir kiriş numunesinden üç adet üretilmiş ve ortalama değerleri alınmıştır. Deneysel çalışma sonucu burkulma davranışına bağlı elde edilen kritik burkulma yükleri boyutsuz değerlere dönüştürülmüş ve Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: C-C sınır şartlı kirişlerin deneysel boyutsuz burkulma sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Boyutsuz Burkulma Sonuçları (α)
Kiriş 1	26,9625
Kiriş 2	29,2425
Kiriş 3	19,5225
Kiriş 4	17,8950
Kiriş 5	28,4220
Kiriş 6	26,0147
Kiriş 7	22,8735
Kiriş 8	23,7843
Kiriş 9	27,0412
Kiriş 10	22,8729

Deneysel analiz sonucu homojen kirişler arasında maksimum boyutsuz burkulma değeri Kiriş 2 konfigürasyonunda gerçekteleşmiştir. Bunun yanı sıra %SiC oranı arttıkça boyutsuz burkulma yük değerlerinde düşüş görülmektedir. FD kirişler arasında ise maksimum boyutsuz burkulma değeri Kiriş 5 konfigürasyonunda görülmüştür.

4.6.2 Serbest Titreşim Deneyleri

Eksenel yönde FD tabakalı ve homojen kirişlerin deneysel olarak serbest titreşim analizleri Şekil 4.18’de gösterilen cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın başlıca özellikleri yaklaşık 0,5 kg ağırlığa sahip, 22,3 x 7,82 x 4,50 cm ölçülerinde, iki adet CAN (Kontrol Alan Ağı) girişli, sekiz tane 200kS/s hızında dinamik analog girişli, 24 adet dijital girişli ve AC/DC adaptörlerine sahip yapıdadır. İvmeölçer olarak Dytran model 3224A1 kullanılmıştır. Bu ivmeölçer 0,2 gram genel ağırlığa

sahip ultra-küçük yapıda ve 10 mV/g hassasiyete sahiptir. Bununla birlikte 50 lbf ölçü aralıklı, 9.8 gram düşük kütleli ve 100 mV/lbf hassasiyetli IEPE Dytran model 5800SL darbe çekici kullanılmıştır.



Şekil 4.18: Titreşim ölçüm cihazı

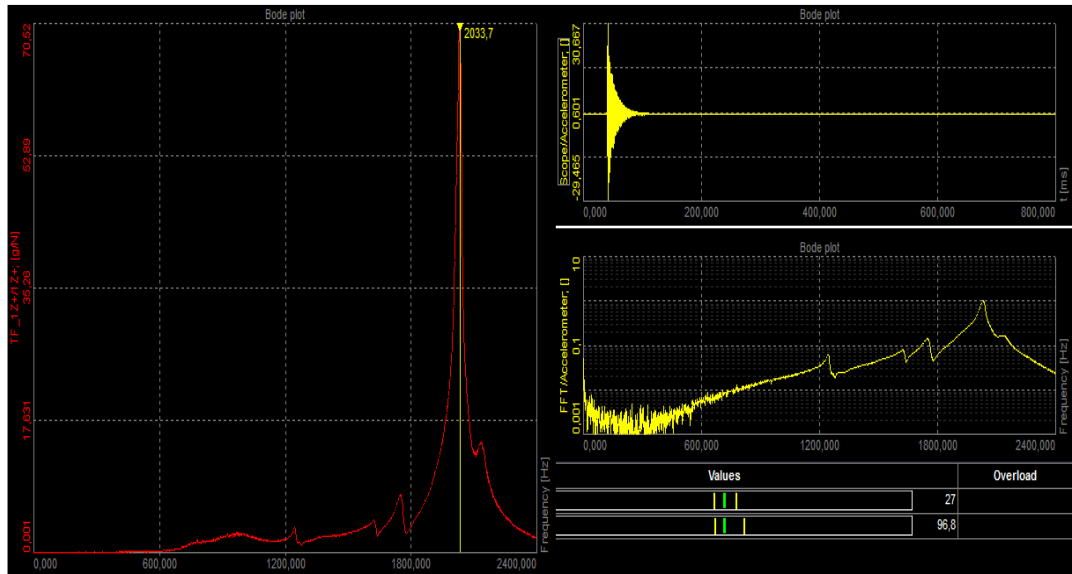
Serbest titreşim analizi için homojen ve aksel yönde tabakalı olarak FD kirişlerden üç adet üretilmiş ve her bir numune Şekil 4.18’de gösterildiği gibi mengene kullanılarak C-F sınır şartına göre sabitlenmiştir. Titreşim deneyleri tabakaların farklı sıralanış ve kiriş bileşenlerinin farklı ağırlık oranları için tekrarlanmıştır. Böylelikle tabaka sıralanma düzenindeki etkiler ve tabakalardaki SiC partiküllerinin ağırlık oranlarındaki değişimlerin FD kirişlerin temel frekansı üzerine olan etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Titreşim ölçümleri, çekiç yardımı ile kiriş numunelerinde darbe oluşturmak suretiyle, 1. Mod değeri için gerçekleştirilmiştir. Meydana gelen titreşim değerleri Dewesoft X programı kullanılarak kaydedilmiştir. Deneysel çalışma sonucu her bir numuneden elde edilen boyutsuz temel frekans değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak Tablo 4.4’de gösterilmiştir. Deneysel analiz sonucunda, homojen kirişler arasında Kiriş 2 konfigürasyonu maksimum boyutsuz temel frekans değerini verirken minimum boyutsuz temel frekans değerini Kiriş 4 konfigürasyonu vermiştir. Aksel yönde tabakalı FD kirişler arasında ise maksimum boyutsuz temel frekans değeri Kiriş 5 konfigürasyonunda elde edilirken

minimum boyutsuz temel frekans değeri Kiriş 10 konfigürasyonunda tespit edilmiştir.

Tablo 4.4: C-F sınır şartlı kirişlerin deneysel boyutsuz temel frekans sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Boyutsuz Temel Frekans Sonuçları ($\bar{\omega}$)
Kiriş 1	3,0468
Kiriş 2	3,1287
Kiriş 3	3,0353
Kiriş 4	3,0343
Kiriş 5	3,0739
Kiriş 6	3,0438
Kiriş 7	3,0381
Kiriş 8	3,0421
Kiriş 9	3,0689
Kiriş 10	3,0371

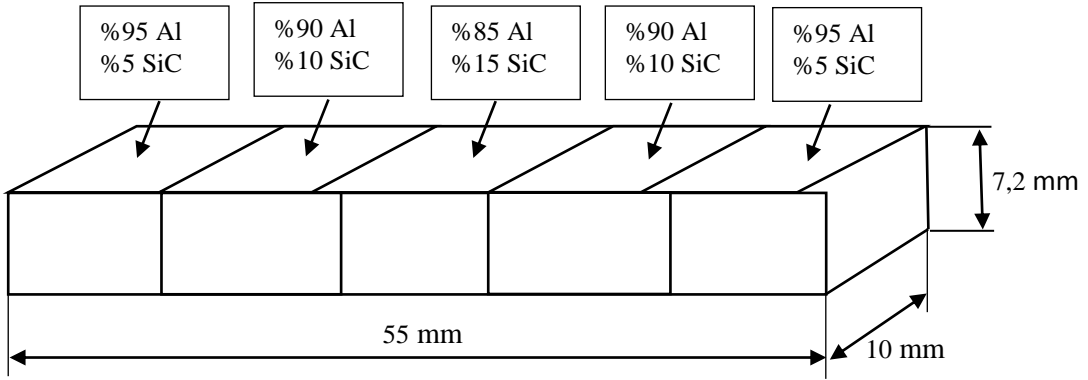
Kiriş 5 konfigürasyonu için elde edilen ivmelenme yanıtı ve frekans spektrumu Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: Kiriş 5 için ivmelenme yanıtı ve frekans spektrumu

5. SAYISAL ANALİZ

Deneyisel çalışmada, homojen kiriş numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucunda en yüksek Elastisite Modül değerleri %15 SiC içeriğine sahip kiriş numunesinde elde edilmiş ve bu orandan daha yüksek %SiC içeriğine sahip numunelerde ise düşüş gözlemlenmiştir. Dolayısıyla sayısal analiz kısmında saf Al ve %15 SiC oranına kadar derecelendirilen kiriş konfigürasyonları değerlendirmeye alınmıştır. Modellemeye alınan kiriş konfigürasyonları Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Kirişlerin sayısal olarak burkulma analizi için ANSYS ve ABAQUS, serbest titreşim analizleri için ise ANSYS sonlu elemanlar tabanlı programlardan yararlanılmıştır. Her iki programda burkulma analizi için C-C ve C-F sınır şartları kullanılırken serbest titreşim analizi için C-F sınır şartı kullanılmıştır. Analizlerde her bir kirişin boyu 55 mm, yüksekliği 7,2 mm, kalınlığı 10 mm, ve Poisson Oranı 0,33 olacak şekilde modellemeye tabi tutulmuştur. Sayısal analize tabi tutulan beş tabakalı örnek kiriş modeli Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Eksenel yönde beş tabakalı olarak derecelendirilmiş FD kiriş

5.1 Burkulma Analizi

Burkulma davranışının sayısal analiz kısmında ABAQUS ve ANSYS sonlu elemanlar tabanlı programlar kullanılmıştır. İki farklı program kullanılmasındaki

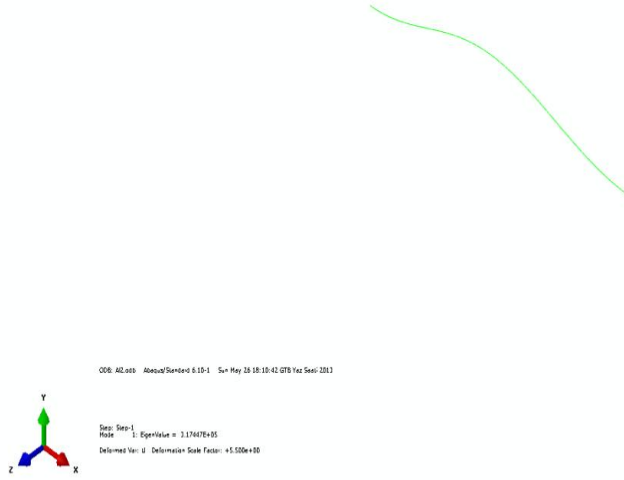
amaç hangi programın Timoshenko kiriş teorisine göre daha yakın sonuçlar vereceğinin tespiti ve karşılaştırılmasıdır.

5.1.1 ABAQUS Sonlu Elemanlar Program Sonuçları

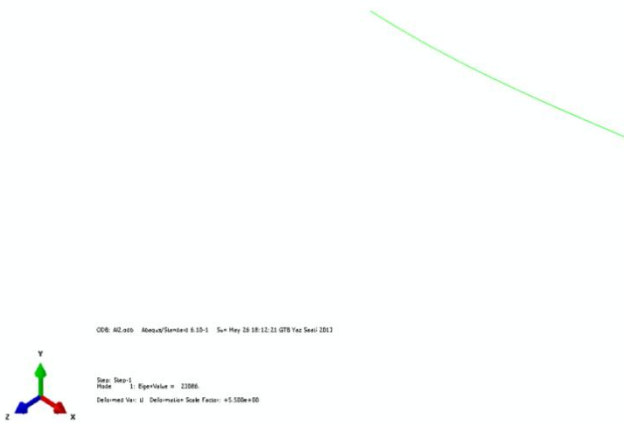
ABAQUS sonlu elemanlar programında Tablo 4.2'deki kirişlere ait kritik burkulma yükleri hesaplanmış ve bu sonuçlar boyutsuz değerlere dönüştürülmüştür. Homojen ve eksenel yönde tabakalı olarak FD kirişlerin modellenmesinde ABAQUS programında mevcut bulunan quadratik kiriş eleman kullanılmıştır. Bu kiriş eleman kayma deformasyon etkisindedir. Analiz sonucunda bu kirişlere ait kritik ve boyutsuz burkulma değerleri Tablo 5.1' de gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde en yüksek kritik burkulma değeri homojen kirişler arasında C-C ve C-F sınır şartı altında Kiriş 4 için elde edilmiştir. Eksenel yönde tabakalı FD kirişler arasında ise en yüksek boyutsuz burkulma değeri C-C sınır şartı için Kiriş 6, C-F sınır şartı için Kiriş 8 de gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen 1. Mod şekilleri homojen kirişler için Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de, eksenel yönde tabakalı FD kirişler için ise Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de sırasıyla gösterilmiştir.

