



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SANDVIÇ KİRİŞLERDE ÇATLAK DURUMUNUN SERBEST TİTREŞİME VE
BURKULMA YÜKÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

MURAT AKDOĞAN

Ekim 2020

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SANDVIÇ KİRİŞLERDE ÇATLAK DURUMUNUN SERBEST TİTREŞİME VE
BURKULMA YÜKÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

MURAT AKDOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU

Ekim 2020

Murat AKDOĞAN tarafından **Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU** danışmanlığında hazırlanan “**Sandviç Kirişlerde Çatlak Durumunun Serbest Titreşime ve Burkulma Yüküne Etkisinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Serkan TOROS, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü İmza |

Üye : Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü İmza |

Üye : Doç. Dr. Süleyman KILIÇ, Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-
Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü İmza |

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Murat AKDOĞAN

ÖZET

SANDVIÇ KİRİŞLERDE ÇATLAK DURUMUNUN SERBEST TİTREŞİME VE BURKULMA YÜKÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

AKDOĞAN, Murat

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU

Ekim 2020, 108 sayfa

Yapılan bu tez çalışması kapsamında sandviç kirişlerde çatlak durumunun serbest titreşim ve burkulma yüklerine olan etkileri araştırılmıştır. Farklı kalınlıkta çekirdek tabakalarına sahip üç tabakalı ve eşit kalınlıkta çekirdek ve yüzey tabakalarına sahip beş tabakalı olmak üzere toplam kiriş kalınlıkları eşit olan iki çeşit ankastre sandviç kiriş modeli oluşturulmuştur. Farklı derinlikte ve ankastre uca göre farklı mesafelerde modellenen enine V çatlak hasarı durumları için çatlağın, sandviç kirişin serbest titreşim ve burkulma durumlarına etkileri sonlu elemanlar modelleri oluşturularak MATLAB yazılımı yardımı ile incelenmiştir. Ele alınan sandviç kirişlerin sonlu elemanlar modellemeleri, burkulma durumları için Euler-Bernoulli ve serbest titreşim durumları için Timoshenko kiriş teorileri kullanılarak yapılmıştır. Yüzey tabakası malzemesi olarak yapısal çelik levha, çekirdek tabakası malzemesi olarak ise PVC ve alüminyum köpük seçilerek çatlak durumunun yanı sıra çekirdek malzemesi türü ve kalınlığının etkileri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde genel olarak çatlak konumunun ankastre uçtan uzaklaştıkça etkisinin azaldığı ve çatlak derinliğinin artması ile serbest titreşim ve burkulma değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Sandviç kiriş, serbest titreşim, burkulma, çatlak, MATLAB, sonlu elemanlar metodu

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CRACK STATUS ON FREE VIBRATION AND BUCKLING LOAD IN SANDWICH BEAMS

AKDOGAN, Murat

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Professor Dr. Yusuf CUNEDIOGLU

October 2020, 108 pages

Within the scope of this thesis study, the effects of crack situation on the sandwich beams on the free vibration and buckling loads were investigated. Two types of built-in sandwich beam models with five layers with equal thickness cores and surface layers and three layers with different thickness core layers have been created. For the transverse V crack damage situations modeled at different depths and different distances according to the built-in point, the effects of the crack on the free vibration and buckling conditions of the sandwich beam were studied with the help of MATLAB software by creating finite element models. Finite element models of the examined sandwich beams were made using Euler-Bernoulli theory for buckling conditions and Timoshenko beam theory for free vibration states. Structural steel plate as the surface layer material, PVC and aluminum foam as the core layer material were selected and the effects of the core material type and thickness were investigated as well as the crack condition. The obtained results show that the effect of the crack position decreases as the distance from the built-in point decreases and the free vibration and buckling values decrease with an increasing crack depth. .

Keywords: Sandwich beam, free vibration, buckling, crack, MATLAB, finite elements method, FEM

ÖNSÖZ

Yapılan bu yüksek lisans tezi çalışmasında, eşit kalınlıkta çekirdek ve yüzey tabakalarına sahip beş tabakalı ve farklı kalınlıkta çekirdek tabakalarına sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için çatlak hasarının serbest titreşime ve burkulma durumuna olan etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, modellenen sandviç kirişler ankastre kiriş olarak kabul edilmiş ve ankastre uçtan farklı uzaklıklarda ve farklı derinliklere sahip V çatlak hasarı durumu için analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak burkulma durumu ve Timoshenko kiriş teorisi kullanılarak serbest titreşim durumu için sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Modellemede çatlak, boyutsuz ve kütsüz bir yay eleman olarak kabul edilmiş ve MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans tezi çalışması süresince, yapılan çalışmalara yön veren ve yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans tez danışmanım sayın Prof. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine ve tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
EKLER DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Yüzey Tabakası Malzemeleri	4
1.2 Çekirdek Tabakası Malzemesi	4
1.3 Yapışma Tabakası Malzemesi	5
1.4 Sandviç Yapıların Avantaj ve Dezavantajları	5
BÖLÜM II LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	9
BÖLÜM III MATERYAL VE YÖNTEM	14
3.1 Kirişlerde Burkulma Durumu	18
3.1.1 Bazı sınır şartlarında euler burkulma yükleri	19
3.2 Kirişlerde Serbest Titreşim Durumu	20
3.3 Sonlu Elemanlar Metodu	21
3.4 Burkulma Durumunun Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi	22
3.5 Serbest Titreşim Durumunun Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi	28
3.6 Çatlağın Modellenmesi	35
3.7 Oluşturulmuş Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması	43
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1 Sandviç Kirişlerde Serbest Titreşim Durumunun İncelenmesi	49
4.2 Sandviç Kirişlerde Burkulma Durumunun İncelenmesi	61
4.3 Sandviç Kirişlerde Ağırlık Durumu	73
BÖLÜM V SONUÇLAR	76
KAYNAKLAR	78
EKLER	84

ÖZ GEÇMİŞ	108
-----------------	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Euler burkulma yükleri	20
Çizelge 3.2. Çatlaksız sandviç kiriş modeli için serbest titreşim doğrulama sonuçları ..	44
Çizelge 3.3. Çatlaklı sandviç kiriş modeli için serbest titreşim doğrulama sonuçları	44
Çizelge 3.4. Çatlaklı ve çatlaksız kolon modeli için doğrulama sonuçları.....	45
Çizelge 4.1. Oluşturulan tek malzemeli ve sandviç kirişlerin ağırlık ve burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişimler	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Sandviç yapı örneği	1
Şekil 1.2. Sandviç yapının eğilme rijitliklerine etkisi	2
Şekil 1.3. Sandviç yapıda oluşan gerilmeler.....	3
Şekil 1.4. Sandviç yapılarda bağlantı örnekleri	6
Şekil 1.5. Sandviç kirişlerde hasar durumları, yüzey hasarı (a), çekirdek kayma hasarı (b), yüzey kırışması hasarı (c) ve (d), burkulma durumu (e), kayma sıkışması hasarı (f), yüzey çukurluğu hasarı (g) ve çekirdek girintisi hasarı (h)	7
Şekil 1.6. Burkulma yüküne maruz sandviç yapıda çekirdek tabakasında hasar durumu.	8
Şekil 3.1. İncelenen sandviç kiriş modelleri, ankastre sandviç kiriş modeli (a), beş tabakalı sandviç kiriş kesiti (b) ve üç tabakalı sandviç kiriş kesit modeli (c)	15
Şekil 3.2. Sandviç kirişlerde çatlak durumu örnekleri	18
Şekil 3.3. Kiriş eleman ve koordinat sistemleri	22
Şekil 3.4. Timoshenko kiriş eleman	29
Şekil 3.5. Çatlak yüzeyinin yer değiştirmesinin temel modları	36
Şekil 3.6. Çatlaklı kiriş elemanın yükleme durumu	36
Şekil 3.7. Çatlak ucu koordinatları.....	37
Şekil 3.8. Her iki ucu sabit kolonun çatlak modellemesi	45
Şekil 4.1. Doğal frekans modları, 1. doğal frekans modu (a), 2. doğal frekans modu (b), 3. doğal frekans modu (c) ve 4. doğal frekans modu (d)	48
Şekil 4.2. Burkulma modları şekilleri, 1. burkulma yükü modu (a), 2. burkulma yükü modu (b), 3. burkulma yükü modu (c) ve 4. burkulma yükü modu (d)	49
Şekil 4.3. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi	50
Şekil 4.4. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi.....	51
Şekil 4.5. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi	52
Şekil 4.6. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi.....	53

Şekil 4.7. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının doğal frekanslar üzerindeki etkisi.....	54
Şekil 4.8. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı ve beş tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının doğal frekanslar üzerindeki etkisi	56
Şekil 4.9. Beş tabakalı PVC çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi	57
Şekil 4.10. Beş tabakalı alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi.....	58
Şekil 4.11. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip PVC çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi	59
Şekil 4.12. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip alüminyum çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi.....	60
Şekil 4.13. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi.....	62
Şekil 4.14. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi	63
Şekil 4.15. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi	64
Şekil 4.16. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi	65
Şekil 4.17. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının burkulma yükleri üzerindeki etkisi	66
Şekil 4.18. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı ve beş tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının burkulma yükleri üzerindeki etkisi	68

Şekil 4.19. Beş tabakalı PVC çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi	69
Şekil 4.20. Beş tabakalı alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi	70
Şekil 4.21. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip PVC çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi.....	71
Şekil 4.22. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip alüminyum çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi.....	72

EKLER DİZİNİ

EK-A: Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı, PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	84
EK-B: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	85
EK-C: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	86
EK-Ç: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	87
EK-D: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	88
EK-E: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	89
EK-F: Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	90
EK-G: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	91
EK-Ğ: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	92
EK-H: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	93
EK-I: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	94
EK-İ: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim	95
EK-J: Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim	96

EK-K: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	97
EK-L: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	98
EK-M: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	99
EK-N: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	100
EK-O: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	101
EK-Ö: Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim	102
EK-P: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	103
EK-R: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	104
EK-S: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	105
EK-Ş: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	106
EK-T: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim.....	107

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
E	Elastisite modülü
M	Eğilme momenti
I	Alan atalet momenti
E_y	Yüzey tabakası elastisite modülü
E_c	Çekirdek tabakası elastisite modülü
V_{top}	Sandviç kirişin hacmi
V_y	Yüzey tabakasının hacim oranı
V_c	Çekirdek tabakasının hacim oranı
ρ	Yoğunluk
ρ_y	Yüzey tabakası malzemesinin yoğunluğu
ρ_c	Çekirdek tabakası malzemesinin yoğunluğu
ρ_{top}	Sandviç kirişin toplam yoğunluğu
L	Uzunluk
b	Genişlik
h	Çekirdek tabakası kalınlığı
H	Sandviç kiriş kalınlığı
V	Kesme kuvveti
P	Eksenel yük
P_{kr}	Kritik burkulma yükü
w	Yayıllı yük
λ	Narinlik oranı
λ_y	Kritik narinlik oranı değeri
L_b	Etkin uzunluk
r	Dönme yarıçapı
A	Kesit alanı
σ	Gerilme

$\Psi(x,t)$	Kiriş kesitinin dönme açısı
$w(x,t)$	Kiriş kesitinin yanal sapması
U	Potansiyel enerji
T	Kinetik enerji
ω	Serbest titreşim frekansı
κ	şekil düzeltme faktörü
G	Kayma rijitlik modülü
N	şekil fonksiyonları
U_a^e	Eksenel deformasyonlar için şekil değiştirme enerjisi
U_f^e	Çökme deformasyon için şekil değiştirme enerjisi
$[k]_e$	Eğilme rijitliği matrisi
$[k]_g$	Geometrik rijitlik matrisi
$[K]$	Eleman rijitlik matrisi
D	Düğümelerin yer değiştirme vektörü
$[M]$	Kütle matrisi
ν	Poisson oranı
J	şekil değiştirme enerjisi serbest bırakma oranı
K	Gerilme şiddet faktörü
F	Doğrulama faktörleri
c	Esneklik katsayıları
$[C]$	Esneklik katsayıları matrisi
$[K]_{wcr}$	Çatlaklı kirişin rijitlik matrisi
$[K]_{cr}$	Çatlağın rijitlik matrisi

Kısaltmalar

Açıklama

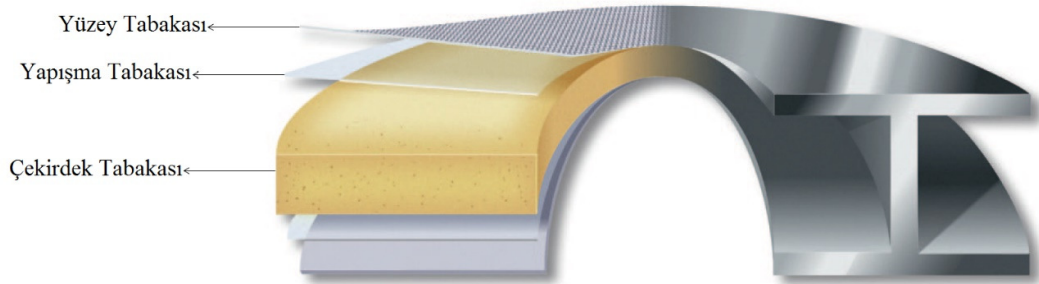
Al	Alüminyum
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
PVC	Poli Vinil Klorür

BÖLÜM I

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile yeni uygulamalarda artan performans istekleri, araştırmacıları yeni malzeme ve tasarım arayışına yöneltmiştir. Tek bir malzeme kullanılarak yüksek performans sağlamak zor olduğu durumlarda ise bu yöneliş farklı malzemeleri bir araya getirerek yeni bir malzeme oluşturma doğrultusunda ilerlemiştir. Tek bir malzemeden elde edilemeyen özellikleri sağlayan, farklı malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşan yapılar kompozit olarak adlandırılmaktadır (Wick ve Veilleux, 1986). Sandviç yapılar ise kompozitlerden farklı olarak birbiri içinde çözünmeden farklı malzemelerin bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir. Daha basit tanımı ile sandviç yapılar, ince ve rijitliği yüksek yüzey tabakaları arasına, yüzeylere göre daha kalın ancak hafif çekirdek malzemesi kullanılarak oluşturulurlar (Carlsson ve Kardomateas, 2011). Düşük ağırlıklarına karşın sahip oldukları yüksek dayanım ve rijitlikten dolayı sandviç yapılar uçak ve uzay sanayinde, otomotiv, denizcilik ve ulaşım gibi birçok sektörde kullanım alanına sahiptir.

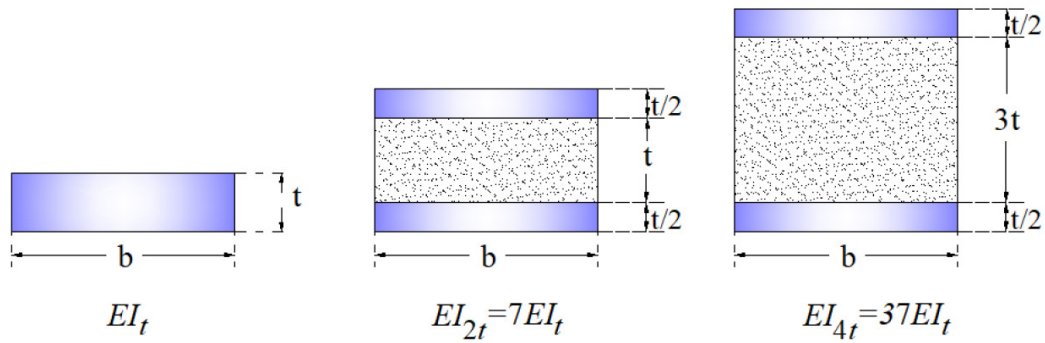
Sandviç yapılar üç temel birimden meydana gelmektedir. Bunlar sıklıkla kullanılan yapı malzemeleri olabileceği gibi özel uygulama alanlarına sahip malzemelerden de seçilebilmektedir. Merkezde çekirdek malzemesi tabakası, çekirdek tabakasının alt ve üst yüzeylerinde yüzey malzemesi tabakası ve çekirdek ile yüzey tabakalarını bir arada tutan yapıştırıcı malzemesi tabakasının bir araya gelmesiyle sandviç yapılar elde edilir. Ayrıca istenilen performans ve yapılan tasarım doğrultusunda tabaka sayısı artırılabilir.



Şekil 1.1. Sandviç yapı örneği (Diab Handbook, 2020)

Sandviç yapılarda yapıyı oluşturan her bir parça birim olarak kendi fonksiyonunu yerine getirmektedir. Bu yapılarda temel amaç çekirdek tabakası sayesinde yüzey tabakalarını birbirinden belirli bir mesafede tutarak ağırlıkta artış meydana gelmeden daha rijit ve yüksek mukavemetli yapı elde etmektir. Yüzey tabakası malzemesi, çekirdek tabakası malzemesine göre nispeten daha yüksek bir yoğunluğa sahip olduklarından dolayı düşük ağırlığa karşın rijitlik(sertlik) ve mukavemet elde edilir (Diab Handbook, 2020).

Çekirdek tabakası sayesinde birbirine belirli bir mesafede tutulan yüzey tabakaları ile, sandviç bir kiriş aynı ağırlık ve genişlikteki tek malzemeden oluşan katı bir kirişe göre daha yüksek atalet momenti sebebiyle daha yüksek eğilme rijitliğine sahip olur.



Şekil 1.2. Sandviç yapının eğilme rijitliklerine etkisi (Aydıncak, 2007)

Şekil 1.2’de sandviç yapı modelinin kirişlerin eğilme rijitliklerine olan etkisi gösterilmektedir. Burada E yüzey malzemesinin elastisite modülü, I atalet momentidir.

Hesaplamalarda çekirdek tabakasının sandviç yapının eğilme rijitliğine olan katkısı, çekirdek malzemesinin yüzey malzemesine göre çok düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı göz ardı edilebilecek durumda varsayılmıştır. Bu durumda, genişliği b ve kalınlığı t olan modeller için eğilme rijitlikleri,

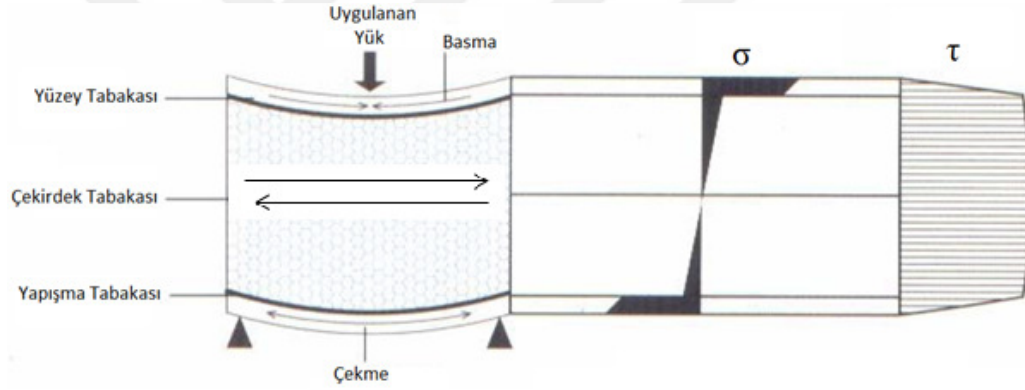
$$EI_t = E \frac{1}{12} bt^3 \quad (1.1)$$

$$EI_{2t} = E \times 2 \left(\frac{1}{12} b \frac{t^3}{8} + b \frac{t}{2} \left(\frac{t}{4} + \frac{t}{2} \right)^2 \right) = E \frac{7}{12} bt^3 \quad (1.2)$$

$$EI_{At} = E \times 2 \left(\frac{1}{12} b \frac{t^3}{8} + b \frac{t}{2} \left(\frac{t}{4} + \frac{3t}{2} \right)^2 \right) = E \frac{37}{12} b t^3 \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilebilmektedir.

Ayrıca sandviç bir kirişin yükleme durumu incelendiğinde, basma yüküne maruz kalan yüzeye basma kuvveti ve karşı tarafta kalan yüzey tabakasına çekme kuvveti etkilemektedir. Böyle bir yükleme durumunda çekirdek tabakası kayma gerilmelerinin etkisinde kalırken, yüzeyler arasındaki mesafeyi koruyarak yapının rijitliğini desteklemektedir. Bu aşamada en önemli ölçütlerden biri ise yüzey tabakaları ve çekirdek arasındaki yapışma tabakasının kusursuzluğudur.



Şekil 1.3. Sandviç yapıda oluşan gerilmeler (Tortoç, 2009)

Sandviç kirişlerde önemli konulardan bir tanesi de malzeme seçimidir. Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi sandviç bir kiriş üç temel bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenler ince ancak dayanımı yüksek yüzey tabakaları, kalın ancak hafif çekirdek tabakası ve bu tabakaları bir arada tutan yapıştırıcı tabakasıdır. Tabakalarda kullanılacak olan malzeme türü kadar bir bütün olarak sandviç yapı içerisinde diğer tabaka malzemeleri ile uyum içinde çalışması da tamamen üretilen yapının performansını etkilemektedir.

Tabi ki malzeme seçiminde tek etken mekanik özellikler değildir. Çevresel direnç, yüzey kalitesi, üretim yöntemi, maliyet ve aşınma direnci gibi etkilere malzeme seçiminde önemli faktörlerdendir. Bu yüzden sandviç yapılar için malzeme seçimi çok geniş bir konudur ve fiber kompozitlerin de sandviç yapılarda yüzey malzemesi olarak

kullanılmaya başlanması ile özellikle yüzey malzemesi için hepsi farklı özelliklere sahip yüzlerce malzeme seçeneği oluşmuştur. Çekirdek tabakası malzemesi için de benzer şekilde hücresel plastiklerin geliştirilmesinden bu yana, mevcut çekirdek tabakası malzeme seçeneği sayısında da artışlar yaşanmıştır. Ayrıca çok sayıda malzeme seçeneği bir problem olarak görülse de bu seçenek genişliği her geçen gün sandviç yapıların hayatımıza daha fazla girmesini etkilemektedir (Zenkert, 1997).

1.1 Yüzey Tabakası Malzemeleri

Sandviç kirişlerde kullanılan tabakaların birinci işlevi, kirişin yeterli rijitliğe sahip olmasını sağlamaktır (Marshall, 1998). Ek olarak, yüzey tabakası malzemelerinden yüksek sertlik, yüksek çekme ve basma dayanımı, çevresel ve aşınma direnci gibi özelliklerde beklenmektedir. Yüzey tabakaları malzemesi için son zamanlara kadar yaygın olarak çelik, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi ince metal levhalar tercih edilmekteydi. Ancak gelişen teknoloji ile günümüzde metallerin yerine yüzey tabakası malzemesi olarak fiber kompozitlerde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca kompozitlerin uygulanmasının daha kolay olması ve sahip oldukları anizotropik davranışlar sayesinde uyarılma durumu mümkün olduğu için tasarım genişliği sağlamaktadır (Diab Handbook, 2020).

1.2 Çekirdek Tabakası Malzemesi

Sandviç kirişlerde çekirdeğin işlevi, ince yüzey tabakalarının içe ve dışa doğru çökmesini engelleyerek, yüzey tabakalarını birbirinden belirli bir mesafede sabit tutmak ve kirişin deforme olmasını engellemektir. Bundan dolayı çekirdek tabakası malzemesi, yüzey tabakaları arasındaki mesafeyi sabit tutacak kadar dayanıklı olmalıdır. Ayrıca yüzeylerin çekirdeğin üzerinden kaymasını engellemesi gerekmektedir. Ayrıca çekirdek tabakası malzemesinden düşük yoğunluk, burkulma, yalıtım ve yaşlanma direnci gibi özellikleri de karşılaması beklenmektedir. (Diab Handbook, 2020).

Çekirdek tabakası oluklu, petek, balsa ağacı ve köpük gibi farklı şekilde malzemelerden kullanılabilir ve çekirdek tabakası malzemesi olarak yukarıda belirtilen özellikleri karşılamak için ahşap, alüminyum ve çeşitli köpük malzemeleri seçilebilmektedir (Zenkert, 1997). Köpük çekirdekli sandviç kirişlerde ise en yaygın

olarak, uygun sertlik/ağırlık oranına, iyi darbe direncine ve yüksek yorulma direncine sahip olmasından dolayı PVC (Poli Vinil Clorür) köpüğü tercih edilmektedir (Alkeflawi, 2018).

1.3 Yapışma Tabakası Malzemesi

Yüzey tabakaları ile çekirdek tabakalarının birbiri ile bir bütün olarak çalışabilmesini sağlamak için, yapıştırıcı malzeme yüzeyler ve çekirdek arasındaki kesme kuvvetini aktarabilmelidir ve kesme ile çekme gerilmelerini taşıyabilmelidir (Diab Handbook, 2020).

Ancak yapışma tabakasındaki kesme ve çekme gerilmeleri oldukça karmaşık olmasından dolayı, yapılan bilimsel çalışmalarda yapıştırıcının çekirdekteki kayma gerilmelerine eşit gerilmeler taşıdığı düşünülmektedir (Davies, 2001).

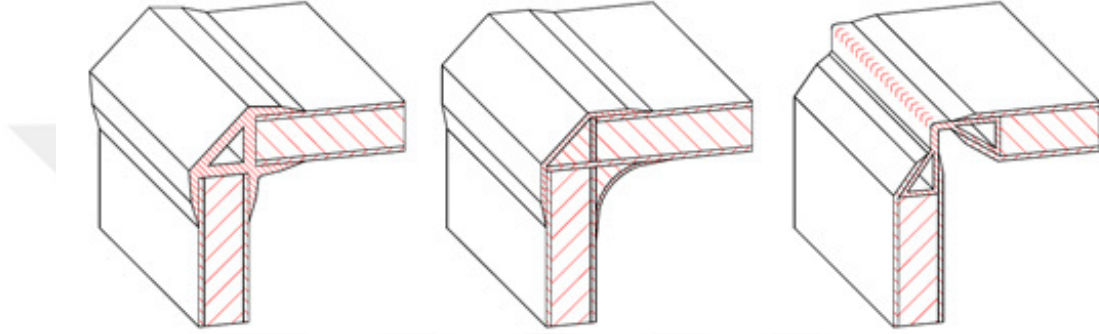
Bahsedilen malzeme özellikleri ve sahip olunan seçenekler sayesinde, istenilen performans ve çalışma şartlarına bağlı olarak farklı özelliklere sahip çeşitli yapılarda sandviç kirişler oluşturulabilmektedir. Buda sandviç kirişler için geniş bir kullanım alanı bulmasına ve geleneksel malzemelerin yerini almasına imkân sağlamaktadır. Bunun için öncelikli olarak sandviç yapıların geleneksel tek malzemeli benzerlerine göre avantaj ve dezavantajlarının bilinmesi ve hasar durumlarının incelenmesi gerekmektedir.

1.4 Sandviç Yapıların Avantaj ve Dezavantajları (Zenkert, 1997)

Sandviç yapılar, doğru bir şekilde yapılan tasarım ile yapıyı oluşturan tüm bileşenlerin sahip oldukları özelliklerin üst sınıra kadar kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Oluşturulan bu yapılar ile yüksek sertlik/ağırlık oranı ve yüksek eğilme dayanımı/ağırlık oranı elde etmek amaçlanmaktadır. Ayrıca yüzey tabakası malzemesi olarak fiber kompozitlerin kullanılması ile bu oran daha yüksek hale gelebilmektedir.

Yüzey tabakalarının sürekli desteklenmesi ile sertleştirilmiş geleneksel tek malzemeli yapılardan farklı olarak yüzeylerin bükülmeden, oldukça yüksek basınçlar altında bile düz kalmasını sağlar. Ayrıca sandviç yapıların çeşitli uygulamalarda yüksek yorulma

dayanımlarına da sahip olduğu görülmektedir. Tabakaların birleştirilmesi esnasında perçin ve cıvata gibi bağlantılara ihtiyaç duymadan üretilebilir olması ve montaj işlemlerinde kolaylık sağlaması sandviç yapıların avantajlarından biridir. Bu sayede parça ve montaj maliyetinden ek bir azalmada sağlanabilmektedir. Diğer bir önemli avantajı ise tek malzemeli yapıların aksine kullanım gereksinimlerine göre özelliklerin ayarlanabilmesidir.



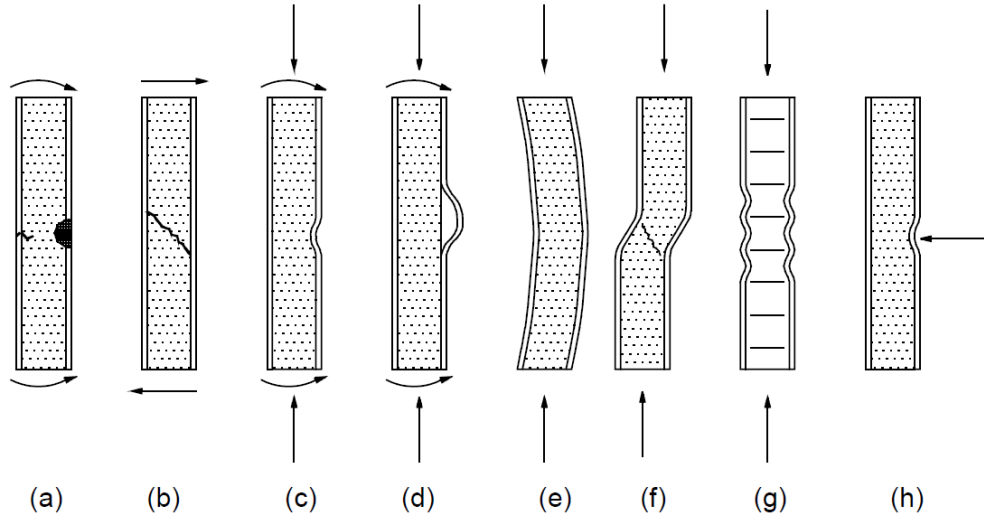
Şekil 1.4. Sandviç yapılarda bağlantı örnekleri (Zenkert, 1997)

Her üründe olabileceği gibi sandviç yapılarında bazı dezavantajları vardır. Konsept birçok uygulama için oldukça yeni olduğu için, bazı alanlarda araştırma ve geliştirme ihtiyacı halen devam etmektedir. Sandviç yapılar nispeten yeni sayılabileceği için tasarımcılar tarafından tedbirli bir şekilde yaklaşılmakta ve tasarımlar olması gerekenden daha ağır oluşturulmaktadır. Araştırma ihtiyacı olan bir diğer konu ise sandviç yapıların yorulma durumlarıdır. Hasar ve hasar büyümesinin hesaba katılarak yorulma değeri hakkında daha kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca sandviç kirişlerin sahip olduğu dezavantajlara daha kalın ve pahalı olmaları, hasar durumunda tamirlerinin zor olması da eklenebilmektedir.

Sandviç yapılar için diğer önemli bir husus ise kusur durumlarının iyi bir şekilde araştırılarak tasarımın ve performans gerekliliklerinin hasara sebep vermeyecek şekilde yapılması gerekmektedir. Kusur durumu kirişlerde dahil olmak üzere sandviç yapılarda dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardır.

