

Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile serbest titreşim analizi

Free vibration analysis of curved castellated beams with different geometric web openings by the finite element method

Duygu ERTÜRKMEN *¹ , Ahmad Reshad NOORI² 

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33343, Mersin

²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34310, İstanbul

• Geliş tarihi / Received: 08.03.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 11.09.2023

Öz

Gövdesinde boşluk bulunan eğri eksenli petek kirişler, daha az çelik malzeme ile daha yüksek mukavemet sağlamaları, dolayısı ile tasarımcıya daha ekonomik bir çözüm yolu sunmaları bakımından tercih edilmektedir. Günümüzde havaalanları, stadyumlar vb. yapı türlerinde sıklıkla rastlayabileceğimiz eğri eksenli petek kirişlerde, farklı geometrik şekillerde boşluk tipleri kullanılabilir. Yapılan çalışmada, gövdesinde farklı geometrik boşluklar bulunan eğri eksenli petek kirişlerin düzlem içi serbest titreşimi üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Gövde boşluk geometrisinin petek kirişlerin serbest titreşim analizi yardımı ile genlik ve frekans değerlerine etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu amaçla yapılan modal analizlerde, daire, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere 4 farklı türde gövde boşluk tipi dikkate alınmıştır. Modellemelerde IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri tercih edilmiş olup 10 düğümlü tetrahedral tipi sonlu eleman modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan malzeme, lineer homojen izotropik bir malzeme olup, çeliğin mekaniksel özellikleri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan profillerin uç mesnetlenme koşulları, ankastre - ankastre, ankastre - sabit ve ankastre - serbest olarak planlanmış ve söz konusu profillerin her biri bu üç sınır koşulu dikkate alınarak serbest titreşim analizine tabi tutulmuştur. Analizlerden elde edilen sonuçlar IPE220, IPE240 ve IPE300 profillerinden oluşan daire, kare, beşgen ve altıgen boşluklu eğri eksenli petek kirişler için detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan tahkikler gövde boşluk tipinin, boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim davranışı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Doğal titreşim frekansları, Eğri eksenli kirişler, Petek kiriş, Serbest titreşim analizi, Sonlu elemanlar yöntemi

Abstract

Curved castellated beams with web openings are preferred because they provide higher strength with less steel material, and therefore offer a more economical solution to the designer. Different geometric shapes of the web opening types can be used in the curved castellated beams which can often be seen in airports, stadiums, etc nowadays. This study investigates the in-plane free vibration behavior of curved castellated beams with different geometric web openings using the three-dimensional finite element method. The effect of the web-opening geometrical shapes on the amplitude and natural frequency values of the curved castellated beams is investigated in detail via free vibration analysis. In the modal analysis done for this purpose, 4 different types of web opening types circle, square, pentagon and hexagon are taken into consideration. IPE 220, IPE 240, and IPE300 profiles are preferred in the modeling, and analysis are carried out using a 10-node tetrahedral finite element model. The material used in this study is a linear homogeneous isotropic material, and the mechanical properties of the steel are considered. The end support conditions of the profiles considered within the scope of the study are planned as fixed - fixed, fixed - pinned, and fixed - free supported. Each of the aforementioned profiles is subjected to free vibration analysis considering these three boundary conditions. The results obtained from the analysis are presented in detail for curved castellated beams with circular, square, pentagonal, and hexagonal web openings consisting of IPE 220, IPE 240, and IPE300 profiles. The investigations show that the web opening type has a significant effect on the free vibration behavior of curved castellated beams.