Tablo 5.1: ABAQUS programında kritik ve boyutsuz burkulma sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Burkulma Değerleri			
	P_{kritik} [N]		Boyutsuz (α)	
	C-C	C-F	C-C	C-F
Kiriş 1	206341	15006	33,5577	2,4405
Kiriş 2	278456	20251	33,5577	2,4405
Kiriş 3	304335	22133	33,5577	2,4405
Kiriş 4	317447	23086	33,5577	2,4405
Kiriş 5	295720	21507	33,4575	2,4333
Kiriş 6	301654	21510	34,1289	2,4336
Kiriş 7	301829	22084	33,2738	2,4346
Kiriş 8	298621	22086	32,9202	2,4348
Kiriş 9	294763	21681	33,0570	2,4315
Kiriş 10	303889	21683	34,0804	2,4317



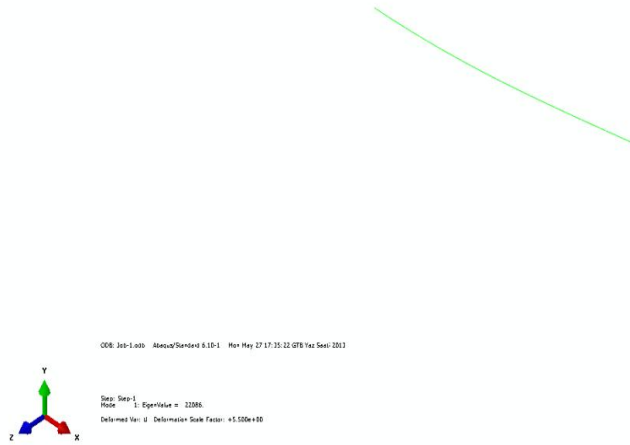
Şekil 5.2: ABAQUS programında Kiriş 4'e ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli



Şekil 5.3: ABAQUS programında Kiriş 4'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli



Şekil 5.4: ABAQUS programında Kiriş 6'ya ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli



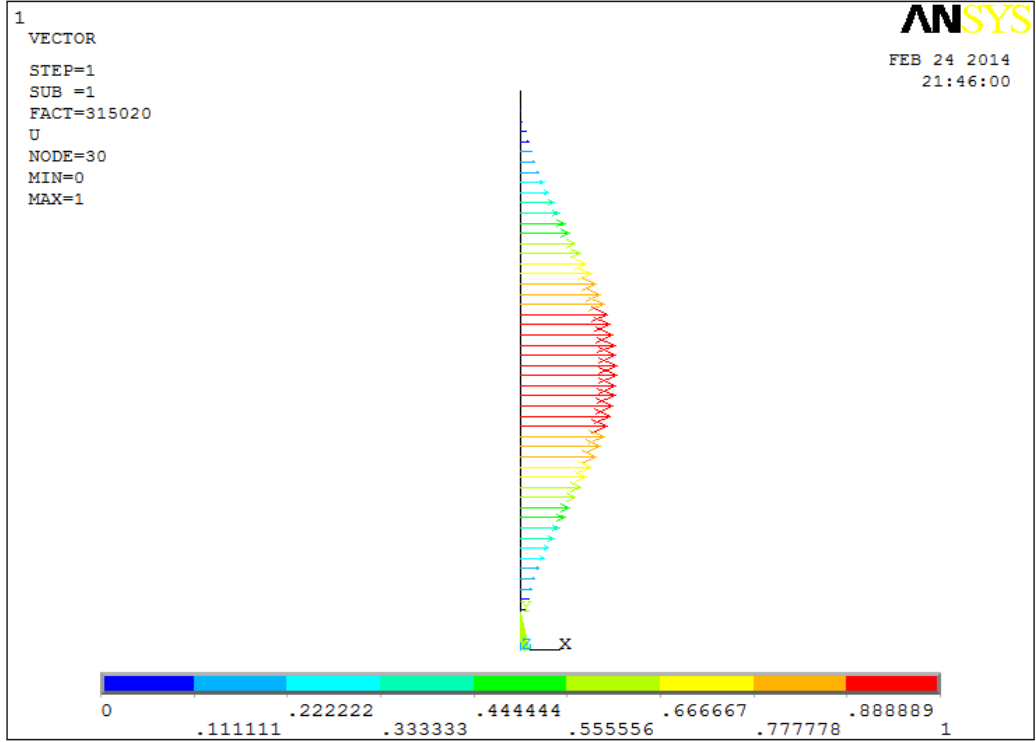
Şekil 5.5: ABAQUS programında Kiriş 8'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli

5.1.2 ANSYS Sonlu Elemanlar Program Sonuçları

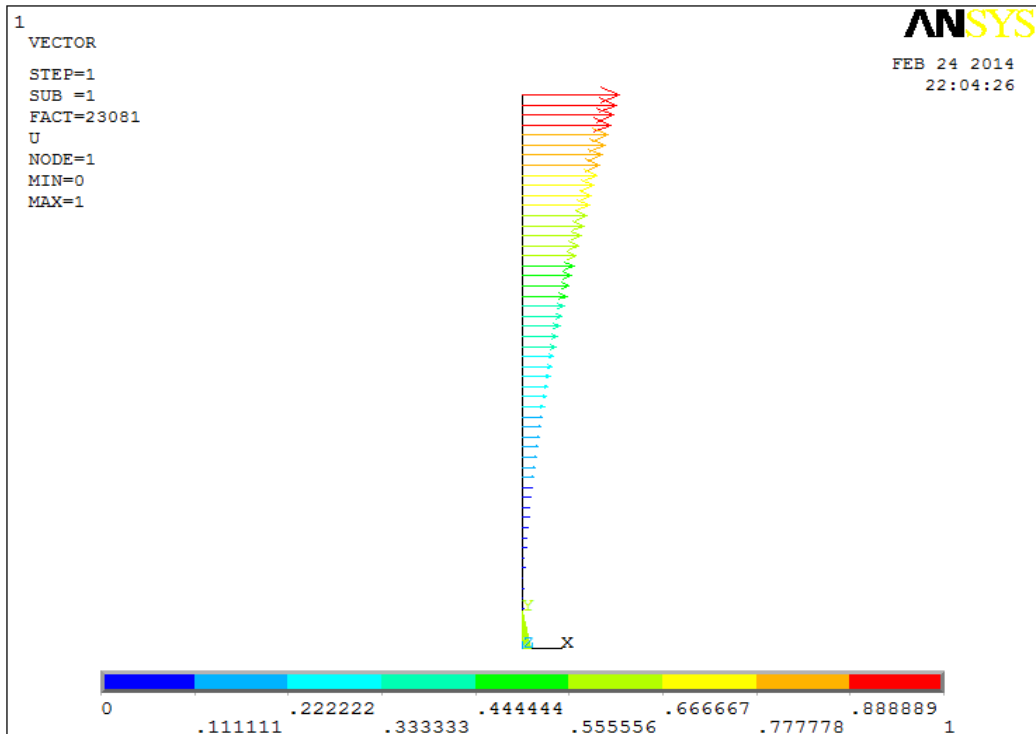
ABAQUS programında olduğu gibi Tablo 4.2’de gösterilen kiriş konfigürasyonları ANSYS sonlu elemanlar programında C-C ve C-F sınır şartları için modellenmiştir. Sayısal analize tabi tutulacak kiriş konfigürasyonları ANSYS sonlu elemanlar tabanlı programda mevcut bulunan çekme, basma ve eğilme yeteneklerine sahip tek eksenli ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesini barındıran (düğüm x ve y yönlerinde ötelenen ve düğüm z-ekseninde dönebilen) Beam-2D Elastic 3 kiriş eleman kullanılmıştır. Özdeğer çıkarımları için Block Lanczos yönteminden yararlanılmıştır. Bununla birlikte bu kiriş eleman Timoshenko kiriş modeline daha yakın olduğu için seçilmiştir. Modellemede SHEARZ (kayma düzeltme faktörü) değeri 6/5 olarak alınmıştır. Analiz sonucu elde edilen kritik ve boyutsuz burkulma yükleri Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Bu tabloda homojen kirişler arasında her iki sınır şartı için en yüksek kritik burkulma değeri Kiriş 4 için elde edilmiştir. Eksenel yönde tabakalı FD kirişler arasında ise en yüksek boyutsuz burkulma değeri C-C sınır şartı için Kiriş 6, C-F sınır şartı için ise Kiriş 8 de gözlemlenmiştir. Elde edilen 1. Mod şekilleri Kiriş 4 için Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de, Kiriş 6 ve Kiriş 8 için ise Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da sırasıyla gösterilmiştir.

Tablo 5.2: ANSYS programında kritik ve boyutsuz burkulma sonuçları

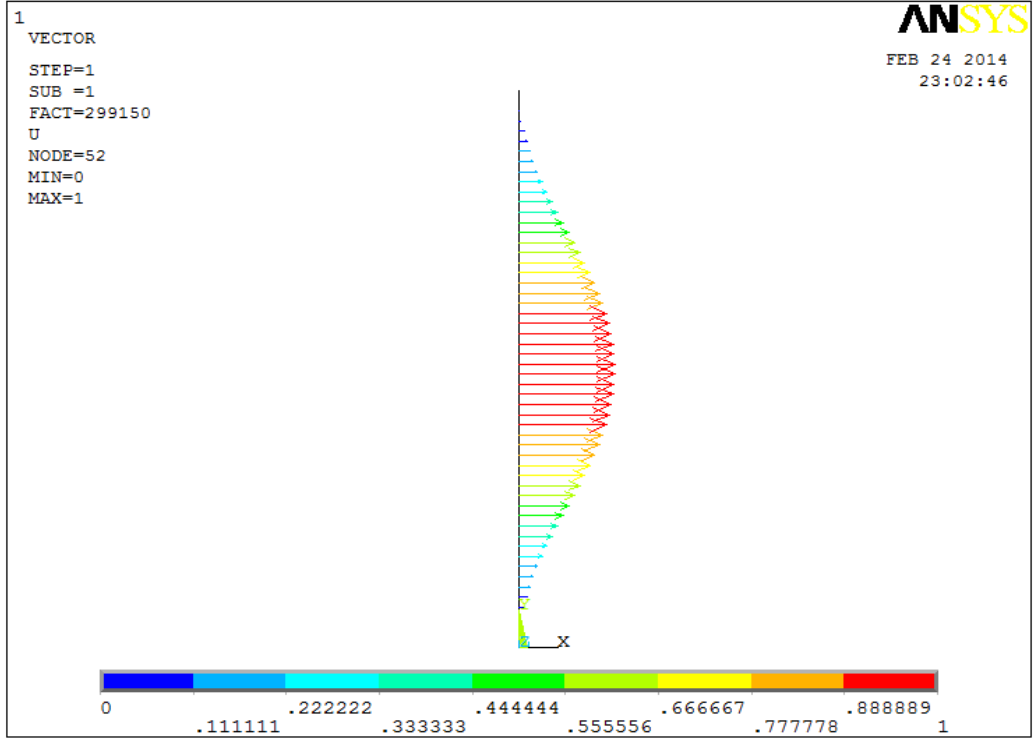
Kiriş Konfigürasyonları	Burkulma Değerleri			
	P _{kritik} [N]		Boyutsuz (α)	
	C-C	C-F	C-C	C-F
Kiriş 1	204763	15003	33,3012	2,4400
Kiriş 2	276328	20246	33,3012	2,4400
Kiriş 3	302009	22128	33,3012	2,4400
Kiriş 4	315020	23081	33,3012	2,4400
Kiriş 5	293457	21501	33,2014	2,4326
Kiriş 6	299150	21505	33,8455	2,4330
Kiriş 7	299577	22079	33,0255	2,4340
Kiriş 8	296485	22081	32,6847	2,4342
Kiriş 9	292603	21676	32,8147	2,4309
Kiriş 10	301371	21677	33,7980	2,4310



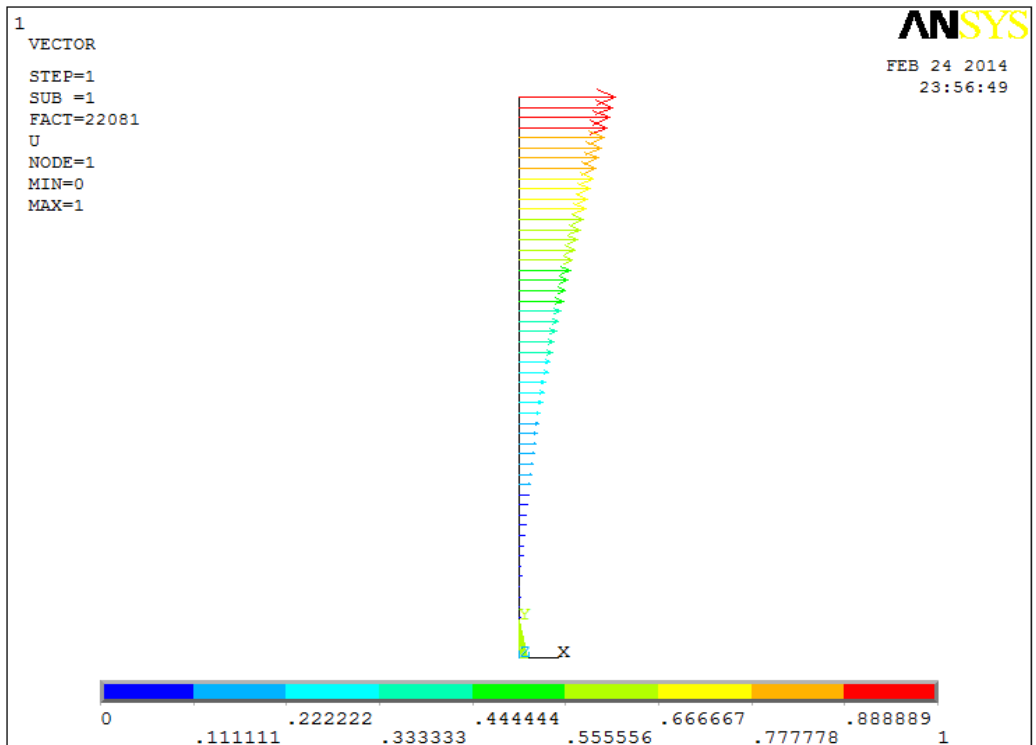
Şekil 5.6: ANSYS programında Kiriş 4'e ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli



Şekil 5.7: ANSYS programında Kiriş 4'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli