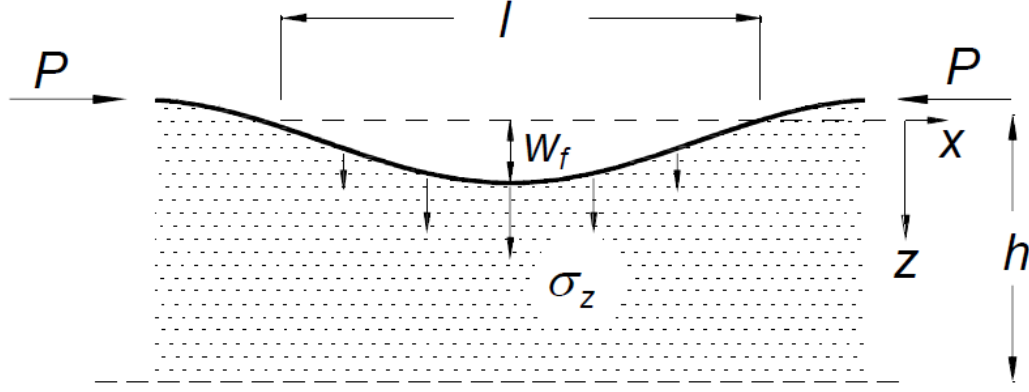
Ağırlık ve rijitlik konusunda elde edilen avantaj, kusur durumu iyi bir şekilde incelenmemiş ve kusur önleyici tedbirler alınmamış sandviç yapılar ile bir anda dezavantaj durumuna dönüşebilmektedir. Oluşan bu kusur durumları sandviç yapının

yapısal özelliklerine ve yükleme durumuna göre değişebildiği için tasarımın uygun çalışma şartlarına göre yapılması gerekmektedir. Sandviç yapılarda yaygın olarak görülen kusur durumları şekildeki gibidir (Zenkert, 1997).



Şekil 1.5. Sandviç kirişlerde hasar durumları, yüzey hasarı (a), çekirdek kayma hasarı (b), yüzey kırışması hasarı (c) ve (d), burkulma durumu (e), kayma sıkışması hasarı (f), yüzey çukurluğu hasarı (g) ve çekirdek girintisi hasarı (h) (Zenkert, 1997)

Şekil 1.5’ de belirtilen kusur şekillerinden burkulma, yapıların güvenli bölge sınırlarında çalışabilmesi için incelenmesi ve sınırlarının belirlenmesi gereken kritik kusurlardan birisi olmasından dolayı tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Her ne kadar burkulma belirli bir düzeye kadar yapıya zarar vermesede kaçınılması gereken bir durumdur. Burkulmuş bir yapı amacını yerine getirme kabiliyetini kaybetmekte ve yükün kritik bir değerinde şekil değişimi plastik deformasyon boyutuna gelerek hasar oluşmaktadır (Zenkert, 1997).



Şekil 1.6.Burkulma yüküne maruz sandviç yapıda çekirdek tabakasında hasar durumu (Zenkert, 1997)

Yapılan bu tez çalışması kapsamında, sandviç yapıda oluşabilecek kusur durumlarından burkulma ve titreşim durumu incelenmiştir. Başlangıç durumunda enine V çatlak hasarı bulunduran sandviç kirişlerde, çatlak durumunun kirişin titreşim ve burkulma özelliklerine olan etkisi sonlu elemanlar metodu kullanılarak MATLAB yazılımı yardımı ile analiz edilmiştir. Ele alınan sandviç kirişler eşit kalınlıkta yüzey ve çekirdek tabakalarına sahip beş tabakalı ve farklı kalınlıkta çekirdek tabakalarına sahip üç tabaka olarak iki farklı şekilde modellenmiş, yüzey tabakası malzemesi olarak yapısal çelik, çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC ve alüminyum köpük seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kirişlerde yapışma tabakası tamamen mükemmel olarak ele alınmış ve yapıştırma etkisi göz ardı edilmiştir. Modellenen enine çatlaklar 1-4mm aralığında değişen derinliklerde ve kiriş üzerinde ankastre uca göre 0,2-0,8m aralığında değişken mesafelerde modellenmiş, ankastre kiriş modeli ele alınarak farklı derinlik ve konumdaki enine çatlakla sahip sandviç kirişlerin titreşim ve burkulması incelenmiştir. İlaveten çatlaksız sağlam kirişlerin analizleri de gerçekleştirilerek çatlakın etkisi daha net bir şekilde ifade edilmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde özellikle inşaat, makine, uzay ve havacılık teknolojilerinde yaygın bir şekilde sandviç kiriş elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu yapı elemanlarının gerek imalatından gerekse çalışma ve çevre şartlarından kaynaklı yüzey çatlaklı hasar durumlarıyla karşılaşmaktadır. Oluşan bu çatlaklar yapıda rijitlik düşüşlerine sebep olmaktadır. Yapıdaki rijitlik düşüşü sistemin burkulma yük değerlerini ve serbest titreşim karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle tasarım esnasında bu durumun göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Literatürde sandviç kirişlerin serbest titreşimi ve burkulması ile ilgili çok sayıda çalışma mevcut olup bunlardan bazıları şöyledir;

Birman ve Simites(2011), çalışmalarında katmanlarda enine çatlaklı sandviç panel ve kirişlerin titreşim sorununa çözüm aramışlardır. Çözümlerinde birinci dereceden kayma deformasyon teorisini kullanmış ve açık-kapalı matris çatlaklı yüzeylerin tepkilerini incelemişlerdir.

Ferdous vd.(2018), çalışmalarında yeni bir kompozit kiriş türü olan katmanlı sandviç kiriş üzerine incelemeler yapmışlardır. Sandviç sistemi, cam elyaf takviyeli polimer yüzey ve fenolik köpükten oluşmaktadır. Çalışmalarında bu yeni konseptin yapısal uygunluğunu araştırmak için, katmanlı sandviç kirişin eğilme ve kayma davranışı üzerine yoğunlaşmışlardır. Bunun için Strand 7 yazılımı kullanılarak hazırlanan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile yapılan analizler sonucunda katmanlı sandviç kirişin, katmanların burkulmasını ve çentiklenmesini önleyecek artan bir kesitsel stabiliteye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, kirişin temel davranışını farklı yükleme durumlarında %10 ile %14 arasında güvenilir bir şekilde tahmin edebildiği görülmüştür.

Bonerji ve Sobey (2005), üç tabakalı sandviç bir kirişin dinamik rijitlik teorisini kullanarak serbest titreşim karakteristiğini araştırmışlardır. Çalışmalarında çekirdek tabakasını bir Timoshenko kirişi gibi, yüzey tabakalarını ise Rayleigh kirişi gibi

düşünmüşlerdir. Sandviç kirişin hareket denklemleri Wittrick-Williams algoritması kullanılarak elde edilmiştir.

Daş ve Yılmaz(2018), ise farklı bir çalışma yaparak, sandviç kirişlerin sadece düz değil, eğri şekilde de kullanılabileceklerini ifade etmiş ve çatlaklı, çelik ve kompozit olmak üzere iki farklı malzemeden yapılmış olan dairesel eğri kirişlerin titreşim durumlarını ANSYS yazılımı kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında kiriş, Rayleigh-Ritz kirişi olarak ele alınmış ve konsol ve iki ucu sabit mesnetli bağlantı şekilleri kullanılarak, çatlağın farklı derinlik ve lokasyonda bulunma durumlarında incelemişlerdir. Sonuç olarak ise farklı konumlardaki değişen çatlak derinliği durumları için, çatlak derinliğinin artması ile doğal frekans değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Frostik ve Thomsen(2004), esnek çekirdeğe sahip sandviç panellerin serbest titreşimini yüksek mertebeden sandviç panel teorisi yardımıyla incelemişlerdir. Matematiksel formülasyon için, uygun sınır şartlarında korunum denklemlerinin türevlerini içeren Hamilton prensibini kullanmışlardır. Formülasyonda yüzey tabakaları için klasik ince levha teorisi ve çekirdek tabakası için üç boyutlu elastikiyet teorisi yardımı ile sandviç panellerin titreşim durumu ele alınmıştır. Çalışmada iki tür hesaplama modeli göz önünde bulundurulmuştur. İlk modelde, yüzey tabakalarını yer değiştirmelerine ek olarak dikey kayma gerilmeleri de hesaba katılmış, ikinci modelde ise ilk modelin yer değiştirme alanlarına dayanan, çekirdekteki yer değiştirme alanlarının polinom tanımı yapılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan formülasyon, klasik ve yüksek mertebeden panel teorileri ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum sayısal olarak doğrulanmıştır.

Douville ve Grogneç (2013), çalışmalarında çoklu yükler altında sandviç kiriş ve kolonların burkulma davranışını incelemişlerdir. Burkulma yüklerine maruz kolon kirişlerin, genel ve bölgesel olarak iki tip burkulma durumu incelenmiştir. Yükleme durumunda çekirdek ve yüzeylerin kalınlık etkileri dikkate alınmış ve çekirdek tabakasının ince olduğu durumlarda genel burkulma, çekirdek tabakasının yeterince kalın olduğu durumlarda ise yerel burkulma meydana geldiği görülmüştür

Gillichvd. (2014), enine çatlaklı sandviç kirişlerde hasar nedeniyle doğal frekans değişikliklerini değerlendirmek için bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritmada, hasar

değerlendirmesi iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk önce çatlak konumu belirlenmiş ve sonrasında etkileri araştırılmıştır. Bu teknik ile, titreşim modlarının frekans değişikliklerindeki kesin çözümünü sağlayan matematiksel bir ilişki kurulmuştur. Bunun için, kirişte depolanan gerilme enerjisi ve hasar etkisinde esnekliğin artması ile ilgili iki terim kullanılmıştır. Oluşturulan matematiksel ifade yardımıyla çok sayıda numune ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak matematiksel ifade doğrulanmıştır.

Sokolinsky vd. (2014), yumuşak polimer köpük çekirdeğe sahip bir sandviç kirişin doğal frekanslarını ve karşılık gelen titreşim modlarını sandviç paneller için yüksek mertebe teorisini, iki boyutlu sonlu elamanlar analizi ve klasik sandviç teorisini kullanarak araştırmış ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçların karşılaştırılması neticesinde, yüksek mertebe teorisinin sonlu elemanlar analizi ve deneysel verilerle iyi bir uyum içerisinde olduğu, ancak klasik sandviç teorisinin yumuşak çekirdekli sandviç kirişlerin serbest titreşim tepkisini yeterli kesinlikte tahmin edemediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca araştırmalar, yumuşak köpük çekirdeğin sönümleme özelliğinin, kalınlık-gerilme titreşim modları durumunda belirgin şekilde ortaya çıktığını, sönümlemenin anti-simetrik modlar üzerindeki etkisinin önemsiz olduğunu göstermiştir.

Negru vd.(2015), yapılarıdaki enine çatlakların, yapının sertliğinin yanı sıra doğal frekans değerlerini de etkilediğini belirtmiş ve sandviç kirişlerin doğal frekanslarının hasar meydana geldiğinde nasıl değiştiğini sonlu elamanlar analizi ile incelemişlerdir. Analizlerinde beş tabakalı, çelik ve PVC'den oluşankiriş, farklı derinlik ve konumlardaki çatlak durumlarında ele alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda eğilme momentinin bölgesel değeri ile frekans düşüşü arasındaki ilişki somut olarak örneklendirilmiş, ayrıca hasar ciddiyetini temsil eden frekans eğrisinin, herhangi bir frekans kaymasının çatlak derinliği ve konumuna göre elde edilebildiği durumlardan bahsedilmiştir.

Khalili vd. (2010) ve Bananpaek ve Khalili(2012), üç katmanlı simetrik sandviç kirişin serbest titreşimini, dinamik sertlik metodu kullanarak incelemişlerdir. Hareket denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiş ve sınır koşulları uygulanarak dinamik sertlik matrisi geliştirilmiştir. Doğal frekanslar ve mod şekillerini sayısal teknikler ve Wittrick-Williams algoritmasını kullanarak hesaplamışlardır.

Jasion vd. (2012), sandviç kirişlerin ve sandviç dairesel plakaların yüzey tabakalarının genel ve bölgesel burkulmaları ile ilgili analitik, nümerik ve deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Sandviç yapıların diferansiyel denklemleri türetilerek analitik yöntemle kritik yükleri hesaplanmış ve sonlu elemanlar modelleri formüle edilerek burkulma modlarını belirlemişlerdir. Sonuç olarak analitik, sayısal ve deneysel çalışmalarda elde edilen kritik yük değerleri karşılaştırılarak aralarındaki uyumdan bahsedilmiştir.

Moita vd. (2015), burkulma analizi için sert elastik tabakalar arasına sıkıştırılmış yumuşak çekirdekli sandviç yapı kullanarak sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar modeli, katmanların farklı davranışlarına izin verecek şekilde, katmanların kalınlık yönünde birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde sert elastik tabakalar için klasik tabaka teorisi, çekirdek için Reddy üçüncü mertebeden kayma yer değiştirme teorisini kullanmışlardır. Sonuç olarak, mevcut sonlu elemanlar modeli ile geliştirilen modelin uygunlukları karşılaştırılmıştır.

Shadaf (2013), çalışmasında gerilme şiddet faktörlerinin integrasyonunu kullanarak, çatlaklı bir kirişin eleman rijitlik matrisini türeterek çatlaklı kiriş için bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu sonlu elemanlar modeli, farklı konum ve boyutlardaki kenar çatlaklarına sahip konsol kirişe uygulanarak frekansları hesaplanmıştır. Sonrasında, çatlak konumunu tanımlayan bir metot önermiş ve gerilme şiddet faktörlerinin bilinmesi durumunda, daha karmaşık ve çeşitli çatlaklara sahip yapılarda önerilen metodun başarıya ulaşacağı savunulmuştur.

Smyczynski ve Magnucka (2017) çalışmasında, basit destekli üç tabakalı bir sandviç kirişin stabilite analizini gerçekleştirmiştir. Ele alınan sandviç kiriş iki adet yüzey tabakası, bir adet çekirdek tabakası ve iki adet yüzey ile çekirdek tabakaları arasındaki bağlantıyı sağlayan yapışma tabakası olmak üzere toplam beş tabaka olarak düşünülmüş ve çalışma bu yönde ilerlemiştir. İncelenen kiriş eksenel bir sıkıştırma ve titreşimli sıkıştırma işlemine maruz bırakılarak sistemin kritik yükleri, serbest titreşimleri ve dengesiz bölgeleri belirlenmiştir. Ayrıca analitik model, sonlu elemanlar analizi kullanılarak sayısal olarak doğrulanmıştır.

Karamanli ve Aydogdu (2019), izotropik, katmanlı kompozit ve sandviç kirişlerin elastik burkulma davranışlarını eksenel olarak değişen düzlem yüklerine ve sınır

şartlarına göre incelemişlerdir. Çalışmalarında matematiksel formülasyon, kayma ve normal deforme olabilen kiriş teorisine dayanan Ritz yöntemi kullanılarak türetilmiştir. Çalışmalar neticesinde, eksenel değişken düzlem içi yük tipinin, sınır koşullarına bağlı olarak kirişlerin kritik burkulma yüklerini ve mod şekillerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

Goncalves vd. (2017), yaptığı çalışmasında, geliştirilmiş “couple-stress” teorisi üzerine kurulu, mikroyapıya dayalı bir Timoshenko kiriş modeli kullanılarak sandviç kirişlerin burkulma ve serbest titreşim durumlarını incelemişlerdir. Kirişin temel denklemlerine tam bir genel çözüm kullanılarak elaman rijitlik matrisi, statik şekil fonksiyonları kullanılarak ise geometrik ve kütle matrisleri hesaplanarak sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller sonucunda mikroyapıya dayalı kirişin, daha karmaşık sonlu elemanlar modellerine kıyasla kritik burkulma yüklerini ve doğal frekanslarını daha iyi bir doğrulukta tahmin edebildiği gösterilmiştir. Ayrıca klasik Timoshenko kiriş modelinin aksine mikroyapı sandviç kirişin, enine esnek olduğunda ve yüzeylerin bükülme sertliği ihmal edilemez olduğunda bile doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Malekzadeh Fard ve Malek-Mohammedi (2017), çalışmasında esnek çekirdek malzemesine sahip sandviç panellerin serbest titreşim ve burkulma durumlarını, yeniden geliştirilmiş yüksek mertebe sandviç panel teorisini kullanarak incelemişlerdir. Kullanılan bu teori ile, çekirdeğin kayma gerilmelerine dayanan hareket denklemleri formüle edilmiştir. Çekirdeğin dinamik denklemleri üç boyutlu esneklik teorisi kullanılarak çıkarılmış ve sistemin dinamik denklemleri için Hamilton teorisi kullanılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda plaka ön yüklerinin, kritik burkulma yüklerine yaklaştığında, panelin doğal frekansının sıfıra gittiği görülmüştür ve teoriden elde edilen sonuçların önceki çalışmalarla uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Magnucki vd. (2013), iki tür yük durumunda alüminyum çekirdekli sandviç kirişin burkulma davranışını incelemiştir. İlk olarak kiriş, orta noktasından tekil bir kuvvet ile yüklenmiştir. Bu sayede kirişin dayanımı analiz edilerek kirişin analitik modelinden normal ve kayma gerilme dağılımları elde edilmiştir. Sonrasında kiriş eksenel bir kuvvetle yüklenerek kiriş sabit potansiyel enerji normuna bağlı denge denklemleri türetilmiştir. Sonuçlar analitik ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

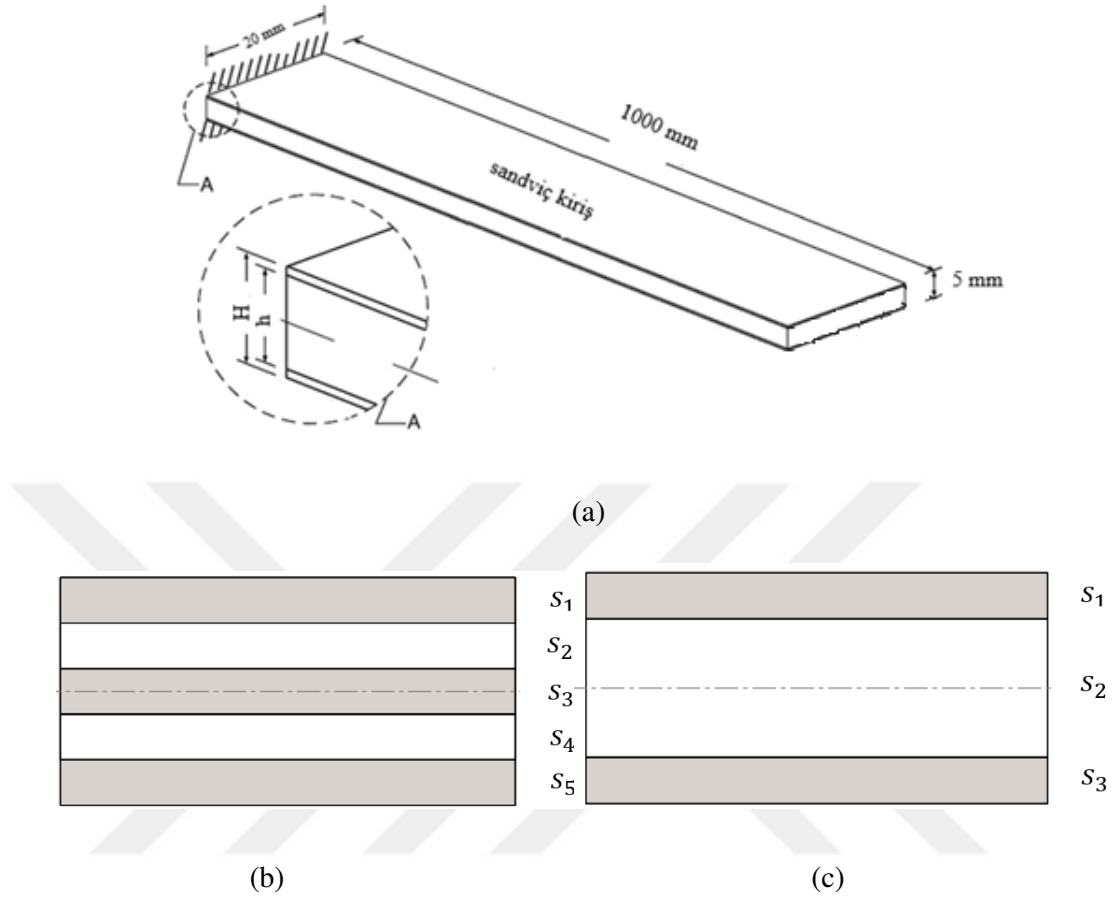
BÖLÜM III

MATERYAL VE YÖNTEM

Kirişler çalışma ortamları gereği birçok farklı yükleme durumuna maruz kalabilmektedir. Gerek uygulanan bu yükleme durumları gerekse tasarımdan kaynaklı hatalardan dolayı hasarlar meydana gelebilmektedir. Oluşan bu hasarlardan en sık karşılaşılanlardan biriside çatlak hasarıdır. Yapıda oluşan çatlak durumunun malzeme özellikleri ve dayanım üzerindeki etkileri ve oluşacak hasarın boyutlarının incelenmesi hazırlanan tasarımların çalışma parametrelerini güvenli bölgede tutabilmek adına son derece önem taşımaktadır.

Hazırlanan bu tez çalışmasında çatlaklı sandviç kirişlerde çatlak durumunun, kirişin serbest titreşim ve burkulma yükü değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Serbest titreşim durumu için Timoshenko kiriş teorisi, burkulma durumu için ise Euler-Bernoulli kiriş teorisi dikkate alınmıştır. Kiriş üzerinde farklı konum ve derinliklerde modellenen çatlak durumuna sahip beş ve üç tabakalı sandviç kirişler oluşturulmuş ve sonlu elemanlar modelleri hazırlanarak MATLAB yazılımı yardımı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Beş tabaka ve üç tabaka olmak üzere iki farklı yapıdaki ankastre kiriş modeli, uzunluğu $L=1\text{m}$, genişliği $b=0,02\text{m}$ ve yüksekliği $H=0,005\text{m}$ boyutlarında Şekil 3.1'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.1.İncelenen sandviç kiriş modelleri,ankastre sandviç kiriş modeli(a),beştabakalı sandviç kiriş kesiti(b) veüç tabakalı sandviç kiriş kesit modeli (c)

Şekil 3.1’de gösterilen sandviç kirişlerin eğilme rijitlikleri ve yoğunlukları ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Beş tabakalı sandviç kirişin eğilme rijitliği için;

$$\begin{aligned}
 & \text{---} & \text{---} \\
 & \text{---} & \text{---} \\
 & \text{---} & \text{---}
 \end{aligned}$$

denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Burada;

E_y : Yüzey malzemesinin elastiklik modülü,

E_ζ : Çekirdek malzemesinin elastiklik modülü,

I : Atalet momenti,

$$s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = s_5 = s ,$$

$d_{1,5}$: 1 ve 5 numaralı tabakaların ağırlık merkezinin tarafsız eksene olan uzaklığı,

$d_{2,4}$: 2 ve 4 numaralı tabakaların ağırlık merkezinin tarafsız eksene olan uzaklığıdır.

$d_1 = d_5 = 2s$ ve $d_2 = d_4 = s$ olmak üzere beş tabakalı kirişin toplam eğilme rijitliği;

$$EI_{top} = 2(EI_{1,5}) + 2(EI_{2,4}) + EI_3 = E_y \left(3 \frac{bs^3}{12} + 8bs^3 \right) + E_\zeta \left(2 \frac{bs^3}{12} + 2bs^3 \right) \quad (3.4)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

Üç tabakalı sandviç kirişin eğilme rijitliği için;

$$EI_{1,3} = E_y \left(\frac{bs_{1,3}^3}{12} + d_{1,3}^2 bs_{1,3} \right) \quad (3.5)$$

$$EI_2 = E_\zeta \frac{bs_2^3}{12} \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada üç tabakalı kiriş için farklı çekirdek kalınlığı değerleri kullanıldığı için, $d_{1,3} = \frac{s_{1,3} + s_2}{2}$ ve $s_{1,3} = \frac{H - s_2}{2}$ denklemleri kullanılarak hesaplanır ve üç tabakalı kirişin toplam eğilme rijitliği;

$$\begin{aligned} EI_{top} &= 2EI_{1,3} + EI_2 \\ &= E_y \left(2 \frac{b \left(\frac{H - s_2}{2} \right)^3}{12} + 2 \left(\frac{s_1 + s_2}{2} \right)^2 b \left(\frac{H - s_2}{2} \right) \right) + E_\zeta \left(\frac{bs_2^3}{12} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

halini alır.

Oluşturulan sandviç kiriş modellerinin yoğunlukları ise;

$$V_{top} = AL \quad (3.8)$$

$$V_{\zeta}(5 \text{ tabaka}) = \frac{2(bsL)}{V_{top}} \quad (3.9)$$

$$V_{\zeta}(3 \text{ tabaka}) = \frac{(bs_2L)}{V_{top}} \quad (3.10)$$

$$V_y = 1 - V_{\zeta} \quad (3.11)$$

$$\rho_{top} = \rho_y V_y + \rho_{\zeta} V_{\zeta} \quad (3.12)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada;

V_{top} : Sandviç kirişin hacmini,

V_{ζ} : Çekirdek malzemesinin hacim oranını,

V_y : Yüzey malzemesinin hacim oranını,

ρ_{ζ} : Çekirdek malzemesinin yoğunluğu,

ρ_y : Yüzey malzemesinin yoğunluğunu,

ρ_{top} : Sandviç kirişin toplam yoğunluğunu ifade etmektedir.

Üç tabakalı kiriş modellerinin oluşturulmasında sabit kalınlıktaki çekirdek tabakası yerine farklı kalınlıktaki tabakalar için incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çekirdek tabakası kalınlığının hesaplanmasında, çekirdek tabakası kalınlığının kirişin tüm kalınlığına oranı $\left(\frac{s_2}{H}\right)$ için sırası ile (1), (0,75), (0,5), (0,25) ve (0) oranları kullanılmış ve beş farklı yapıda üç tabakalı kiriş modelleri oluşturulmuştur.

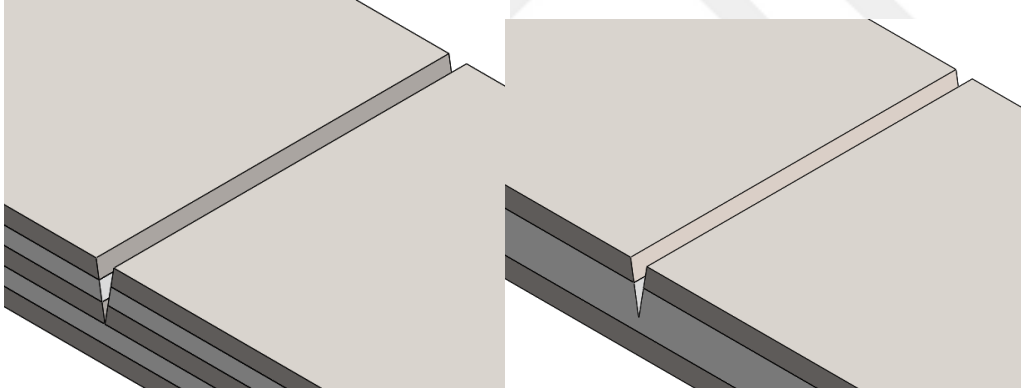
Yapılan tez çalışmasında ele alınan beş tabakalı ve beş farklı çekirdek oranına sahip üç tabakalı olmak üzere altı farklı kiriş örneği için yüzey malzemesi olarak yapısal çelik

kullanılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak ise PVC ve alüminyum kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sandviç kiriş için kullanılan bu malzemelerin özellikleri ise(Negru vd., 2015);

—,	—,	—,
—,	—,	—,
,	,	,

şeklindedir.

Oluşturulan sandviç kirişlerde çatlak durumu ise V kesitli kenar çatlağı kullanılarak modellenmiştir. Çatlak durumu için, sabit uçtan (0,2m), (0,4m), (0,6m) ve (0,8m) uzaklıktave (1mm), (2mm), (3mm) ve (4mm) farklı çatlak derinliği boyutlarına sahip çatlaklar kullanılmıştır.



Şekil 3.2.Sandviç kirişlerde çatlak durumu örnekleri

3.1Kirişlerde Burkulma Durumu

Stabilite, bir yapının seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan birisidir. Stabilite problemlerinde amaç, oluşturulan yapının şekil değiştirme sonrasındaki denge konumunun kararlı ya da kararsız olduğunu araştırmaktır.Kararsız denge konumundaki yapılarda meydana gelen şekil değiştirmeler yapının işlevini kaybetmesine sebep olur. Bundan dolayı yapıların hangi koşullarda kararsız konuma geldikleri araştırılarak, bu durumda olan yapılarda gerekli boyut ve yük düzenlemesi

gerçekleştirilip yapıyı kararlı konumda tutmak gerekmektedir. Bunun için ise yapının stabilitesi doğru bir şekilde incelenmelidir.

Kiriş ve kolon gibi uzunluğu kalınlığına oranla çok fazla olan yapılar basma yüküne maruz bırakıldığında, küçük yüklemeler için geometride ve yük taşıma kapasitesinde gözle görülür bir değişiklik olmazken yük artırıldığında boy kısalarak bükülmeye başlar. Kritik bir yük değerine ulaşıldığında, yapı aniden bükülerek büyük bir deformasyona uğrar ve yükü taşıma kabiliyetini kaybeder. Bu duruma burkulma denir ve ani deformasyonun meydana geldiği yük değeri kritik burkulma yükü adını alır. Burkulmanın meydana geldiği yük değeri yapının dayanımına değil rijitliğine bağlı olduğu içinde burkulma bir stabilite problemidir (Wang vd., 2005).

3.1.1 Bazı sınır şartlarında euler burkulma yükleri

Burkulmanın oluşabilmesi için yapıda hesaplanan gerilmenin, muhakkak gerilme limitini aşması gerekmemektedir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi burkulmanın meydana geldiği yük değeri yapının dayanımına değil rijitliğine bağlıdır. Yani burkulma bir stabilite problemidir.

Euler teorisi Hooke kanunlarının geçerli olduğu yapıların elastik bölgedeki şekil değişimleri için geçerlidir. Burkulma için gerekli kritik yük, kirişin dayanımından ziyade iki ucun nasıl sınırlandırıldığına bağlı olarak hesaplanır (Nariman and Msekh, 2013).

Kritik burkulma yüklerini hesaplamak için kullanılan bazı klasik sınır şartları;

$$\text{Sabit uç: } v = 0 \text{ ve } \frac{dv}{dx} = 0 \quad (3.13)$$

$$\text{Mafsallı uç: } v = 0 \text{ ve } \frac{d^2v}{dx^2} = 0 \quad (3.14)$$

$$\text{Serbest uç: } \frac{dv}{dx} = 0 \text{ ve } \frac{d^3v}{dx^3} + \frac{P}{EI} \frac{dv}{dx} = 0 \quad (3.15)$$

şeklindeki gibidir.