Keywords: Natural frequency, Curved beams, Castellated beams, Free vibration analysis, Finite element method

* Duygu ERTÜRKMEN; derturkmen@mersin.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Gelişmiş pek çok ülkede geniş açıklığa ve büyük yüksekliğe sahip binaların taşıyıcı sistemlerinde çelik elemanların, özellikle de gövdesi boşluklu olarak tasarlanan petek kirişler olarak adlandırılan I veya H profillerinden üretilmiş olan çelik elemanların kullanımı, maliyeti düşürmeleri bakımından sıklıkla tercih edilmektedir. Petek kiriş kullanımı ile, profil tablolarında tüm özellikleri mevcut halde bulunan I veya H şeklindeki çelik profillerin dolu gövdeli halleri kullanıldığında elde edilen mukavemet değerinden çok daha yüksek mukavemet veren kirişler elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Genel olarak, I kesitli (I, IP, IPE profilleri) veya H kesitli hadde profillerinin gövdeleri boyunca testere dişine benzer şekilde kesildikten sonra özel bir sistemle kesilen uçlardan birbirlerine zikzak görünümü oluşacak şekilde kaynaklanmalarıyla elde edilen çelik petek kirişler, gövdesinde altı köşeli boşluklar bulunan daha yüksek bir profilin elde edilmesine ve bu sayede de elemandan, daha yüksek mukavemet sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Petek kirişler, gövde boşluklarının genelde altı köşeli olması dolayısı ile de petek görünümüne sahip olmaları nedeniyle, bu şekilde adlandırılmıştır. Teknolojideki yeni gelişmelerin de etkisiyle, zaman içinde farklı tipte geometrik boşluk şekilleri de söz konusu kirişlerin tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Petek kirişlerin gövde boşlukları, kullanım amacına ve bir takım estetik nedenlere bağlı olarak daire, kare, altıgen ve sekizgen şeklinde olabilmektedir. Günümüzde geliştirilen özel lazer uçlu kesiciler yardımıyla I profillerin gövdeleri istenilen şekillerde kesilip birleştirilerek daire, kare, altıgen ve sekizgen boşluklu petek kirişler kolaylıkla elde edilebilmektedir.

Bilindiği üzere eğilmeye çalışan kirişlerin, eğilme momentleri, yani taşıma kapasiteleri, kiriş kesit yüksekliğinin karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla çelik kirişler ile tasarım yapılırken, kirişlerin yüksekliklerini arttırmak gerekmektedir. Ancak artan kesit yüksekliği ile birlikte maliyetin de büyük ölçüde artacağına da hesaba alınması gereklidir. Bu sebeple bu işlemi yaparken çelik malzeme giderini en alt düzeyde tutacak çözümün uygulamaya konulması ekonomi bakımından önem kazanmaktadır. Daha az çelik malzeme ile daha yüksek mukavemet sağlamaları, dolayısı ile de daha ekonomik olmaları bakımından boşluklu petek kirişlerin geniş açıklıklı yapılarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Boşluklu petek kirişler aynı zamanda yapıya hafiflikte sağlamaktadır. Buna ek olarak petek kirişlerin gövdesinde oluşan boşluklardan yapının tesisat donanımları geçebilmekte ve bu sayede yapı yüksekliğinin gereğinden fazla olması engellenebilmektedir. Bununla birlikte mimari açıdan da şık ve dekoratif bir görüntü sağlanmaktadır. Havaalanı, stadyum, otopark ve fabrika gibi yapıların tasarımında petek kirişlerin kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır.