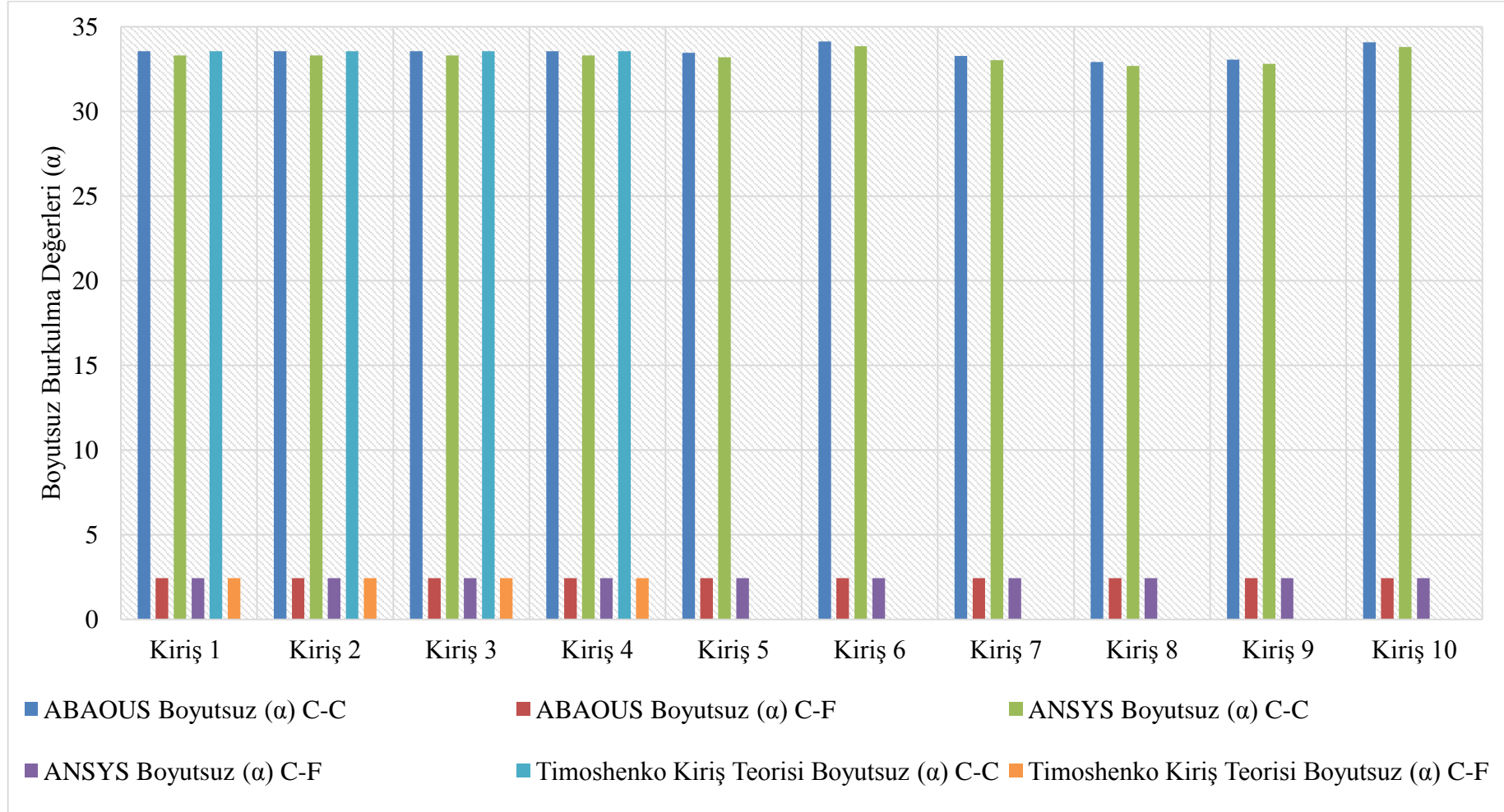


Şekil 5.8: ANSYS programında Kiriş 6'ya ait C-C sınır şartı için 1. Mod şekli



Şekil 5.9: ANSYS programında Kiriş 8'e ait C-F sınır şartı için 1. Mod şekli

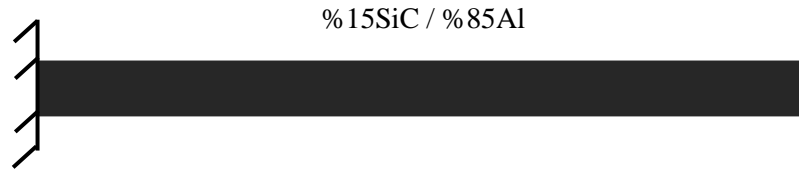
Sayısal analiz kısmında ABAQUS ve ANSYS sonlu elemanlar tabanlı paket program kullanılarak homojen ve eksenel yönde FD tabakalı kirişler farklı sınır şartları için kritik ve boyutsuz burkulma değerleri hesaplanmıştır. Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak homojen kirişlere ait burkulma değerleri programlarda elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesine bulunan sonuçlar her iki programda benzer bir trend göstermektedir. Ancak homojen kirişler için ABAQUS programı ile hesaplanan burkulma değerlerinin Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu fark edilmiştir. Dolayısıyla burkulma analizi için ABAQUS programının ANSYS programına nazaran daha hassas sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun başlıca sebeplerinden birisi, kullanılan kiriş tipinin ANSYS programında kullanılan kiriş tipinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla eksenel yönde tabakalı FD kirişler için ABAQUS programında hesaplanan sonuçların bu teori kapsamında daha hassas çıkacağı düşüncesine ulaşılmıştır. ANSYS, ABAQUS ve Timoshenko kiriş teorisi sonucu elde edilen boyutsuz burkulma sonuçlarının karşılaştırılmış hali Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



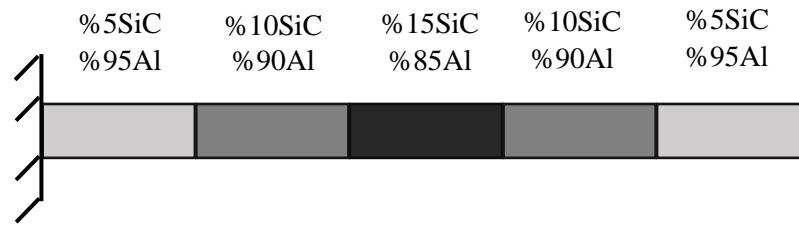
Şekil 5.10: Boyutsuz burkulma değerlerinin karşılaştırılması

5.2 Serbest Titreşim Analizi

Serbest titreşim analizi için ABAQUS ve ANSYS sonlu elemanlar programları çok yakın sonuçlar verdiği için homojen ve eksenel yönde FD tabakalı kirişlerin temel frekans değerlerinin hesaplanmasında yalnızca ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bununla birlikte burkulma analizinde olduğu gibi serbest titreşim analizi içinde ANSYS programında mevcut bulunan çekme, basma ve eğilme yeteneklerine sahip tek eksenli ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesini barındıran (düğüm x ve y yönlerinde ötelenebilen ve düğüm z-ekseninde dönebilen) Beam-2D Elastic 3 kiriş eleman kullanılmıştır. Özdeğer çıkarımları için Block Lanczos yönteminden yararlanılmıştır. Analizlerde her bir numune için kiriş boyu 55 mm, eni 10 mm, kalınlığı 7,7 mm, SHEARZ değeri 6/5 ve Poisson Oranı 0,3 olacak şekilde modellemeler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analize tabi tutulan homojen ve eksenel yönde FD kiriş modelleri sırası ile Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de örneklendiği gibi ele alınmıştır.



Şekil 5.11: C-F sınır şartlı homojen kiriş



Şekil 5.12: C-F sınır şartlı eksenel yönde FD tabakalı kiriş

5.2.1 Serbest Titreşim İçin ANSYS Sonuçları

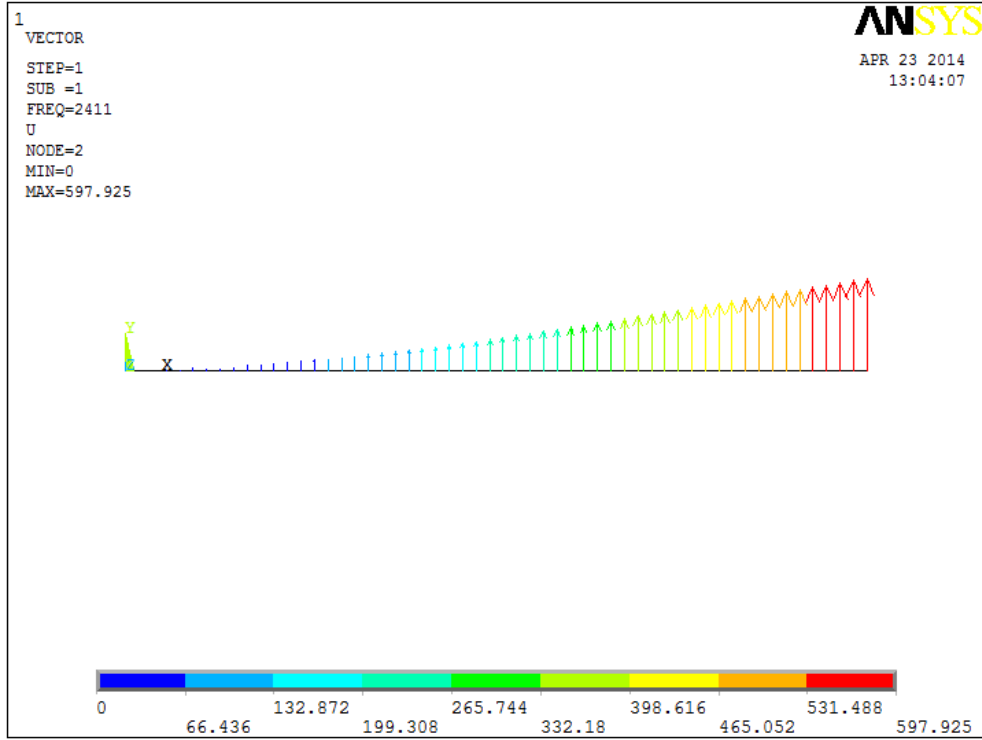
Burkulma analizinde olduğu gibi serbest titreşim analizi için Tablo 4.2’de yer alan kiriş konfigürasyonları değerlendirmeye alınmıştır. Her bir kiriş konfigürasyonu

C-F sınır şartı için frekans değerleri hesaplanmış ve bulunan sonuçlar Tablo 5.3’de verilmiştir.

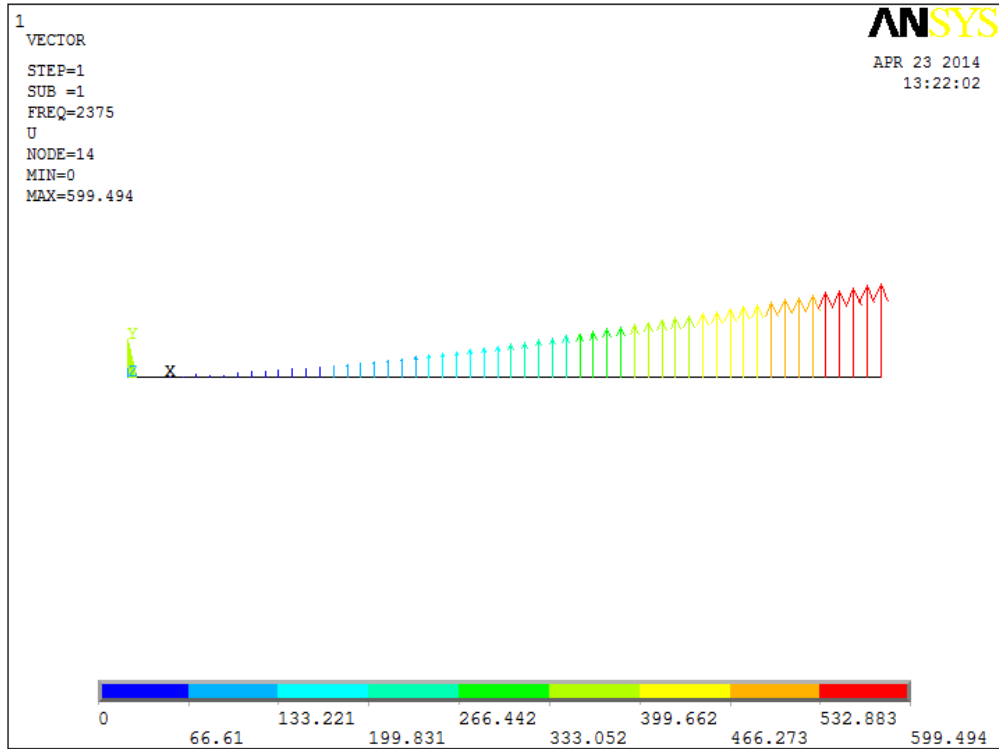
Tablo 5.3: ANSYS programında kirişlere ait temel frekans sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Temel Frekans Değeri (Hz) (ω)	Boyutsuz ($\bar{\omega}$)
Kiriş 1	1921,6	3,4625
Kiriş 2	2247,0	3,4625
Kiriş 3	2351,6	3,4625
Kiriş 4	2411,4	3,4626
Kiriş 5	2293,2	3,4190
Kiriş 6	2323,8	3,4646
Kiriş 7	2375,1	3,4923
Kiriş 8	2358,1	3,4673
Kiriş 9	2304,3	3,4177
Kiriş 10	2351,9	3,4883

Bu tablo incelendiğinde tek tabakalı homojen kirişler için maksimum temel frekans sonucu Kiriş 4 için elde edilirken eksenel yönde tabakalı olarak FD kirişler arasında ise Kiriş 7 için elde edilmiştir. Kiriş 4 ve Kiriş 7 için ANSYS programında elde edilen sonuçların Mod şekilleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Kiriş 4 için 1. Mod şekli



Şekil 5.14: Kiriş 7 için 1. Mod şekli

Tablo 5.4’de homojen kirişlere ait boyutsuz temel frekans değerlerinin teorik ve ANSYS sonuçlarına dayalı karşılaştırılmaları yapılmıştır. Her iki analiz sonuçları Timoshenko kiriş teorisine göre gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonucunda ANSYS sonuçlarının teorik sonuçlara çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonucun oluşmasındaki başlıca etkenler seçilen Beam-2D Elastic 3 kiriş eleman ve modellemede kullanılan SHEARZ değeridir. Dolayısıyla homojen kirişlerde olduğu gibi aksenal yönde tabakalı FD kirişler için ANSYS programında hesaplanan sonuçların bu teoriye göre benzer yakınlık göstereceği düşüncesine ulaşılmıştır.