Çizelge 3.1’de verilen kritik Euler yükleri ile yapıya uygulanan P basma kuvveti arasındaki ilişki ise (Nariman and Msekh, 2013);

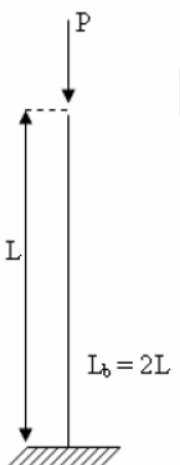
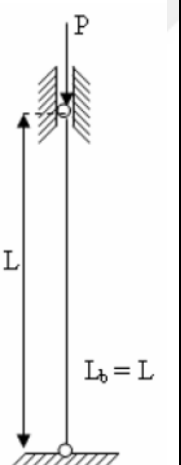
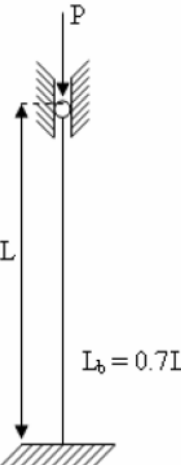
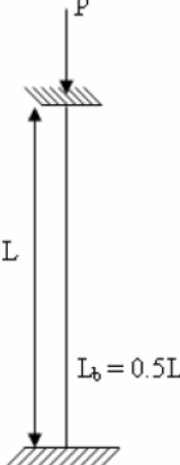
$P < P_{kr} \Rightarrow$ Kararlı denge durumu

$P = P_{kr} \Rightarrow$ Farksız denge durumu

$P > P_{kr} \Rightarrow$ Kararsız denge durumu

olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 3.1. Eulerburkulma yükleri (Wang vd., 2005)

Sınır Şartları	C-F	P-P	C-P	C-C
Burkulma Şekli				
Kritik Burkulma Yüğü	$\frac{\pi^2 EI}{(2L)^2}$	$\frac{\pi^2 EI}{L^2}$	$\frac{\pi^2 EI}{(0,7L)^2}$	$\frac{\pi^2 EI}{(0,5L)^2}$
C: Sabit, F: Serbest, P: Mafsallı, L: Uzunluk)				

3.2Kirişlerde Serbest Titreşim Durumu

Yapıların titreşimi, mekanik ve yapısal tasarımlar için oldukça önemlidir. Yapılarda maruz kalınan dış etkenler vasıtasıyla meydana gelen titreşimlerin yapının doğal frekans

değerlerinden herhangi birinin frekansına sahip olması durumunda(rezonans), titreşim çok büyük boyutlara ulaşmakta ve hasar meydana gelebilmektedir.

Serbest titreşim ise elastik bölgede bir yapının denge konumundan uzaklaştırılıp serbest bırakılması durumunda, yapının yeniden denge konuma dönünceye kadar yaptığı titreşime denir.

Kirişler için titreşim durumunun incelemesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de Timoshenko kiriş teorisidir. Timoshenko kiriş teorisi Euler-Bernoulli kiriş teorisinin geliştirilmiş halidir. Bu teori, Euler-Bernoulli teorisinin aksine deformasyon sonucu meydana gelen dönme ve kayma etkilerinin de hesaplamalara katmıştır (Kocatürk ve Şimşek, 2005).

3.3 Sonlu Elemanlar Metodu

Doğada karşılaşılan her olay fizik kanunları ve matematiksel denklemler ile ifade edilebilir. Ancak bu ifadelerin boyutları ve karmaşıklıkları düşünüldüğünde, insan zihninin sınırları tek bir adımda olayı veya davranışları kavrayamayacak düzeydedir. Bu nedenle sistemleri, davranışları daha kolay anlaşılan kendi alt bileşenlerine ayırarak inceleme yapılır ve orijinal sistem bu bileşenlerin yeniden bir araya getirilmesiyle bütün olarak çözülmüş olur. Karmaşık problemlerin alt bileşenlere ayrılıp çözülmesiyle tam çözümün elde edildiği bu yöntemle sonlu elemanlar metodu denir (Zienkiewicz vd., 2005).

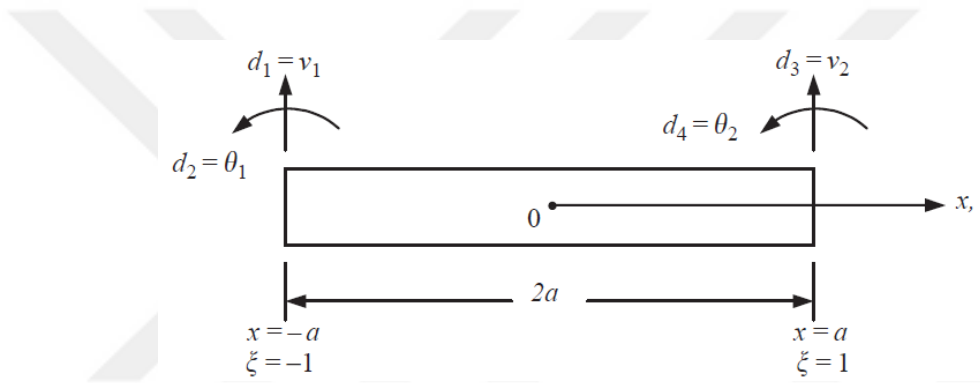
Sonlu elemanlar metodu, çözümü analitik olarak elde edilmesi zor olan problemlerde, alan değişkenlerinin dağılımının yaklaşık çözümünü arayan sayısal bir yöntemdir. Yani kesin çözümün zor olmasından dolayı parçalardan elde edilen sonuçların bir araya gelmesiyle yaklaşık tam çözümün hesaplanmasıdır (Liu ve Quek, 2003).

Sonlu elemanlar metodunda çoğu durumda, sınırlı sayıda iyi tanımlanmış bileşen kullanılarak yeterli bir model oluşturulup çözüme gidilebilir. Bu gibi durumlar ayrık olarak adlandırılır. Diğer durumlarda ise, alt bölünme süresiz olarak devam eder ve sorun yalnızca sonsuz küçük bir matematiksel model kullanılarak tanımlanabilir. Bu

durum sonsuz sayıda elaman içeren diferansiyel denklemlere veya eşdeğer ifadelerle yol açar. Bu tür sistemler ise sürekli olarak adlandırılır (Zienkiewicz vd., 2005).

3.4Burkulma Durumunun Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi

Sonlu elemanlar metodu uygulanacak kiriş Şekil 3.3'deki gibi elemanlara ayrılır. Oluşturulan her eleman iki düğüm noktasına ve her bir düğüm noktası çökme ve eğim olmak üzere iki serbestlik derecesine sahiptir. Yani kiriş için, her eleman dört serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 3.3.Kiriş eleman ve koordinat sistemleri(Liu ve Quek, 2003)

Sonrasında, kirişin sonlu elemanlar metodu ile modellenebilmesi için şekil fonksiyonlarının oluşturulması gerekmektedir. Kiriş eleman dört serbestlik derecesine sahip olduğu için dört adet şekil fonksiyonu olması gerekir (Liu ve Quek, 2003).Şekil fonksiyonlarını belirlemek için kirişin x, yani uzunluğun yer aldığı (0,L) koordinat, yerel $\xi(-1,1)$ koordinat düzlemine;

— —

eşitliği kullanılarak taşınmalıdır (Smith and Griffiths, 1988). Şekil fonksiyonlarının yerel koordinatlarda eldesi için kiriş elemandaki yer değiştirme;

şeklinde ifade edilebilir. Kiriş eleman için düğümlerde geçerli olan sınır şartlarının uygulanması ile a_0, a_1, a_2 ve a_3 sabitleri bulunur. Sınır şartlarının uygulanması sonucu şekil fonksiyonları (Liu ve Quek, 2003);

$$N_1 = \frac{1}{4}(2 - 3\xi + \xi^3) \quad (3.18a)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 - \xi - \xi^2 + \xi^3) \quad (3.18b)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(2 + 3\xi - \xi^3) \quad (3.18c)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi + \xi^2 + \xi^3) \quad (3.18d)$$

olarak hesaplanır. Kiriş eleman için oluşturulan şekil fonksiyonları yardımı ile çökme ifadesi düzenlenirse;

$$v(\xi) = N_1 v_1 + N_2 \left(\frac{dv}{d\xi} \right)_1 + N_3 v_2 + N_4 \left(\frac{dv}{d\xi} \right)_2 \quad (3.19)$$

halini alır. $dx = \frac{L}{2} d\xi$ ve $\left(\frac{dv}{d\xi} \right) = \left(\frac{dv}{dx} \right) \left(\frac{dx}{d\xi} \right)$ olduğundan dolayı;

$$\frac{dv}{d\xi} = \frac{L}{2} \frac{dv}{dx} \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilebilir. $\frac{dv}{dx}$, 1 ve 2 numaralı düğümlerdeki θ_1 ve θ_2 dönmeler olduğundan dolayı çökme ifadesi denklem (3.21)' deki halini alır;

$$v(\xi) = N_1 v_1 + \frac{L}{2} N_2 \theta_1 + N_3 v_2 + \frac{L}{2} N_4 \theta_2 \quad (3.21)$$

Oluşan çökme matris formda ise;

$$\{v\} = [N]\{d\} \quad (3.22)$$

olarak ifade edilebilir (Liu ve Quek, 2003).Burada;

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & \frac{L}{2}N_2N_3 & \frac{L}{2}N_4 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\{d\} = \{v_1 \quad \theta_1 v_2 \quad \theta_2\}^T \quad (3.24)$$

sırasıyla şekil fonksiyonları matrisi ve deplasman vektörüdür. Elde edilen bu ifadeler yardımıyla şekil değiştirme enerjisi denkleminin düzenlenmesi gerekmektedir. Euler kiriş elemanı için şekil değiştirme enerjisi denklemi (Saouma, 1999);

$$U_a^e = \frac{1}{2} \int_L EA \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx \quad (3.25)$$

$$U_f^e = \frac{1}{2} \int_L \left(EI \left(\frac{d^2v}{dx^2} \right)^2 + P_x \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right) dx \quad (3.26)$$

$$U^e = U_a^e + U_f^e \quad (3.27)$$

şeklindedir. Şekil değiştirme enerjisi (3.27) numaralı denklemde de ifade edildiği gibi iki kısımdan meydana gelmektedir. Birinci kısım yani U_a^e aksenal deformasyonlar, ikinci kısım yani U_f^e ise çökme deformasyonları ile ilgili kısımları ifade etmektedir. Söz konusu inceleme burkulma için gerçekleştirildiğinden U_f^e denklemi kullanılarak şekil değiştirme enerjisi elde edilecektir.

Öncelikli olarak denklem (3.26)'da verilen enerji ifadesi yerel koordinatlara taşınmalıdır. Bunun için (3.20) numaralı denklem kullanılarak (Smith and Griffiths, 1988);

$$\frac{dv}{dx} = \frac{2}{L} \frac{dv}{d\xi} \quad (3.28)$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{4}{L^2} \frac{d^2v}{d\xi^2} \quad (3.29)$$

bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılar (3.22) numaralı çökme ifadesi ile birleştirildiğinde;

$$\left(\frac{dv}{dx}\right)^2 = \{d\}^T \frac{4}{L^2} \left[\frac{dN}{d\xi}\right]^T \left[\frac{dN}{d\xi}\right] \{d\} \quad (3.30)$$

$$\left(\frac{d^2v}{dx^2}\right)^2 = \{d\}^T \frac{16}{L^4} \left[\frac{d^2N}{d\xi^2}\right]^T \left[\frac{d^2N}{d\xi^2}\right] \{d\} \quad (3.31)$$

eşitlikleri oluşturulur. $dx = \frac{L}{2} d\xi$ dönüşümü ile denklem (3.30) ve (3.31) kullanılarak (3.26) numaralı denklem yeniden düzenlenirse;

$$U_f^e = \frac{1}{2} \{d\}^T \frac{8EI}{L^3} \int_{-1}^1 [N'']^T [N''] d\xi \{d\} + \frac{1}{2} \{d\}^T \frac{2P}{L} \int_{-1}^1 [N']^T [N'] d\xi \{d\} \quad (3.32)$$

halini alır.(3.32) numaralı denklem aynı zamanda (Saouma, 1999);

$$U_f^e = \frac{1}{2} \{d\}^T [k]_e \{d\} + \frac{1}{2} \{d\}^T [k]_g \{d\} \quad (3.33)$$

ifadesine eşittir.

$[k]_e$ = eğilme rijitliği matrisini

$[k]_g$ = geometrik rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Bu durumda(Saouma, 1999);

$$[k]_e = \frac{8EI}{L^3} \int_{-1}^1 [N'']^T [N''] d\xi \quad (3.34)$$

$$[k]_g = \frac{2P}{L} \int_{-1}^1 [N']^T [N'] d\xi \quad (3.35)$$

denklemleri elde edilir ve

$$[k]_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$[k]_g = \frac{P}{L} \begin{bmatrix} \frac{6}{5} & \frac{1}{10}L & -\frac{6}{5} & \frac{1}{10}L \\ \frac{1}{10}L & \frac{2}{15}L^2 & -\frac{1}{10} & -\frac{1}{30}L^2 \\ -\frac{6}{5} & -\frac{1}{10}L & \frac{6}{5} & -\frac{1}{10}L \\ \frac{1}{10}L & -\frac{1}{30}L^2 & -\frac{1}{10}L & \frac{2}{15}L^2 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

şeklindeki gibi hesaplanır.

Eleman rijitlik matrisi ise eğilme rijitliği matrisi ve geometrik rijitlik matrisinin toplamına eşit olup (Saouma, 1999);

$$[K] = [k]_e + [k]_g \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kütle matrisinin oluşturulması için ise kinetik enerji denkleminin kullanılması gerekmektedir. Euler kirişi için kinetik enerji (Liu and Quek, 2003);

$$T = \frac{1}{2} \int_0^V \rho \{\dot{U}\}^T \dot{U} dV \quad (3.39)$$

denklemini ile hesaplanabilir. Burada ρ yoğunluk, $\dot{U}$ ise hız vektörünü temsil etmektedir.

Yer değiştirme ile benzer şekilde hız vektörü de matris formda ifade edilecek olursa;

$$\{\dot{U}\} = [N]\{\dot{d}\} \quad (3.40)$$

şeklinde yazılabilir. (3.40) numaralı eşitlik kullanılarak kinetik enerji denklemi düzenlenirse;

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{d}\}^T \int_0^V \rho [N]^T [N] dV \{\dot{d}\} \quad (3.41)$$

halini alır. Elde edilen kinetik enerji denklemi aynı zamanda;

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{d}\}^T [M] \{\dot{d}\} \quad (3.42)$$

ifadesine eşit olduğundan dolayı kütle matrisi (Liu and Quek, 2003);

$$[M] = \int_0^V \rho [N]^T [N] dV = \rho \int_A dA \int_L [N]^T [N] dx = \rho AL \int_{-1}^1 [N]^T [N] d\xi \quad (3.43)$$

denklemi ile ifade edilebilir ve Euler kirişi için kütle matrisi;

$$[M] = \frac{\rho AL}{105} \begin{bmatrix} 39 & \frac{11}{2}L & \frac{27}{2} & -\frac{13}{4}L \\ \frac{11}{2}L & L^2 & \frac{13}{4}L & -\frac{3}{4}L^2 \\ \frac{27}{2} & \frac{13}{4}L & 39 & -\frac{11}{2}L \\ -\frac{13}{4}L & -\frac{3}{4}L^2 & -\frac{11}{2}L & L^2 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

şeklinde elde edilir.

Burkulma durumlarında, burkulmaya neden olan eksenel yükün sonlu elemanlar metodu ile hesaplanmasında başlangıç olarak bir yük değeri seçilir. Burkulmaya neden olan yük değeri ($\bar{P}$), seçilen yükün λ katı olduğundan;

$$\bar{P} = \lambda \bar{P}^* \quad (3.45)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Aynı şekilde geometrik rijitlik matrisi de kuvvetle orantılı olduğundan;

$$[k]_g = \lambda [k]_g^* \quad (3.46)$$

olarak oluşturulur. $[k]_e$ eğilme rijitliği matrisi sabit olduğundan, burkulma yükü ifadesi;

$$([k]_e + \lambda [k]_g^*) \bar{v} - \lambda \bar{P}^* = 0 \quad (3.47)$$

durumuna gelir ve yer değiştirme ifadesi yalnız bırakıldığında;

$$\bar{v} = ([k]_e + \lambda [k]_g^*)^{-1} \lambda \bar{P}^* \quad (3.48)$$

şeklinde yazılır. Yer değiştirmelerin sonsuza gitme eğilimi göstermesi yüzünden;

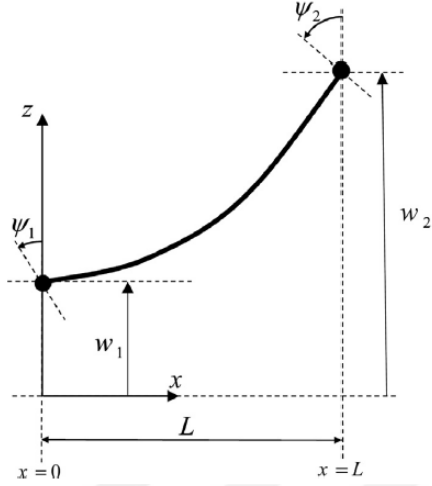
$$|[k]_e + \lambda [k]_g^*| = 0 \quad (3.49)$$

durumu söz konusudur. Burada λ 'nın en küçük değeri (λ_{kr}) için elde edilen $\bar{P}$ yükü kritik burkulma yükünü temsil etmektedir ve (3. 50) numaralı denklem ile verilebilir.

$$\bar{P}_{kr} = \lambda_{kr} \bar{P}^* \quad (3.50)$$

3.5 Serbest Titreşim Durumunun Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi

Timoshenko kiriş modelinde rijitlik ve kütle matrislerini oluşturmak için Şekil 3.4' deki gibi iki düğüm ve her bir düğüm için iki serbestlik derecesine sahip kiriş eleman kullanılabilir.



Şekil 3.4.Timoshenko kiriş eleman (Kahrobaiyan vd., 2014)

Şekilde yanal sapmayı ve kesitin dönme açısını göstermektedir ve yer değiştirme vektörü;

şeklindedir. Yer değiştirme matris formda ise(Kahrobaiyan vd., 2014);

şeklinde yazılabilir. Burada ve kiriş eleman için şekil fonksiyonlarını ifade etmektedir.

Kiriş elemanın şekil fonksiyonları (3.54) ve (3.55) numaralı temel denklemlerin, statik denge durumu için çözümü ile oluşturulur (Banerjee and Anathapuvirajah, 2019).

$$EI \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \kappa GA \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) = \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3.54)$$

$$\kappa GA \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.55)$$

Daha sonra oluşturulan şekil fonksiyonları sınır şartları uygulanarak hesaplanır. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi kiriş eleman için sınır şartları denklem (3.56) ve (3.57)’deki gibidir.

$$\begin{aligned} x = 0; \\ w = w_1, \psi = \psi_1 \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$x = L; \quad w = w_2, \psi = \psi_2 \quad (3.57)$$

Statik denge durumu için Timoshenko kirişinin temel denklemleri düzenlendiğinde;

$$EI \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \kappa GA \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) = 0 \quad (3.58)$$

$$\kappa GA \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.59)$$

halini alır (Kahrobaiyan vd., 2014). w ve ψ için (Petyt, 2010);

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = 0, \quad \frac{d^3 \psi}{dx^3} = 0 \quad (3.60)$$

durumu söz konusudur ve Şekil 3.3’deki gibi kiriş elemanın $\xi = \frac{x}{a}$ eşitliği kullanılarak yerel koordinatlara taşınması ile;

$$\frac{d^4 w}{d\xi^4} = 0, \quad \frac{d^3 \psi}{d\xi^3} = 0 \quad (3.61)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerin genel çözümü ise (Petyt, 2010);

$$w = a_1 + a_2\xi + a_3\xi^2 + a_4\xi^3 \quad (3.62)$$

$$\psi = b_1 + b_2 + b_3\xi^2 \quad (3.63)$$

şeklindedir. Bilinmeyen yedi integral sabitini dörde indirmek için (3.58) numaralı moment ifadesi yukarıdaki denklemler kullanılarak çözüldüğünde;

$$b_1 = \frac{1}{a}a_2 + \frac{6\beta}{a}a_4, \quad b_2 = \frac{2}{a}a_3, \quad b_3 = \frac{3}{a}a_4 \quad (3.64)$$

$$a = \frac{L}{2}, \quad \beta = \frac{EI}{\kappa GAa^2} \quad (3.65)$$

sonuçlarına ulaşılır. Dörde indirilen bilinmeyen integral sabitlerinin $\xi = \mp 1$ sınır şartında çözülmesiyle yer değiştirme fonksiyonları (Petyt, 2010);

$$\{w\} = [N_1^w \quad aN_2^w \quad N_3^w \quad aN_4^w]\delta \quad (3.66)$$

$$\{\psi\} = \left[\frac{1}{a}N_1^\psi \quad N_2^\psi \quad \frac{1}{a}N_3^\psi \quad N_4^\psi \right] \delta \quad (3.67)$$

şeklinde bulunur. Elde edilen çözümler neticesinde şekil fonksiyonları (Petyt, 2010);

$$N_1^w = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{2 + 6\beta - 3(1+2\beta)\xi + \xi^3\} \quad (3.68a)$$

$$N_2^w = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{1 + 3\beta - \xi - (1+3\beta)\xi^2 + \xi^3\} \quad (3.68b)$$

$$N_3^w = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{2 + 6\beta + 3(1+2\beta)\xi - \xi^3\} \quad (3.68c)$$

$$N_4^w = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{-(1+3\beta) - \xi + (1+3\beta)\xi^2 + \xi^3\} \quad (3.68d)$$

$$N_1^\psi = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{-3 + 3\xi^2\} \quad (3.68e)$$

$$N_2^\psi = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{-1 + 6\beta - (2+6\beta)\xi + 3\xi^2\} \quad (3.68f)$$

$$N_3^\psi = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{3 - 3\xi^2\} \quad (3.68g)$$

$$N_4^\psi = \frac{1}{4(1+3\beta)} \{-1 + 6\beta + (2+6\beta)\xi + 3\xi^2\} \quad (3.68h)$$

olarak bulunur. (3.69) ve (3.70) numaralı denklemlerle verilen Timoshenko kirişi için potansiyel ve kinetik enerji ifadeleri (3.52) numaralı denklem ile düzenlendiğinde(Kahrobaiyan vd., 2014);

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ EI \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \kappa GA \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right)^2 \right\} dx \quad (3.69)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho \int_0^L \left\{ I \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 + A \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dx \quad (3.70)$$

$$U = \frac{1}{2} \delta^T \int_0^L \left(EI \left(\frac{\partial [N^\psi]}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial [N^\psi]}{\partial x} \right) + \kappa GA \left(\frac{\partial [N^w]}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial [N^w]}{\partial x} \right) - \kappa GA ([N^\psi])^T [N^\psi] \right) dx \delta \quad (3.71)$$

$$T = \frac{1}{2} \delta^T \int_0^L \left(\rho I [N^\psi]^T [N^\psi] + \rho A [N^w]^T [N^w] \right) dx \delta \quad (3.72)$$

halini alır. L: Uzunluk, A: Kesit alanı, I: Atalet momenti, ρ : Yoğunluk

Bu ifadeler aynı zamanda;

$$U = \frac{1}{2} \delta^T K \delta \quad (3.73)$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{\delta}^T M \dot{\delta} \quad (3.74)$$

denklemlerine eşittir. K eleman rijitlik matrisini ve M kütle matrisini temsil etmekte olup yerel koordinatlar için hesaplandığında(3.75) ve (3.76) numaralı denklemlerdeki elde edilir (Petyt, 2010).

$$[K] = \frac{EI}{2a^3(1 + 3\beta)} \begin{bmatrix} 3 & 3a & -3 & 3a \\ 3a & (4 + 3\beta)a^2 & -3a & (2 - 3\beta)a^2 \\ -3 & -3a & 3 & -3a \\ 3a & (2 - 3\beta)a^2 & -3a & (4 + 3\beta)a^2 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$[M] = \frac{\rho A a}{210(1 + 3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ m_2 & m_5 & -m_4 & m_6 \\ m_3 & -m_4 & m_1 & -m_2 \\ m_4 & m_6 & -m_2 & m_5 \end{bmatrix} + \frac{\rho I}{30a(1 + 3\beta)^2} \begin{bmatrix} m_7 & m_8 & -m_7 & m_8 \\ m_8 & m_9 & -m_8 & m_{10} \\ -m_7 & -m_8 & m_7 & -m_8 \\ m_8 & m_{10} & -m_8 & m_9 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$m_1 = 156 + 882\beta + 1260\beta^2 \quad (3.77a)$$

$$m_2 = (44 + 231\beta + 315\beta^2)a \quad (3.77b)$$

$$m_3 = 54 + 378\beta + 630\beta^2 \quad (3.77c)$$

$$m_4 = (-26 - 189\beta - 315\beta^2)a \quad (3.77d)$$

$$m_5(16 + 84\beta + 126\beta^2)a^2 \quad (3.77e)$$

$$m_6 = (-12 - 84\beta - 126\beta^2)a^2 \quad (3.77f)$$

$$m_7 = 18 \quad (3.77g)$$

$$m_8 = (3 - 45\beta)a \quad (3.77h)$$

$$m_9 = (8 + 30\beta + 180\beta^2)a^2 \quad (3.77i)$$

$$m_{10} = (-2 - 30\beta + 90\beta^2)a^2 \quad (3.77i)$$

Genel sonlu elemanlar denkleminin oluşturulmasında, tüm elemanların sonlu elemanlar denklemleri;

$$KD + M\ddot{D} = F \quad (3.78)$$

şeklinde bir araya getirilir. Burada K rijitlik matrisini, M kütle matrisini ve D ise tüm düğümlerin yer değiştirme vektörüne karşılık gelir. Serbest titreşim analizinde sisteme dış kuvvet etkisi söz konusu olmadığı için $F = 0$ olur ve homojen hale gelen denklem;

$$KD + M\ddot{D} = 0 \quad (3.79)$$

şeklini alır. Serbest titreşim analizi için;

$$D = \Phi \exp(i\omega t) \quad (3.80)$$

olarak verilebilir. Burada Φ düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin genliğine, ω serbest titreşimin frekansına ve t ise zamana karşılık gelmektedir. (3.80) numaralı denklemin (3.79) numaralı denklemde yerine yazılması ile;

$$[K - \lambda M]\Phi = 0 \quad (3.81)$$

eşitliğine ulaşılır. Burada $\lambda = \omega^2$ 'dir. Φ 'nin sıfır olmadığı bir çözüm elde edebilmek için;

$$|K - \lambda M| = 0 \quad (3.82)$$

şeklinde matris determinantı sıfıra eşit olmalıdır ve (3.82) denkleminin çözümü ile elde edilen λ değerleri doğal frekans olarak adlandırılır.

Doğal frekans dinamik yük taşıyan yapının önemli bir karakteristiğidir. Bir yapının, doğal frekanslarından bir tanesinin büyüklüğüne sahip bir kuvvet tarafından uyarılması durumunda, hasara sebep olan aşırı şiddetli bir titreşim meydana gelmektedir. Bu durum rezonans olarak adlandırılır. Yapıda bu tarz bir hasardan kaçınmak için, dinamik yüklere maruz kalacak yapıların tasarımında serbest titreşim analizi önemli bir yer tutmaktadır.

3.6Çatlağın Modellenmesi

Yapısal malzemelerde oluşacak herhangi bir hasar malzemenin mekanik davranışlarına olumsuz yönde etki etmektedir. Özellikle çatlak hasarı, malzemenin dayanımını ciddi boyutlarda etkilemekte, doğal frekanslarının değerlerinin ve burkulma yüklerinin azalmasına ve mod şekillerinin değişmesine neden olmaktadır. Malzemede çatlak hasarı, üretim esnasında oluşan artık gerilmeler, tasarım hataları ve yorulma gibi faktörlerden dolayı meydana gelebilmektedir (Kumar vd., 2018).

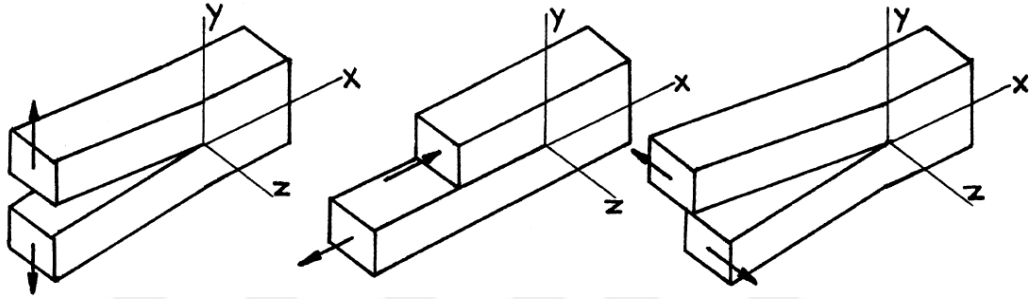
Kiriş yapılarda, diğer yapılar gibi çalışma ortamından kaynaklı olarak malzemede çatlak hasarı oluşturabilecek çeşitli yük ve titreşimlere maruz kalabilmektedir. Oluşan çatlakların ilerlemesi durumunda yapılarda tahribat meydana gelebileceğinden, çatlak durumunun incelenmesi son derece önemlidir. Bunun için öncelikli olarak çatlak durumunun modellenmesi gerekmektedir (Kim vd., 2018).

Çatlağın meydana geldiği yapılarda gerilme alanı yalnızca çatlağa yakın bulunan bölgelerde etkilidir. Çatlaktan kaynaklı ilave gerilme enerjisi, gerilme şiddet faktörleriyle ifade edilen esneklik katsayılarına sebep olur. Bu esneklik katsayıları şekil

değiştirme enerjisi salıverinim oranından elde edilir (Kisa and Brandon, 2000) ve düzlem şekil değiştirme durumu için şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranı;

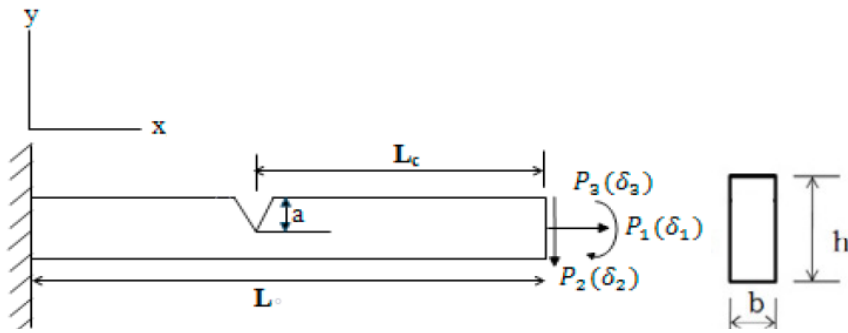
$$\frac{U}{U_0} = \frac{U}{U_0} = \frac{U}{U_0}$$

şeklinde. Burada E elastisite modülü, ν Poisson oranı, σ , τ , γ sırasıyla açma, kayma ve yırtılma deformasyon modları için gerilme şiddet faktörleridir.



Şekil 3.5.Çatlak yüzeyinin yer değiştirmesinin temel modları (Tada vd., 2000)

Şekil 3.5’de gösterilen deformasyon modlarından I ve II numaralı modlar kullanılarak dikdörtgen sabit kesitli bir kirişin esneklik katsayılarını hesaplamak mümkündür(Kisa and Brandon, 2000).

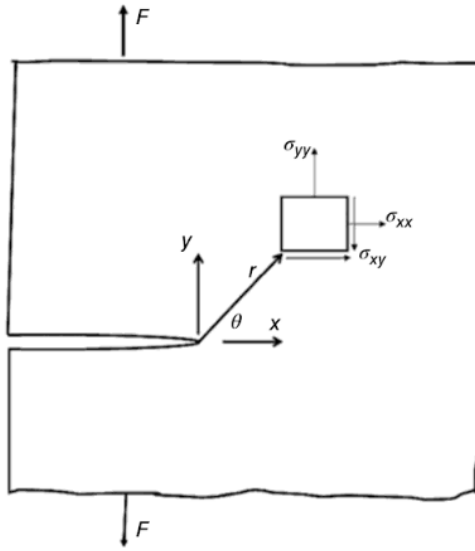


Şekil 3.6.Çatlaklı kiriş elemanın yükleme durumu(Kumar vd., 2018).