Petek kirişler, genellikle düzgün yayılı yüklerin taşınmasında ve aktarılmasında kullanılmaktadır. Sabit mesnetli eğri eksenli altıgen boşluklu petek kirişlerin yayılı yükler etkisi altında test edildiği bir çalışmada, kirişlere gelen burkulma yükü değerinin, kiriş açıklıklarının dairesel yarıçap değerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış olup kirişlerin burkulma yükünün kiriş açıklığında dikkate alınan gövde boşluk sayısına bağlı olarak azalma gösterdiği sonucuna varılmıştır (Jiang vd., 2012). Petek kirişlerin gövde boşluklu olarak teşkil edilmesinin, kirişlerin enine şekil değiştirme değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, farklı başlık genişliğine sahip çeşitli boylarda olan iki açıklıklı sürekli kirişler yayılı yük etkisi altında test edilmiştir. Özellikle kiriş gövdesinde meydana gelen kesme kuvvetlerinin incelendiği çalışmada, ele alınan sürekli petek kirişlerin sehim değerlerinin söz konusu kirişlerin uzunlukları arttıkça azaldığı sonucuna varılmıştır (Elaiwi vd., 2017). Dairesel gövde boşluklu eğri eksenli sabit veya ankastre uç mesnetli olarak planlanan petek kirişlerin Sonlu Eleman Yöntemi ile analizini ele alan bir çalışmada gövde boşluklarının çap değerlerinin ve kiriş yüksekliklerinin değişiminin kiriş davranışı üzerindeki ve sehim üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı sıcaklık dereceleri ve çeşitli derinlik/açıklık değerleri dikkate alınarak kirişlerin sehim değerlerinin değişiminin incelendiği çalışmada, açıklık boyutunun artması ile kiriş orta bölgesinde meydana gelen sehimin arttığı sonucuna varılmıştır (Pandya & Dhankot, 2017). Eğri eksenli I kesitli dairesel gövde boşluklu sabit mesnetli dört adet petek kirişin ortalarında tekil yük etkisinde test edildiği deneysel bir çalışmada, yay uzunluğu-yüksekliği ve eğrilik yarıçapı değerlerinin değişiminin numunelerin maksimum yük ve sehim değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kirişlerin davranışı için geliştirilen sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir (Zaher vd., 2018). Dairesel ve altıgen gövde boşluk geometri petek kirişlerin dört nokta yükleme etkisindeki davranışlarının karşılaştırılması olarak ele alındığı çalışmada, altıgen boşlukların köşelerinde oluşan kayma gerilmelerinin yoğunluğundan kirişlerin kesme etkisi nedeniyle

göçmelerinin önlenmesi ve yük taşıma kapasitelerinin artırılması amacıyla dairesel gövde boşluklu kirişlerin kullanımı önerilmiştir (Mehetre & Talikoti, 2020). Farklı geometrik şekillerde gövde boşlukları kullanılarak oluşturulan 15 adet petek kirişin deneysel ve doğrusal olmayan analizinin gerçekleştirildiği bir çalışmada boşlukların farklı çap ve yükseklik değerleri için kirişlerin maksimum moment değerleri ve oluşan gerilmelerin değişimleri araştırılmıştır (Morkhade vd., 2020). Eksenel eğilme etkisindeki boşluklu petek kirişlerin elastik ve elastik olmayan burkulma davranışına yönelik gerçekleştirilen parametrik bir çalışmada gövde kalınlığının ve profilin başlık geometrisinin burkulma yükünün kritik değeri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Rajana vd., 2020). Benzer uzunlukta değişken kesit yüksekliğinde yanal takviyeli veya takviyesiz, altıgen gövde boşluk kesitli olarak planlanan dört adet petek kirişin, açıklık ortasında tekil bir yük etkisi altında deneysel olarak test edilmesi sonucunda yanal takviyelerin kirişlerin yük taşıma kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Al-Mawashee & Al-Kannoon, 2021).