Tablo 5.4: Boyutsuz temel frekans değerlerinin karşılaştırılması

Kiriş Konfigurasyonları	TEORİK ($\bar{\omega}$)	ANSYS ($\bar{\omega}$)	% Fark
Kiriş 1	3,4625	3,4625	0
Kiriş 2	3,4625	3,4625	0
Kiriş 3	3,4625	3,4625	0
Kiriş 4	3,4625	3,4626	0,0028
Kiriş 5	-	3,4190	-
Kiriş 6	-	3,4646	-
Kiriş 7	-	3,4923	-
Kiriş 8	-	3,4673	-
Kiriş 9	-	3,4177	-
Kiriş 10	-	3,4883	-

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

6.1 Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada homojen ve aksel yönde FD tabakalı kısa kirişlerin burkulma davranışı ve serbest titreşim analizi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz için sonlu elemanlar tabanlı paket programlardan yararlanılmıştır. Bu programlar kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve meydana gelen yüzde hata oranları belirlenmiştir. Her iki analiz sonucu hesaplanan boyutsuz burkulma ve boyutsuz temel frekans sonuçları ile bu sonuçlar arasında meydana gelen yüzde farklar sırası ile Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1: C-C sınır şartlı kirişlerin boyutsuz burkulma sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Deneysel (α)	ABAQUS (α)	% Fark
Kiriş 1	26,9625	33,5577	19,6533
Kiriş 2	29,2425	33,5577	12,8590
Kiriş 3	19,5225	33,5577	41,8240
Kiriş 4	17,8950	33,5577	46,6739
Kiriş 5	28,4220	33,4575	15,0504
Kiriş 6	26,0147	34,1289	23,7751
Kiriş 7	22,8735	33,2738	31,2567
Kiriş 8	23,7843	32,9202	27,7516
Kiriş 9	27,0412	33,0570	18,1982
Kiriş 10	22,8729	34,0804	32,8854

Tablo 6.1’de verilen C-C sınır şartlı kirişlerin boyutsuz burkulma sonuçları arasında homojen kiriş numuneleri için en yüksek yüzde fark Kiriş 4 konfigürasyonu için gerçekleşirken en düşük yüzde fark Kiriş 2 konfigürasyonu için gerçekleşmiştir.

FD kirişler arasında en yüksek yüzde fark Kiriş 10 konfigürasyonu için gerçekleşirken en düşük yüzde fark Kiriş 5 konfigürasyonu için gerçekleşmiştir.

Tablo 6.2: C-F sınır şartlı kirişlerin boyutsuz temel frekans sonuçları

Kiriş Konfigürasyonları	Deneysel ($\bar{\omega}$)	ANSYS ($\bar{\omega}$)	% Fark
Kiriş 1	3,0468	3,4625	12,00
Kiriş 2	3,1287	3,4625	9,64
Kiriş 3	3,0353	3,4625	12,34
Kiriş 4	3,0343	3,4626	12,37
Kiriş 5	3,0739	3,4190	10,09
Kiriş 6	3,0438	3,4646	12,15
Kiriş 7	3,0381	3,4923	13,00
Kiriş 8	3,0421	3,4673	12,26
Kiriş 9	3,0689	3,4177	10,21
Kiriş 10	3,0371	3,4883	12,93

Tablo 6.2’de verilen C-F sınır şartlı kirişlerin boyutsuz temel frekans sonuçları arasında homojen kiriş numuneleri için en yüksek yüzde hata oranı Kiriş 4 konfigürasyonu için gerçekleşirken en düşük yüzde hata oranı Kiriş 2 konfigürasyonu için gerçekleşmiştir. FD kirişler arasında en yüksek yüzde fark Kiriş 7 konfigürasyonu için gerçekleşirken en düşük yüzde hata oranı Kiriş 5 konfigürasyonu için gerçekleşmiştir.

6.2 Değerlendirme

Bu çalışmada homojen ve eksenel yönde fonksiyonel derecelendirilmiş kısa kirişlerin burkulma ve serbest titreşim davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerleri ağırlıkça %15 SiC oranına kadar artış göstermiş ve daha yüksek %SiC oranlarında ise düşüş eğilimi göstermiştir. Bunun yanı sıra ağırlıkça %15 SiC oranından yüksek %SiC içeriğine sahip kiriş konfigürasyonlarında gözenek oluşumu daha fazla artış göstermiş, Al ve SiC tozları uygun bir şekilde birleşimi

sağlanamamış ve kullanılan 450 MPa pres basıncı ile kalıp kapasitesi yetersiz kalmıştır. Dolayısıyla çalışmanın burkulma davranışı ile serbest titreşim analizi bölümlerinde ağırlıkça %15'den yüksek SiC içeriğine sahip kiriş konfigürasyonları değerlendirilmeye alınmamıştır. Kiriş numunelerinde ağırlıkça %SiC oranındaki artış kiriş yapılarında gözenek oluşumunu arttırmakta ve kiriş numunelerinin yoğunluklarında düşüş oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra tabaka sertliği %20 SiC içeriğine kadar artış göstermekte ve bu değerden sonra düşüş göstermektedir. Bu düşüşün başlıca sebepleri numunelerde meydana gelen gözenekler ve kullanılan üretim yöntemidir. Bunun yanı sıra SEM analizlerinde komşu tabakalarda ağırlıkça %SiC içerik farkı yüksek olan FD kiriş numunelerinin tabaka birleşim yüzeylerinde çatlak oluşumuna rastlanmıştır. Bu durumun başlıca nedenleri ani %SiC içerik artışı ve Al/SiC sistemlerinin mekanik özellikleri ile mikroyapı karakterizasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu mekanik özellikler ile mikroyapı karakterizasyonu kirişlerin burkulma davranışı ile serbest titreşim analizini doğrudan etkilemiştir. Bu çalışmaya göre;

DeneySEL burkulma analizi sonucunda Tablo 4.3'de verilen bütün kiriş konfigürasyonları arasında elde edilen maksimum boyutsuz burkulma yükü Kiriş 2 konfigürasyonu için 29,2425 olarak elde edilmiştir. SiC miktarının artışı, %5 SiC içeriğine kadar homojen kirişlerde boyutsuz burkulma değerinin artmasına, daha yüksek SiC oranlarında ise düşmesine sebep olmaktadır. Eksenel yönde derecelendirilmiş FD kiriş konfigürasyonları içerisinde ise maksimum boyutsuz burkulma yükü Kiriş 5 konfigürasyonu için 28,4220 olarak elde edilmiştir. Kiriş 5 konfigürasyonunda en yüksek boyutsuz burkulma değerine ulaşılması ikişer tabaka Kiriş 2 ve Kiriş 3 konfigürasyonlarının kullanılması, bu iki tabakanın kirişteki konumuyla ve tabakalar arasındaki SiC oranlarındaki yumuşak geçiş ile açıklanabilir. Buna ek olarak FD kirişler arasında uç tabakalarda %5 SiC içeriğine sahip kirişlerde maksimum boyutsuz burkulma değerine ulaşılmıştır. Ayrıca aynı ağırlık oranına sahip kirişlerin komşu tabakaları arasındaki ani geçişler boyutsuz burkulma değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Bu durum Kiriş 5 ve Kiriş 6 konfigürasyonları kıyaslandığında açık bir şekilde görülmektedir. Ancak Kiriş 7 ve Kiriş 8 konfigürasyonları karşılaştırıldığında, Kiriş 8 konfigürasyonunda komşu tabakalar arasında %SiC içerik miktarında ani değişimler olmasına rağmen daha yüksek boyutsuz burkulma değerine ulaşılmıştır. Bunun başlıca nedenlerinden biri

Kiriş 8 konfigürasyonunun uç tabakalarında düşük SiC içeriği olmasıdır. Kiriş 5 ve Kiriş 9 konfigürasyonlarının uç tabakalarında % 5 SiC içermesine rağmen Kiriş 9'da ani geçişler mevcuttur ve iki adet %15 SiC içeriğine sahip tabaka içermektedir. Dolayısıyla Kiriş 5 konfigürasyonunda daha yüksek boyutsuz burkulma değerine ulaşılmıştır. Kiriş 6 ve Kiriş 8 kiriş numunelerinin uç tabakaları ağırlıkça %10 SiC içermektedir ve her iki kiriş numunesinde ani geçişler mevcuttur. Ancak Kiriş 6'da iki adet %5 SiC içeriğine sahip tabaka bulunduğu için boyutsuz burkulma değeri daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra Kiriş 7 ile Kiriş 10 konfigürasyonları karşılaştırıldığında her iki kiriş numunesinin uç tabakaları % 15 SiC içermektedir. Ancak Kiriş 10 konfigürasyonunda iki adet % 5 SiC içeren tabaka bulunmasına rağmen tabakalar arasında ani geçişlerin bulunması boyutsuz burkulma değerinin düşmesine sebep olmuştur. Çalışmanın sayısal analiz kısmında ise değerlendirmeye alınan tüm kiriş konfigürasyonları için elde edilen boyutsuz burkulma yüklerinin mevcut bulunduğu Tablo 5.1 incelendiğinde tutulu-tutulu sınır şartı için maksimum boyutsuz burkulma değeri, FD kiriş konfigürasyonu Kiriş 6 için 34,1289 ve tutulu-serbest FD kiriş konfigürasyonu Kiriş 8 için ise 2,4348 olarak bulunmuştur. Ayrıca tutulu-serbest ve tutulu-tutulu sınır şartı için maksimum kritik burkulma yükü homojen kirişler için sırasıyla 23086 N ve 317447 N olarak Kiriş 4 konfigürasyonunda elde edilmiştir. Benzer bir trend gösteren Tablo 5.2'de tutulu-tutulu sınır şartı için maksimum boyutsuz burkulma yükü FD kiriş konfigürasyonu Kiriş 6 için 33,8455 ve tutulu-serbest FD kiriş konfigürasyonu Kiriş 8 için 2,4342 olarak elde edilmiştir. Tutulu-serbest ve tutulu-tutulu sınır şartı için maksimum kritik burkulma yükü homojen kirişler için sırasıyla 23081 N ve 315020 N olarak Kiriş 4 konfigürasyonunda elde edilmiştir. Dolayısıyla sayısal analiz sonuçlarına göre tutulu-tutulu sınır şartı kullanıldığı uygulamalarda eksenel yönde tabakalı FD kirişler ve tutulu-serbest sınır şartına sahip uygulamalarda ise homojen kirişlerin kullanılmasının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Serbest titreşim analiz sonuçlarının mevcut bulunduğu Tablo 6.2 incelendiğinde deneysel ve sayısal değerler arasındaki maksimum fark %13 çıkmıştır. Tablo 4.4'de görüldüğü üzere tutulu-serbest sınır şartı için maksimum boyutsuz temel frekans değeri homojen kirişler arasında Kiriş 2 konfigürasyonu için 3,1287 değeri elde edilirken FD kirişler arasında ise Kiriş 5 konfigürasyonu için 3,0739 değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışma sonucu Kiriş 5

konfigürasyonunda maksimum boyutsuz temel frekans değerine ulaşılması iki tabaka Kiriş 2 konfigürasyonu kullanılması ve bu konfigürasyonun Kiriş 5'deki simetrik konumu ile açıklanabilir. Çalışmanın sayısal analiz kısmında ise tüm kiriş konfigürasyonları için elde edilen boyutsuz temel frekans sonuçlarının mevcut bulunduğu Tablo 5.3 incelendiğinde tutulu-serbest sınır şartı için maksimum boyutsuz temel frekans değeri Kiriş 4 için 3,4626 ve Kiriş 7 için 3,4923 olarak bulunmuştur. ANSYS sonuçlarından anlaşılacağı üzere uç tabakalardaki %SiC içerik oranındaki düşme temel frekansın düşmesine vesile olmuştur. Deneysel sonuçlarda ise uç tabakalarda ağırlıkça %5 SiC içeren kiriş konfigürasyonlarında maksimum temel frekans değerine ulaşılmış ve uç tabakalardaki %SiC oranındaki artış temel frekans değerinin düşmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte deneysel sonuçlara dayanarak komşu tabakalar arasında SiC miktarındaki ani artışlar temel frekans değerinin düşmesine vesile olmaktadır. Bunun ana nedenlerinden biri mekanik özelliklerin değişiminde düzgün geçişlerin olmayışıdır. Bu durum Kiriş 5 ve Kiriş 6 konfigürasyonları kıyaslandığında açık bir şekilde görülmektedir. Buna göre uç tabakalarda yüksek oranda %SiC kullanımı ve komşu tabakalar arasında ani geçişlerin bulunması temel frekans değerinin düşmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla komşu tabakalar arasında düzenli geçişlerin sağlanması temel frekans değerleri üzerinde olumlu bir etki meydana gelmesini sağlayacaktır. Ancak uç tabakalardaki %SiC içerik miktarı, komşu tabakalar arasında ani geçişlerin yaratmış olduğu etkiye nazaran daha baskındır. Bu durum Kiriş 7 ve Kiriş 8 konfigürasyonunda net bir şekilde görülmektedir. Kiriş 8 konfigürasyonunda komşu tabakalar arasında ani geçişler mevcut olmasına rağmen Kiriş 8 konfigürasyonunun uç tabakalarında %SiC içerik oranı Kiriş 7 konfigürasyonuna göre daha azdır ve Kiriş 8 konfigürasyonunda daha yüksek temel frekans değerine ulaşılmıştır. Kiriş 5 ve Kiriş 9 konfigürasyonları karşılaştırıldığında her iki kirişin uç tabakalarında % 5 SiC içermesine rağmen Kiriş 9'da ani geçişler mevcuttur ve iki adet %15 SiC içeriğine sahip tabaka içermektedir. Dolayısıyla Kiriş 5 konfigürasyonunda daha yüksek temel frekans değerine ulaşılmıştır. Kiriş 6 ve Kiriş 8 kirişlerinin uç tabakaları ağırlıkça %10 SiC içermektedir ve her iki konfigürasyonda ani geçişler mevcuttur. Ancak Kiriş 6'da iki adet %5 SiC içeriğine sahip tabaka bulunduğu için temel frekans değeri daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanı sıra Kiriş 7 ile Kiriş 10 konfigürasyonlarının uç tabakaları % 15 SiC içermektedir fakat Kiriş 10

konfigürasyonunda iki adet % 5 SiC içeren tabaka bulunmasına rağmen tabakalar arasında ani geçişlerin bulunması temel frekans değerinin düşmesine sebep olmuştur.