Dikdörtgen sabit kesitli kiriş için şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranı (Wang, 1996);

denklemleri kullanılarak hesaplanır. Burada; P aksel kuvvet, M eğilme momenti ve V kayma kuvvetidir. Ayrıca düzlem şekil değiştirme durumu için ϵ_x , düzlem gerilme için ise σ_x olarak verilir.

Gerilme şiddet faktörü, malzemenin kritik bir gerilme şiddeti değerine kadar çatlak ucu gerilmelerine dayanabileceğini yani çatlakın hangi boyuta kadar ilerleyebileceğini gösteren bir ifadedir. Bu kritik gerilme şiddet faktörü malzeme tokluğunun bir ölçüsüdür (Roylance, 2001). Gerilme şiddet faktörlerinin hesaplanması için öncelikli olarak çatlak etrafında oluşan gerilmenin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.7.Çatlak ucu koordinatları (İbrahim, 2017)

Şekil 3.7’da gösterildiği gibi çatlak etrafında oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler farklı deformasyon modları için ((Tada vd., 2000), (İbrahim, 2017));

Mod I için;

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \frac{3}{4}\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.85b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.85c)$$

$$u = \frac{K_I}{G} \sqrt{r/2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \right) \quad (3.85d)$$

$$v = \frac{K_I}{G} \sqrt{r/2\pi} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu - \left(\cos \frac{\theta}{2} \right)^2 \right) \quad (3.85e)$$

$$w = 0 \quad (3.85f)$$

Mod II için;

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.86a)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.86b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.86c)$$

$$u = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{r/2\pi} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu + \left(\cos \frac{\theta}{2} \right)^2 \right) \quad (3.86d)$$

$$v = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{r/2\pi} \cos \frac{\theta}{2} \left(-1 + 2\nu + \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \right) \quad (3.86e)$$

$$w = 0 \quad (3.86f)$$

Mod III için;

$$\sigma_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.87a)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (3.87b)$$

$$w = \frac{K_{III}}{G} \sqrt{2r/\pi} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.87c)$$

$$u = v = 0 \quad (3.87d)$$

şeklindeki gibidir. G: kayma modülü, r: çatlak ucundan olan mesafe

Verilen denklemler doğrultusunda Şekil 3.6'daki yüklemeler doğrultusunda dikdörtgen kesitli ve kenar çatlaklı bulunduran kiriş için gerilme şiddet faktörleri (Tada vd., 2000);

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{h}\right) \quad (3.88)$$

denklemini kullanılarak;

$$K_I(P_1) = \frac{P_1}{bh} \sqrt{\pi a} F_1\left(\frac{a}{h}\right) \quad (3.89)$$

$$K_I(P_3) = \frac{6P_3}{bh^2} \sqrt{\pi a} F_3\left(\frac{a}{h}\right) \quad (3.90)$$

$$K_{II}(P_2) = \frac{\kappa P_2}{bh} \sqrt{\pi a} F_2\left(\frac{a}{h}\right) \quad (3.91)$$

halinde elde edilir. Burada F_1 , F_2 ve F_3 birer fonksiyon olup aşağıdaki ifadelerle tanımlanmıştır (Tada vd., 2000);

$$F_1\left(\frac{a}{h}\right) = \sqrt{\frac{2h}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2h}} \frac{0,752 + 2,02\left(\frac{a}{h}\right) + 0,37\left(1 - \sin \frac{\pi a}{2h}\right)^3}{\cos \frac{\pi a}{2h}} \quad (3.92)$$

$$F_2\left(\frac{a}{h}\right) = \frac{1,122 - 0,561\left(\frac{a}{h}\right) + 0,085\left(\frac{a}{h}\right)^2 + 0,180\left(\frac{a}{h}\right)^3}{\sqrt{1 - \frac{a}{h}}} \quad (3.93)$$

$$F_3\left(\frac{a}{h}\right) = \sqrt{\frac{2h}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2h}} \frac{0,923 + 0,199\left(\frac{a}{h}\right) + \left(1 - \sin \frac{\pi a}{2h}\right)^4}{\cos \frac{\pi a}{2h}} \quad (3.94)$$

Burada κ Timoshenko kiriş teorisinden gelen kesitsel faktördür. Elde edilen gerilme şiddet faktörü değerleri (3.84) numaralı denklemde yerine yazıldığında şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranı;

$$J = \frac{(1 - \nu^2)}{E'} \left\{ \left(\frac{P_1}{bh} \sqrt{\pi a} F_1\left(\frac{a}{h}\right) + \frac{6P_3}{bh^2} \sqrt{\pi a} F_3\left(\frac{a}{h}\right) \right)^2 + \left(\frac{\kappa P_2}{bh} \sqrt{\pi a} F_2\left(\frac{a}{h}\right) \right)^2 \right\} \quad (3.95)$$

halini alır. şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranı aynı zamanda Griffith-Irwin teorisine göre (Wang, 1996);

$$J = \frac{\partial U(P_i, A)}{\partial A} \quad (3.96)$$

olarak tanımlanır. Castigliano teoremi ise çatlaktan kaynaklanan ek yer değiştirmeyi (Kisa and Brandon, 2000);

$$u_i = \frac{\partial U(P_i, A)}{\partial P_i} \quad (3.97)$$

şeklinde tanımlamıştır. Bu iki denklem birlikte düzenlendiğinde şekil değiştirme enerjisi salıverinim oranı ile yer değiştirme arasında ilişki (Kisa and Brandon, 2000);

$$u_i = \frac{\partial}{\partial P_i} \int_A J(P_i, A) dA \quad (3.98)$$

halinde yazılabilir. Oluşturulan bu denklemler yardımıyla esneklik katsayıları, çatlak şekli ve gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak (Papadopoulos and Dimarogonas, 1998);

$$c_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \int_A J(P_i, A) dA, \quad i, j = 1, \dots, 3 \quad (3.99)$$

denklemi ile hesaplanır ve denklemin çözümü ile esneklik katsayıları;

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{2\pi}{h^2 b^2 E} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_0^{a_1} a F_1^2 \left(\frac{a}{h} \right) da dz \\ &= \frac{2b\pi}{h^2 b^2 E} \int_0^{a_1} a F_1^2 \left(\frac{a}{h} \right) da = \frac{2\pi}{h^2 b d E} \int_0^{a_1} a F_1^2 \left(\frac{a}{h} \right) da; \end{aligned} \quad (3.100a)$$

$$C_{12} = 0; \quad (3.100b)$$

$$\begin{aligned} C_{13} &= \frac{2\pi b}{E h^3 b^2} \int_0^{a_1} a F_1 \left(\frac{a}{h} \right) F_3 \left(\frac{a}{h} \right) da dz \\ &= \frac{12\pi}{E h^3 b} \int_0^{a_1} a F_1 \left(\frac{a}{h} \right) F_3 \left(\frac{a}{h} \right) da; \end{aligned} \quad (3.100c)$$

$$C_{21} = 0; \quad (3.100d)$$

$$C_{22} = \frac{2\pi \kappa}{E h^2 b} \int_0^{a_1} a F_2^2 \left(\frac{a}{h} \right) da; \quad (3.100e)$$

$$C_{23} = 0; \quad (3.100f)$$

$$C_{31} = \frac{12\pi}{E h^3 b} \int_0^{a_1} a F_1 \left(\frac{a}{h} \right) F_3 \left(\frac{a}{h} \right) da = C_{13}; \quad (3.100g)$$

$$C_{32} = 0; \quad (3.100h)$$

$$C_{33} = \frac{72\pi}{E^*h^4b} \int_0^{a_1} F_3^2\left(\frac{a}{h}\right) da; \quad (3.100i)$$

a_1 : Yerel çatlak derinliği.

şeklinde olup matris formda (Kisa and Brandon, 2000);

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & c_{22} & 0 \\ c_{31} & 0 & c_{33} \end{bmatrix}_{[3 \times 3]} \quad (3.101)$$

olarak yazılabilir. $[C]^{-1}$ esneklik katsayıları matrisinin tersi olmak üzere, çatlakın rijitlik matrisi K_{cr} aşağıdaki gibi oluşturulur (Kisa and Brandon, 2000).

$$K_{cr} = \begin{bmatrix} [C]^{-1} & -[C]^{-1} \\ -[C]^{-1} & [C]^{-1} \end{bmatrix}_{(6 \times 6)} \quad (3.102)$$

Çatlakın, kirişin rijitliğine olan etkilerinin incelenmesi için sağlam haldeki kiriş için hesaplanan rijitlik matrislerine, çatlakın rijitlik matrisi;

$$[K]_{wcr} = [K] - [K]_{cr} \quad (3.103)$$

şeklindeki gibi eklenmelidir.

Burada;

$[K]_{wcr}$: Çatlaklı kirişin rijitlik matrisi,

$[K]$: Sağlam kirişin rijitlik matrisi,

$[K]_{cr}$: Çatlakın rijitlik matrisidir.

Çatlaklı kiriş için rijitlik matrisinin oluşturulması ile kiriş için incelenen serbest titreşim ve burkulma analizlerinde, sağlam kiriş için kullanılan rijitlik matrisleri yerine çatlaklı kirişin rijitlik matrisi kullanılarak çatlak kirişe eklenmiş olmaktadır.

3.7Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

Tez çalışması kapsamında ele alınan sandviç kiriş modellerinin analizleri için oluşturulan sonlu elemanlar modelleri, serbest titreşim ve burkulma durumları için ayrı ayrı doğrulanmıştır. Doğrulama çalışmasında referans alınan araştırmaların sonuç değerleri dikkate alınarak, oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde kullanılan eleman sayıları yakınsama sağlanan durumlara göre belirlenmiştir.

Bu kapsamda, doğal frekans değerleri için yapılan çalışmada kullanılan modeller 100elemandan oluşurken burkulma yükü değeri için kullanılan modeller 40 elemandan oluşmuştur. Kirişin uzunluğu dikkate alınarak, incelenen çatlak konumuna kaçınıcı elemanın denk geldiği hesaplanmış ve artı bir eleman ile çatlak sembolize edilmiştir.

Doğal frekans değerlerinin incelenmesi için oluşturulan sonlu elemanlar modeli, Negru ve arkadaşlarının 2015 yılında yapmış oldukları “ Natural frequency changes due to damage in composite beams” (Negru vd., 2015) başlıklı yayını referans alınarak doğrulanmıştır. Negru vd. (2015), yaptıkları çalışmalarında çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC ve yüzey tabakası malzemesi olarak AISI 1045 yapısal çelik kullanarak oluşturulan beş tabakalı sandviç kirişin serbest titreşim durumunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Solidworks yazılımı kullanılarak farklı derinliklere sahip çatlaklı ve çatlaksız sandviç kiriş modelleri için ilk on titreşim modunda analizler gerçekleştirmişlerdir.

Yapılan doğrulama çalışması için, tez çalışmasında kullanılan sonlu elemanlar modelinde Negru vd. (2015) çalışmalarında kullandıkları ile benzer boyutsal ölçü, malzeme özellikleri,çatlak konumlandırılması ve çatlak derinliği değerleri kullanılarak analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Negru vd., (2015)'nin yapmış oldukları çalışmada kullandıkları kiriş modeli, eşit tabaka kalınlıklarına sahip iki adet çekirdek tabakasından ve üç adet yüzey tabakasından oluşan beş tabakalı sandviç kiriştir. Kiriş modellerine ait diğer özellikler ise aşağıdaki gibidir.

Kiriş uzunluğu $L=1\text{m}$,kiriş genişliği $B=0,02\text{m}$, kiriş yüksekliği $H=0,005$ (her bir tabakanın yüksekliği $0,001\text{m}$), malzeme özellikleri $E_{\text{çelik}} = 2,06 * 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, $E_{\text{PVC}} = 2,41 * 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, $\rho_{\text{çelik}} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{\text{PVC}} = 1300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\nu_{\text{çelik}} = 0,29$, $\nu_{\text{PVC}} = 0,3825$

Çizelge 3.2. Çatlaksız sandviç kiriş modeli için serbest titreşim doğrulama sonuçları

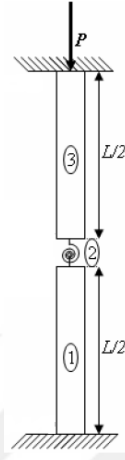
	Analitik Negru vd. (2015)(Hz)	FEM Negru vd. (2015) (Hz)	Bu Çalışma (Hz)
1.Mod	4,48443	4,5076	4,5180
2.Mod	28,10534	28,1580	28,3109
3.Mod	78,69577	78,4390	79,2566
4.Mod	154,21230	152,5780	155,2687

Çizelge 3.3. Çatlaklı sandviç kiriş modeli için serbest titreşim doğrulama sonuçları

	a=0,4mm çatlak derinliği		a=1mm çatlak derinliği		a=2mm çatlak derinliği	
	FEM Negru vd. (2015)(Hz)	Bu çalışma (Hz)	FEM Negru vd. (2015)(Hz)	Bu çalışma (Hz)	FEM Negru vd. (2015)(Hz)	Bu Çalışma (Hz)
1.Mod	4,5035	4,5167	4,3908	4,5101	4,3475	4,4826
2.Mod	28,1562	28,3106	28,0730	28,3088	28,0400	28,3016
3.Mod	78,3794	79,2381	76,5370	79,1480	75,8680	78,7754
4.Mod	152,493	155,2275	150,0900	155,0270	149,2700	154,2128

Burkulma durumun incelenmesi için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için ise Özen'in (2007) yapmış olduğu "Kusurlu yapılarda burkulma ve titreşim probleminin nümerik analizi" başlıklı yüksek lisans tezi referans alınmıştır.Özen (2007), yaptığı çalışmada düşey tekil yüklere maruz çatlaklı, dikdörtgen kesitli, tek malzemeli kolonların titreşim ve burkulma durumunu farklı sınır şartları için analitik, nümerik ve deneysel olarak araştırmış ve elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını yapmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinde, tez çalışması

kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar modeline benzer şekilde çatlak durumu, kütsüz bir yayla modellenmiş ve yapının 3 birim elemandan oluştuğı kabul edilmiştir.



Şekil 3.8. Her iki ucu sabit kolonun çatlak modellemesi (Özen, 2007)

Burkulma durumunu için oluşturulan sonlu elemanlar modeli, referans olarak alınan Özen'in (2007) yapmış olduğı çalışma ile benzer boyutsal ölçü ve malzeme özelliklerinde çalıştırılarak doğrulaması yapılmıştır.

Özen'in (2007) yapmış olduğı çalışmada kullandığı kolon modeli, tek malzemedan oluşan her iki ucu sabit kolon şeklindedir. Modele ait diğerk özellikler ise aşağıdaki gibidir.

Kolon uzunluğı $L=0,490\text{m}$, kolon genişliğı $B=0,008\text{m}$, kolon yüksekliğı $H=0,008\text{m}$, malzeme özellikleri, $E = 1,9 * 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$, $\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\nu = 0,29$.

Çizelge 3.4.Çatlaklı ve çatlaksız kolon modeli için doğrulama sonuçları

	a=2mm çatlak derinliğıne sahip kiriş		Çatlak hasarı bulunmayan kiriş	
	Burkulma Yüğü (N)Özen (2007)	Burkulma Yüğü (N)Bu Çalışma	Burkulma Yüğü (N)Özen (2007)	Burkulma Yüğü (N) Bu Çalışma
1.Mod	10575,1	10575,1	10804,3	10804,3
2.Mod	32412,8	32413,1	32412,8	32418,3

Yukarıdaki çizelgelerden görüleceği üzere çatlaksız ve çatlaklı halde doğal frekans ve burkulma yükü değerlerinin hesaplanması için MATLAB’da yazılan sonlu elemanlar kodunun literatürle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



BÖLÜM IV

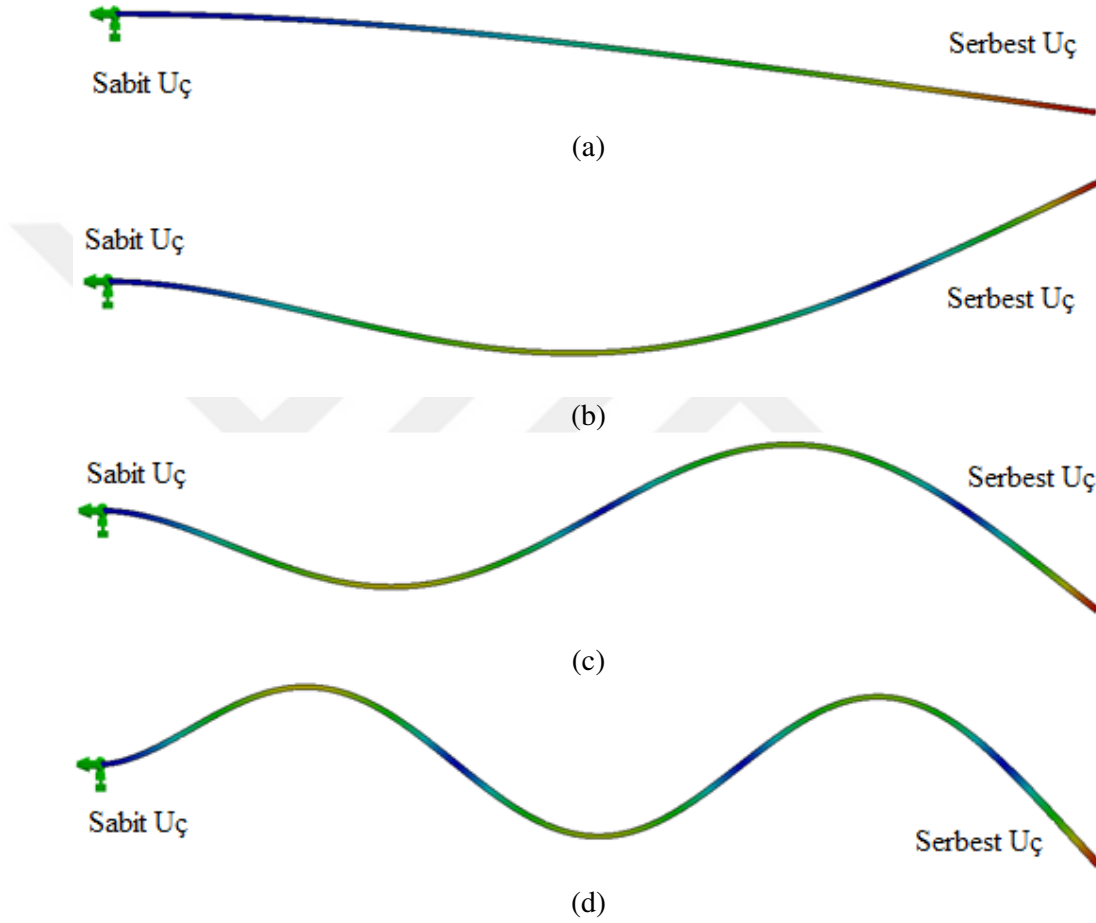
BULGULAR VE TARTIŞMA

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere sandviç kirişler günümüzde konvansiyonel tek malzemeli kirişlere alternatif olarak gösterilmekte ve özellikle ağırlık problemi yaşanan yapılarda kompozit yapılarla beraber en önemli çözüm yöntemi olarak görülmektedir. Bundan dolayı da özellikle son zamanlarda sandviç yapılar üzerine araştırmalar yoğunlaştırılmış ve geliştirme çabaları artırılmıştır. Yapılan bu tez çalışması kapsamında da çatlak hasarına sahip sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma durumları incelenmiştir. İnceleme kapsamında sandviç kirişler beş tabaka ve üç tabaka olmak üzere iki farklı şekilde modellenmiş, beş tabakalı yapılar eşit kalınlıkta iki adet çekirdek tabakası ve üç adet yüzey tabakasından oluşmuş, üç tabakalı yapılar ise çekirdek tabakası için farklı kalınlıklarda modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Üç tabakalı kirişlerin modellenmesinde h/H (çekirdek tabakası kalınlığı/toplam kiriş kalınlığı) oranı kullanılmış ve bu oran için 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1 değerleri dikkate alınmıştır. $h/H=0$ olma durumu yapının tamamen yüzey tabakası malzemesinden yani yapısal çelikten oluştuğunu, $h/H=1$ olma durumu ise yapının tamamen çekirdek tabakası malzemesinden yani PVC veya alüminyumdan oluştuğunu ifade etmektedir (Oluşturulan tüm sandviç kiriş modellerinin toplam kalınlıkları 5mm' dir).

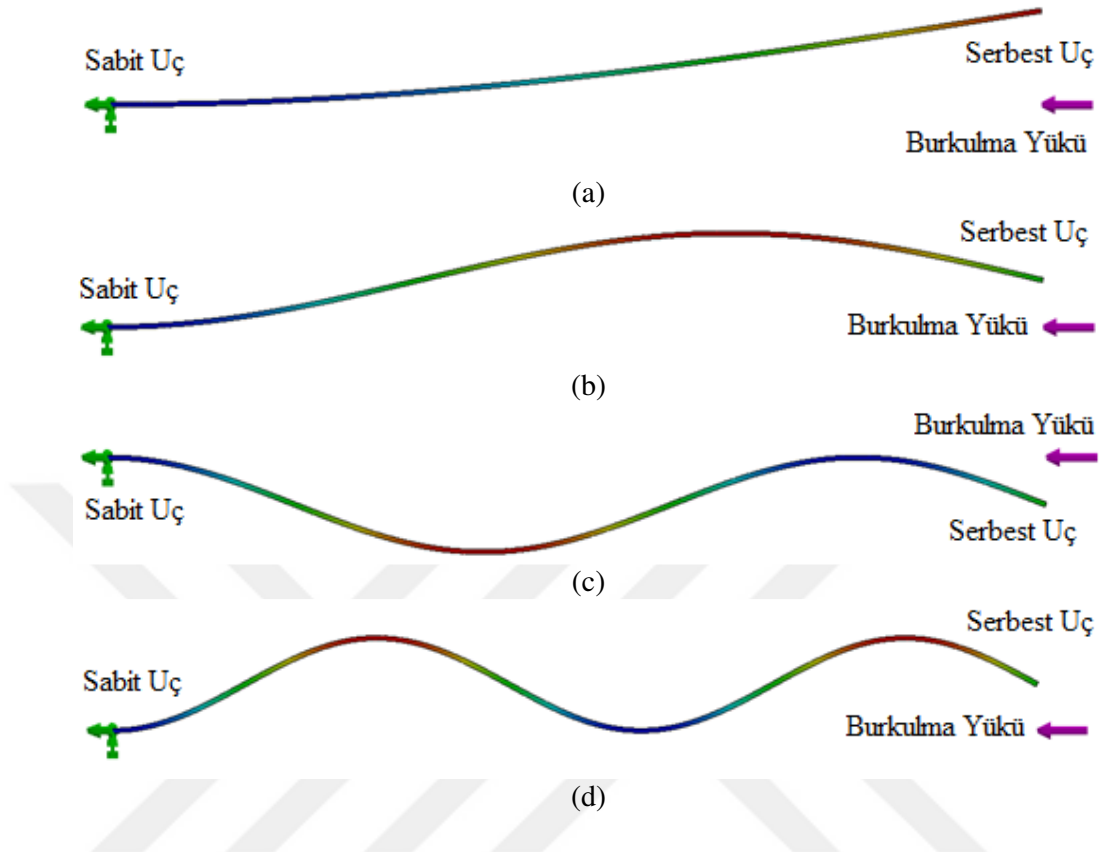
Ele alınan kiriş modeli ankastre kiriş olarak kabul edilmiş ve ankastre uçtan farklı mesafelerde bulunan, farklı derinliklere sahip çatlak hasarının doğal frekans ve burkulma yük değeri üzerine etkileri incelenmiştir. Çatlak hasarının ankastre uca olan mesafesi sırası ile 0,2m, 0,4m, 0,6m ve 0,8m olarak modellenmiş ve çatlak derinliğinin belirtilen noktalarda 1mm-4mm arasındaki değişiminin etkileri araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında diğer bir incelemede çekirdek malzemesi türünün kirişin doğal frekans ve burkulma yük değerlerine etkisi üzerine yapılmıştır. Bu kapsamda çekirdek malzemesi olarak PVC ve alüminyum seçilerek bu malzemelerin sandviç yapıda etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde tek malzemedan oluşan konvansiyonel kirişler ile sandviç kirişlerin titreşim ve burkulma durumları karşılaştırılmıştır.

Analizler sonlu elemanlar metodu kullanılarak MATLAB’de yazılan kod yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, serbest titreşim ve burkulma durumları için ilk dört mod şekli değerleri dikkati alınarak incelenmiştir. Dikkate alınan mod şekilleri iki eksenli yükleme durumunu temsil etmekte olup Şekil 4.1 ve 4.2’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1.Doğal frekans modları, 1. doğal frekans modu (a), 2. doğal frekans modu (b),3. doğal frekans modu (c) ve 4. doğal frekans modu (d)

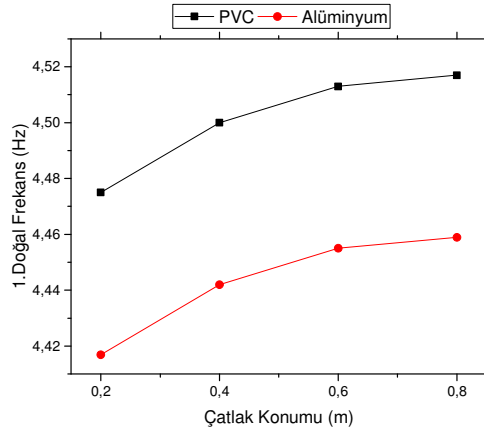


Şekil 4.2.Burkulma modları şekilleri,1. burkulma yükü modu (a), 2. burkulma yükümodu (b),3. burkulma yükü modu (c) ve 4. burkulma yükü modu (d)

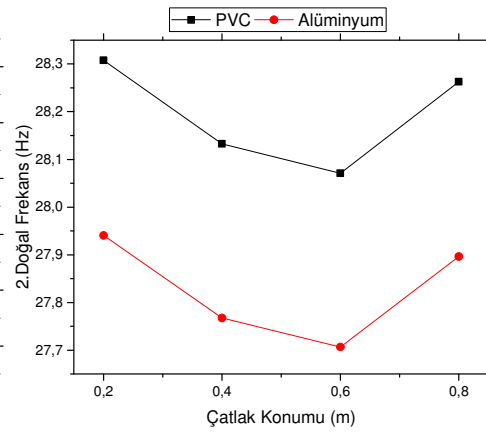
4.1 Sandviç Kirişlerde Serbest Titreşim Durumunun İncelenmesi

Titreşim yapıların tasarımı ve imalatında, tasarımcıların özellikle inceledikleri durumlardan birisidir. Oluşturulan yapının çalışma ortamında, doğal frekans değerlerine denk titreşim genliğine sahip bir yükleme durumuna maruz kalması, yapının hasara uğramasına ve hatta tahrip olmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden yapıların, yapıya etkiyebilecek titreşim durumlarının araştırılarak uygunsuzluk durumlarının belirlenmesi, gerekirse tasarım veya yükleme durumu değişikliğine gidilmesi gerekmektedir.

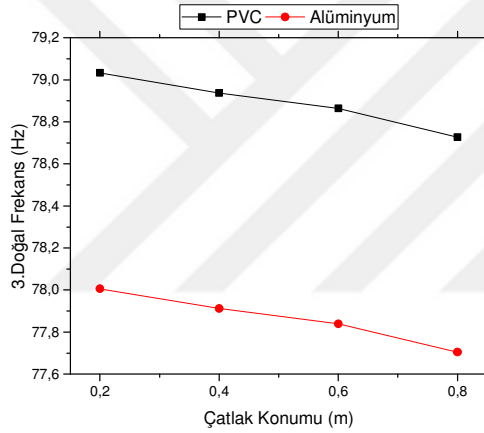
Bu doğrultuda yapılan tez çalışması kapsamında, modellenen sandviç kiriş modellerinin doğal frekans araştırmaları oluşturulan modellerin tabaka sayısının, tabaka kalınlığının, çekirdek tabakası malzemesi türünün, çatlak konumunun ve çatlak derinliğinin doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizlerde yakınsama durumu dikkate alınarak eleman sayısı 100 olarak alınmıştır.



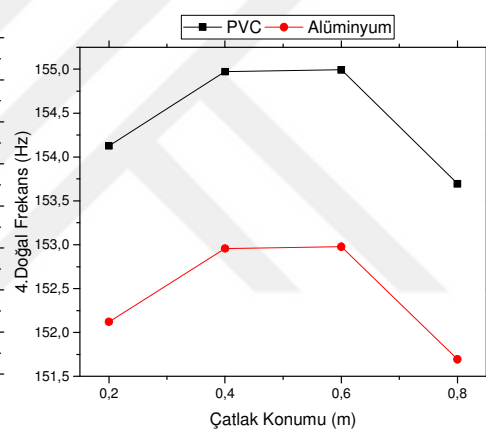
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans

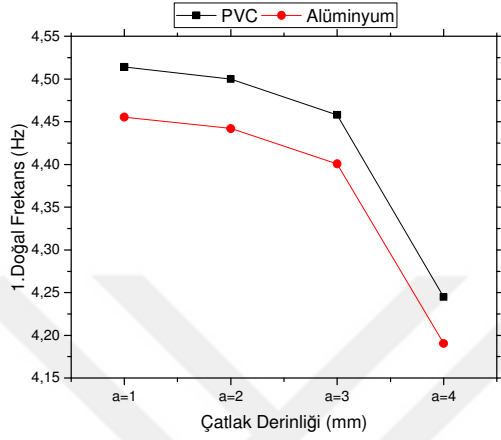


(d) 4. Doğal frekans

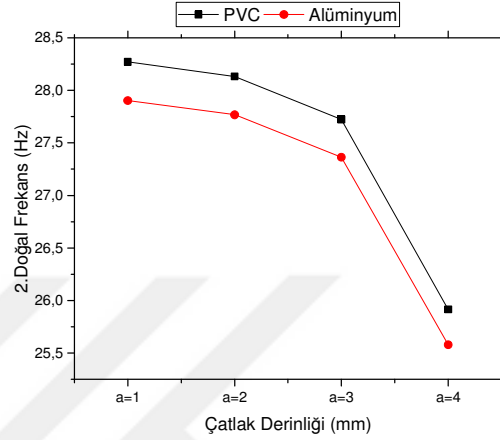
Şekil 4.3. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Şekil 4.3' de beş tabaka olarak modellenen 2mm sabit çatlak derinliğine sahip sandviç kirişin, doğal frekans değerlerinin çatlak konumu ile değişimi PVC ve alüminyum çekirdekli modeller için gösterilmektedir. Görüldüğü üzere PVC çekirdekli modellerin doğal frekans değerleri alüminyum çekirdekli modellere göre daha yüksek olmaktadır. Ayrıca çatlak konumundaki değişimin yapı üzerinde, farklı mod şekillerine ait titreşim değerleri için farklı etkilere sahip olduğu görülmektedir.

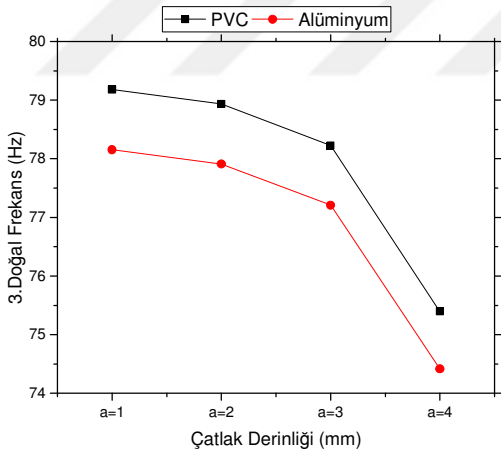
Çatlak konumu ankastre uçtan uzaklaştıkça, 1. ve 3. doğal frekans değerlerinde sırasıyla sürekli bir artış ve azalma gerçekleşirken, bu durum 2. ve 4. doğal frekanslarda 0,6m çatlak konumu durumunda sırası ile minimum ve maksimum değerlere ulaşmaktadır.