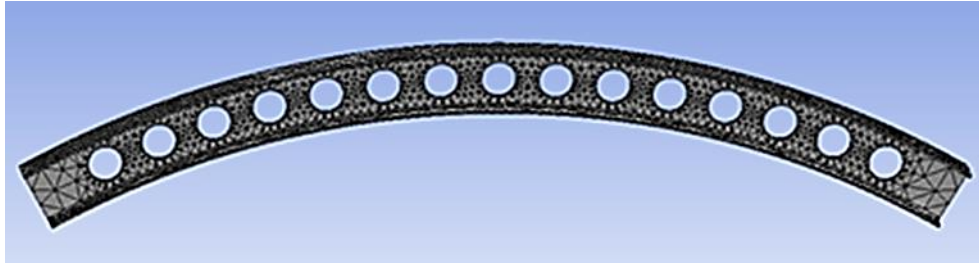
Genel olarak yapılan çalışmalar düz eksenli ve değişken boşluk türüne sahip petek kirişlerle alakalı olup eğri eksenli ve değişken boşluklu petek kirişler için çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Düz eksenli petek kirişlerde kesit gövdesinde oluşturulan altıgen geometri boşluğun boşluksuz dolu gövdeli kirişlere nazaran kirişlerin eğilme dayanımlarını ne şekilde etkilediğinin araştırılması amacıyla ANSYS programı yardımıyla sayısal analizler gerçekleştirilmiştir (Barkiah & Darmawan, 2021). Yanal takviyeli kompozit olmayan Litzka tipi petek kirişlerin göçme modları sonlu eleman yöntemi kullanılarak araştırılmış, kirişi oluşturan parçaların ve yanal takviyelerin davranışa etkisi ve elemanların burkulma davranışları incelenmiştir (Braga vd., 2021). ABAQUS analiz programı yardımıyla farklı gövde boşluk geometri petek kirişlerin aynı üniform yayılı yük ve uç mesnetlenme koşullarındaki davranışları sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir (Doori & Noori, 2021). Değişken gövde yüksekliğine ve başlık genişliğine sahip olan I profilinden teşkil edilen çelik kirişlerin sonlu eleman analizleri sonucunda, en çok zorlanan bölgelerin gövde ortaları olduğu ve bu orta kısımda kesit yüksekliklerinin artırılmasının, yani petek kiriş kullanımının, kirişlerde oluşacak olan sehim değerlerini azaltacağı sonucuna varılmıştır (Pandey & Rathour, 2021). Gövdesinde dairesel boşluk bulunan 20 petek kirişi üzerinde üniform yayılı yük etkisinde sonlu eleman yöntemi ile ABAQUS programında değişken sınır şartları dikkate alınarak test edilmiş ve oluşan gerilme deformasyon değerlerinin değişimi incelenmiştir (Singh, 2021). Altıgen gövde boşluklu petek kirişlerin boşluk kenarlarında oluşan kesme deformasyonlarını azaltmak ve kirişin kesme mukavemetini arttırmak için kayma gerilmelerinin yoğun olduğu kısımlarda kesit rijitliğini arttıracak çapraz ve düşey çelik çubuk takviye elemanlarının kullanımının kiriş kesme kapasitesine etkisi deneysel ve analitik çalışma ile sunulmuştur (Subramanian & Jagadeesan, 2021). Petek kirişlerin basınç ve yanal burkulma etkisindeki davranışlarını araştırmak için bir yöntem geliştirilmiş ve geliştirilen yöntem mevcut yöntemlerle karşılaştırılmış; önerdikleri denklemin kirişlerin davranışını gerçekçi bir şekilde yansıttığı sonucuna varılmıştır (Weidlich vd., 2021). Altıgen gövde boşluklu betonarme petek kirişlerin eğilme etkisindeki davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla değişken kiriş yüksekliği ve açıklık boyutları için kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için parametrik bir çalışma yapılmıştır (Nabil vd., 2022).

Yapılan araştırma ve incelemelere göre, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak analiz eden herhangi bir çalışmaya literatürde henüz rastlanmamıştır. Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim altındaki davranışının araştırılması amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS workbench programı yardımıyla farklı geometrik boşluklu petek kirişlere ait modal analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, farklı uç mesnetlenme biçimlerinin ve çalışma kapsamında ele alınan IPE profillerinden oluşturulan petek kirişlerin gövdesinde açılan değişken boşluk geometrisinin (kare, daire, beşgen ve altıgen) analiz sonucunda elde edilecek olan toplam deplasman (genlik) değerleri, frekans değerleri ve gerilmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

Yapılan çalışmada daire eksenli olacak şekilde oluşturulmuş dolayısıyla da eğri eksenli olarak adlandırılmış olan IPE kesitli çelik petek kirişler, daire, kare, beşgen ve altıgen boşluklu olarak planlanmış ve Sonlu eleman yöntemini temel alan ANSYS Workbench yapı analizi programı kullanılarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir (ANSYS, Inc release ansys R1, 2022).