Burkulma ve serbest titreşim analizleri için deneysel ve sayısal olarak verilen sonuçlar karşılaştırıldığında deneysel sonuçların daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun başlıca nedenleri üretilen kiriş numunelerinde meydana gelen gözenekli yapılar, kullanılan üretim yöntemi, partikül boyutu, şekli ve dağılımıdır. Sayısal analiz kısmında ise kullanılan sonlu elemanlar tabanlı programlar kiriş numunelerinde meydana gelen bu tür sorunları göz önüne almayarak analizleri gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla bahsi geçen bu sorunlar sayısal ve deneysel sonuçlar arasında farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ağırlıkça farklı yüzdelerle sahip Al ve SiC toz karışımlarından oluşan homojen ve eksenel yönde tabakalı olarak FD kısa kırımların deneysel ve sayısal olarak burkulma ve serbest titreşim analizi incelenmiştir. Öncelikle ağırlıkça farklı Al ve SiC yüzde oranlarına sahip homojen kırımlar üretilmiş ve bu kırımlarla eksenel yönde FD tabakalı kırımlara ait her bir tabakanın mikroyapı karakterizasyonu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Böylece burkulma davranışı ile serbest titreşim analizinin deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasında meydana gelen farkların tespiti açıklanmaya çalışılmıştır. Eksenel yönde tabakalı olarak FD kırımların burkulma ve serbest titreşim analizi sonucunda;

- Ağırlıkça %15 SiC içeren homojen kırımlarda en yüksek Elastisite Modül ve Maksimum Çekme Gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler, %15 den daha fazla SiC içeren homojen kırım numunelerinde SiC oranındaki %5 ağırlık artışına bağlı olarak düşüş gözlemlenmiştir.
- Deneysel yoğunluk hesaplamalarına tabi tutulan numunelerde ağırlıkça %SiC oranı arttıkça yoğunluk değerlerinde düşmeler meydana gelmiştir.
- SEM analizi sonucunda tabakalı olarak FD kırım numunelerinin tabaka birleşim yüzeylerinde ağırlıkça %SiC miktarındaki ani artışa bağlı olarak çatlak oluşumlarına rastlanmıştır. Bunun yanı sıra tabakalarda ağırlıkça %SiC miktarındaki artış SiC partikül kümeleşmesinde artışa neden olmuştur.
- Optik Mikroskop analizi sonucunda SiC partiküllerinin 2-6 µm aralığında düzensiz şekilde ve keskin kenarlara sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra ağırlıkça %SiC miktarının artışına bağlı olarak tabakalar üzerinde gözenekli yapıların oluşumuna rastlanmış ve bu gözenekli yapılarda büyüme gözlemlenmiştir.
- Tabaka sertliklerinde ağırlıkça %0SiC içeriğinden %20SiC içeriğine kadar artış gözlemlenmiş ve %20SiC içeriğinden %40SiC içeriğine kadar ise düşüş gözlemlenmiştir.

- Deneysel sonuçlara göre eksenel yönde FD tabakalı kirişlerde komşu tabakalar arasında ağırlıkça %SiC oranındaki ani değişimler temel frekans ve burkulma değerinde düşüşe sebep olmuştur.
- ANSYS ve ABAQUS sonlu elemanlar tabanlı programlarda kullanılan kiriş eleman tipi, Timoshenko kiriş teorisine göre kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analiz sonuçlarına doğrudan etkisi olduğu belirlenmiştir.
- Ağırlıkça %SiC içeriği eşit olmasına rağmen farklı tabaka sıralamasına sahip eksenel yönde FD tabakalı kirişlerde farklı burkulma ve temel frekans sonuçlarına ulaşılması tabakaların derecelendirilmesindeki önemini ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlara dayanarak yapılabilecek öneriler;

- Al ve SiC sistemleri kullanılarak yapılacak malzemelerde burkulma ve serbest titreşim analizleri için ağırlıkça %15 SiC miktarından fazla SiC içeren malzemeler kullanılmamalıdır. Ancak farklı üretim yöntem ve teknikleri kullanılarak bu değer üstünde bir oran kullanılabilir.
- Farklı üretim yöntem ve teknikler kullanılarak, ağırlıkça %15'e kadar SiC içeren Al ve SiC sistemlerinden üretilen malzemelerde daha yüksek Elastisite Modülü ve Çekme Gerilme değerleri elde edilebilir.
- Al ve SiC tozları kullanılarak toz metalürjisi yöntemi ile üretilen malzemelerde, SiC miktarının artışına bağlı olarak gözenekli yapının oluştuğu ve malzemenin yoğunluk değerinde azalma gözleendiğinden dolayı üretilen malzemelerde ele alınan SiC miktarları mümkün olduğunca optimum seviyede seçilmelidir.
- Eksenel yönde fonksiyonel derecelendirme yöntemi kullanılarak üretilen kirişlerde, derecelendirme doğrultusunda yumuşak bir geçişin sağlanması kirişlerin burkulma ve serbest titreşim analizleri için önem arz etmektedir. Dolayısıyla derecelendirmede eşit miktarda SiC ve Al sistemleri kullanılsa dahi konfigürasyon türü her iki analiz içinde önemli olabilecektir.

8. KAYNAKÇALAR

- [1] Koizumi, M., "FGM activities in Japan", *Composites Part B: Engineering*, 28, 1-4, (1997).
- [2] Jha, D. K., Kant, T. and Singh, R. K., "A critical review of recent research on functionally graded plates", *Composite Structures*, 96, 833-849, (2013).
- [3] Mahamood, R., Akinlabi, E., Shukla, M. and Pityana, S., "*Functionally Graded Material: An overview*", Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 London, UK, Vol III (WCE 2012), (2012).
- [4] Liew, K. M., Zhao, X. and Ferreira, A. J. M., "A review of meshless methods for laminated and functionally graded plates and shells", *Composite Structures*, 93, 2031-2041, (2011).
- [5] Shukla, A., Jain, N. and Chona, R., "A review of dynamic fracture studies in functionally graded materials", *Strain*, 43, 76-95, (2007).
- [6] Miyamoto, Y., "Development of functionally graded materials by HIP", *Materials Science Research International*, 6, 3-8, (2000).
- [7] Neubrand, A. and Rodel, J., "Gradient materials: An overview of a novel concept", *Zeitschrift Fur Metallkunde*, 88, 358-371, (1997).
- [8] Wu, C. P., Chiu, K. H. and Wang, Y. M., "A Review on the Three-Dimensional Analytical Approaches of Multilayered and Functionally Graded Piezoelectric Plates and Shells", *Cmc-Computers Materials & Continua*, 8, 93-132, (2008).
- [9] Birman, V. and Byrd, L. W., "Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures", *Applied Mechanics Reviews*, 60, 195-216, (2007).
- [10] Sankar, B. V. and Tzeng, J. T., "Thermal stresses in functionally graded beams", *Aiaa Journal*, 40, 1228-1232, (2002).

- [11] Kiani, Y. and Eslami, M. R., "Thermomechanical Buckling of Temperature-dependent FGM Beams", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 10, 223-245, (2013).
- [12] Zhang, L. W., Zhu, P. and Liew, K. M., "Thermal buckling of functionally graded plates using a local Kriging meshless method", *Composite Structures*, 108, 472-492, (2014).
- [13] Reddy, J. N. and Chin, C. D., "Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates", *Journal of Thermal Stresses*, 21, 593-626, (1998).
- [14] Carrera, E. and Brischetto, S., "Modeling and Analysis of Functionally Graded Beams, Plates and Shells: Part I", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 17, 585-585, (2010).
- [15] Carrera, E. and Brischetto, S., "Modeling and Analysis of Functionally Graded Beams, Plates and Shells: Part II", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 18, 1-2, (2011).
- [16] Nogata, F. and Takahashi, H., "Intelligent functionally graded material: Bamboo", *Composites Engineering*, 5, 743-751, (1995).
- [17] Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S. M., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K. and Soboyejo, W. O., "Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures", *Acta Biomaterialia*, 7, 3796-3803, (2011).
- [18] Silva, E., Walters, M. and Paulino, G., "Modeling bamboo as a functionally graded material: lessons for the analysis of affordable materials", *Journal of Materials Science*, 41, 6991-7004, (2006).
- [19] Ray, A. K., Mondal, S., Das, S. K. and Ramachandrarao, P., "Bamboo—A functionally graded composite-correlation between microstructure and mechanical strength", *Journal of Materials Science*, 40, 5249-5253, (2005).
- [20] Şimşek, M., "Vibration analysis of a functionally graded beam under a moving mass by using different beam theories", *Composite Structures*, 92, 904-917, (2010).

- [21] Akgöz, B. and Civalek, Ö., "Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli–Euler microbeams based on the modified couple stress theory", *Composite Structures*, 98, 314-322, (2013).
- [22] Şimşek, M., "Nonlocal effects in the free longitudinal vibration of axially functionally graded tapered nanorods", *Computational Materials Science*, 61, 257-265, (2012).
- [23] Kien, N. D., "Large displacement response of tapered cantilever beams made of axially functionally graded material", *Composites Part B-Engineering*, 55, 298-305, (2013).
- [24] Babilio, E., "Dynamics of an axially functionally graded beam under axial load", *European Physical Journal-Special Topics*, 222, 1519-1539, (2013).
- [25] Zarrinzadeh, H., Attarnejad, R. and Shahba, A., "Free vibration of rotating axially functionally graded tapered beams", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering*, 226, 363-379, (2012).
- [26] Li, S.-R., Cao, D.-F. and Wan, Z.-Q., "Bending solutions of FGM Timoshenko beams from those of the homogenous Euler–Bernoulli beams", *Applied Mathematical Modelling*, 37, 7077-7085, (2013).
- [27] Fallah, A. and Aghdam, M. M., "Thermo-mechanical buckling and nonlinear free vibration analysis of functionally graded beams on nonlinear elastic foundation", *Composites Part B: Engineering*, 43, 1523-1530, (2012).
- [28] Li, X. F., "A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler–Bernoulli beams", *Journal of Sound and Vibration*, 318, 1210-1229, (2008).
- [29] Kadoli, R., Akhtar, K. and Ganesan, N., "Static analysis of functionally graded beams using higher order shear deformation theory", *Applied Mathematical Modelling*, 32, 2509-2525, (2008).

- [30] Kadkhodayan, M. and Golmakani, M. E., "Non-linear bending analysis of shear deformable functionally graded rotating disk", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 58, 41-56, (2014).
- [31] Tahouneh, V. and Yas, M. H., "Semianalytical Solution for Three-Dimensional Vibration Analysis of Thick Multidirectional Functionally Graded Annular Sector Plates under Various Boundary Conditions", *Journal of Engineering Mechanics*, 140, 31-46, (2014).
- [32] Tahouneh, V. and Naei, M. H., "A novel 2-D six-parameter power-law distribution for three-dimensional dynamic analysis of thick multi-directional functionally graded rectangular plates resting on a two-parameter elastic foundation", *Meccanica*, 49, 91-109, (2014).
- [33] Goupee, A. J. and Vel, S. S., "Two-dimensional optimization of material composition of functionally graded materials using meshless analyses and a genetic algorithm", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 5926-5948, (2006).
- [34] Vel, S. S. and Pelletier, J. L., "Multi-objective optimization of functionally graded thick shells for thermal loading", *Composite Structures*, 81, 386-400, (2007).
- [35] Yin, H. M., Sun, L. Z. and Paulino, G. H., "Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions", *Acta Materialia*, 52, 3535-3543, (2004).
- [36] Shen, H. S., *Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells*, NW, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 4-5, (2009).
- [37] Bhangale, R. K. and Ganesan, N., "Thermoelastic buckling and vibration behavior of a functionally graded sandwich beam with constrained viscoelastic core", *Journal of Sound and Vibration*, 295, 294-316, (2006).
- [38] Saidi, H., Houari, M. S. A., Tounsi, A. and Bedia, E. A., "Thermo-mechanical bending response with stretching effect of functionally graded sandwich plates using a novel shear deformation theory", *Steel and Composite Structures*, 15, 221-245, (2013).

- [39] Setoodeh, A. R., Ghorbanzadeh, M. and Malekzadeh, P., "A two-dimensional free vibration analysis of functionally graded sandwich beams under thermal environment", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C- Journal of Mechanical Engineering Science*, 226, 2860-2873, (2012).
- [40] Zenkour, A. M., "A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 1 - Deflection and stresses", *International Journal of Solids and Structures*, 42, 5224-5242, (2005).
- [41] Zenkour, A. M., "A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 2 - Buckling and free vibration", *International Journal of Solids and Structures*, 42, 5243-5258, (2005).
- [42] Lal, A., Jagtap, K. R. and Singh, B. N., "Post buckling response of functionally graded materials plate subjected to mechanical and thermal loadings with random material properties", *Applied Mathematical Modelling*, 37, 2900-2920, (2013).
- [43] Benatta, M. A., Mechab, I., Tounsi, A. and Adda Bedia, E. A., "Static analysis of functionally graded short beams including warping and shear deformation effects", *Computational Materials Science*, 44, 765-773, (2008).
- [44] Mahi, A., Adda Bedia, E. A., Tounsi, A. and Mechab, I., "An analytical method for temperature-dependent free vibration analysis of functionally graded beams with general boundary conditions", *Composite Structures*, 92, 1877-1887, (2010).
- [45] Chakraborty, A., Gopalakrishnan, S. and Reddy, J. N., "A new beam finite element for the analysis of functionally graded materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, 45, 519-539, (2003).
- [46] Kapuria, S., Bhattacharyya, M. and Kumar, A. N., "Theoretical Modeling and Experimental Validation of Thermal Response of Metal-Ceramic Functionally Graded Beams", *Journal of Thermal Stresses*, 31, 759-787, (2008).
- [47] Cho, J. R. and Oden, J. T., "Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the Crank–Nicolson–Galerkin scheme", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 188, 17-38, (2000).

- [48] Zhai, P. C., Zhang, Q. J. and Yuan, R. Z., "Thermal and thermo-elastic-plastic response of ceramic-metal functionally graded materials - Thermal shock problem", *Acta Mechanica Solida Sinica*, 10, 148-156, (1997).
- [49] Librescu, L., Oh, S. Y. and Song, O., "Spinning thin-walled beams made of functionally graded materials: modeling, vibration and instability", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 23, 499-515, (2004).
- [50] Lal, A., Neeranjan Singh, H. and Shegokar, N. L., "FEM model for stochastic mechanical and thermal postbuckling response of functionally graded material plates applied to panels with circular and square holes having material randomness", *International Journal of Mechanical Sciences*, 62, 18-33, (2012).
- [51] Pradhan, S. C. and Murmu, T., "Thermo-mechanical vibration of FGM sandwich beam under variable elastic foundations using differential quadrature method", *Journal of Sound and Vibration*, 321, 342-362, (2009).
- [52] Reddy, J. N., "Analysis of functionally graded plates", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47, 663-684, (2000).
- [53] Erdogan, F., "Fracture mechanics of functionally graded materials", *Composites Engineering*, 5, 753-770, (1995).
- [54] Takagi, K., Li, J.-F., Yokoyama, S. and Watanabe, R., "Fabrication and evaluation of PZT/Pt piezoelectric composites and functionally graded actuators", *Journal of the European Ceramic Society*, 23, 1577-1583, (2003).
- [55] Li, J.-F., Takagi, K., Ono, M., Pan, W., Watanabe, R., Almajid, A. and Taya, M., "Fabrication and Evaluation of Porous Piezoelectric Ceramics and Porosity-Graded Piezoelectric Actuators", *Journal of the American Ceramic Society*, 86, 1094-1098, (2003).
- [56] Lee, W. Y., Stinton, D. P., Berndt, C. C., Erdogan, F., Lee, Y.-D. and Mutasim, Z., "Concept of Functionally Graded Materials for Advanced Thermal Barrier Coating Applications", *Journal of the American Ceramic Society*, 79, 3003-3012, (1996).