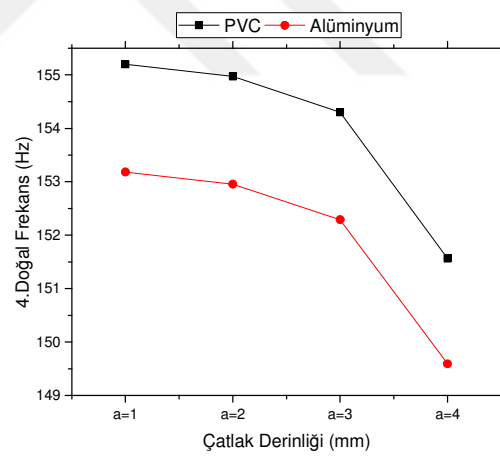
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans

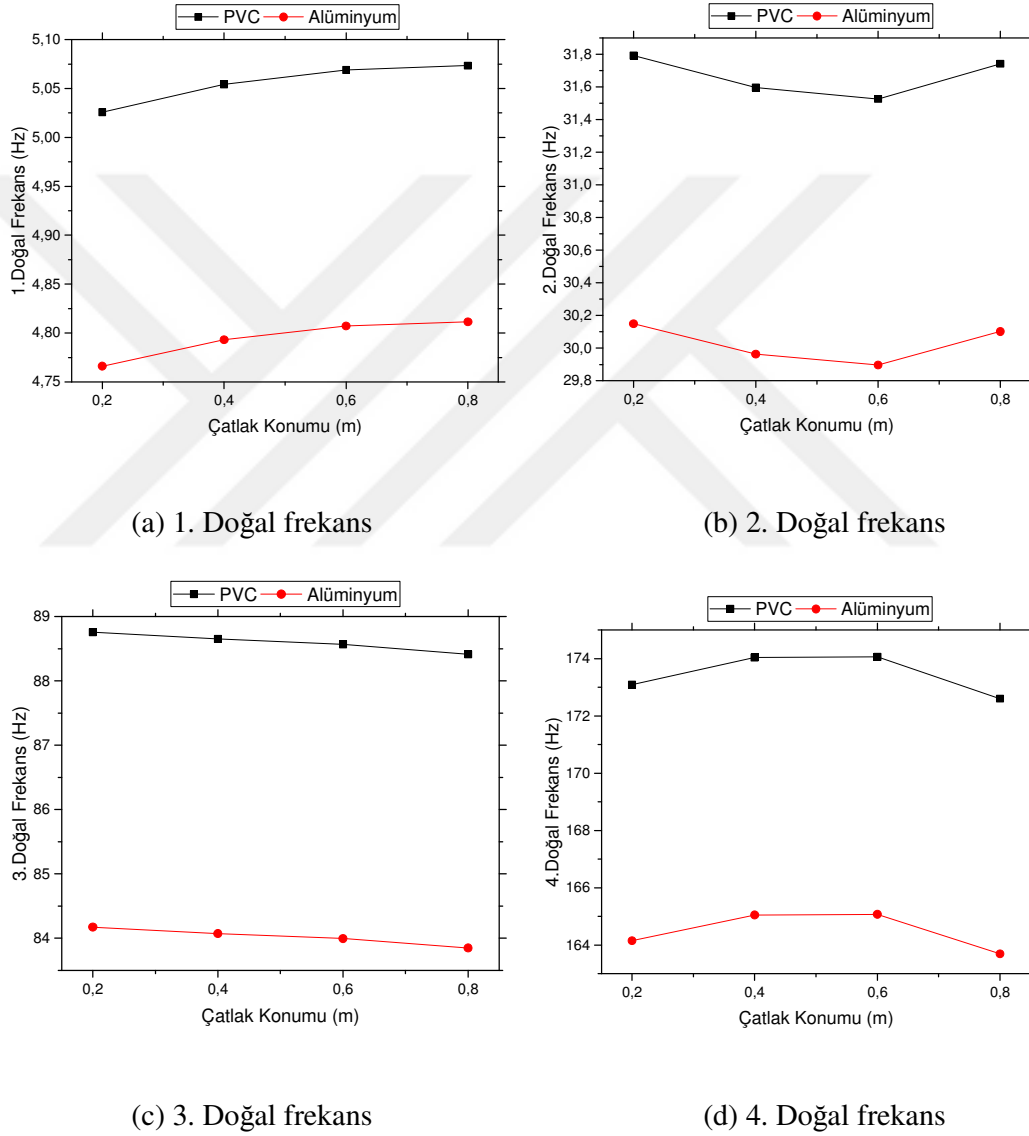


(d) 4. Doğal frekans

Şekil 4.4.Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Şekil 4.4'ise çatlak konumunun sabit tutulduğu beş tabakalı sandviç kiriş modellerinde, çatlak derinliğindeki değişimden kaynaklı etkilerin PVC ve alüminyum çekirdek kullanılması durumunu göstermektedir. Görüldüğü üzere PVC çekirdek tabakası kullanılan sandviç kiriş modellerinde doğal frekans değerleri, alüminyum çekirdekli modellere göre daha yüksek olmaktadır.

Çatlak derinliğindeki artışın etkisi 2. ve 4. doğal frekans değerleri için sırası ile minimum ve maksimum değere ulaşmaktadır. Ayrıca çatlak konumunun sabit tutulması durumunda, çatlak derinliğindeki artış yapılar da sürekli bir doğal frekans değeri azalışına sebep olmaktadır. Bu değişim dört doğal frekans şekilleri içinde benzer şekilde olup, çatlak derinliğinin 3mm'yi geçmesi durumunda daha belirgin hal almaktadır.

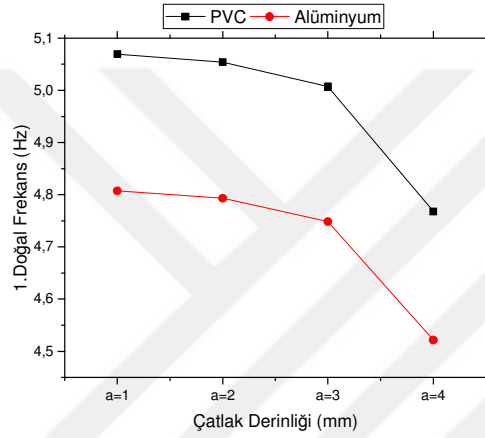


Şekil 4.5. Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi

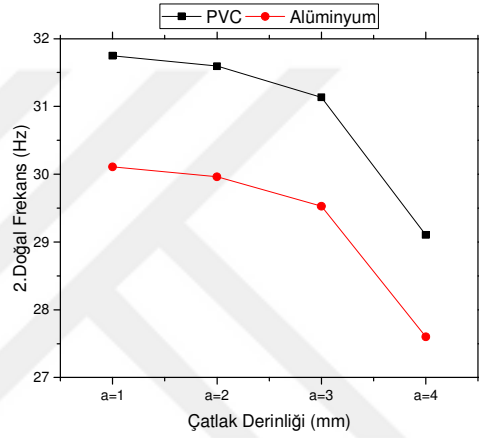
Şekil 4.5' de ise sabit çatlak derinliğine sahip üç tabakalı PVC ve alüminyum çekirdekli modeller için çatlak konumundaki değişimin, doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri

gösterilmektedir. Her bir doğal frekans şekli için değişim formu beş tabakalı modeller için elde edilen sonuçlar ile benzer olsa da üç tabakalı modellerde çatlak konumundaki değişimin etkileri daha düşük düzeyde olmaktadır.

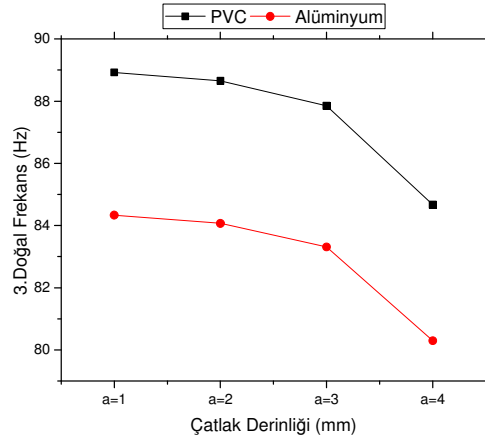
Ayrıca beş tabakalı modellerden farklı olarak üç tabakalı modellerde, çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC kullanılması ile alüminyumun kullanılmasından kaynaklı frekans değerlerinde oluşan fark daha belirgin olmaktadır.



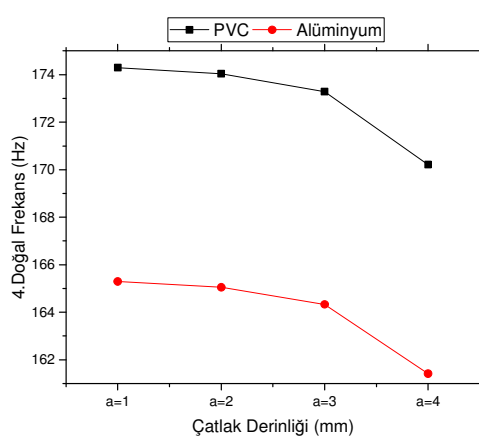
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



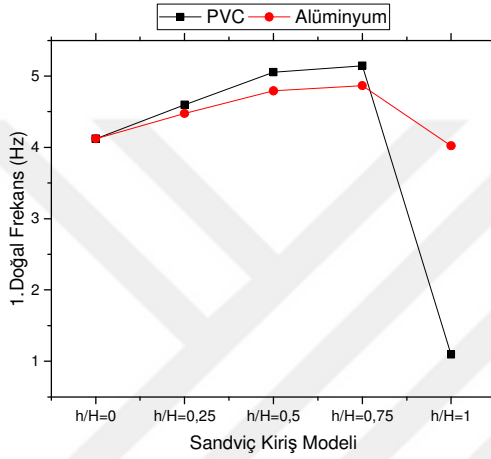
(c) 3. Doğal frekans



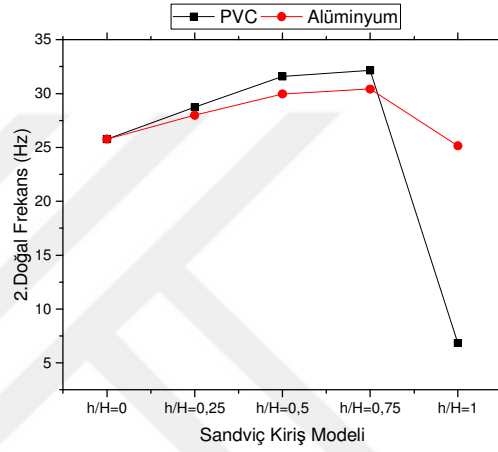
(d) 4. Doğal frekans

Şekil 4.6.Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi

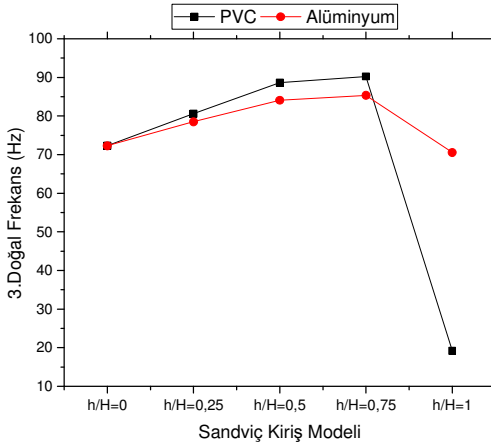
Çatlak derinliğindeki değişimin, çatlak konumunun sabit tutulduğu PVC ve alüminyum çekirdekli üç tabakalı modellerin doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Beş tabakalı modeller ile benzer şekilde, çatlak derinliğindeki artış ile dört doğal frekans şekli içinde sürekli bir azalmaya sebep olurken, çekirdek tabakası olarak PVC ve alüminyum malzemenin kullanılmasının etkileri 4. doğal frekans şeklinde en belirgin halini almaktadır.



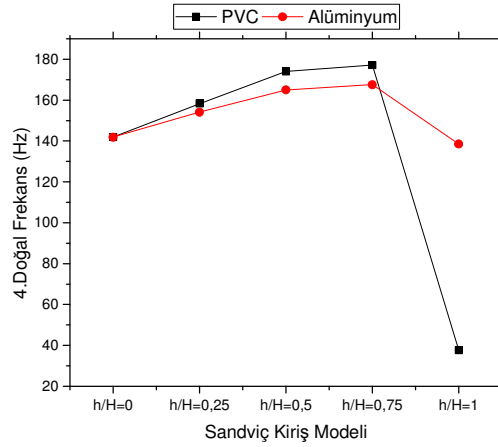
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans



(d) 4. Doğal frekans

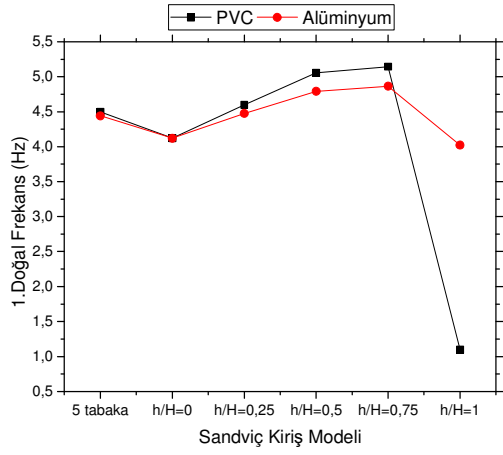
Şekil 4.7. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının doğal frekanslar üzerindeki etkisi

PVC ve alüminyum çekirdek tabakası malzemesi kullanılan üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için, çatlak konumunun ve çatlak derinliğinin sabit olması durumunda, çekirdek tabakası kalınlığındaki değişimin doğal frekans değerleri üzerine etkileri ise Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere h/H , çekirdek tabakası kalınlığının toplam kalınlığa olan oranını temsil etmektedir. Oluşturulan tüm sandviç kiriş modelleri için toplam kalınlık sabit tutulduğu için, üç tabakalı modellerde çekirdek tabakasındaki artış, yüzey tabakasında azalmaya sebep olmaktadır.

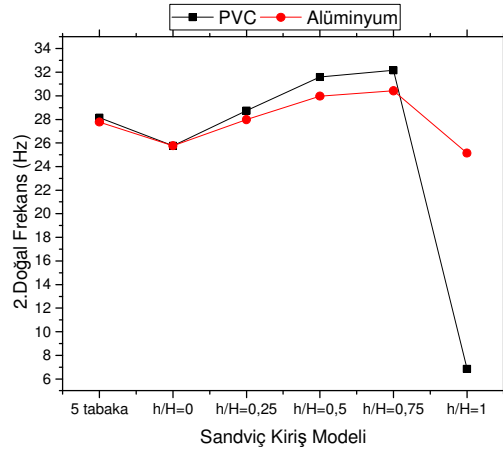
Şekil 4.7’ de $h/H=0$ ile yapının tamamen yüzey tabakası malzemesinden yani yapısal çelikten oluştuğu, $h/H=1$ ile ise yapının tamamen çekirdek tabakası malzemesinden yani PVC veya alüminyumdan oluştuğu ifade edilmiştir. Şekil 4.7’de ki grafiklerden de görüldüğü üzere tüm modeller için dört doğal frekans şeklinde de aynı değişim gözlenmektedir. PVC çekirdekli sandviç kirişler, alüminyum çekirdekli modellerden daha yüksek doğal frekans değerine sahip olmakta ve $h/H=0,75$ yani çekirdek tabakası kalınlığı 3,75mm olduğunda ise her iki yapı içindedoğal frekans değerleri maksimuma ulaşmaktadır.

Şekil 4.8’ de ise PVC ve alüminyum çekirdek tabakası malzemesi kullanılan sandviç kiriş modellerinin sabit çatlak konumu ve sabit çatlak derinliğinde doğal frekans değerlerinin, üç tabakalı ve beş tabakalı modellerin için değişimi gösterilmektedir.

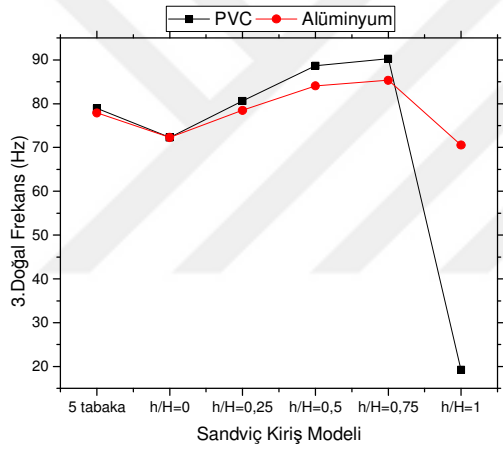
Görüldüğü üzere tek malzemeli kiriş modellerinin doğal frekans değerleri en düşük değerlere sahip olurken, üç tabakalı modellerin doğal frekans değerleri beş tabakalı modellerden daha yüksek oluşmaktadır. Üç tabakalı modellerde çekirdek tabakası kalınlığı arttıkça da aradaki fark artmaktadır. PVC ve alüminyum çekirdek malzemesi kullanılması durumunda meydana gelen doğal frekans değeri farkı ise en düşük beş tabakalı yapılarda oluşmaktadır.



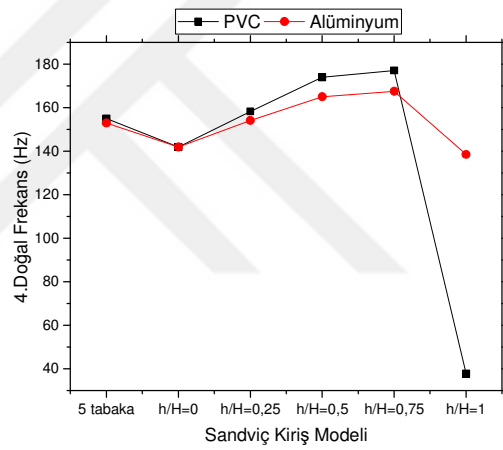
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans

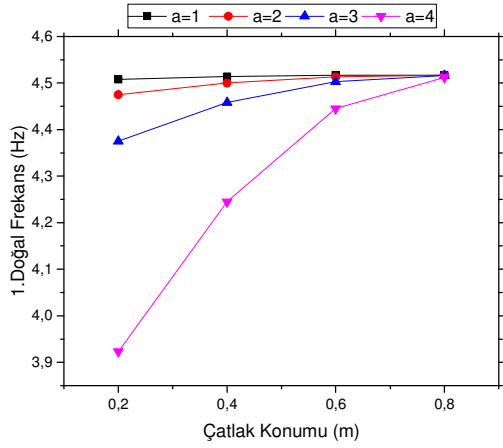


(c) 3. Doğal frekans

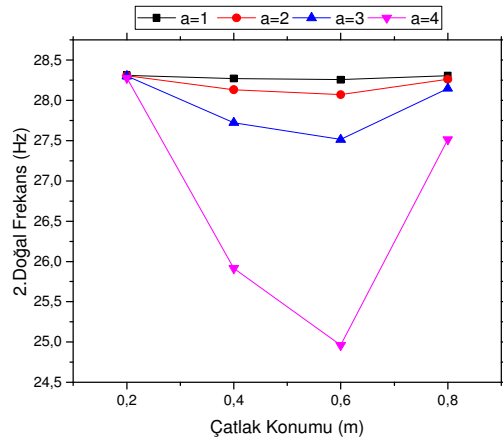


(d) 4. Doğal frekans

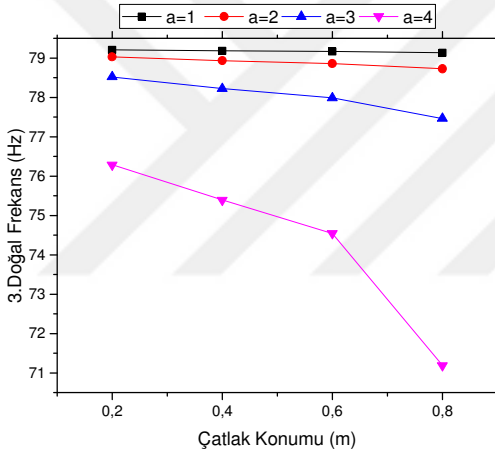
Şekil 4.8. Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı ve beş tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının doğal frekanslar üzerindeki etkisi



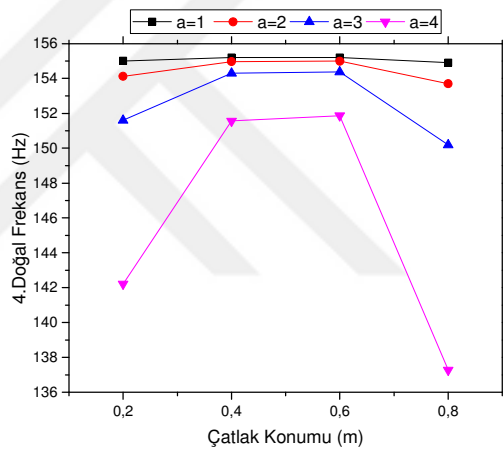
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans

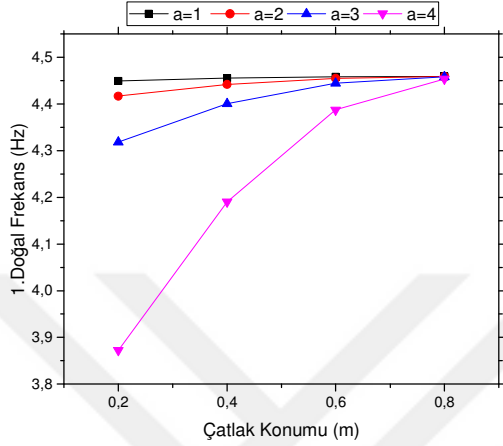


(d) 4. Doğal frekans

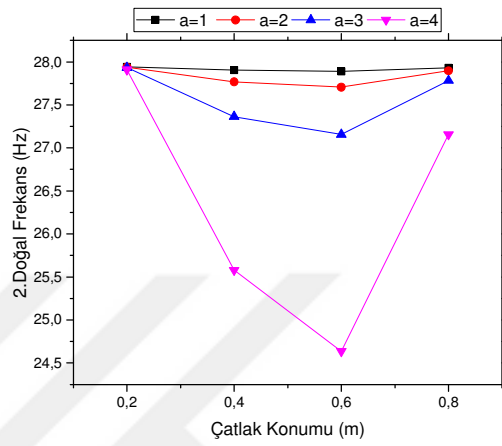
Şekil 4.9. Beş tabakalı PVC çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Beş tabakalı PVC çekirdek tabakasına sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumu ve değişen çatlak derinliğinin doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri Şekil 4.9’da verilmiştir. 1. ve 3. doğal frekans şekli değerlerinde, çatlak konumunun ankastre uçtan uzaklaşması ile sırasıyla sürekli artış ve azalma yaşanmakta, 4. doğal frekans değerlerinde ise çatlak konumunun ankastre uca en yakın ve en uzak olduğu durumlarda en düşük frekans değerleri oluşmaktadır. Bu durum 2. doğal frekans değerleri için 0,6m mesafede minimum değerde gerçekleşmektedir. Çatlak konumunun ankastre uçtan olan uzaklığındaki artışın etkileri, çatlak derinliğinin artması ile artmakta ve en belirgin

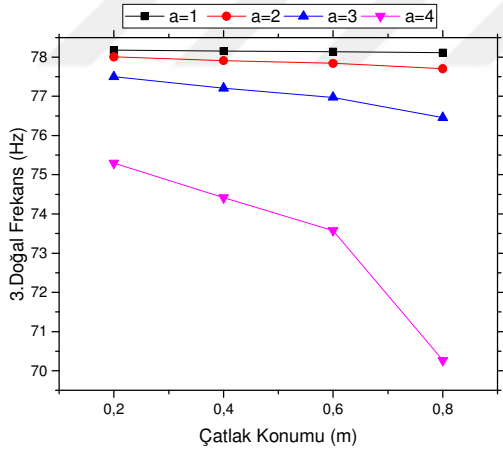
halini 4mm çatlak derinliği için almaktadır. Çatlak derinliğinin 1mm olduğu durumda ise değişim minimum düzeydedir. Bu durum çatlak derinliğinin artması ile, çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesinin daha kritik hale geldiğini göstermektedir.



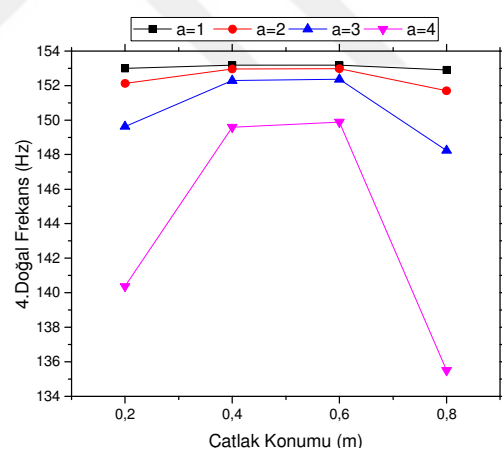
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



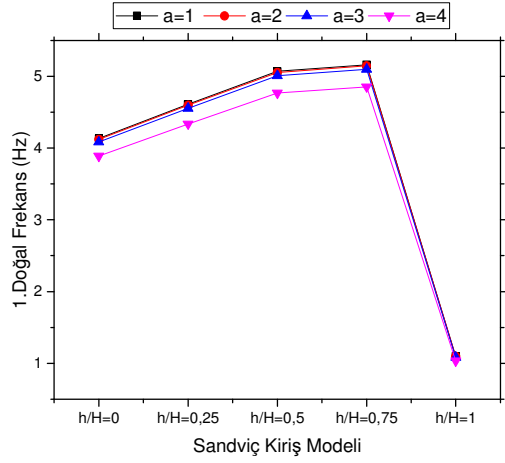
(c) 3. Doğal frekans



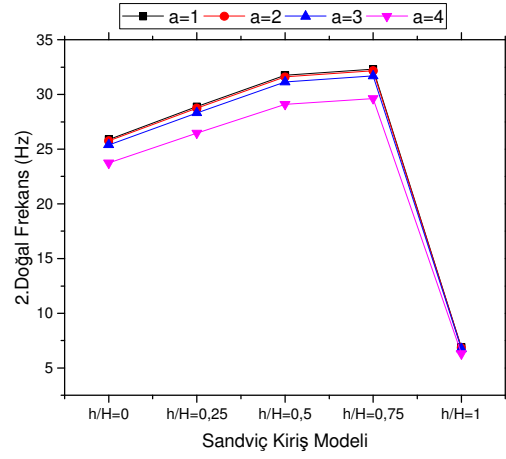
(d) 4. Doğal frekans

Şekil 4.10. Beş tabakalı alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun doğal frekanslar üzerindeki etkisi

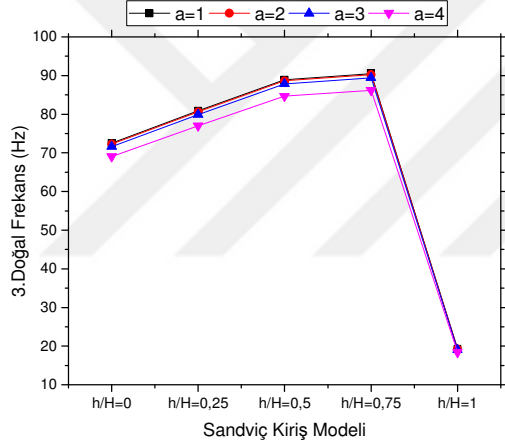
Şekil 4.9 ile benzer şekilde, beş tabakalı alüminyum çekirdekli sandviç kiriş modeli içinde çatlak konumu ve çatlak derinliğindeki değişimin doğal frekans değerleri üzerindeki etkileri Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



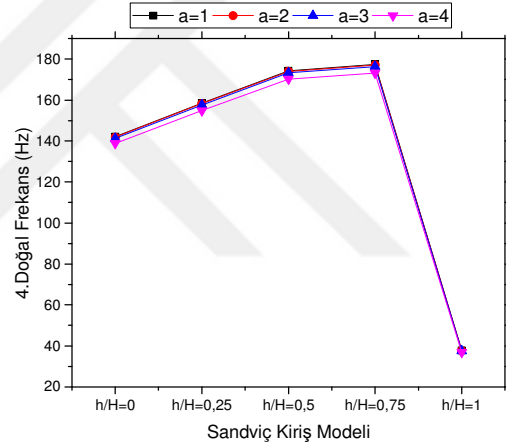
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans

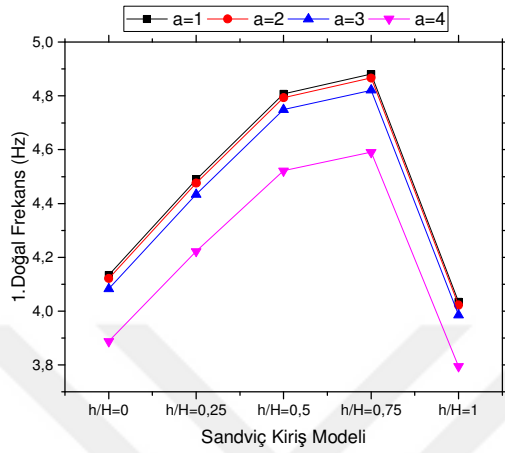


(d) 4. Doğal frekans

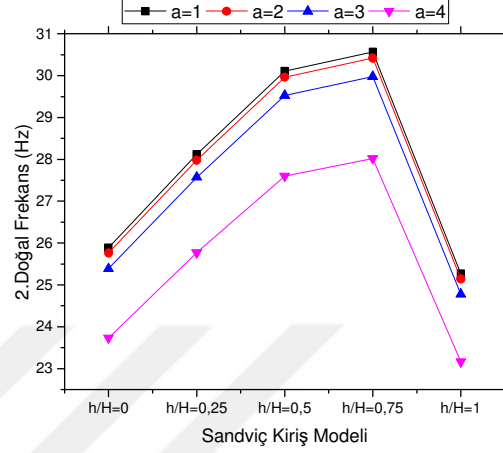
Şekil 4.11. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip PVC çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Şekil 4.11’de ankastre uca uzaklığı sabit tutulan üç tabakalı PVC çekirdekli sandviç kirişler için, çatlak derinliğindeki değişimin farklı kiriş modellerinde doğal frekans değerlerine olan etkileri görülmektedir. $h/H=0,75$ (çekirdek kalınlığı 3,75mm) olan model için dört frekans şeklinde de en yüksek doğal frekans değerleri elde edilmektedir. Ayrıca her bir doğal frekans şekli için çatlak derinliğindeki değişimin etkileri farklı olmaktadır.

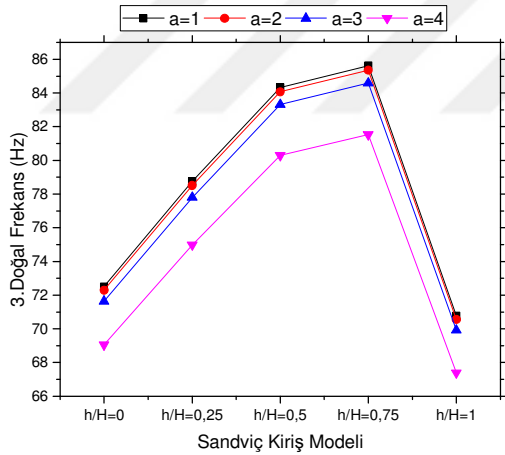
4. doğal frekans değeri için çatlak derinliğindeki artışın etkisi minimuma inerken, 2. doğal frekans şeklinde bu etki maksimum boyuttur.