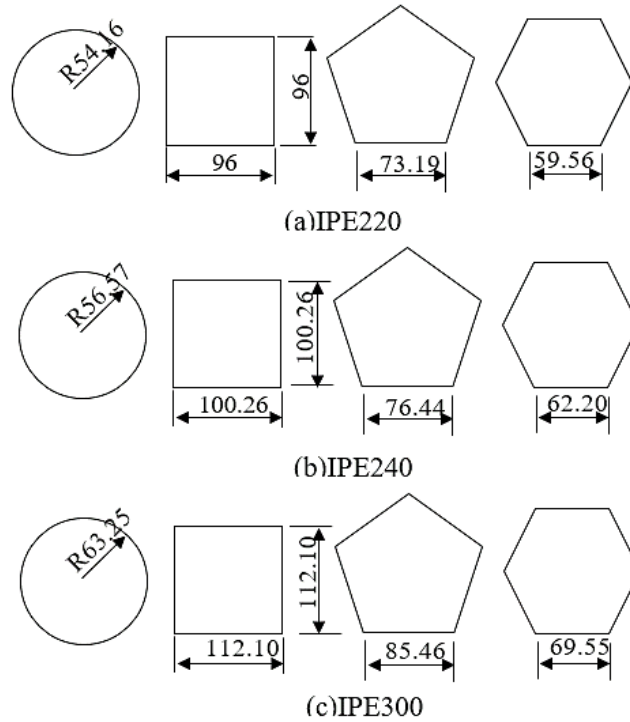
Şekil 1. Dairesel boşluklu eğri eksenli petek kiriş modeli
Figure 1. Curved castellated beams with circle web openings

Şekil 1’de serbest titreşim davranışı araştırılan iki ucu ankastre mesnetli dairesel boşluklu eğri eksenli bir petek kiriş örneği görülmektedir. Çalışmada Şekil 1’de verilen örnek modele benzer şekilde eğri eksenli olarak tasarlanan farklı geometrik boşluklu (daire, kare, beşgen, altıgen) tüm petek kirişler için ankastre – serbest, ankastre – sabit ve ankastre – ankastre mesnet koşulları ele alınmıştır. Kirişlere ait malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiş olup kirişlerin izotropik homojen malzemeden imal edildiği kabul edilmiştir.

Tablo 1. Eğri eksenli petek kirişlere ait malzeme özellikleri
Table 1. Material properties of curved castellated beams

Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kgm^{-3})	Hacim modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)
200	0.3	7850	166.7	76.92

Analizlerde ele alınan eğri eksenli çelik petek kirişler için IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri kullanılmıştır. Kullanılan kirişler için planlanan gövde boşluk şekilleri ve boşluk ölçüleri Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Gövde boşluk geometrisi ve boşluk boyutları (a-c)
Figure 2. Geometry and dimensions of web openings (a-c)

Şekil 2’de verilen boşlukların geometrik ölçüleri, her bir kiriş modeli için toplam boşluk alanları eşit olacak şekilde hesaplanarak modellemeye dikkate alınmıştır. Modellemeye eğri eksenli petek kirişin yay açısı 60° , uzunluğu 3 m, ve eğrilik yarıçapı 2.865 m olarak ele alınmıştır. Kirişlerde bırakılan gövde boşluk sayısı tasarlanan tüm model türleri için 15’er adet olup söz konusu boşluklar arasındaki mesafe (α) = 0.18 m

değerinde, kenar boşlukları ve mesnetler arasındaki mesafe ise $(\beta) = 0.24$ m olarak belirlenmiştir. Tüm bu özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Analizler için sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS Workbench yapısal analiz programı kullanılmış olup analizde elemanlar için göz önüne alınan sonlu eleman SOLID187’ dir. SOLID187, dörtyüzlü (tetrahedral), her düğüm noktasında 3 adet serbestlik derecesi olan 10 düğümlü bir sonlu eleman tipidir. Düğüm noktasındaki serbestlik dereceleri x, y ve z yönlerinde ötelenmelerdir. Söz konusu elemanın teorisine, yapılan kabullere ve kısıtlamalara yönelik detaylı veriler ANSYS programının teorileri kaynağında mevcuttur ([Mechanical APDL element reference, 2013](#)). Çalışma kapsamında ele alınan eğri eksenli petek kiriş modelleri için analizlerde dikkate alınan uç mesnetlenme koşullarını tanımlamak için, ankastre mesnet için “Fixed” komutu, sabit mesnet için ise “Remote displacement” komutu kullanılmış ve sabit mesnet sınır koşulu için tanımlama yaparken dönme değerleri sıfır olarak düzeltilmiştir.