- [57] Schulz, U., Peters, M., Bach, F. W. and Tegeder, G., "Graded coatings for thermal, wear and corrosion barriers", *Materials Science and Engineering: A*, 362, 61-80, (2003).
- [58] Kumar, S., Murthy Reddy, K. V. V. S., Kumar, A. and Rohini Devi, G., "Development and characterization of polymer–ceramic continuous fiber reinforced functionally graded composites for aerospace application", *Aerospace Science and Technology*, 26, 185-191, (2013).
- [59] Leushake, U., Krell, T. and Schulz, U., "Graded Thermal Barrier Coating Systems for gas turbine applications", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 28, 391-394, (1997).
- [60] Müller, E., Drašar, Č., Schilz, J. and Kaysser, W. A., "Functionally graded materials for sensor and energy applications", *Materials Science and Engineering: A*, 362, 17-39, (2003).
- [61] Paszkiewicz, B., Paszkiewicz, R., Wosko, M., Radziewicz, D., Ściana, B., Szyszka, A., Macherzynski, W. and Tłaczała, M., "Functionally graded semiconductor layers for devices application", *Vacuum*, 82, 389-394, (2007).
- [62] Cho, J. R. and Park, H. J., "High strength FGM cutting tools: finite element analysis on thermoelastic characteristics", *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131, 351-356, (2002).
- [63] Nomura, T., Moriguchi, H., Tsuda, K., Isobe, K., Ikegaya, A. and Moriyama, K., "Material design method for the functionally graded cemented carbide tool", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 17, 397-404, (1999).
- [64] Fahad, M., Mativenga, P. T. and Sheikh, M. A., "A comparative study of multilayer and functionally graded coated tools in high-speed machining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 43-57, (2012).
- [65] Moriguchi, H., Nomura, T., Tsuda, K., Isobe, K., Ikegaya, A. and Moriyama, K., "Design of Functionally Graded Cemented Carbide Tools", *Funtai Oyobi Fumatsu Yakin/Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 45, 231-236, (1998).

- [66] Pompe, W., Worch, H., Epple, M., Friess, W., Gelinsky, M., Greil, P., Hempel, U., Scharnweber, D. and Schulte, K., "Functionally graded materials for biomedical applications", *Materials Science and Engineering: A*, 362, 40-60, (2003).
- [67] Miao, X. G. and Sun, D., "Graded/Gradient Porous Biomaterials", *Materials*, 3, 26-47, (2010).
- [68] Mehrali, M., Shirazi, F. S., Mehrali, M., Metselaar, H. S. C., Kadri, N. A. B. and Osman, N. A. A., "Dental implants from functionally graded materials", *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 101, 3046-3057, (2013).
- [69] Watari, F., Yokoyama, A., Saso, F., Uo, M. and Kawasaki, T., "Fabrication and properties of functionally graded dental implant", *Composites Part B: Engineering*, 28, 5-11, (1997).
- [70] Watari, F., Yokoyama, A., Omori, M., Hirai, T., Kondo, H., Uo, M. and Kawasaki, T., "Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application", *Composites Science and Technology*, 64, 893-908, (2004).
- [71] Iwasaki, K., "Production of a functionally graded artificial tooth root by unique sequence of processes", *Material Research Innovations*, 1, 180-187, (1997).
- [72] He, L.-H., Yin, Z.-H., Jansen van Vuuren, L., Carter, E. A. and Liang, X.-W., "A natural functionally graded biocomposite coating – Human enamel", *Acta Biomaterialia*, 9, 6330-6337, (2013).
- [73] Chin, E. S. C., "Army focused research team on functionally graded armor composites", *Materials Science and Engineering A*, A259, 155-161, (1999).
- [74] Huang, P. J., Hubbard, C., Swab, J. J., Cole, M. W., Sampath, S., Depalo, S., Gutleber, J., Kulkarni, A. and Margolies, J., "Functionally Graded Materials for gun barrels", *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 20, 33-38, (1999).
- [75] Na, S., Kim, K. W., Lee, B. H. and Marzocca, P., "Dynamic Response Analysis of Rotating Functionally Graded Thin-Walled Blades Exposed to Steady

Temperature and External Excitation", *Journal of Thermal Stresses*, 32, 209-225, (2009).

[76] Librescu, L., Oh, S. Y. and Song, O., "Thin-walled beams made of functionally graded materials and operating in a high temperature environment: Vibration and stability", *Journal of Thermal Stresses*, 28, 649-712, (2005).

[77] Balci, E., Sarikan, B., Übeyli, M., Camuşcu, N. and Yildirim, R. O., "On the ballistic performance of the AA7075 based functionally graded material with boron carbide reinforcement", *Kovove Materialy*, 51, 257-262, (2013).

[78] Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O. and Keleş, T., "The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy", *Materials and Design*, 56, 31-36, (2014).

[79] Zhao, F.-q., Wang, Z.-m. and Liu, H.-z., "Thermal post-buckling analyses of functionally graded material rod", *Applied Mathematics and Mechanics*, 28, 59-67, (2007).

[80] Wang, Y., Xu, R.-q. and Ding, H.-j., "Free axisymmetric vibration of FGM circular plates", *Applied Mathematics and Mechanics*, 30, 1077-1082, (2009).

[81] Pradyumna, S. and Bandyopadhyay, J. N., "Free vibration analysis of functionally graded curved panels using a higher-order finite element formulation", *Journal of Sound and Vibration*, 318, 176-192, (2008).

[82] Haddadpour, H., Mahmoudkhani, S. and Navazi, H. M., "Free vibration analysis of functionally graded cylindrical shells including thermal effects", *Thin-Walled Structures*, 45, 591-599, (2007).

[83] Patel, B. P., Gupta, S. S., Loknath, M. S. and Kadu, C. P., "Free vibration analysis of functionally graded elliptical cylindrical shells using higher-order theory", *Composite Structures*, 69, 259-270, (2005).

[84] Abrate, S., "Free vibration, buckling, and static deflections of functionally graded plates", *Composites Science and Technology*, 66, 2383-2394, (2006).

- [85] Matsunaga, H., "Free vibration and stability of functionally graded circular cylindrical shells according to a 2D higher-order deformation theory", *Composite Structures*, 88, 519-531, (2009).
- [86] Kadoli, R. and Ganesan, N., "Buckling and free vibration analysis of functionally graded cylindrical shells subjected to a temperature-specified boundary condition", *Journal of Sound and Vibration*, 289, 450-480, (2006).
- [87] Sepiani, H. A., Rastgoo, A., Ebrahimi, F. and Ghorbanpour Arani, A., "Vibration and buckling analysis of two-layered functionally graded cylindrical shell, considering the effects of transverse shear and rotary inertia", *Materials & Design*, 31, 1063-1069, (2010).
- [88] Sheng, G. G. and Wang, X., "Thermoelastic vibration and buckling analysis of functionally graded piezoelectric cylindrical shells", *Applied Mathematical Modelling*, 34, 2630-2643, (2010).
- [89] Bhangale, R. K., Ganesan, N. and Padmanabhan, C., "Linear thermoelastic buckling and free vibration behavior of functionally graded truncated conical shells", *Journal of Sound and Vibration*, 292, 341-371, (2006).
- [90] Najafizadeh, M. M. and Heydari, H. R., "An exact solution for buckling of functionally graded circular plates based on higher order shear deformation plate theory under uniform radial compression", *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, 603-612, (2008).
- [91] Wu, L., Wang, Q.-s. and Elishakoff, I., "Semi-inverse method for axially functionally graded beams with an anti-symmetric vibration mode", *Journal of Sound and Vibration*, 284, 1190-1202, (2005).
- [92] Aydogdu, M. and Taskin, V., "Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges", *Materials & Design*, 28, 1651-1656, (2007).
- [93] Sankar, B. V., "An elasticity solution for functionally graded beams", *Composites Science and Technology*, 61, 689-696, (2001).

- [94] Chakraborty, A. and Gopalakrishnan, S., "A spectrally formulated finite element for wave propagation analysis in functionally graded beams", *International Journal of Solids and Structures*, 40, 2421-2448, (2003).
- [95] Zhong, Z. and Yu, T., "Analytical solution of a cantilever functionally graded beam", *Composites Science and Technology*, 67, 481-488, (2007).
- [96] Kang, Y.-A. and Li, X.-F., "Bending of functionally graded cantilever beam with power-law non-linearity subjected to an end force", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 44, 696-703, (2009).
- [97] Yu, Z. and Chu, F., "Identification of crack in functionally graded material beams using the p-version of finite element method", *Journal of Sound and Vibration*, 325, 69-84, (2009).
- [98] Mena, R., Tounsi, A., Mouaici, F., Mechab, I., Zidi, M. and Bedia, E. A. A., "Analytical Solutions for Static Shear Correction Factor of Functionally Graded Rectangular Beams", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19, 641-652, (2012).
- [99] Murín, J., Aminbaghai, M. and Kutiš, V., "Exact solution of the bending vibration problem of FGM beams with variation of material properties", *Engineering Structures*, 32, 1631-1640, (2010).
- [100] Murin, J., Aminbaghai, M., Hrabovský, J., Kutiš, V. and Kugler, S., "Modal analysis of the FGM beams with effect of the shear correction function", *Composites Part B: Engineering*, 45, 1575-1582, (2013).
- [101] Calìò, I. and Elishakoff, I., "Closed-form solutions for axially graded beam-columns", *Journal of Sound and Vibration*, 280, 1083-1094, (2005).
- [102] ELISHAKOFF, I. and CALIÒ, I., "Closed-form trigonometric solutions for inhomogeneous beam-columns on elastic foundation", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 04, 139-146, (2004).

- [103] Elishakoff, I. and Rollot, O., "New Closed-Form Solutions for Buckling of a Variable Stiffness Column by Mathematica®", *Journal of Sound and Vibration*, 224, 172-182, (1999).
- [104] Elishakoff, I. and Johnson, V., "Apparently the first closed-form solution of vibrating inhomogeneous beam with a tip mass", *Journal of Sound and Vibration*, 286, 1057-1066, (2005).
- [105] Sarkar, K. and Ganguli, R., "Closed-form solutions for axially functionally graded Timoshenko beams having uniform cross-section and fixed–fixed boundary condition", *Composites Part B: Engineering*, 58, 361-370, (2014).
- [106] Karami, G. and Malekzadeh, P., "A new differential quadrature methodology for beam analysis and the associated differential quadrature element method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, 3509-3526, (2002).
- [107] Rajasekaran, S., "Buckling of fully and partially embedded non-prismatic columns using differential quadrature and differential transformation methods", *Structural Engineering and Mechanics*, 28, 221-238, (2008).
- [108] Rajasekaran, S., Gimena, L., Gonzaga, P. and Gimena, F. N., "Solution method for the classical beam theory using differential quadrature", *Structural Engineering and Mechanics*, 33, 675-696, (2009).
- [109] Yilmaz, Y., Girgin, Z. and Evran, S., "Buckling Analyses of Axially Functionally Graded Nonuniform Columns with Elastic Restraint Using a Localized Differential Quadrature Method", *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 12, (2013).
- [110] Rajasekaran, S., "Free vibration of centrifugally stiffened axially functionally graded tapered Timoshenko beams using differential transformation and quadrature methods", *Applied Mathematical Modelling*, 37, 4440-4463, (2013).
- [111] Shahba, A. and Rajasekaran, S., "Free vibration and stability of tapered Euler–Bernoulli beams made of axially functionally graded materials", *Applied Mathematical Modelling*, 36, 3094-3111, (2012).

- [112] Li, S. R. and Fan, L. L., "Free vibration of FGM Timoshenko beams with through-width delamination", *Science China-Physics Mechanics & Astronomy*, 57, 927-934, (2014).
- [113] Yuan, S., Ye, K., Xiao, C., Williams, F. W. and Kennedy, D., "Exact dynamic stiffness method for non-uniform Timoshenko beam vibrations and Bernoulli–Euler column buckling", *Journal of Sound and Vibration*, 303, 526-537, (2007).
- [114] Totry, E. M., Altus, E. and Proskura, A., "Buckling of non-uniform beams by a direct functional perturbation method", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 22, 88-99, (2007).
- [115] Aydogdu, M., "Semi-inverse method for vibration and buckling of axially functionally graded beams", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 683-691, (2008).
- [116] Alshorbagy, A. E., Eltaher, M. A. and Mahmoud, F. F., "Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method", *Applied Mathematical Modelling*, 35, 412-425, (2011).
- [117] Shahba, A., Attarnejad, R. and Hajilar, S., "Free vibration and stability of axially functionally graded tapered Euler-Bernoulli beams", *Shock and Vibration*, 18, 683-696, (2011).
- [118] Coşkun, S. B. and Atay, M. T., "Determination of critical buckling load for elastic columns of constant and variable cross-sections using variational iteration method", *Computers & Mathematics with Applications*, 58, 2260-2266, (2009).
- [119] Atay, M. T. and Coşkun, S. B., "Elastic stability of Euler columns with a continuous elastic restraint using variational iteration method", *Computers & Mathematics with Applications*, 58, 2528-2534, (2009).
- [120] Arbabi, F. and Li, F., "Buckling of Variable Cross-Section Columns: Integral-Equation Approach", *Journal of Structural Engineering*, 117, 2426-2441, (1991).