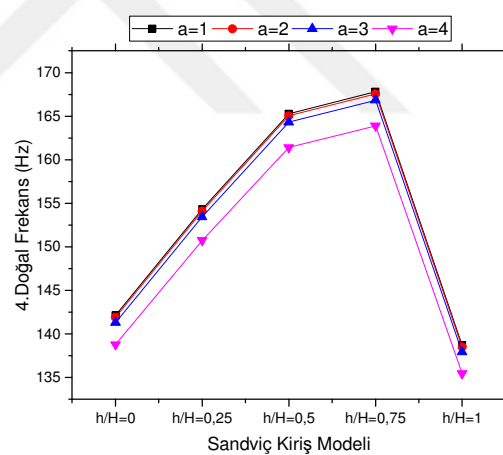
(a) 1. Doğal frekans



(b) 2. Doğal frekans



(c) 3. Doğal frekans



(d) 4. Doğal frekans

Şekil 4.12. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip alüminyum çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Çekirdek tabakası malzemesi olarak alüminyum malzeme kullanılan üç tabakalı sandviç kirişlerin, çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesinin sabit olması durumunda çatlak derinliğindeki değişimin doğal frekans değerlerine olan etkileri Şekil 4.12’de belirtilmiştir. PVC çekirdekli kiriş modellerine nazaran, alüminyum çekirdekli

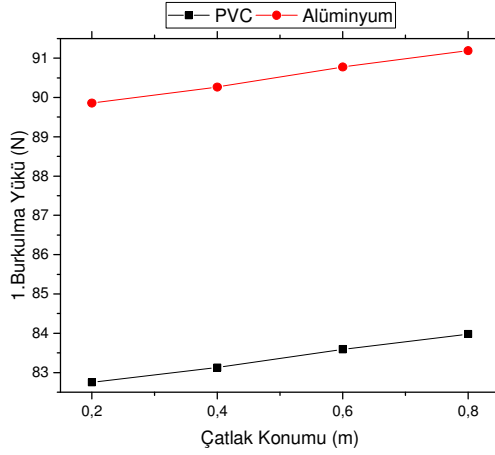
modellerde yaşanan doğal frekans değişimleri benzer olup, çatlak derinliğinin etkileri alüminyum çekirdekli modellerde daha yüksektir.

Genel olarak incelenen sandviç kiriş modelleri serbest titreşim durumu göz önüne alındığında, alüminyum çekirdekli sandviç kiriş modellerinin, PVC çekirdekli sandviç kirişlerden daha düşük doğal frekans değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Kiriş modellerinin titreşim durumu incelendiğinde ise, en yüksek doğal frekans değerlerine 3.75mm çekirdek kalınlığına sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelinin ulaştığı görülmektedir. Ayrıca çatlak derinliğinin ve ankastre uca olan konumunun etkisi doğal frekans şekillerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

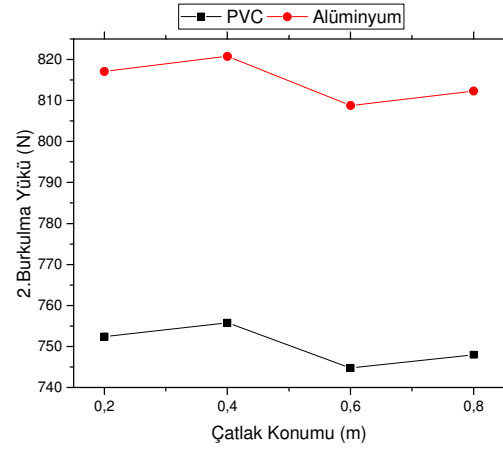
4.2 Sandviç Kirişlerde Burkulma Durumunun İncelenmesi

Burkulma, yapıların tasarımı esnasında en az titreşim kadar önemli bir konudur. Özellikle kiriş ve kolon gibi boy/kalınlık oranı yüksek olan yapılarda eksenel yönde etki eden yük, yapının deformasyona uğramasına sebep olmaktadır. Etki eden yükün kritik değere ulaşması durumunda ise oluşan deformasyon plastik boyutta gerçekleşerek hasar oluşmaktadır. Bu nedenle tasarımı gerçekleştirilen yapıların çalışma ortamları doğru bir şekilde analiz edilerek, yapılara etkiyecek yüklerin boyutları ve yönleri doğru belirlenmelidir. Etki eden yüklerin tanımlanması sonucunda ise belirlenen çalışma ortamı için doğru tasarımın yapılması gerekmektedir.

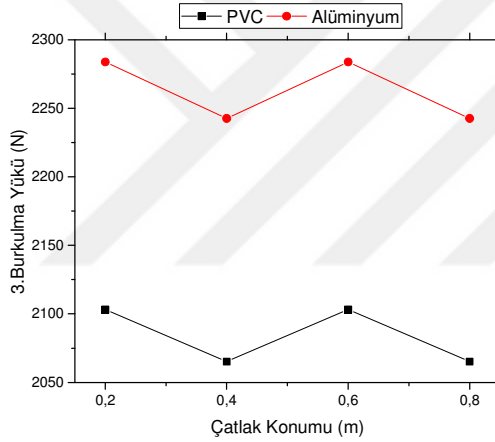
Yapılan bu tez çalışması kapsamında, modellenen sandviç kirişlerin burkulma yük değerlerinin çekirdek tabakası malzemesi türü, tabaka kalınlığı, çatlak konumu ve çatlak derinliği ile değişimi incelenmiştir. Titreşim durumu araştırması için oluşturulan modeller ile aynı şekilde yüzey tabakası yapısal çelik olan sandviç kirişler hem PVC hem de alüminyum çekirdek kullanılması durumu için incelenmiştir. Oluşturulan beş ve üç tabakalı modeller farklı çatlak konumu ve derinliğine sahip olma durumları ele alınarak çalışmalar yapılmıştır. Analizlerde yakınsama durumu dikkate alınarak eleman sayısı 40 olarak alınmıştır.



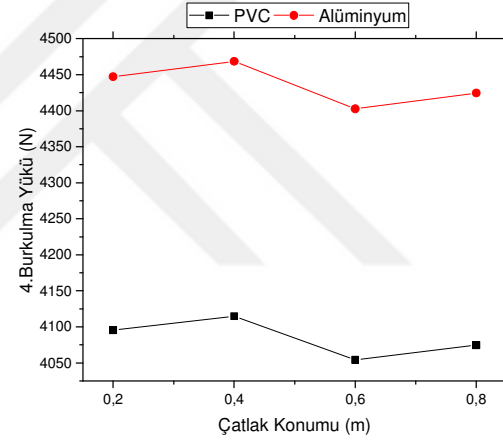
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



(c) 3. Burkulma yükü

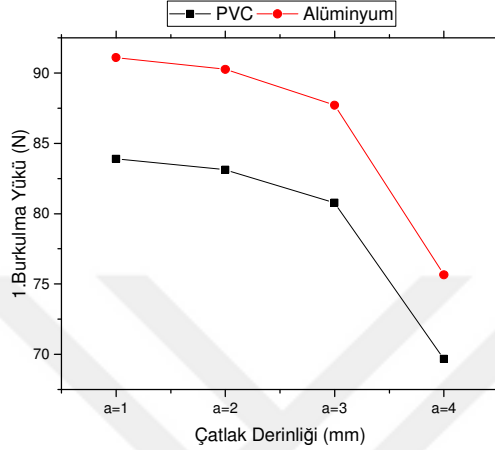


(d) 4. Burkulma yükü

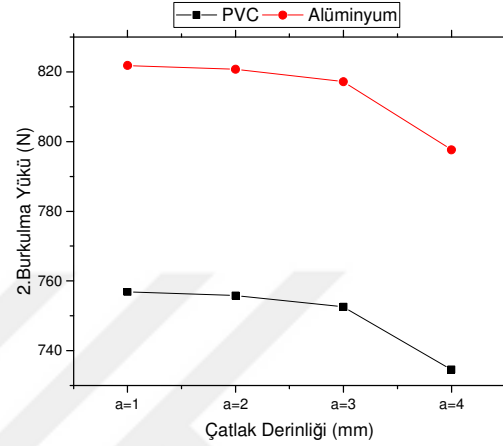
Şekil 4.13.Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Şekli 4.13’de sabit çatlak derinliğine sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesinin değişiminin burkulma yüküne olan etkileri verilmektedir. Görüldüğü üzere doğal frekans değerlerinde yaşanan durumunun aksine PVC çekirdek malzemesine sahip kiriş modelleri, alüminyum çekirdek tabakalı kirişlerden daha düşük burkulma yükü değerlerine sahiptir. 1. burkulma şekli durumunda çatlak konumu ankastre uçtan uzaklaştıkça kirişin kritik burkulma yükü değeri devamlı bir artış göstermektedir. Bu durum 2. ve 4. burkulma şekli durumunda, çatlak konumu 0,4m olduğunda maksimuma ulaşırken 0,6m mesafedeki çatlak için

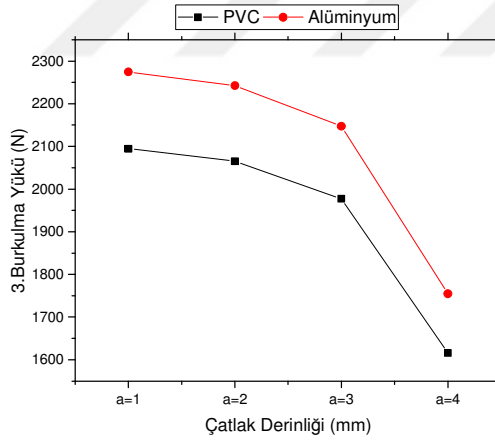
minimum değerde kalmaktadır. 3. burkulma şekli durumunda ise 0,2m ve 0,6m mesafedeki çatlak konumu için burkulma yükü üst değerde iken 0,4m ve 0,8m mesafelerde en düşük değerededir.



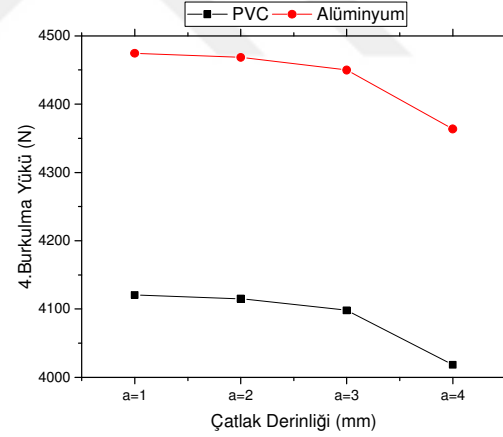
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



(c) 3. Burkulma yükü

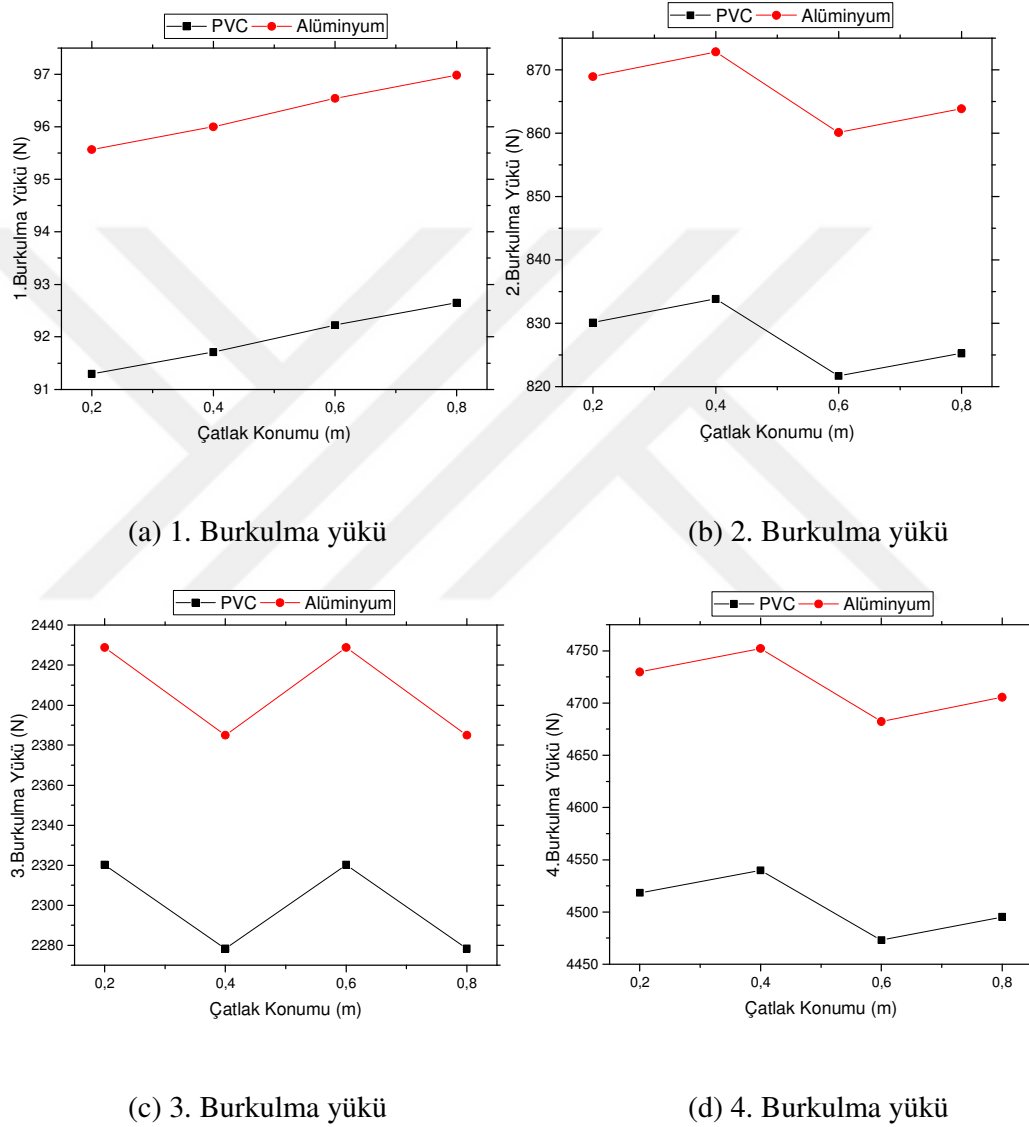


(d) 4. Burkulma yükü

Şekil 4.14. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliğinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesi sabit tutulması durumunda ise, çatlak derinliğindeki değişimin PVC ve alüminyum çekirdek tabakasına sahip beş tabakalı sandviç kirişteki burkulma yüküne olan etkileri Şekil 4.14'deki gibidir. Dört burkulma şekli içinde çatlak derinliğindeki artış devamlı bir burkulma yükü azalışına sebep

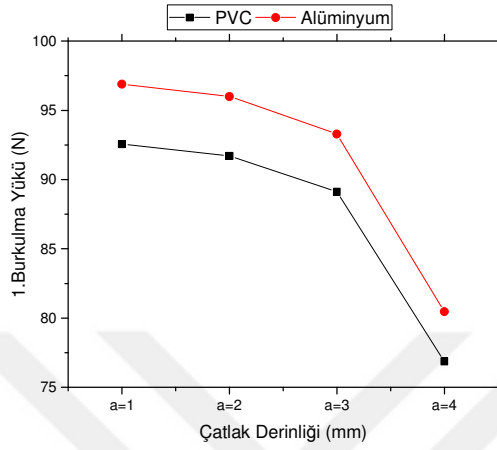
olmaktadır. Şekil 4.14’de görüldüğü üzere 1. ve 3. burkulma yük değerlerinde çatlak derinliğindeki değişim daha kritik boyuttadır. 2. ve 4. burkulma yük değerlerinde ise çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC ve alüminyum malzeme kullanılmasının etkileri daha belirgin bir hal almaktadır.



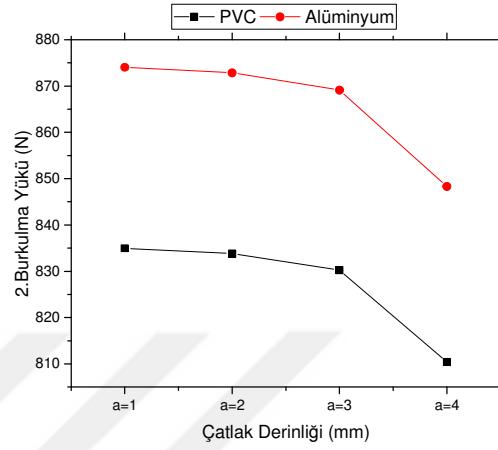
Şekil 4.15.Sabit (2mm) çatlak derinliğine sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli için değişen çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.15, çatlak derinliğinin sabit olduğu üç tabakalı sandviç kiriş için çatlak konumunun burkulma yüklerine olan etkilerini göstermektedir. Üç tabakalı model için çatlak konumundaki değişimin burkulma yüklerine olan etkileri beş tabakalı modellerde meydana gelen etkiler ile benzer şekilde oluşmaktadır. Bu durum, çatlak konumunun

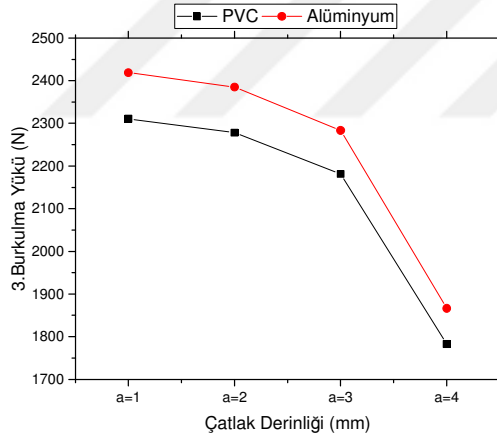
burkulma yüküne olan etkilerinin sandviç yapısından bağımsız olduğunu göstermektedir.



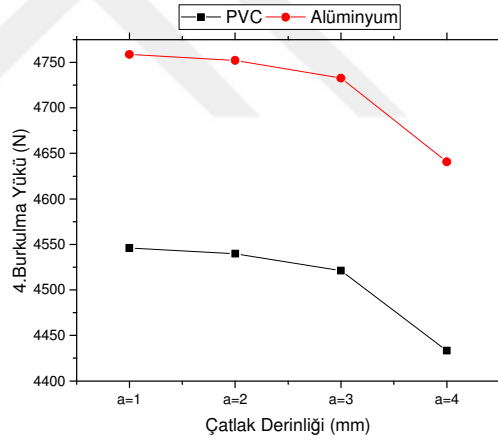
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



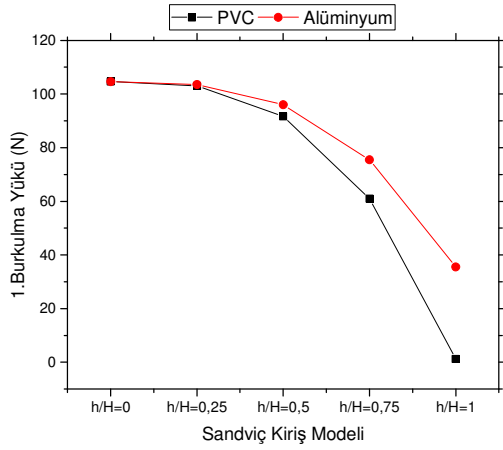
(c) 3. Burkulma yükü



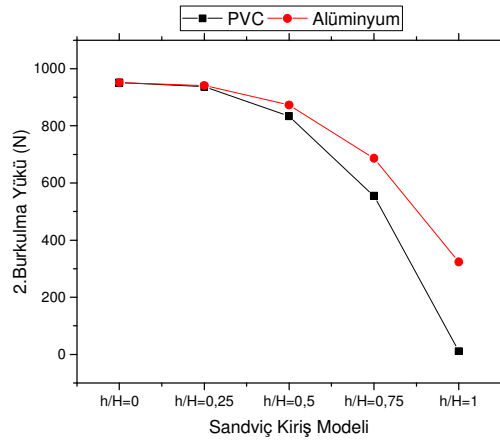
(d) 4. Burkulma yükü

Şekil 4.16. Sabit (0,4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modeli içinde değişen çatlak derinliğinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi

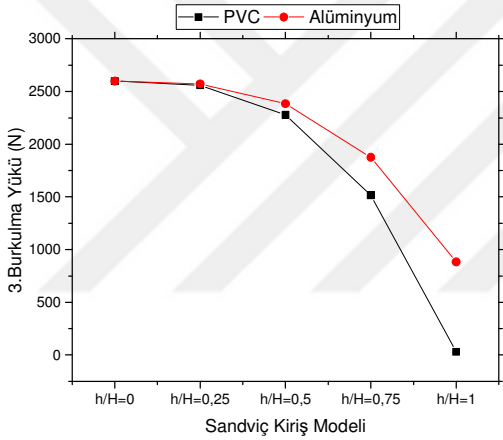
Beş tabakalı sandviç kirişler ile benzer şekilde üç tabakalı modellerde de çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesi sabit tutularak, çatlak derinliğindeki değişim burkulma yüklerine olan etkileri incelendiğinde çatlak derinliğindeki artışın, kirişin burkulma yükü değerlerinde düzenli olarak bir azalmaya sebep olmaktadır. Şekil 4.16'de görüldüğü üzere çatlak derinliğindeki değişimin etkileri 1. ve 3. burkulma yük değerlerinde, 2. ve 4. burkulma yük değerlerine göre daha etkili olmaktadır.



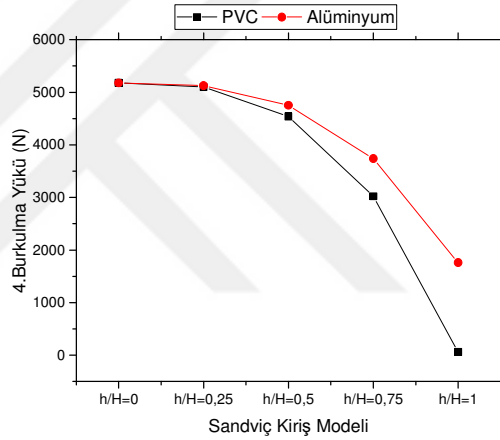
(a) 1. Burkulma yüğü



(b) 2. Burkulma yüğü



(c) 3. Burkulma yüğü



(d) 4. Burkulma yüğü

Şekil 4.17.Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının burkulma yükleri üzerindeki etkisi

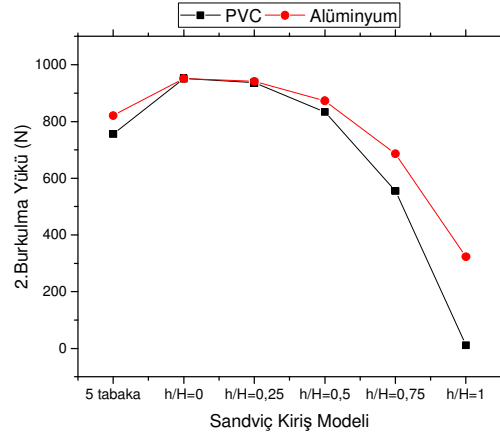
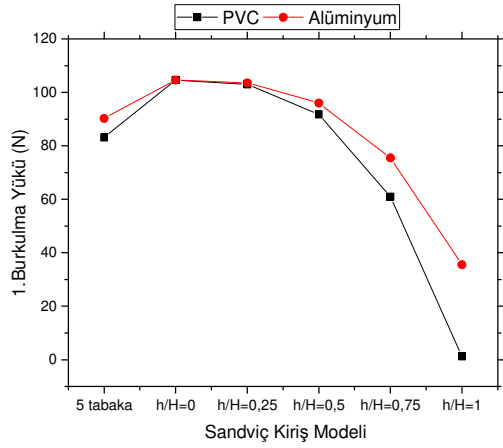
Şekil 4.17’de ise PVC ve alüminyum çekirdek tabakalarına sahip üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için, sabit çatlak konumuna ve sabit çatlak derinliğine sahip olmaları durumunda, sandviç kiriş modelinin burkulma yüküne olan etkileri gösterilmektedir. (h/H çekirdek tabakası kalınlığının toplam kiriş kalınlığına olan oranını ifade etmektedir.)

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere PVC çekirdek tabakasına sahip olan kirişlerin burkulma yükü değerleri, alüminyum çekirdekli modellere göre daha düşüktür. Ayrıca en yüksek burkulma yükü değeri $h/H=0$ yani yapının tamamen yapısal çelikten oluştuğu durumda

meydana gelmektedir. Sonrasında ise çekirdek tabakası kalınlığında meydana gelen artış, üç tabakalı kiriş modelinin burkulma yük değerlerinde sürekli bir azalmaya sebep olmuştur.

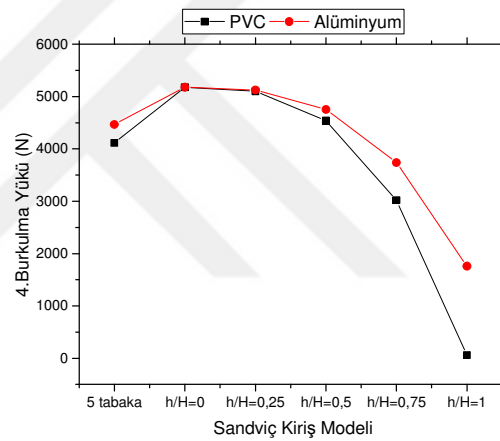
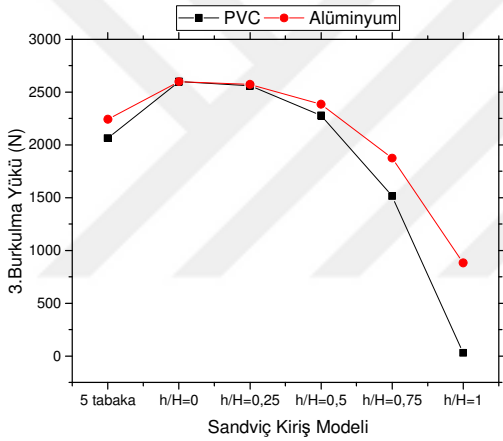
En düşük burkulma yükü değeri ise $h/H=1$ yani yapının tamamen çekirdek tabakası malzemesinden oluştuğu durumda PVC malzeme için geçerlidir.

Belirtildiği üzere çekirdek tabakası kalınlığında meydana gelen artış sürekli olarak burkulma yükü değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum bir dezavantaj olarak görülebilmektedir. Ancak toplam kiriş kalınlığı sabit tutulduğu için, çekirdek tabakası kalınlığındaki artış, yüzey tabakası kalınlığında azalmaya sebep olmaktadır ve kiriş ağırlığı da azalmaktadır. Bu durumsandviç kiriş modeli, çalışma ortamına uygun, gerekli yüklemeleri taşıyabilecek minimum ağırlıkta bir tasarım yapılmasına olanak sağlamaktadır.



(a) 1. Burkulma yükü

(b) 2. Burkulma yükü



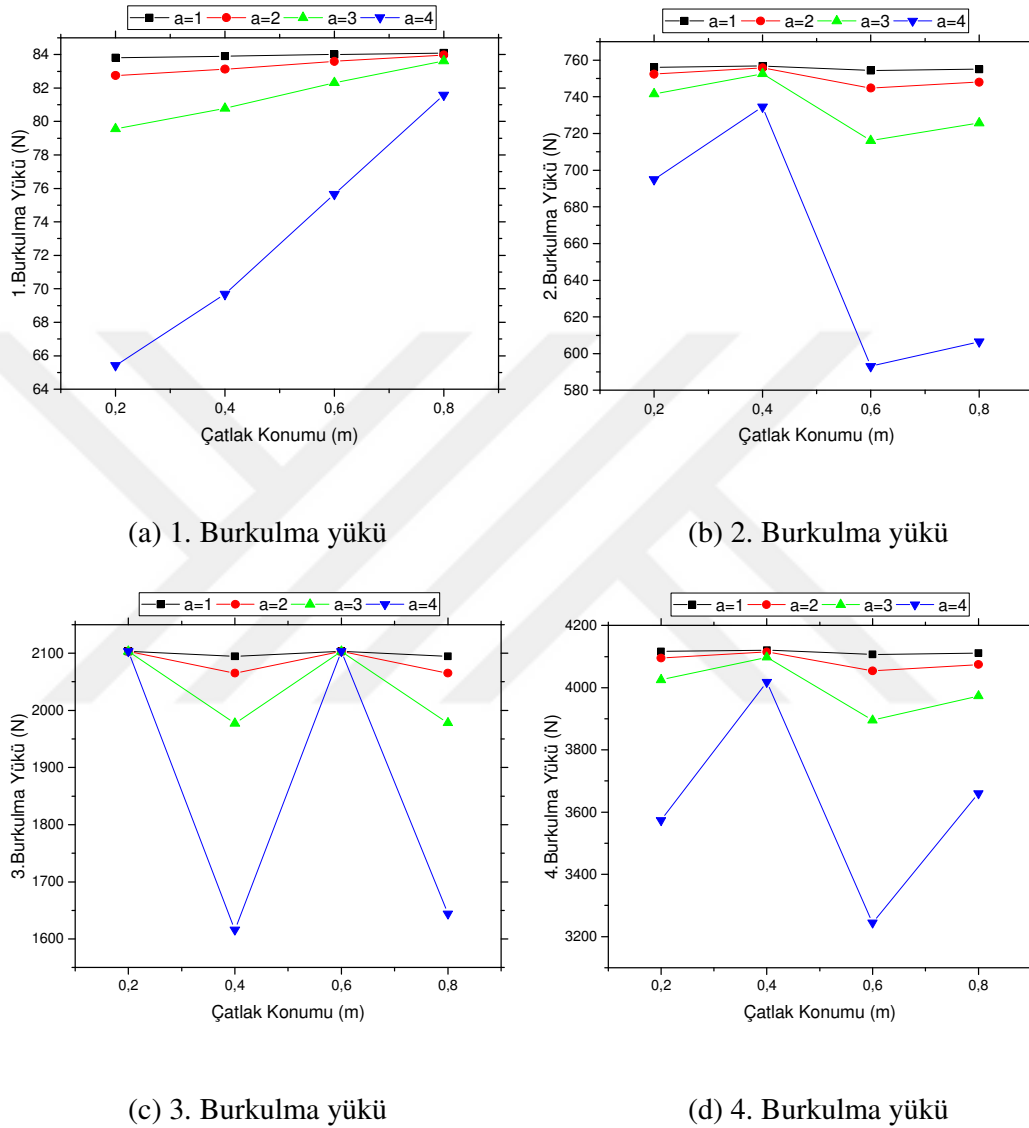
(c) 3. Burkulma yükü

(d) 4. Burkulma yükü

Şekil 4.18.Sabit (2mm) çatlak derinliğine ve sabit (0.4m) çatlak konumuna sahip üç tabakalı ve beş tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çekirdek tabakası kalınlığının burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.18’ de ise PVC ve alüminyum çekirdek tabakasına sahip sandviç kiriş modelleri için, sabit çatlak konumu ve sabit çatlak derinliğinde meydana gelen burkulma yükü değişimlerinin beş tabakalı ve üç tabakalı olma durumlarındaki sonuçları gösterilmektedir. En yüksek burkulma yükü tamamen çelik malzemeden oluşan konvansiyonel kiriş modeli için elde edilir iken, en düşük değerler tamamen PVC veya alüminyum malzemeden oluşan kirişlerde meydana gelmiştir. Üç tabakalı modellerde çekirdek tabakası kalınlığının, toplam kalınlığın yarısından az olduğu durumlarda burkulma yükü değeri, beş tabakalı modellerden yüksek olmaktadır. Çekirdek tabakası

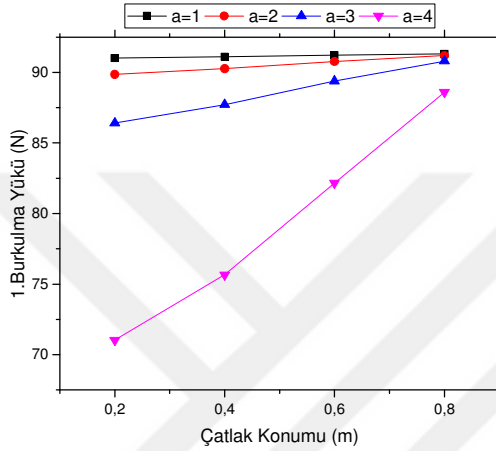
kalınlığı toplam kalınlığın yarısının üzerinde çıktığında ise, çekirdek kalınlığındaki artış ile orantılı olarak burkulma yükü değerleri beş tabakalı modellerin altına inmektedir.