Tablo 2. Geometrik özellikler

Table 2. Geometric features

Profil	Model	Gövde boşluk geometrisi	Boşluk alanı (mm ²)	β (m)	α (m)	Boşluk sayısı
IPE 220	I	Daire	9216	0.24	0.18	15
	II	Kare				
	III	Beşgen				
	IV	Altıgen				
IPE 240	V	Daire	10052.07	0.24	0.18	15
	VI	Kare				
	VII	Beşgen				
	VIII	Altıgen				
IPE 300	IX	Daire	12566.41	0.24	0.18	15
	X	Kare				
	XI	Beşgen				
	XII	Altıgen				

Çalışmada analizler modal analiz olarak ele alınmış ve söz konusu elemanlar serbest titreşim etkisi dikkate alınarak dinamik olarak analiz edilmiştir. Ele alınan problemlerin sonlu eleman ağları oluştururken, programın “Mesh” ayarlarında iyileştirme yapılmış olup “Resolution” değeri programın kendisinde 2 iken 5 yapılmış “Span angle center” değeri ise “Fine” seçeneği işaretlenerek analiz için daha hassas bir mesh ayarı kullanımı düşünülmüştür. Her bir petek kiriş modeli için program tarafından hesaplanan eleman ve düğüm noktası sayısı ile elemanlara ait kütle bilgileri Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Sonlu eleman ağı özellikleri

Table 3. Finite element mesh properties

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	Kütle (kg)
I	12982	28130	62.427
II	12140	25630	62.426
III	12527	26674	62.426
IV	12854	26886	62.426
V	13123	28507	68.480
VI	12274	25927	68.482
VII	12901	27495	68.481
VIII	12582	26559	68.482
IX	15346	32887	96.331
X	12502	26523	96.333
XI	13936	29622	96.334
XII	13105	27702	96.332