- [121] O'Rourke, M. and Zebrowski, T., "Buckling load for nonuniform columns", *Computers & Structures*, 7, 717-720, (1977).
- [122] Iremonger, M. J., "Finite difference buckling analysis of non-uniform columns", *Computers & Structures*, 12, 741-748, (1980).
- [123] Huang, Y. and Li, X., "Buckling Analysis of Nonuniform and Axially Graded Columns with Varying Flexural Rigidity", *Journal of Engineering Mechanics*, 137, 73-81, (2011).
- [124] Elishakoff, I. and Candan, S., "Apparently first closed-form solution for vibrating: inhomogeneous beams", *International Journal of Solids and Structures*, 38, 3411-3441, (2001).
- [125] Elishakoff, I. and GuÉDÉ, Z., "Analytical Polynomial Solutions for Vibrating Axially Graded Beams", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 11, 517-533, (2004).
- [126] Caliò, I. and Elishakoff, I., "Can a Trigonometric Function Serve Both as the Vibration and the Buckling Mode of an Axially Graded Structure?", *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 32, 401-421, (2004).
- [127] Shafiee, H., Naei, M. H. and Eslami, M. R., "In-plane and out-of-plane buckling of arches made of FGM", *International Journal of Mechanical Sciences*, 48, 907-915, (2006).
- [128] Yang, J. and Chen, Y., "Free vibration and buckling analyses of functionally graded beams with edge cracks", *Composite Structures*, 83, 48-60, (2008).
- [129] Kapuria, S., Bhattacharyya, M. and Kumar, A. N., "Bending and free vibration response of layered functionally graded beams: A theoretical model and its experimental validation", *Composite Structures*, 82, 390-402, (2008).
- [130] Xiang, H. J. and Yang, J., "Free and forced vibration of a laminated FGM Timoshenko beam of variable thickness under heat conduction", *Composites Part B: Engineering*, 39, 292-303, (2008).

- [131] Piovan, M. T. and Sampaio, R., "Vibrations of axially moving flexible beams made of functionally graded materials", *Thin-Walled Structures*, 46, 112-121, (2008).
- [132] Singh, K. V. and Li, G., "Buckling of functionally graded and elastically restrained non-uniform columns", *Composites Part B: Engineering*, 40, 393-403, (2009).
- [133] Sina, S. A., Navazi, H. M. and Haddadpour, H., "An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams", *Materials & Design*, 30, 741-747, (2009).
- [134] Oyekoya, O. O., Mba, D. U. and El-Zafrany, A. M., "Buckling and vibration analysis of functionally graded composite structures using the finite element method", *Composite Structures*, 89, 134-142, (2009).
- [135] Maalawi, K. Y., "Optimization of elastic columns using axial grading concept", *Engineering Structures*, 31, 2922-2929, (2009).
- [136] Huang, Y. and Li, X.-F., "A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section", *Journal of Sound and Vibration*, 329, 2291-2303, (2010).
- [137] Khalili, S. M. R., Jafari, A. A. and Eftekhari, S. A., "A mixed Ritz-DQ method for forced vibration of functionally graded beams carrying moving loads", *Composite Structures*, 92, 2497-2511, (2010).
- [138] Anandakumar, G. and Kim, J.-H., "On the modal behavior of a three-dimensional functionally graded cantilever beam: Poisson's ratio and material sampling effects", *Composite Structures*, 92, 1358-1371, (2010).
- [139] Huang, Y. and Li, X. F., "Buckling of functionally graded circular columns including shear deformation", *Materials & Design*, 31, 3159-3166, (2010).
- [140] Ke, L.-L., Yang, J. and Kitipornchai, S., "Nonlinear free vibration of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams", *Composite Structures*, 92, 676-683, (2010).

- [141] Ansari, R., Gholami, R. and Sahmani, S., "Free vibration analysis of size-dependent functionally graded microbeams based on the strain gradient Timoshenko beam theory", *Composite Structures*, 94, 221-228, (2011).
- [142] Yousefi, A. and Rastgoo, A., "Free vibration of functionally graded spatial curved beams", *Composite Structures*, 93, 3048-3056, (2011).
- [143] Hein, H. and Feklistova, L., "Free vibrations of non-uniform and axially functionally graded beams using Haar wavelets", *Engineering Structures*, 33, 3696-3701, (2011).
- [144] Shahba, A., Attarnejad, R., Marvi, M. T. and Hajilar, S., "Free vibration and stability analysis of axially functionally graded tapered Timoshenko beams with classical and non-classical boundary conditions", *Composites Part B: Engineering*, 42, 801-808, (2011).
- [145] Wei, D., Liu, Y. and Xiang, Z., "An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams with edge cracks", *Journal of Sound and Vibration*, 331, 1686-1700, (2012).
- [146] Wattanasakulpong, N., Gangadhara Prusty, B., Kelly, D. W. and Hoffman, M., "Free vibration analysis of layered functionally graded beams with experimental validation", *Materials & Design*, 36, 182-190, (2012).
- [147] Thai, H.-T. and Vo, T. P., "Bending and free vibration of functionally graded beams using various higher-order shear deformation beam theories", *International Journal of Mechanical Sciences*, 62, 57-66, (2012).
- [148] Şimşek, M., Kocatürk, T. and Akbaş, Ş. D., "Dynamic behavior of an axially functionally graded beam under action of a moving harmonic load", *Composite Structures*, 94, 2358-2364, (2012).
- [149] Aydogdu, M., Maroti, G. and Elishakoff, I., "A note on semi-inverse method for buckling of axially functionally graded beams", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32, 511-512, (2013).

- [150] Şimşek, M. and Reddy, J. N., "Bending and vibration of functionally graded microbeams using a new higher order beam theory and the modified couple stress theory", *International Journal of Engineering Science*, 64, 37-53, (2013).
- [151] Su, H., Banerjee, J. R. and Cheung, C. W., "Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of functionally graded beams", *Composite Structures*, 106, 854-862, (2013).
- [152] Li, X. F., Kang, Y. A. and Wu, J. X., "Exact frequency equations of free vibration of exponentially functionally graded beams", *Applied Acoustics*, 74, 413-420, (2013).
- [153] Huang, Y., Yang, L.-E. and Luo, Q.-Z., "Free vibration of axially functionally graded Timoshenko beams with non-uniform cross-section", *Composites Part B: Engineering*, 45, 1493-1498, (2013).
- [154] Pradhan, K. K. and Chakraverty, S., "Free vibration of Euler and Timoshenko functionally graded beams by Rayleigh–Ritz method", *Composites Part B: Engineering*, 51, 175-184, (2013).
- [155] Nguyen, T.-K., Vo, T. P. and Thai, H.-T., "Static and free vibration of axially loaded functionally graded beams based on the first-order shear deformation theory", *Composites Part B: Engineering*, 55, 147-157, (2013).
- [156] Vo, T. P., Thai, H.-T., Nguyen, T.-K., Maheri, A. and Lee, J., "Finite element model for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams based on a refined shear deformation theory", *Engineering Structures*, 64, 12-22, (2014).
- [157] Hadji, L., Daouadji, T. H., Tounsi, A. and Bedia, E. A., "A higher order shear deformation theory for static and free vibration of FGM beam", *Steel and Composite Structures*, 16, 507-519, (2014).
- [158] Li, S. R., Wan, Z. Q. and Zhang, J. H., "Free vibration of functionally graded beams based on both classical and first-order shear deformation beam theories", *Applied Mathematics and Mechanics-English Edition*, 35, 591-606, (2014).

- [159] Zhang, D. G., "Thermal post-buckling and nonlinear vibration analysis of FGM beams based on physical neutral surface and high order shear deformation theory", *Meccanica*, 49, 283-293, (2014).
- [160] Yang, Y., Lam, C. C., Kou, K. P. and Iu, V. P., "Free vibration analysis of the functionally graded sandwich beams by a meshfree boundary-domain integral equation method", *Composite Structures*, 117, 32-39, (2014).
- [161] Zhang, B., He, Y., Liu, D., Gan, Z. and Shen, L., "Size-dependent functionally graded beam model based on an improved third-order shear deformation theory", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 47, 211-230, (2014).
- [162] Rajasekaran, S. and Tochaei, E. N., "Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Timoshenko beams using differential transformation element method and differential quadrature element method of lowest-order", *Meccanica*, 49, 995-1009, (2014).
- [163] Fard, K. M., "Higher order free vibration of sandwich curved beams with a functionally graded core", *Structural Engineering and Mechanics*, 49, 537-554, (2014).
- [164] Celebi, K. and Tutuncu, N., "Free vibration analysis of functionally graded beams using an exact plane elasticity approach", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 228, 2488-2494, (2014).
- [165] Zenkour, A. M. and Abbas, I. A., "Free vibration analysis of doubly convex/concave functionally graded sandwich beams", *Journal of Vibroengineering*, 16, 2747-2755, (2014).
- [166] Mashat, D. S., Carrera, E., Zenkour, A. M., Al Khateeb, S. A. and Filippi, M., "Free vibration of FGM layered beams by various theories and finite elements", *Composites Part B-Engineering*, 59, 269-278, (2014).
- [167] Kocatürk, T. and Şimşek, M., "Free Vibration Analysis of Timoshenko Beams Under Various Boundary Conditions", *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2005, 30-34, (2005).

- [168] Wang, C. M., Wang, C. Y. and Reddy, J. N., *Exact solutions for buckling of structural members*, Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 40-62, (2004).
- [169] Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H., "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering: A*, 362, 81-106, (2003).
- [170] Kawasaki, A. and Watanabe, R., "Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials", *Ceramics International*, 23, 73-83, (1997).
- [171] Bishop, A., Lin, C. Y., Navaratnam, M., Rawlings, R. D. and McShane, H. B., "A functionally gradient material produced by a powder metallurgical process", *Journal of Materials Science Letters*, 12, 1516-1518, (1993).
- [172] Tohgo, K. and Hadano, A., "Characterization of fracture process in ceramic-metal functionally graded material under three-point-bending", *Jsmc International Journal Series a-Solid Mechanics and Material Engineering*, 49, 321-330, (2006).
- [173] Zhu, J., Lai, Z., Yin, Z., Jeon, J. and Lee, S., "Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy", *Materials Chemistry and Physics*, 68, 130-135, (2001).
- [174] Duque, N. B., Melgarejo, Z. H. and Suárez, O. M., "Functionally graded aluminum matrix composites produced by centrifugal casting", *Materials Characterization*, 55, 167-171, (2005).
- [175] Watanabe, Y., Eryu, H. and Matsuura, K., "Evaluation of three-dimensional orientation of Al₃Ti platelet in Al-based functionally graded materials fabricated by a centrifugal casting technique", *Acta Materialia*, 49, 775-783, (2001).
- [176] Rajan, T. P. D., Jayakumar, E. and Pai, B. C., "Developments in Solidification Processing of Functionally Graded Aluminium Alloys and Composites by Centrifugal Casting Technique", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65, 531-537, (2012).

- [177] Biesheuvel, P. M. and Verweij, H., "Calculation of the Composition Profile of a Functionally Graded Material Produced by Centrifugal Casting", *Journal of the American Ceramic Society*, 83, 743-749, (2000).
- [178] Fukui, Y., Takashima, K. and Ponton, C. B., "Measurement of Young's modulus and internal friction of an in situ Al-Al₃Ni functionally gradient material", *Journal of Materials Science*, 29, 2281-2288, (1994).
- [179] Yeo, J.-G., Jung, Y.-G. and Choi, S.-C., "Zirconia-stainless steel functionally graded material by tape casting", *Journal of the European Ceramic Society*, 18, 1281-1285, (1998).
- [180] Liu, Z., Liu, M., Nie, L. and Liu, M., "Fabrication and characterization of functionally-graded LSCF cathodes by tape casting", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1082-1087, (2013).
- [181] Yeo, J.-G., Jung, Y.-G. and Choi, S.-C., "Design and microstructure of ZrO₂/SUS316 functionally graded materials by tape casting", *Materials Letters*, 37, 304-311, (1998).
- [182] Cannillo, V., Lusvardi, L. and Sola, A., "Production and characterization of plasma-sprayed TiO₂-hydroxyapatite functionally graded coatings", *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 2161-2169, (2008).
- [183] Han, Z., Xu, B., Wang, H. and Zhou, S., "A comparison of thermal shock behavior between currently plasma spray and supersonic plasma spray CeO₂-Y₂O₃-ZrO₂ graded thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology*, 201, 5253-5256, (2007).
- [184] Gu, Y. W., Khor, K. A., Fu, Y. Q. and Wang, Y., "Functionally graded ZrO₂-NiCrAlY coatings prepared by plasma spraying using pre-mixed, spheroidized powders", *Surface and Coatings Technology*, 96, 305-312, (1997).
- [185] Limarga, A. M., Widjaja, S. and Yip, T. H., "Mechanical properties and oxidation resistance of plasma-sprayed multilayered Al₂O₃/ZrO₂ thermal barrier coatings", *Surface and Coatings Technology*, 197, 93-102, (2005).

- [186] Ivosevic, M., Knight, R., Kalidindi, S. R., Palmese, G. R. and Sutter, J. K., "Solid particle erosion resistance of thermally sprayed functionally graded coatings for polymer matrix composites", *Surface and Coatings Technology*, 200, 5145-5151, (2006).
- [187] Groves, J. F. and Wadley, H. N. G., "Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition", *Composites Part B: Engineering*, 28, 57-69, (1997).
- [188] Hirai, T. and Sasaki, M., "Vapor - deposited functionally gradient materials", *JSME International Journal, Series 1: Solid Mechanics, Strength of Materials*, 34, 123-129, (1991).
- [189] Kawase, M., Tago, T., Kurosawa, M., Utsumi, H. and Hashimoto, K., "Chemical vapor infiltration and deposition to produce a silicon carbide-carbon functionally gradient material", *Chemical Engineering Science*, 54, 3327-3334, (1999).
- [190] Lian, Y., Liu, X., Xu, Z., Song, J. and Yu, Y., "Preparation and properties of CVD-W coated W/Cu FGM mock-ups", *Fusion Engineering and Design*, 88, 1694-1698, (2013).
- [191] Kim, Y., Choi, J.-T., Choi, J. K. and Auh, K. H., "Effect of source gas composition on the synthesis of SiCC functionally gradient materials by CVD", *Materials Letters*, 26, 249-257, (1996).
- [192] Kawai, C., Teraki, J.-i., Hirano, T. and Nomura, T., "Fabrication of a functionally gradient material of TiC-SiC system by chemical vapor deposition", *Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan*, 100, 1117-1121, (1992).
- [193] Dumont, A.-L., Bonnet, J.-P., Chartier, T. and Ferreira, J. M. F., "MoSi₂/Al₂O₃ FGM: elaboration by tape casting and SHS", *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 2353-2360, (2001).
- [194] Pei, Y. T. and De Hosson, J. T. M., "Functionally graded materials produced by laser cladding", *Acta Materialia*, 48, 2617-2624, (2000).