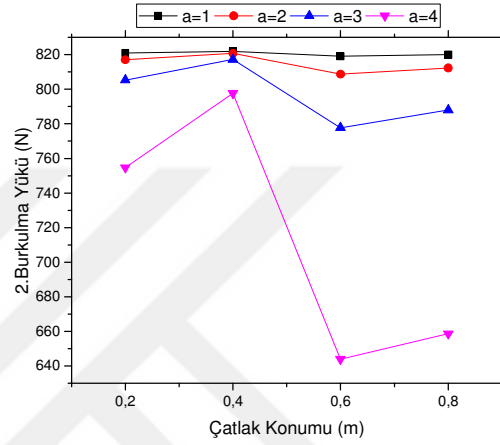
Şekil 4.19.Beş tabakalı PVC çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi

PVC çekirdek tabakasına sahip beş tabakalı sandviç kiriş modeli için, değişen çatlak konumu ve değişen çatlak derinliği etkilerindeki burkulma yükü değerleri Şekil 4.19' de verilmektedir. Farklı çatlak konumundaki değişen çatlak derinliğinin etkileri her bir burkulma yük değeri için farklı bir etkiye sahip olmaktadır. 1. burkulma şekli için çatlak konumunun ankastre uca olan mesafesinde meydana gelen artış, burkulma yükü değerinde sürekli bir artışa sebep olmaktadır. Bu durum göstermektedir ki ankastre

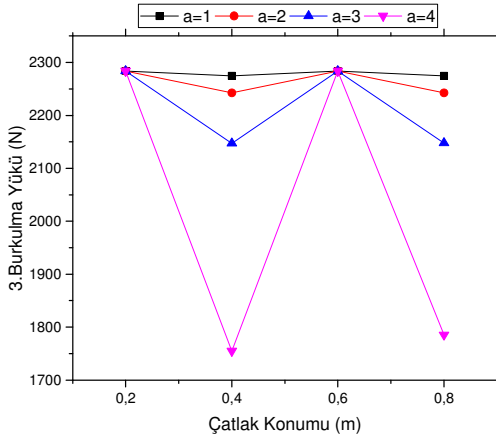
uçan yakın olan çatlak konumu, 1. burkulma şekli için en kritik noktayı oluşturmaktadır. Ancak 2. ve 4. burkulma yük değerlerinde ise kritik bölüm, çatlak hasarının ankastre uçtan 0,6m mesafede bulunduğu durumdur. 3. burkulma şekli durumunda ise tüm çatlak derinliklerinde, 0,2m ve 0,6m çatlak konumlarındaki burkulma yük değerleri eşittir.



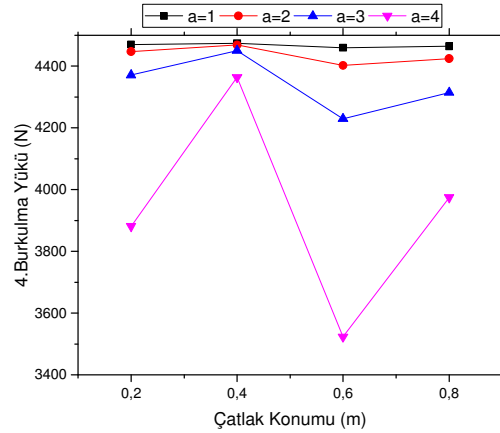
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



(c) 3. Burkulma yükü

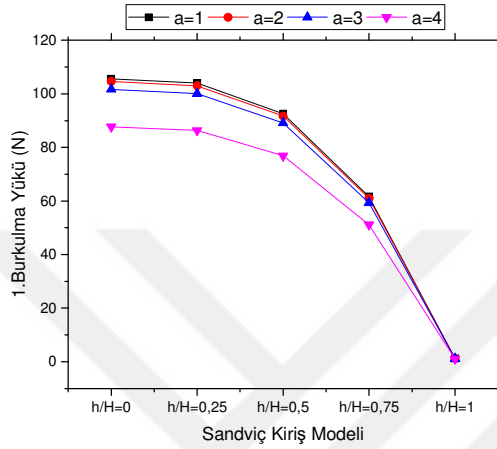


(d) 4. Burkulma yükü

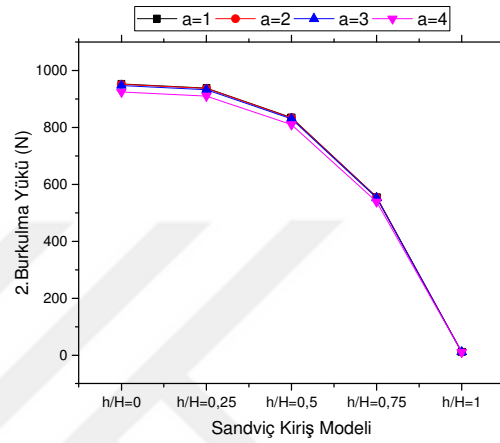
Şekil 4.20. Beş tabakalı alüminyum çekirdek malzemesine sahip sandviç kiriş modeli için değişen çatlak derinliği ve çatlak konumunun burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.20’de ise değişken çatlak konumu ve değişken çatlak derinliğine sahip beş tabakalı, alüminyum çekirdek tabakasına sahip sandviç kiriş modeli için burkulma yüklerinde meydana gelen değişimler yer almaktadır. Çatlak konumu ve çatlak

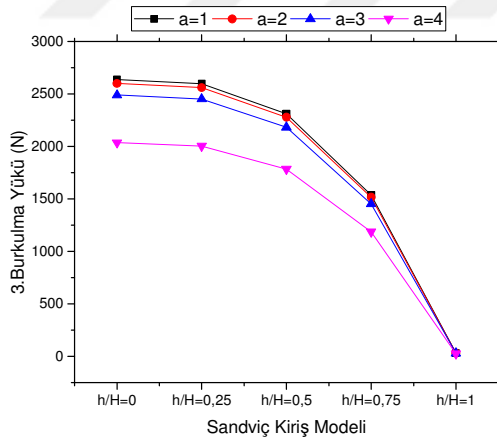
derinliğindeki değişimden meydana gelen etkiler, PVC çekirdek tabakasına sahip beş tabakalı model ile benzer şekilde meydana gelmektedir. Ancak alüminyum çekirdekli modellerde, çatlak konumundaki değişimin etkileri PVC çekirdekli modellere göre bir miktar daha fazla olmaktadır.



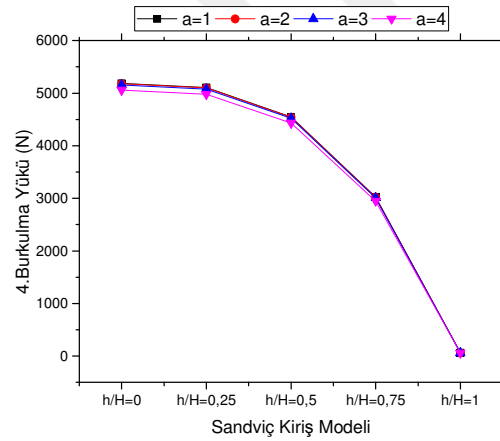
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



(c) 3. Burkulma yükü

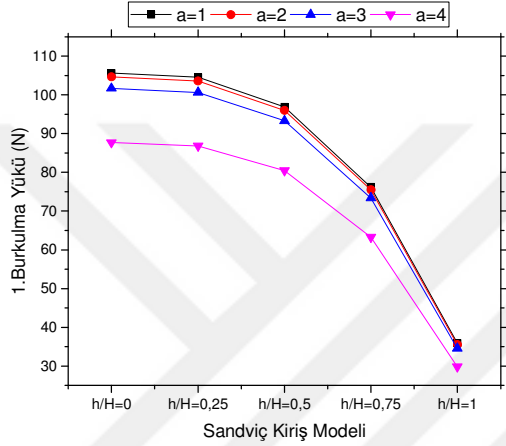


(d) 4. Burkulma yükü

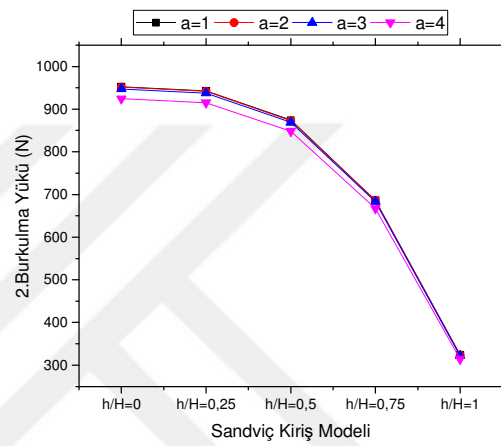
Şekil 4.21. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip PVC çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Çatlak konumunun sabit tutulduğu PVC çekirdek tabakasına sahip üç tabakalı sandviç kiriş modellerinin, değişen çatlak derinliği etkilerindeki burkulma yükü değerleri ise Şekil 4.21'da gösterilmektedir. Dört burkulma şekli içinde çatlak derinliğindeki artış,

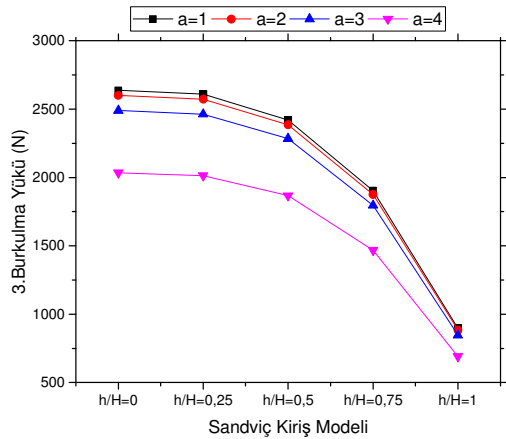
burkulma yükü değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Ancak bu değişim 2. ve 4. burkulma şeklinde, 1. ve 3. burkulma şeklinde meydana gelen değişimden daha düşük boyutlarda gerçekleşmektedir. Ayrıca çekirdek tabakası kalınlığı arttıkça burkulma yük değerinin azaldığı görülmektedir. $h/H=0$ tamamen yapısal çelikten oluşan kiriş modelini temsil ettiği için en yüksek burkulma yükü değeri sandviç kiriş modeli olarak $h/H=0,25$ (çekirdek tabakası kalınlığının 1,25mm olduğu durum) oranında meydana gelmektedir.



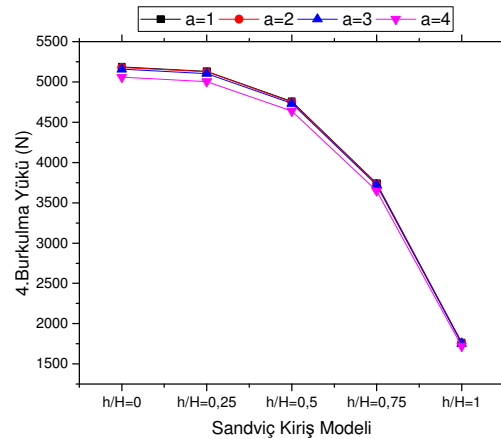
(a) 1. Burkulma yükü



(b) 2. Burkulma yükü



(c) 3. Burkulma yükü



(d) 4. Burkulma yükü

Şekil 4.22. Sabit (0,4m) çatlak konumunda, farklı çekirdek tabakası kalınlığına sahip alüminyum çekirdekli üç tabakalı sandviç kiriş modelleri için değişen çatlak derinliklerinin burkulma yükleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.22’de de görüldüğü üzere, çekirdek tabakası malzemesi olarak alüminyumun kullanılması durumunda da Şekil 4.21’de PVC çekirdekli modeller için meydana gelen değişimin benzeri görülmektedir. Ancak alüminyum çekirdekli sandviç kiriş modelleri, PVC çekirdekli modellere nazaran daha yüksek burkulma yükü değerlerine sahip olduğu için çekirdek tabakasındaki artışın burkulma yüküne olan etkisi daha düşük seviyede gerçekleşmektedir.

Genel olarak oluşturulan sandviç kiriş modelleri burkulma durumları incelendiğinde, en yüksek burkulma yükleri $h/H=0,25$ yani 1.25mm çekirdek kalınlığına sahip üç tabakalı sandviç kirişlerde oluşmaktadır. Çekirdek tabakası malzemesi açısından incelendiğinde ise alüminyum çekirdek malzemesine sahip kirişler, PVC çekirdekli kirişlerden daha yüksek burkulma yüklerine sahiptir. Özellikle çekirdek tabakası kalınlığının 3.75mm olduğu üç tabakalı sandviç kiriş modellerinde, PVC çekirdekli kirişlerde meydana gelen yüksek burkulma yük değeri azalması, alüminyum çekirdekli modellerde daha hafif bir düzeyde gerçekleşmektedir.

Ancak elde edilen bu burkulma değerleri tek malzemeli yapısal çelikten oluşan kirişin yük değerlerine ulaşamamaktadır. Bu durum bir dezavantaj ya da var olanın daha yetersiz hale gelmesi gibi görünse de ağırlıkta meydana gelen azalma sandviç kirişin bu dezavantajlı durumunu yıkmaktadır. Diğer yandan tek malzemeli alüminyum malzemeden oluşan kiriş göz önüne alındığında ise sandviç yapıların burkulma yüklerine ciddi boyutlarda fayda sağlamaktadır.

4.3 Sandviç Kirişlerde Ağırlık Durumu

Sandviç kirişleri günümüzde avantajlı kılan ve bu yöne doğru eğilim oluşmasına sebep olan en önemli faktörlerden biriside ağırlık azalmasına olanak sağlamasıdır. Her ne kadar yük değeri konusunda düşüşler meydana gelse de yapılan tasarımlar sayesinde bu durum absorbe edilebilir bir hal almakta ve komple yapı ele alındığında meydana gelen ağırlık azalması sandviç yapıların tercih edilme durumunu artırmaktadır.

Tez çalışması kapsamında oluşturulan sandviç kiriş modelleri incelendiğinde de gerçekleşen ağırlık ve yük değeri değişimleri bahsedilen durumu en iyi şekilde açıklamaktadır. Oluşturulan modeller içerisinde konvansiyonel tek malzemeli yapısal

elikten oluşan kiriş modelinin en yüksek ağırlığa sahip olduğu görülmektedir. Sandviç yapıdaki modellerde ise çekirdek tabakası kalınlığı arttıķa kiriş ağırlığı azalmaktadır. Çekirdek tabakası kalınlığındaki artış ile ağırlıkta meydana gelen azalma, çekirdek tabakası malzemesine göre de farklılık göstermektedir. Çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC malzeme kullanılan kiriş modelleri, aynı kalınlıkta çekirdek tabakası kalınlığına sahip alüminyum çekirdekli modellerden daha az ağırlığa sahiptirler. Ancak görülmektedir ki PVC ekirdekli modellerin burkulma yükü değerleri, aynı kalınlıkta çekirdek tabakasına sahip alüminyum çekirdekli modellere göre daha düşüktür. Bu durum başlangıçta PVC ekirdek kullanılmasının, yapının burkulma yk değerlerine zarar verdiği gibi görünse de daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere önemli olan etki yapının çalışma ortamında maruz kalacağı yükleme durumlarıdır.

izelge4.1’de görüldüğü üzere, tek malzemeli yapısal çelikten oluşan kiriş modeline nazaran en düşük burkulma yük değeri azalması $h/H=0,25$ ($h=1,25\text{mm}$) zelliğine sahip alüminyum çekirdekli sandviç kirişte oluşmaktadır. En yüksek burkulma yük değeri azalması ise $h/H=0,75$ ($3,75\text{mm}$) oranına sahip PVC ekirdekli kirişte meydana gelmektedir.

Bu hususta sandviç yapılarının tasarımında, çalışma ortamında yapıya etki edecek yüklerin büyüklüklerinin ve yönlerinin net bir şekilde belirlenmesinin önemi daha net anlaşılmaktadır. İstenilen dayanım kriterleri için en uygun modelin oluşturulması ile, yapıya eklenilecek gereksiz ek ağırlıklardan da kaçınılması mümkündür.

izelge4.1 incelendiğinden yük değeri azalmasının maksimum düzeyde olduğu $h/H=0,75$ oranına sahip PVC ekirdekli sandviç kiriş modeli en riskli olarak görülse de yapı için gerekli yükleme değerlerine sahip olması durumunda yapıda %62 oranından bir ağırlık azalması avantajı sağlayabilmektedir.

Çizelge 4.1.Oluşturulan tek malzemeli ve sandviç kirişlerin ağırlık ve burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişimler

Kiriş Türü	Ağırlık (Gram)	Ağırlıkta Azalma Oranı (%)	Burkulma Yüğü Değerlerinde Azalma Oranı (%)
Çelik Kiriş	785		
Alüminyum	280		
PVC Kiriş	130		
5 tabakalı PVC	523	%33	%20
5 tabakalı Al	583	%25	%13
3 tabakalı PVC (h=1.25mm)	621	%20	%1,5
3 tabakalı Al (h=1.25mm)	658	%16	%0,95
3 tabakalı PVC (h=2.5mm)	457	%41	%12
3 tabakalı Al (h=2.5mm)	532	%32	%8
3 tabakalı PVC (h=3.75mm)	293	%62	%41
3 tabakalı Al (h=3.75mm)	406	%48	%28

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Yapılan bu yüksek lisans tezi çalışmasında günümüzde birçok kullanım alanına sahip olan ve kullanım alanı her geçen gün genişleyen sandviç kirişlerde çatlak durumunun serbest titreşim ve burkulma yüklerine olan etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında toplam kiriş kalınlıkları eşit olmakla birlikte, eşit kalınlıkta yüzey ve çekirdek tabakalarına sahip beş tabakalı ve farklı çekirdek kalınlıklarına sahip üç tabakalı sandviç kirişler modellenmiştir. Farklı çekirdek kalınlıklarına sahip üç tabakalı sandviç kirişler h/H oranı için 0, 0.25, 0.5, 0.75 ve 1 değerleri kullanılarak modellenmiş ve toplamda altı farklı yapı ele alınmıştır. Ele alınan kirişlerde her çeşit için yüzey tabakası malzemesi yapısal çelik levha seçilmiş, ancak çekirdek tabakası malzemesi olarak PVC ve alüminyum kullanılarak çekirdek tabakası malzemesinin de sandviç kirişlerde etkileri incelenmiştir.

İncelenen sandviç kiriş modelleri ankastre kiriş olarak kabul edilmiş ve çatlağın ankastre uçtan 0.2m, 0.4m, 0.6m ve 0.8m mesafelerde 1mm-4mm aralığında derinliğe sahip enine V şeklinde olması durumları araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

- ❖ Çatlak konumundaki değişimlerin, kirişin doğal frekans ve burkulma yükü değerlerinde her bir mod şekli için farklı şekilde etki edebildiği görülmüştür.
- ❖ Çatlak konumundaki değişimler sonucu doğal frekans ve burkulma yük değerleri için en düşük ve en yüksek değerler elde edildiği bölgeler serbest titreşim ve burkulma mod şekline bağlı olarak değişmektedir.
- ❖ Çatlak derinliğinde meydana gelen artış, doğal frekans ve burkulma yükü değerlerinde azalmalara sebep olmaktadır.
- ❖ Çatlak konumunun ankastre uçtan uzaklaşması ile meydana gelen değişim, doğal frekans ve burkulma yükü mod şekli ile bağlantılı olmasına karşın, çatlak derinliğindeki artışın etkileri her mod şekli için sürekli azalan yöndedir.

- ❖ Çekirdek tabakası malzemesi olarak alüminyum kullanılması, aynı çekirdek tabakası kalınlığına sahip PVC çekirdekli kirişlere göre daha düşük doğal frekans ve daha yüksek burkulma yükü değerlerinin oluşmasına sebep olmuştur.
- ❖ Oluşturulan modeller içerisinde en yüksek doğal frekans değerleri 3.75mm çekirdek tabakası kalınlığına sahip üç tabakalı sandviç kirişlerde görülmüştür.
- ❖ Üç tabakalı sandviç kiriş modellerinde çekirdek tabakası kalınlığında meydana gelen artış doğal frekans değerlerinde artışa ve burkulma yükü değerlerinde düşüşe sebep olmuştur.
- ❖ Oluşturulan modeller içerisinde en yüksek burkulma yük değerleri konvansiyonel tek malzemeli çelik kirişlerden düşük olmakla birlikte 1.25mm çekirdek tabakası kalınlığına sahip üç tabakalı sandviç kiriş modellerinde görülmüştür.
- ❖ Oluşturulan modellerde üç tabakalı yapıların çekirdek tabakası kalınlığı 2,5mm'yi geçtiğinde, yani toplam kalınlığın yarısından fazlasını çekirdek tabakası oluşturmaya başladığında burkulma yükü değerlerinin, beş tabakalı modellerin altına düştüğü görülmüştür.
- ❖ Oluşturulan modellerin doğal frekans değerleri incelendiğinde, üç tabaka modellerin doğal frekans değerlerinin beş tabakalı modellere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- ❖ Oluşturulan modellerin ağırlıkları tabaka sayısı ve tabaka kalınlığına göre incelendiğinde, en ağır model konvansiyonel tek malzemeli çelik kiriş, en hafif model ise tek malzemeli PVC kiriş olduğu görülmüştür. Sandviç kiriş modellerinde ise en yüksek ağırlık azalması kazanımı $h/H=0,75$ oranına sahip kiriş modellerinde sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Alkeflawi, A.H., Buckling and Post-Buckling Behaviors of Metal Sandwich Beams with Polymeric Foam Core, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes University Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Kayseri, 2018.

Aydincak, I., Investigation of design and analyses principles of honeycomb structures, MSc Thesis, **Middle East Technical University**, Ankara, 2007.

Banerjee, J.R. and Ananthapuvirajah, A., “An exact dynamic stiffness matrix for a beam incorporating Rayleigh–Love and Timoshenko Theories”, *International Journal of Mechanical Sciences* 150, 337–347, 2019.

Banerjee, J.R. and Sobey, A.J., “Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of a three-layered sandwich beam”, *International Journal of Solids and Structures* 42 (8), 2181-2197, 2005.

Beer, F.P., Johnston, E.R., Dewolf, J.T. and Mazurek, D.F., Mechanics of Materials, Sixth Edition, *The McGraw-Hill Companies*, New York, 2012.

Birman, V. and Simites, G.J., “ Vibrations of sandwich panels and beams with matrix cracks in the facings”, *Composites Science and Technology* 61, 1605–1613, 2001.

Carlsson, L. A. and Kardomateas, G. A., Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites, *Springer Science & Business Media*, 2011.

Damanpack, A.R. and Khalili, S.M.R., “ High-order free vibration analysis of sandwich beams with a flexible core using dynamic stiffness method”, *Composite Structures* 94,1503-1514, 2012.

Daş, T.M. and Yılmaz, A., Vibration analysis of a cracked circular curved beams, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416380>, 2018.

Davies, J. M., Lightweight Sandwich Construction, *John Wiley & Sons*, 2001.

DIAB Group, Sandwich composites and core materials, DIAB Knowledge series, <https://www.diabgroup.com/>, 2020.

Douville, M.A. and Grognet, P.L., “Exact analytical solutions for the local and global buckling of sandwich beam-columns under various loadings”, *International Journal of Solids and Structures* 50, 2597–2609, 2013.

Ferdous, V., Manalo, A., Aravinthan, T. and Fam, A., “Flexural and shear behaviour of layered sandwich beams”, *Construction and Building Materials* 173, 429–442, 2018.

Frostig, Y. and Thomsen, O.T., “High-order free vibration of sandwich panels with a flexible core”, *International Journal of Solids and Structures* 41, 1697–1724, 2004.

Gillich, G.R., Praisach, Z.I., Abdel Wahab, M. And Vasile, O., Localization of Transversal Cracks in Sandwich Beams and Evaluation of Their Severity, *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration*, 2014.

Goncalves, B.R., Karttunen, A., Romanoff, J. and Reddy, J.N., “Buckling and free vibration of shear-flexible sandwich beams using a couple-stress-based finite element”, *Composite Structures* 165, 233–241, 2017.

Ibrahim, R.A., Handbook of Structural Life Assessment, First Edition, *John Wiley&Sons Ltd, Hoboken*, 2017.

Jasion, P., Magnucka-Blandzi, E., Szyk, W. and Magnucki, K., “Global and local buckling of sandwich circular and beam-rectangular plates with metal foam core”, *Thin-Walled Structures* 61,154–161, 2012.

Kahrobaiyan, M.H., Asghari, M. and Ahmadian, M.T., “A Timoshenko Beam Element Based on the Modified Couple Stress Theory”, *International Journal of Mechanical Sciences* 79, 75-83, 2014.

Karamanli, A. and Aydogdu, M., “Buckling of laminated composite and sandwich beams due to axially varying in-plane loads”, *Composite Structures* 210, 391–408, 2019.

Khalili, S.M.R., Nemati, N., Malekzadeh, K. and Damanpack, A.R., “ Free vibration analysis of sandwich beams using improved dynamic stiffness method”, *Composite Structures* 92 (2), 387-394, 2010.

Kim, K., Kim, S., Sok, K., Pak, C. and Han, K., “A Modeling Method for Vibration Analysis of Cracked Beam with Arbitrary Boundary Condition”, *Journal of Ocean Engineering and Science* 3, 367-381, 2018.

Kisa, M. and Brandon, J., “The Effect of Closure of Cracks on the Dynamics of a Cracked Cantilever Beam”, *Journal of Sound and Vibration* 238, 1-18, 2000.

Kocatürk, T. and Şimşek, M., “Free Vibration Analysis of Timoshenko Beams Under Various Boundary Conditions”, *Journal of Engineering and Natural Sciences* 1, 2005.

Kumar, D., Kumar, C. and Lateefi, M.M., “Vibration Analysis of Cracked Cantilever Beam Type Serial, International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa2018)”, *Procedia Computer Science* 133, 668-675, 2018.

Liu, G.R. and Quek, S.S., *The Finite Element Method: A Practical Course*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.

Magnucki, K., Smoczyński, M. , Jasion, P., and Szyc, W., “Strength and buckling of a sandwich beam with thin binding layers between faces and a core”, *Steel and Composite Structures* 16, 325–337, 2013.

Malekzadeh Fard, K. and Malek-Mohammadi, H., “Free Vibration and Buckling Analysis of Sandwich Panels with Flexible Cores Using an Improved Higher Order Theory”, *Journal of Solid Mechanics* 9 (1), 39-53, 2017.

Marshall A. C., Sandwich Construction, Peters, S. T. (Ed.), Handbook of Composites, *Chapman & Hall*, 1117, London, 254-290, 1998.

Moita, J.S., Araujo, A.L., Franco Correia, V.M., Mota Soares, C.M. and Mota Soares, C.A., “ Buckling and geometrically nonlinear analysis of sandwich structures”, *International Journal of Mechanical Sciences* 92, 154–161, 2015.

Nariman, N.A. and Msekh, M.A., “Finite Element Analysis of the Buckling Critical Loads in Un-Braced Steel Frames with Multiple Slenderness Ratio Configurations”, *International Journal of Civil And Structural Engineering Research* 1 (1), 1-13, October, 2013.

Negru, I., Gillich, G.R., Praisach, Z.I., Tufoi, M. and Gillich, N., “ Natural frequency changes due to damage in composite beams”, *Journal of Physics: Conference Series* 628, 2015.

Özen, M., Kusurlu yapılarda burkulma ve titreşim probleminin nümerik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 2007.

Papadopoulos, C.A. and Dimarogonas, A.D., “Coupled Longitudinal and Bending Vibrations of a Cracked Shaft”, *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design* 110, 1-8, 1998.

Petyt, M., Inroduction to finite element vibration analysis, Second Edition, *Cambridge University Press*, New York, 2010.

Roylance, D., Inroduction to Fracture Mechanics, *Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology*, Cambridge, 2001.

Saouma, V.E., Matrix structural analysis with an introduction to finite elements, department of civil environmental and architectural engineering, *University of Colorado*, Boulder, 1999.

Shadaf, A.K., Vibration analysis of composite beam with crack, MSc Thesis, **Department of Civil Engineering National Institute of Technology**, Rourkela, 2013.

Smith, I.M. and Griffiths, D.V., Programing the finite element method, Second Edition, *John Wiley & Sons Ltd*, New York, 1988.

Smyczynski, M.J. and Magnucka-Blandzi, E., “Stability and free vibrations of the three layer beam with two binding layers”, *Thin-Walled Structures* 113, 144–150, 2017.

Sokolinsky, V.S., Von Bremen, H.F., Lavoie, J.A. and Nutt, S.R., “ Analytical and Experimental Study of Free Vibration Response of Soft-core Sandwich Beams”, *Journal of Sandwich Structures and Materials* 6, 239 – 261, 2004.

Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., The stress analysis of cracks handbook, Third Edition, *The American Society of Mechanical Engineers*, New York, 2000.

Tortoç, A., Balsa/PVC sandviç yapılar da kırılma tokluğu etkisinin nümerik çalışması, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2009.

Wang, C.H., Introduction to fracture mechanics, *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory*, Commonwealth of Australia, 1996.

Wang, C.M., Wang, C.Y. and Reddy, J.N., Exact solutions for buckling of structural members, *CRC Series in Computational Mechanics and Applied Analysis*, CRC Press LLC, 2005.

Wick, C. and Veilleux, R.F., “Materials, finishing and coating”, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook* 3 (8), 13-30, 1986.

Wu, C., “Free vibration analysis of a free-free timoshenko beam carrying multiple concentrated elements with effect of rigid-body motions considered”, *Journal of Sound and Vibration* 445, 204-227, 2019.

Zenkert, D., The handbok of sandvich construction, chapter 1-5, *Department of Aeronautics*, KTH, Sweden, 1997.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z., The finite element method: its basis and fundamental, Sixth Edition, *Elsevier Butterworth-Heinemann*, Oxford, 2005.



EKLER

EK-A:Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı, PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim

Beş Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,508	4,475	4,375	3,923	4,518
2.Mod	0.2	28,310	28,308	28,302	28,278	28,310
3.Mod	0.2	79,206	79,033	78,521	76,288	79,256
4.Mod	0.2	155,009	154,126	151,599	142,215	155,268
1.Mod	0.4	4,514	4,500	4,458	4,245	
2.Mod	0.4	28,271	28,133	27,724	25,916	
3.Mod	0.4	79,184	78,938	78,225	75,396	
4.Mod	0.4	155,201	154,971	154,299	151,564	
1.Mod	0.6	4,517	4,513	4,503	4,445	
2.Mod	0.6	28,257	28,071	27,514	24,960	
3.Mod	0.6	79,167	78,864	77,988	74,547	
4.Mod	0.6	155,206	154,992	154,369	151,868	
1.Mod	0.8	4,517	4,517	4,516	4,512	
2.Mod	0.8	28,305	28,263	28,149	27,514	
3.Mod	0.8	79,138	78,728	77,464	71,191	
4.Mod	0.8	154,911	153,694	150,191	137,284	

EK-B: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim(h/H=0 Tamamen çelik olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş(h/H=0)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,1286	4,0981	4,0069	3,5930	4,1375
2.Mod	0.2	25,9258	25,9241	25,9188	25,8963	25,9264
3.Mod	0.2	72,5350	72,3770	71,9073	69,8628	72,5810
4.Mod	0.2	141,9530	141,1443	138,8301	130,2367	142,1907
1.Mod	0.4	4,1339	4,1214	4,0831	3,8881	
2.Mod	0.4	25,8898	25,7639	25,3889	23,7336	
3.Mod	0.4	72,5150	72,2899	71,6369	69,0458	
4.Mod	0.4	142,1292	141,9187	141,3033	138,7987	
1.Mod	0.6	4,1366	4,1335	4,1238	4,0709	
2.Mod	0.6	25,8772	25,7073	25,1968	22,8577	
3.Mod	0.6	72,4997	72,2222	71,4194	68,2682	
4.Mod	0.6	142,1334	141,9375	141,3670	139,0764	
1.Mod	0.8	4,1374	4,1372	4,1364	4,1322	
2.Mod	0.8	25,9168	25,8833	25,7783	25,1973	
3.Mod	0.8	72,4731	72,0973	70,9400	65,1948	
4.Mod	0.8	141,8637	140,7489	137,5412	125,7212	

EK-C: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,25$ - 1.25 mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,25$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,6050	4,5710	4,4692	4,0075	4,6149
2.Mod	0.2	28,9171	28,9151	28,9093	28,8842	28,9177
3.Mod	0.2	80,9040	80,7277	80,2038	77,9235	80,9552
4.Mod	0.2	158,3313	157,4294	154,8480	145,2632	158,5964
1.Mod	0.4	4,6109	4,5970	4,5542	4,3367	
2.Mod	0.4	28,8769	28,7365	28,3182	26,4720	
3.Mod	0.4	80,8817	80,6306	79,9022	77,0122	
4.Mod	0.4	158,5279	158,2931	157,6066	154,8131	
1.Mod	0.6	4,6139	4,6104	4,5996	4,5406	
2.Mod	0.6	28,8628	28,6734	28,1039	25,4950	
3.Mod	0.6	80,8646	80,5551	79,6597	76,1449	
4.Mod	0.6	158,5326	158,3141	157,6777	155,1228	
1.Mod	0.8	4,6148	4,6145	4,6137	4,6090	
2.Mod	0.8	28,9070	28,8697	28,7526	28,1046	
3.Mod	0.8	80,8349	80,4158	79,1249	72,7169	
4.Mod	0.8	158,2318	156,9883	153,4105	140,2268	

EK-Ç: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,5 - 2,5$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,5$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	5,0631	5,0257	4,9137	4,4062	5,0739
2.Mod	0.2	31,7935	31,7914	31,7849	31,7573	31,7942
3.Mod	0.2	88,9516	88,7578	88,1818	85,6746	89,0079
4.Mod	0.2	174,0806	173,0890	170,2509	159,7126	174,3721
1.Mod	0.4	5,0695	5,0542	5,0073	4,7681	
2.Mod	0.4	31,7493	31,5949	31,1350	29,1051	
3.Mod	0.4	88,9271	88,6510	87,8502	84,6727	
4.Mod	0.4	174,2968	174,0386	173,2839	170,2125	
1.Mod	0.6	5,0728	5,0690	5,0571	4,9922	
2.Mod	0.6	31,7339	31,5255	30,8995	28,0310	
3.Mod	0.6	88,9082	88,5680	87,5835	83,7191	
4.Mod	0.6	174,3019	174,0617	173,3620	170,5530	
1.Mod	0.8	5,0738	5,0735	5,0726	5,0675	
2.Mod	0.8	31,7824	31,7414	31,6127	30,9001	
3.Mod	0.8	88,8756	88,4148	86,9956	79,9501	
4.Mod	0.8	173,9712	172,6040	168,6703	154,1752	

EK-D: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,75 - 3,75$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,75$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	5,1536	5,1155	5,0016	4,4850	5,1646
2.Mod	0.2	32,3620	32,3598	32,3533	32,3252	32,3627
3.Mod	0.2	90,5421	90,3448	89,7585	87,2069	90,5994
4.Mod	0.2	177,1933	176,1839	173,2951	162,5697	177,4900
1.Mod	0.4	5,1602	5,1446	5,0968	4,8534	
2.Mod	0.4	32,3170	32,1599	31,6917	29,6259	
3.Mod	0.4	90,5171	90,2361	89,4210	86,1871	
4.Mod	0.4	177,4133	177,1505	176,3823	173,2564	
1.Mod	0.6	5,1635	5,1596	5,1475	5,0815	
2.Mod	0.6	32,3013	32,0892	31,4520	28,5327	
3.Mod	0.6	90,4980	90,1516	89,1495	85,2165	
4.Mod	0.6	177,4185	177,1740	176,4618	173,6030	
1.Mod	0.8	5,1645	5,1642	5,1633	5,1581	
2.Mod	0.8	32,3507	32,3089	32,1779	31,4528	
3.Mod	0.8	90,4648	89,9957	88,5511	81,3808	
4.Mod	0.8	177,0819	175,6902	171,6862	156,9338	

EK-E: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=1$, Tamamen PVC olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=1$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	1,0973	1,0892	1,0649	0,9550	1,0997
2.Mod	0.2	6,8908	6,8903	6,8889	6,8829	6,8909
3.Mod	0.2	19,2790	19,2370	19,1122	18,5689	19,2912
4.Mod	0.2	37,7296	37,5147	36,8996	34,6158	37,7928
1.Mod	0.4	1,0987	1,0954	1,0852	1,0334	
2.Mod	0.4	6,8812	6,8477	6,7481	6,3082	
3.Mod	0.4	19,2737	19,2139	19,0403	18,3517	
4.Mod	0.4	37,7764	37,7205	37,5569	36,8913	
1.Mod	0.6	1,0994	1,0986	1,0960	1,0820	
2.Mod	0.6	6,8778	6,8327	6,6970	6,0754	
3.Mod	0.6	19,2696	19,1959	18,9825	18,1451	
4.Mod	0.6	37,7776	37,7255	37,5739	36,9651	
1.Mod	0.8	1,0996	1,0996	1,0994	1,0983	
2.Mod	0.8	6,8884	6,8795	6,8516	6,6972	
3.Mod	0.8	19,2626	19,1627	18,8551	17,3283	
4.Mod	0.8	37,7059	37,4096	36,5570	33,4158	

EK-F:Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim

Beş Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,4497	4,4169	4,3185	3,8724	4,4593
2.Mod	0.2	27,9422	27,9403	27,9347	27,9104	27,9428
3.Mod	0.2	78,1764	78,0061	77,4999	75,2964	78,2259
4.Mod	0.2	152,9933	152,1218	149,6275	140,3658	153,2496
1.Mod	0.4	4,4554	4,4420	4,4007	4,1905	
2.Mod	0.4	27,9034	27,7677	27,3635	25,5795	
3.Mod	0.4	78,1549	77,9122	77,2084	74,4158	
4.Mod	0.4	153,1833	152,9564	152,2931	149,5938	
1.Mod	0.6	4,4583	4,4550	4,4445	4,3875	
2.Mod	0.6	27,8898	27,7067	27,1564	24,6355	
3.Mod	0.6	78,1383	77,8393	76,9740	73,5777	
4.Mod	0.6	153,1878	152,9767	152,3618	149,8931	
1.Mod	0.8	4,4592	4,4589	4,4581	4,4536	
2.Mod	0.8	27,9325	27,8964	27,7833	27,1570	
3.Mod	0.8	78,1097	77,7047	76,4573	70,2653	
4.Mod	0.8	152,8972	151,6956	148,2384	135,4992	

EK-G:Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0$, Tamamen çelik olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,1286	4,0981	4,0069	3,5930	4,1375
2.Mod	0.2	25,9258	25,9241	25,9188	25,8963	25,9264
3.Mod	0.2	72,5350	72,3770	71,9073	69,8628	72,5810
4.Mod	0.2	141,9530	141,1443	138,8301	130,2367	142,1907
1.Mod	0.4	4,1339	4,1214	4,0831	3,8881	
2.Mod	0.4	25,8898	25,7639	25,3889	23,7336	
3.Mod	0.4	72,5150	72,2899	71,6369	69,0458	
4.Mod	0.4	142,1292	141,9187	141,3033	138,7987	
1.Mod	0.6	4,1366	4,1335	4,1238	4,0709	
2.Mod	0.6	25,8772	25,7073	25,1968	22,8577	
3.Mod	0.6	72,4997	72,2222	71,4194	68,2682	
4.Mod	0.6	142,1334	141,9375	141,3670	139,0764	
1.Mod	0.8	4,1374	4,1372	4,1364	4,1322	
2.Mod	0.8	25,9168	25,8833	25,7783	25,1973	
3.Mod	0.8	72,4731	72,0973	70,9400	65,1948	
4.Mod	0.8	141,8637	140,7489	137,5412	125,7212	

EK-Ğ: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,25 - 1,25$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş ($h/H=0,25$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,4836	4,4505	4,3514	3,9019	4,4932
2.Mod	0.2	28,1550	28,1531	28,1474	28,1230	28,1556
3.Mod	0.2	78,7718	78,6001	78,0901	75,8698	78,8207
4.Mod	0.2	154,1585	153,2803	150,7670	141,4348	154,4166
1.Mod	0.4	4,4893	4,4758	4,4342	4,2224	
2.Mod	0.4	28,1159	27,9791	27,5719	25,7743	
3.Mod	0.4	78,7501	78,5056	77,7964	74,9826	
4.Mod	0.4	154,3499	154,1213	153,4529	150,7330	
1.Mod	0.6	4,4924	4,4889	4,4783	4,4209	
2.Mod	0.6	28,1022	27,9177	27,3633	24,8231	
3.Mod	0.6	78,7334	78,4321	77,5602	74,1381	
4.Mod	0.6	154,3544	154,1417	153,5221	151,0346	
1.Mod	0.8	4,4932	4,4929	4,4921	4,4876	
2.Mod	0.8	28,1452	28,1088	27,9948	27,3639	
3.Mod	0.8	78,7045	78,2965	77,0396	70,8004	
4.Mod	0.8	154,0616	152,8508	149,3673	136,5311	

EK-H: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,5 - 2,5$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,5$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,8015	4,7661	4,6599	4,1786	4,8118
2.Mod	0.2	30,1512	30,1492	30,1431	30,1169	30,1518
3.Mod	0.2	84,3568	84,1730	83,6267	81,2491	84,4102
4.Mod	0.2	165,0885	164,1481	161,4566	151,4627	165,3650
1.Mod	0.4	4,8076	4,7932	4,7486	4,5218	
2.Mod	0.4	30,1093	29,9629	29,5268	27,6017	
3.Mod	0.4	84,3336	84,0717	83,3123	80,2989	
4.Mod	0.4	165,2935	165,0486	164,3329	161,4201	
1.Mod	0.6	4,8108	4,8072	4,7959	4,7344	
2.Mod	0.6	30,0946	29,8971	29,3033	26,5831	
3.Mod	0.6	84,3157	83,9930	83,0594	79,3946	
4.Mod	0.6	165,2984	165,0706	164,4070	161,7431	
1.Mod	0.8	4,8117	4,8114	4,8106	4,8057	
2.Mod	0.8	30,1407	30,1018	29,9797	29,3040	
3.Mod	0.8	84,2848	83,8478	82,5018	75,8203	
4.Mod	0.8	164,9847	163,6882	159,9577	146,2113	

EK-I:Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim($h/H=0,75 - 3,75$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,75$)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,8748	4,8388	4,7310	4,2423	4,8852
2.Mod	0.2	30,6114	30,6093	30,6031	30,5766	30,6120
3.Mod	0.2	85,6443	85,4576	84,9031	82,4891	85,6985
4.Mod	0.2	167,6081	166,6533	163,9208	153,7743	167,8888
1.Mod	0.4	4,8810	4,8663	4,8211	4,5908	
2.Mod	0.4	30,5689	30,4202	29,9774	28,0230	
3.Mod	0.4	85,6207	85,3548	84,5838	81,5244	
4.Mod	0.4	167,8162	167,5676	166,8410	163,8837	
1.Mod	0.6	4,8842	4,8805	4,8691	4,8066	
2.Mod	0.6	30,5540	30,3534	29,7506	26,9888	
3.Mod	0.6	85,6025	85,2749	84,3270	80,6063	
4.Mod	0.6	167,8211	167,5899	166,9162	164,2116	
1.Mod	0.8	4,8852	4,8849	4,8840	4,8791	
2.Mod	0.8	30,6007	30,5612	30,4373	29,7512	
3.Mod	0.8	85,5711	85,1275	83,7610	76,9774	
4.Mod	0.8	167,5027	166,1864	162,3989	148,4428	

EK-İ:Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde doğal frekans değerlerindeki değişim(h/H=1, Tamamen alüminyum olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş h/H=1)						
Mod	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Mod	0.2	4,0297	4,0000	3,9109	3,5070	4,0384
2.Mod	0.2	25,3049	25,3031	25,2980	25,2761	25,3054
3.Mod	0.2	70,7977	70,6434	70,1850	68,1898	70,8425
4.Mod	0.2	138,5529	137,7637	135,5048	127,1183	138,7850
1.Mod	0.4	4,0349	4,0227	3,9853	3,7950	
2.Mod	0.4	25,2697	25,1468	24,7808	23,1654	
3.Mod	0.4	70,7782	70,5584	69,9210	67,3924	
4.Mod	0.4	138,7249	138,5195	137,9188	135,4745	
1.Mod	0.6	4,0375	4,0345	4,0250	3,9734	
2.Mod	0.6	25,2574	25,0916	24,5933	22,3106	
3.Mod	0.6	70,7632	70,4924	69,7088	66,6334	
4.Mod	0.6	138,7291	138,5379	137,9810	135,7456	
1.Mod	0.8	4,0383	4,0381	4,0373	4,0333	
2.Mod	0.8	25,2960	25,2633	25,1609	24,5939	
3.Mod	0.8	70,7372	70,3705	69,2408	63,6341	
4.Mod	0.8	138,4653	137,3777	134,2468	122,7114	

EK-J:Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim

Beş Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	83,8157	82,7509	79,5712	65,4173	84,1246
2.Yük	0.2	756,0609	752,4097	741,5821	695,0103	757,1221
3.Yük	0.2	2103,1213	2103,1213	2103,1213	2103,1213	2103,1170
4.Yük	0.2	4116,3105	4095,4210	4025,3352	3574,1788	4122,1094
1.Yük	0.4	83,9009	83,1260	80,7791	69,6786	
2.Yük	0.4	756,8277	755,7959	752,5551	734,5468	
3.Yük	0.4	2094,5816	2065,1231	1977,3921	1616,0772	
4.Yük	0.4	4120,5412	4114,9819	4098,0257	4018,3638	
1.Yük	0.6	84,0063	83,5938	82,3118	75,6562	
2.Yük	0.6	754,3423	744,7603	716,2058	593,0392	
3.Yük	0.6	2103,1213	2103,1213	2103,1213	2103,1213	
4.Yük	0.6	4106,9782	4054,3280	3895,1793	3244,4855	
1.Yük	0.8	84,0919	83,9773	83,6169	81,5893	
2.Yük	0.8	755,1025	748,0140	725,6812	606,5621	
3.Yük	0.8	2094,5818	2065,1384	1977,9345	1644,1242	
4.Yük	0.8	4111,2448	4074,5419	3973,1683	3660,2257	

EK-K:Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim(h/H=0, Tamamen çelik olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş (h/H=0)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	105,5038	104,1634	100,1609	82,3445	105,8926
2.Yük	0.2	951,6979	947,1018	933,4726	874,8499	953,0336
3.Yük	0.2	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3157
4.Yük	0.2	5181,4392	5155,1446	5066,9236	4499,0268	5188,7388
1.Yük	0.4	105,6109	104,6356	101,6814	87,7085	
2.Yük	0.4	952,6631	951,3642	947,2848	924,6168	
3.Yük	0.4	2636,5718	2599,4906	2489,0584	2034,2504	
4.Yük	0.4	5186,7650	5179,7671	5158,4233	5058,1483	
1.Yük	0.6	105,7437	105,2244	103,6170	95,2328	
2.Yük	0.6	949,5345	937,4731	901,5299	746,4930	
3.Yük	0.6	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3212	
4.Yük	0.6	5169,6924	5103,4185	4903,0888	4084,0227	
1.Yük	0.8	105,8514	105,7071	105,2535	102,7012	
2.Yük	0.8	950,4914	941,5687	913,4572	763,5151	
3.Yük	0.8	2636,5720	2599,5098	2489,7412	2069,5547	
4.Yük	0.8	5175,0630	5128,8630	5001,2589	4607,3390	

EK-L: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim($h/H=0,25 - 1,25$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş ($h/H=0,25$)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	103,8746	102,5548	98,6142	81,0729	104,2574
2.Yük	0.2	937,0016	932,4765	919,0577	861,3403	938,3167
3.Yük	0.2	2606,4407	2606,4407	2606,4407	2606,4407	2606,4353
4.Yük	0.2	5101,4264	5075,5378	4988,6791	4429,5519	5108,6133
1.Yük	0.4	103,9801	103,0198	100,1112	86,3541	
2.Yük	0.4	937,9519	936,6731	932,6567	910,3387	
3.Yük	0.4	2595,8573	2559,3488	2450,6219	2002,8371	
4.Yük	0.4	5106,6699	5099,7801	5078,7659	4980,0394	
1.Yük	0.6	104,1108	103,5995	102,0169	93,7622	
2.Yük	0.6	934,8716	922,9965	887,6083	734,9655	
3.Yük	0.6	2606,4407	2606,4407	2606,4407	2606,4407	
4.Yük	0.6	5089,8609	5024,6105	4827,3743	4020,9564	
1.Yük	0.8	104,2168	104,0747	103,6282	101,1153	
2.Yük	0.8	935,8138	927,0288	899,3514	751,7247	
3.Yük	0.8	2595,8575	2559,3676	2451,2941	2037,5962	
4.Yük	0.8	5095,1486	5049,6620	4924,0284	4536,1915	

EK-M:Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim($h/H=0,5$ - $2,5$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş ($h/H=0,5$)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	92,4701	91,2953	87,7872	72,1719	92,8109
2.Yük	0.2	834,1274	830,0991	818,1536	766,7730	835,2981
3.Yük	0.2	2320,2774	2320,2774	2320,2774	2320,2774	2320,2726
4.Yük	0.2	4541,3365	4518,2903	4440,9679	3943,2277	4547,7344
1.Yük	0.4	92,5640	91,7092	89,1199	76,8732	
2.Yük	0.4	834,9734	833,8350	830,2595	810,3919	
3.Yük	0.4	2310,8559	2278,3557	2181,5661	1782,9440	
4.Yük	0.4	4546,0043	4539,8710	4521,1640	4433,2767	
1.Yük	0.6	92,6804	92,2253	90,8164	83,4680	
2.Yük	0.6	832,2313	821,6599	790,1570	654,2730	
3.Yük	0.6	2320,2774	2320,2774	2320,2774	2320,2774	
4.Yük	0.6	4531,0409	4472,9543	4297,3729	3579,4922	
1.Yük	0.8	92,7748	92,6483	92,2507	90,0137	
2.Yük	0.8	833,0700	825,2495	800,6109	669,1922	
3.Yük	0.8	2310,8561	2278,3725	2182,1645	1813,8868	
4.Yük	0.8	4535,7480	4495,2554	4383,4152	4038,1593	

EK-N:Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim(h/H=0,75 - 3,75 mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş(h/H=0,75)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	61,5151	60,7335	58,3998	48,0134	61,7418
2.Yük	0.2	554,8974	552,2177	544,2710	510,0953	555,6763
3.Yük	0.2	1543,5485	1543,5485	1543,5485	1543,5485	1543,5453
4.Yük	0.2	3021,0927	3005,7613	2954,3231	2623,2623	3025,2488
1.Yük	0.4	61,5776	61,0089	59,2864	51,1406	
2.Yük	0.4	555,4602	554,7029	552,3244	539,1099	
3.Yük	0.4	1537,2809	1515,6604	1451,2717	1186,1262	
4.Yük	0.4	3024,1979	3020,1177	3007,6730	2949,2154	
1.Yük	0.6	61,6549	61,3522	60,4149	55,5273	
2.Yük	0.6	553,6361	546,6036	525,6465	435,2634	
3.Yük	0.6	1543,5485	1543,5485	1543,5485	1543,5485	
4.Yük	0.6	3014,2435	2975,6019	2858,7975	2381,2929	
1.Yük	0.8	61,7177	61,6336	61,3692	59,8813	
2.Yük	0.8	554,1940	548,9915	532,6008	445,1898	
3.Yük	0.8	1537,2810	1515,6715	1451,6698	1206,7050	
4.Yük	0.8	3017,3749	2990,4375	2916,0366	2686,3814	

EK-O: Üç tabakadan oluşan PVC çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim(h/H=1, Tamamen PVC olma durumu)

Üç Tabakalı PVC Çekirdekli Sandviç Kiriş (h/H=1)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	1,2342	1,2186	1,1717	0,9633	1,2388
2.Yük	0.2	11,1339	11,0801	10,9207	10,2349	11,1495
3.Yük	0.2	30,9710	30,9710	30,9710	30,9710	30,9710
4.Yük	0.2	60,6178	60,3101	59,2781	52,6354	60,7032
1.Yük	0.4	1,2355	1,2241	1,1895	1,0261	
2.Yük	0.4	11,1452	11,1300	11,0823	10,8171	
3.Yük	0.4	30,8453	30,4115	29,1196	23,7994	
4.Yük	0.4	60,6801	60,5982	60,3485	59,1756	
1.Yük	0.6	1,2370	1,2310	1,2112	1,1141	
2.Yük	0.6	11,1086	10,9675	10,5470	8,7335	
3.Yük	0.6	30,9710	30,9710	30,9710	30,9710	
4.Yük	0.6	60,4803	59,7050	57,3614	47,7803	
1.Yük	0.8	1,2383	1,2366	1,2313	1,2015	
2.Yük	0.8	11,1198	11,0154	10,6865	8,9326	
3.Yük	0.8	30,8453	30,4117	29,1275	24,2123	
4.Yük	0.8	60,5432	60,0027	58,5099	53,9018	

EK-Ö:Eşit kalınlıkta tabakalara sahip beş tabakalı alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim

Beş Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	91,0171	89,8607	86,4078	71,0378	91,3525
2.Yük	0.2	821,0207	817,0557	805,2979	754,7247	822,1731
3.Yük	0.2	2283,8188	2283,8188	2283,8188	2283,8188	2283,8141
4.Yük	0.2	4469,9783	4447,2942	4371,1867	3881,2676	4476,2756
1.Yük	0.4	91,1095	90,2681	87,7196	75,6653	
2.Yük	0.4	821,8534	820,7329	817,2136	797,6581	
3.Yük	0.4	2274,5454	2242,5558	2147,2871	1754,9285	
4.Yük	0.4	4474,5728	4468,5358	4450,1227	4363,6164	
1.Yük	0.6	91,2241	90,7761	89,3894	82,1564	
2.Yük	0.6	819,1544	808,7491	777,7412	643,9924	
3.Yük	0.6	2283,8188	2283,8188	2283,8188	2283,8188	
4.Yük	0.6	4459,8444	4402,6706	4229,8481	3523,2475	
1.Yük	0.8	91,3171	91,1925	90,8012	88,5994	
2.Yük	0.8	819,9799	812,2824	788,0308	658,6772	
3.Yük	0.8	2274,5455	2242,5724	2147,876	1785,3852	
4.Yük	0.8	4464,4776	4424,6213	4314,5384	3974,7075	

EK-P: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim(h/H=0, Tamamen çelik olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş(h/H=0)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	105,5038	104,1634	100,1609	82,3445	105,8926
2.Yük	0.2	951,6979	947,1018	933,4726	874,8499	953,0336
3.Yük	0.2	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3157
4.Yük	0.2	5181,4392	5155,1446	5066,9236	4499,0268	5188,7388
1.Yük	0.4	105,6109	104,6356	101,6814	87,7085	
2.Yük	0.4	952,6631	951,3642	947,2848	924,6168	
3.Yük	0.4	2636,5718	2599,4906	2489,0584	2034,2504	
4.Yük	0.4	5186,7650	5179,7671	5158,4233	5058,1483	
1.Yük	0.6	105,7437	105,2244	103,6170	95,2328	
2.Yük	0.6	949,5345	937,4731	901,5299	746,4930	
3.Yük	0.6	2647,3212	2647,3212	2647,3212	2647,3212	
4.Yük	0.6	5169,6924	5103,4185	4903,0888	4084,0227	
1.Yük	0.8	105,8514	105,7071	105,2535	102,7012	
2.Yük	0.8	950,4914	941,5687	913,4572	763,5151	
3.Yük	0.8	2636,5720	2599,5098	2489,7412	2069,5547	
4.Yük	0.8	5175,0630	5128,8630	5001,2589	4607,3390	

EK-R: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim($h/H=0,25 - 1,25$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,25$)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	104,4154	103,0889	99,1276	81,4951	104,8002
2.Yük	0.2	941,8806	937,332	923,8433	865,8254	943,2026
3.Yük	0.2	2620,0126	2620,0126	2620,0126	2620,0126	2620,0072
4.Yük	0.2	5127,9899	5101,9665	5014,6555	4452,617	5135,2142
1.Yük	0.4	104,5215	103,5562	100,6325	86,8038	
2.Yük	0.4	942,8359	941,5504	937,5131	915,0749	
3.Yük	0.4	2609,3741	2572,6755	2463,3825	2013,2661	
4.Yük	0.4	5133,2607	5126,3351	5105,2114	5005,9708	
1.Yük	0.6	104,6529	104,139	102,5481	94,2505	
2.Yük	0.6	939,7396	927,8026	892,2301	738,7925	
3.Yük	0.6	2620,0126	2620,0126	2620,0126	2620,0126	
4.Yük	0.6	5116,3642	5050,774	4852,5109	4041,8938	
1.Yük	0.8	104,7595	104,6166	104,1678	101,6418	
2.Yük	0.8	940,6866	931,8559	904,0344	755,639	
3.Yük	0.8	2609,3743	2572,6945	2464,0582	2048,2062	
4.Yük	0.8	5121,6795	5075,956	4949,6682	4559,8118	

EK-S:Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim($h/H=0,5 - 2,5$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,5$)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	96,7971	95,5674	91,8952	75,5491	97,1539
2.Yük	0.2	873,1597	868,943	856,4834	802,6536	874,3852
3.Yük	0.2	2428,8529	2428,8529	2428,8529	2428,8529	2428,8479
4.Yük	0.2	4753,8447	4729,7201	4648,7794	4127,7479	4760,5419
1.Yük	0.4	96,8955	96,0006	93,2902	80,4705	
2.Yük	0.4	874,0453	872,8536	869,1108	848,3135	
3.Yük	0.4	2418,9906	2384,9695	2283,6507	1866,3754	
4.Yük	0.4	4758,731	4752,3106	4732,7282	4640,7283	
1.Yük	0.6	97,0173	96,5409	95,066	87,3738	
2.Yük	0.6	871,1749	860,1088	827,1318	684,8892	
3.Yük	0.6	2428,8529	2428,8529	2428,8529	2428,8529	
4.Yük	0.6	4743,0673	4682,2626	4498,465	3746,9917	
1.Yük	0.8	97,1161	96,9837	96,5675	94,2259	
2.Yük	0.8	872,0528	863,8664	838,0748	700,5065	
3.Yük	0.8	2418,9908	2384,9871	2284,2771	1898,7662	
4.Yük	0.8	4747,9947	4705,6073	4588,5336	4227,1217	

EK-Ş: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim($h/H=0,75 - 3,75$ mm çekirdek kalınlığına sahip olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş($h/H=0,75$)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	76,1189	75,1518	72,2641	59,41	76,3994
2.Yük	0.2	686,6315	683,3156	673,4823	631,1872	687,5952
3.Yük	0.2	1909,9908	1909,9908	1909,9908	1909,9908	1909,9869
4.Yük	0.2	3738,3073	3719,3367	3655,687	3245,9605	3743,5743
1.Yük	0.4	76,1962	75,4925	73,3611	63,2801	
2.Yük	0.4	686,5079	686,3908	683,4476	667,0931	
3.Yük	0.4	1902,2353	1875,482	1795,8073	1467,6722	
4.Yük	0.4	3742,1502	3737,1014	3721,7023	3649,3558	
1.Yük	0.6	76,292	75,9174	74,7576	68,7086	
2.Yük	0.6	685,0707	676,3687	650,4363	538,5802	
3.Yük	0.6	1909,9908	1909,9908	1909,9908	1909,9908	
4.Yük	0.6	3729,8326	3682,0174	3537,4834	2946,543	
1.Yük	0.8	76,3697	76,2656	75,9384	74,0969	
2.Yük	0.8	685,7611	679,3235	659,0416	550,8613	
3.Yük	0.8	1902,2355	1875,4958	1796,2999	1493,1435	
4.Yük	0.8	3733,7075	3700,375	3608,3112	3324,1056	

EK-T: Üç tabakadan oluşan alüminyum çekirdekli sandviç kirişin değişen çatlak konumu ve derinliği etkisinde burkulma yükü değerlerindeki değişim(h/H=1, Tamamen alüminyum olma durumu)

Üç Tabakalı Alüminyum Çekirdekli Sandviç Kiriş(h/H=1)						
Yük	Mesafe(m)	Çatlak Derinliği (mm)				
		1	2	3	4	0
1.Yük	0.2	35,8508	35,3953	34,0352	27,982	35,9829
2.Yük	0.2	323,3924	321,8307	317,1994	297,2819	323,8463
3.Yük	0.2	899,5751	899,5751	899,5751	899,5751	899,5733
4.Yük	0.2	1760,6832	1751,7481	1721,7701	1528,8289	1763,1637
1.Yük	0.4	35,8872	35,5558	34,5519	29,8046	
2.Yük	0.4	323,7204	323,2791	321,8929	314,1915	
3.Yük	0.4	895,9224	883,322	845,7965	691,2705	
4.Yük	0.4	1762,4929	1760,115	1752,8623	1718,7933	
1.Yük	0.6	35,9323	35,7558	35,2096	32,3611	
2.Yük	0.6	322,6573	318,5588	306,3451	253,6701	
3.Yük	0.6	899,5751	899,5751	899,5751	899,5751	
4.Yük	0.6	1756,6915	1734,1713	1666,0981	1387,8099	
1.Yük	0.8	35,9689	35,9198	35,7657	34,8986	
2.Yük	0.8	322,9825	319,9505	310,398	259,4552	
3.Yük	0.8	895,9225	883,3285	846,0285	703,2638	
4.Yük	0.8	1758,5165	1742,8175	1699,4565	1565,6145	

ÖZ GEÇMİŞ

Murat AKDOĞAN 12.06.1993 yılında Niğde’de doğdu. İlk ve orta öğretimini Niğde’de tamamladıktan sonra 2012 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’ne başladı. 2017 yılında lisans programını tamamladıktan sonra başladığı yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.