- [195] Amado, J. M., Montero, J., Tobar, M. J. and Yáñez, A., "Ni-based Metal Matrix Composite Functionally Graded Coatings", *Physics Procedia*, 39, 362-367, (2012).
- [196] Tang, X., Zhang, H., Du, D., Qu, D., Hu, C., Xie, R. and Feng, Y., "Fabrication of W–Cu functionally graded material by spark plasma sintering method", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 42, 193-199, (2014).
- [197] Handtrack, D., Despang, F., Sauer, C., Kieback, B., Reinfried, N. and Grin, Y., "Fabrication of ultra-fine grained and dispersion-strengthened titanium materials by spark plasma sintering", *Materials Science and Engineering: A*, 437, 423-429, (2006).
- [198] Put, S., Vleugels, J., Anné, G. and Van der Biest, O., "Functionally graded ceramic and ceramic–metal composites shaped by electrophoretic deposition", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 222, 223-232, (2003).
- [199] Put, S., Vleugels, J. and Van der Biest, O., "Microstructural engineering of functionally graded materials by electrophoretic deposition", *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, 572-577, (2003).
- [200] Sarkar, P., Datta, S. and Nicholson, P. S., "Functionally graded ceramic/ceramic and metal/ceramic composites by electrophoretic deposition", *Composites Part B: Engineering*, 28, 49-56, (1997).
- [201] Nagarajan, N. and Nicholson, P. S., "Nickel–Alumina Functionally Graded Materials by Electrophoretic Deposition", *Journal of the American Ceramic Society*, 87, 2053-2057, (2004).
- [202] Askari, E., Mehrali, M., Metselaar, I. H. S. C., Kadri, N. A. and Rahman, M. M., "Fabrication and mechanical properties of functionally graded material by electrophoretic deposition", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 12, 144-150, (2012).

- [203] Ruys, A. J., Kerdic, J. A. and Sorrell, C. C., "Thixotropic casting of ceramic-metal functionally gradient materials", *Journal of Materials Science*, 31, 4347-4355, (1996).
- [204] Song, C.-J., Xu, Z.-M. and Li, J.-G., "Fabrication of in situ Al/Mg₂Si functionally graded materials by electromagnetic separation method", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 427-433, (2007).
- [205] Jung, Y.-G., Choi, S.-C., Oh, C.-S. and Paik, U.-G., "Residual stress and thermal properties of zirconia/metal (nickel, stainless steel 304) functionally graded materials fabricated by hot pressing", *Journal of Materials Science*, 32, 3841-3850, (1997).
- [206] Gandra, J., Miranda, R., Vilaca, P., Velhinho, A. and Teixeira, J. P., "Functionally graded materials produced by friction stir processing", *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1659-1668, (2011).
- [207] Miranda, R. M., Santos, T. G., Gandra, J., Lopes, N. and Silva, R. J. C., "Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1609-1615, (2013).
- [208] Mahmoud, M. N.-A., Moataz, H. A., Mohamed, R. B. and Wael, K.-E., "Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural Investigations of Aluminum/Steel Functionally Graded Material", *Materials Sciences and Applications*, 02, 1708-1718, (2011).
- [209] Mkaddem, A. and El Mansori, M., "On fatigue crack growth mechanisms of MMC: Reflection on analysis of 'multi surface initiations'", *Materials & Design*, 30, 3518-3524, (2009).
- [210] Surappa, M. K., "Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities", *Sadhana*, 28, 319-334, (2003).
- [211] Bhattacharyya, M., Kumar, A. N. and Kapuria, S., "Synthesis and characterization of Al/SiC and Ni/Al₂O₃ functionally graded materials", *Materials Science and Engineering: A*, 487, 524-535, (2008).

- [212] Singh, S. B. and Ray, S., "Creep analysis in an isotropic FGM rotating disc of Al-SiC composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 616-622, (2003).
- [213] Nai, S. M. L. and Gupta, M., "Synthesis of Al/SiC based functionally gradient materials using technique of gradient slurry disintegration and deposition: effect of stirring speed", *Materials Science and Technology*, 18, 633-641, (2002).
- [214] Zeng, Q. C., Lim, C. W., Lu, C. F. and Yang, Q., "Asymptotic Two-Dimensional Elasticity Approach for Free Vibration of FGM Circular Arches", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19, 29-38, (2012).
- [215] Gunes, R., Aydin, M., Apalak, M. K. and Reddy, J. N., "Experimental and numerical investigations of low velocity impact on functionally graded circular plates", *Composites Part B-Engineering*, 59, 21-32, (2014).
- [216] Fukui, Y. and Watanabe, Y., "Analysis of thermal residual stress in a thick-walled ring of Duralcan-base Al-SiC functionally graded material", *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 27, 4145-4151, (1996).
- [217] Sozhamannan, G. G. and Prabu, S. B., "Influence of interface compounds on interface bonding characteristics of aluminium and silicon carbide", *Materials Characterization*, 60, 986-990, (2009).
- [218] Neelima, D. C., Mahesh, V. and Selvaraj, N., "Mechanical characterization of Aluminium silicon carbide composite", *International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul* 1, 793-799, (2011).
- [219] El-Daly, A. A., Abdelhameed, M., Hashish, M. and Eid, A. M., "Synthesis of Al/SiC nanocomposite and evaluation of its mechanical properties using pulse echo overlap method", *Journal of Alloys and Compounds*, 542, 51-58, (2012).
- [220] Gupta, M. and Loke, C. Y., "Synthesis of free standing, one dimensional, Al-SiC based functionally gradient materials using gradient slurry disintegration and deposition", *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 276, 210-217, (2000).

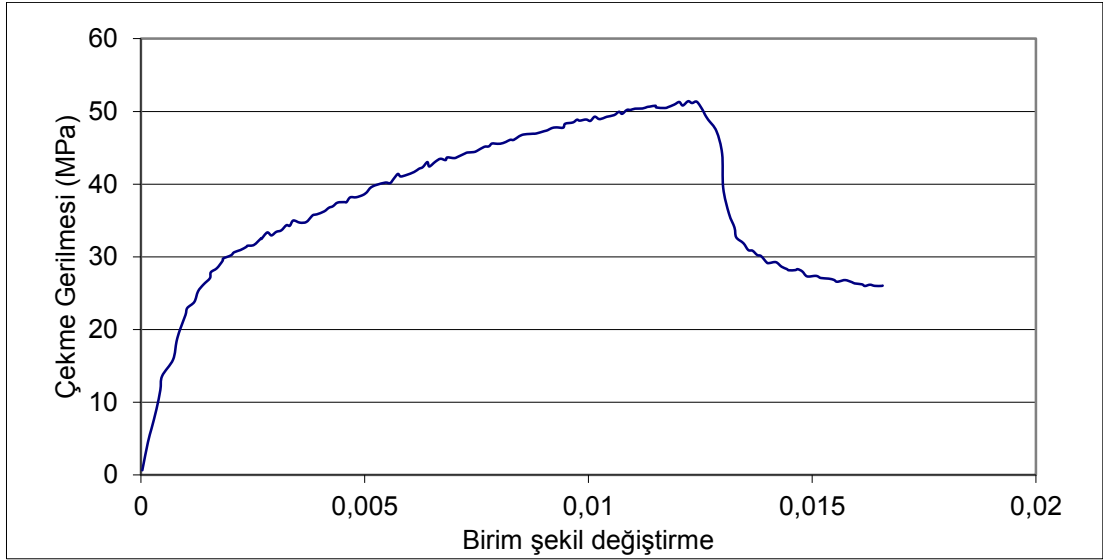
- [221] Nai, S. M. L. and Gupta, M., "Influence of stirring speed on the synthesis of Al/SiC based functionally gradient materials", *Composite Structures*, 57, 227-233, (2002).
- [222] Nikanorov, S. P., Volkov, M. P., Gurin, V. N., Burenkov, Y. A., Derkachenko, L. I., Kardashev, B. K., Regel, L. L. and Wilcox, W. R., "Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt", *Materials Science and Engineering: A*, 390, 63-69, (2005).
- [223] Izadi, H., Nolting, A., Munro, C., Bishop, D. P., Plucknett, K. P. and Gerlich, A. P., "Friction stir processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy", *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1900-1907, (2013).
- [224] Zakeri, M. and Vakili-Ahrari Rudi, A., "Effect of shaping methods on the mechanical properties of Al-SiC composite", *Materials Research*, 16, 1169-1174, (2013).
- [225] Ayyar, A. and Chawla, N., "Microstructure-based modeling of crack growth in particle reinforced composites", *Composites Science and Technology*, 66, 1980-1994, (2006).
- [226] Zakaria, H. M., "Microstructural and corrosion behavior of Al/SiC metal matrix composites", *Ain Shams Engineering Journal*, 5, 831-838, (2014).
- [227] Chennakesava Reddy, A. and Zitoun, E., "Matrix Al-Alloys for Silicon Carbide Particle Reinforced Metal Matrix Composites", *Indian Journal of Science and Technology*, 3, 1184-1187, (2010).
- [228] Myriounis, D. P., Hasan, S. T. and Matikas, T. E., "Predicting Interfacial Strengthening Behaviour of Particulate-Reinforced MMC — A Micro-mechanistic Approach", *Composite Interfaces*, 17, 347-355, (2010).
- [229] Mason, J. J. and Ritchie, R. O., "Fatigue crack growth resistance in SiC particulate and whisker reinforced P/M 2124 aluminum matrix composites", *Materials Science and Engineering: A*, 231, 170-182, (1997).

- [230] Meena, K. L., Manna, D. A., Banwait, D. S. S. and Jaswanti, D., "An Analysis of Mechanical Properties of the Developed Al/SiC-MMC's", *American Journal of Mechanical Engineering*, 1, 14-19, (2013).
- [231] El-Kady, O. and Fathy, A., "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", *Materials & Design*, 54, 348-353, (2014).
- [232] Kaynak, C. and Boylu, S., "Effects of SiC particulates on the fatigue behaviour of an Al-alloy matrix composite", *Materials & Design*, 27, 776-782, (2006).
- [233] Pal, S., Ray, K. K. and Mitra, R., "Room temperature mechanical properties and tensile creep behavior of powder metallurgy processed and hot rolled Al and Al-SiCp composites", *Materials Science and Engineering: A*, 527, 6831-6837, (2010).
- [234] Ferreira, A. J. M., *MATLAB Codes for Finite Element Analysis: Solids and Structures*, 157/Solid Mechanics and Its Applications, Dordrecht ; London Springer, 130, (2008).

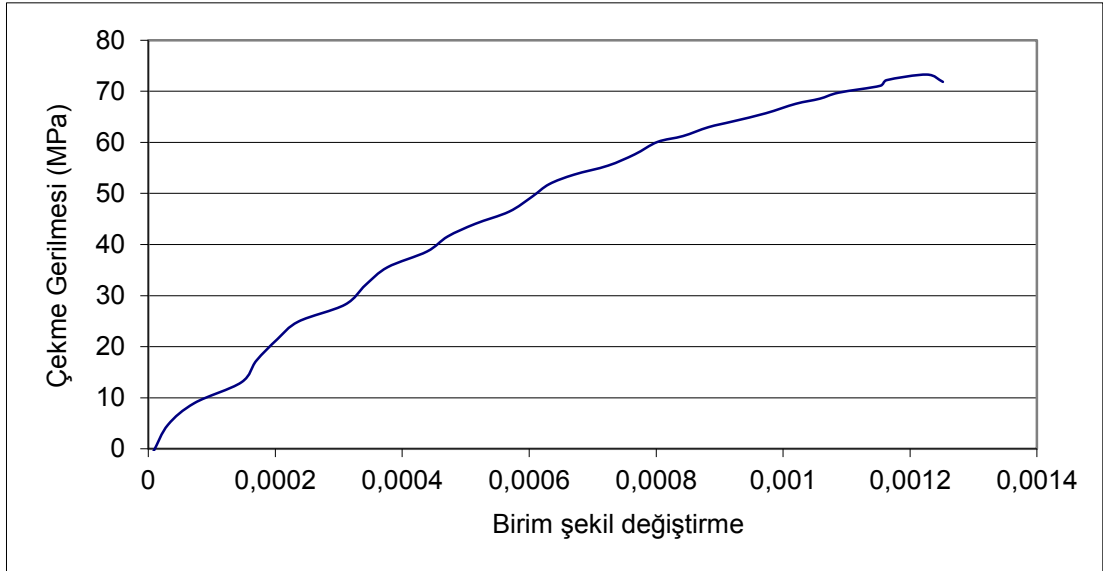
EKLER

9. EKLER

EK A



Şekil A.1: Saf Al içeriğinden oluşan bir numunenin Çekme Gerilme deney grafiği



Şekil A.2: %5 SiC içeriğine sahip bir numunenin Çekme Gerilme deney grafiği

10. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Savaş Evran

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul / 27.08.1983

Lisans Üniversite : Marmara Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Marmara Üniversitesi

Elektronik posta : evran258@hotmail.com

İletişim Adresi : 960 Toki Konutları B2/10 Daire:7 Kepez
ÇANAKKALE

Yayın Listesi :

- Yılmaz, Y., Girgin, Z. and Evran, S., "Buckling Analyses of Axially Functionally Graded Nonuniform Columns with Elastic Restraint Using a Localized Differential Quadrature Method", *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 12, (2013)
- Yılmaz, Y. and Evran, S., "Free Vibration Analysis of Axially Layered Functionally Graded Short Beams Using Experimental and Finite Element Methods ", *Science and Engineering of Composite Materials*, doi: 10.1515/secm-2014-0161, (2014)