3. Bulgular ve tartışma

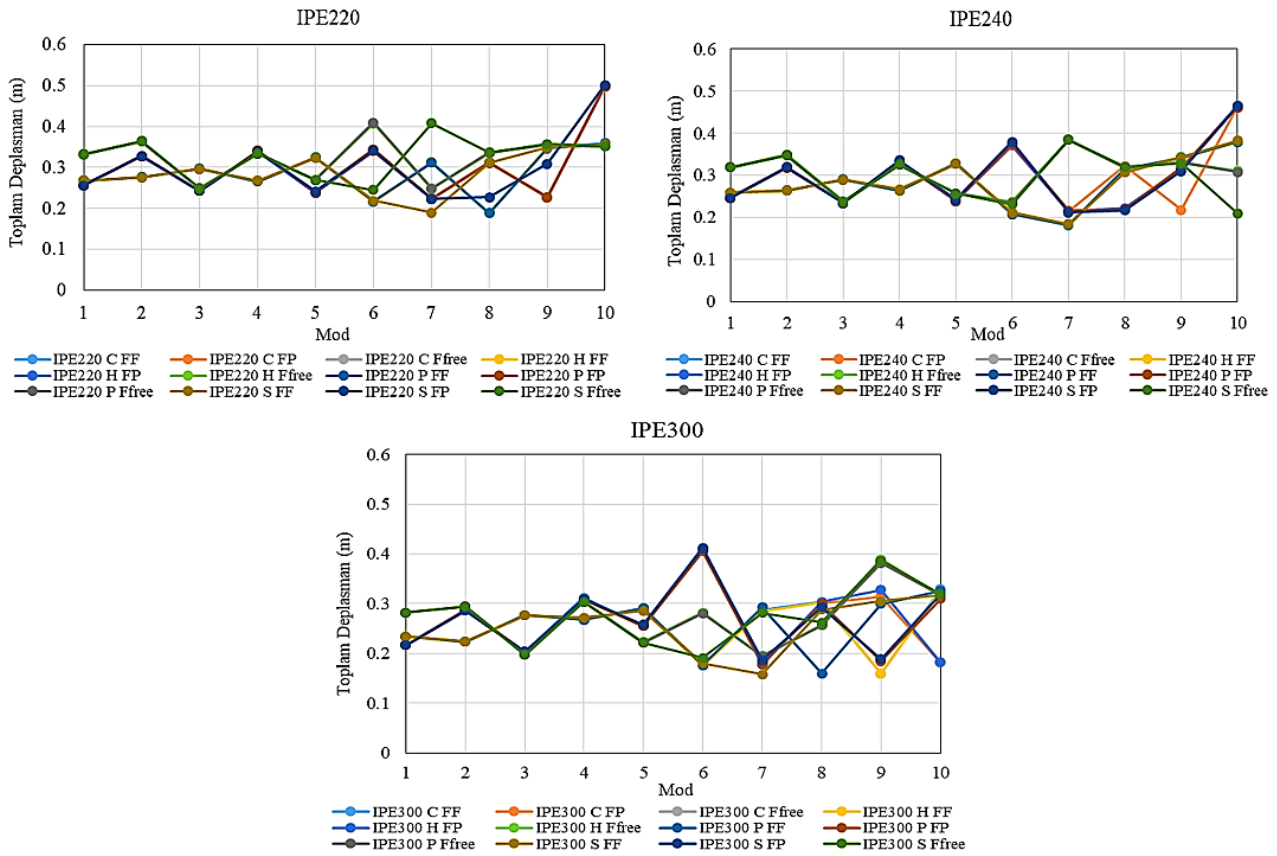
3. Results and discussion

Bu çalışmada, gövdesinde farklı geometrik şekillerde boşluklar bulunan daire eksenli çelik petek kirişlerin serbest titreşim analizi sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kirişlerin gövdesinde kullanılan boşluk tipi geometrisinin, ele alınan yapı elemanlarının genlik ve frekans değerlerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, her bir profil

için elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda kirişlerin uzunluğu, eğrilik yarıçapı, boşluk alanı ve boşluklar arasındaki mesafe değerleri eşit tutulmuş yalnızca boşluk tipi geometrisi değiştirilmiştir. Analizler, elemanların serbest titreşim davranışı için yapılmış olup kirişlere şiddeti zamana bağlı değişen bir dinamik yük uygulanmamıştır. Yapılan modal analizlerde her bir eleman için 10 mod göz önüne alınmış ve her mod için modellerin serbest titreşim frekansı ve genlik değerlerinin değişimi incelenmiştir.

Tüm modeller için elde edilen genlik değerleri tüm sınır koşulları ve gövde boşluk tipleri için Tablo 4’te verilmiştir. Tüm sınır koşulları ve boşluk tipleri için göz önüne alınan IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli eğri eksenli petek kirişlere ait genlik değerlerinin profil türlerine bağlı değişimi Şekil 3’te verilen grafiklerde görülmektedir. Söz konusu profillerden en büyük genlik değerlerinin oluşumunun gözlemlendiği bazı profillere ait ilk 10 mod için elde edilen mod görselleri ise Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’ da yer almaktadır. Frekans değerleri ise Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen grafiklerle sırasıyla uç mesnetlenme ve profil türlerine göre karşılaştırılmıştır.

Şekil 3 ve Tablo 4 incelendiğinde tüm mesnet koşulları için, en büyük genlik değerlerinin 10. modda ve kare ile beşgen boşluk durumunda meydana geldiği, 6. veya 7. modda ise tüm durumlar için oluşan genlik değerlerinin bir anda düştüğü ve sonrasında tekrar artarak maksimum değere ulaştığı görülmektedir.



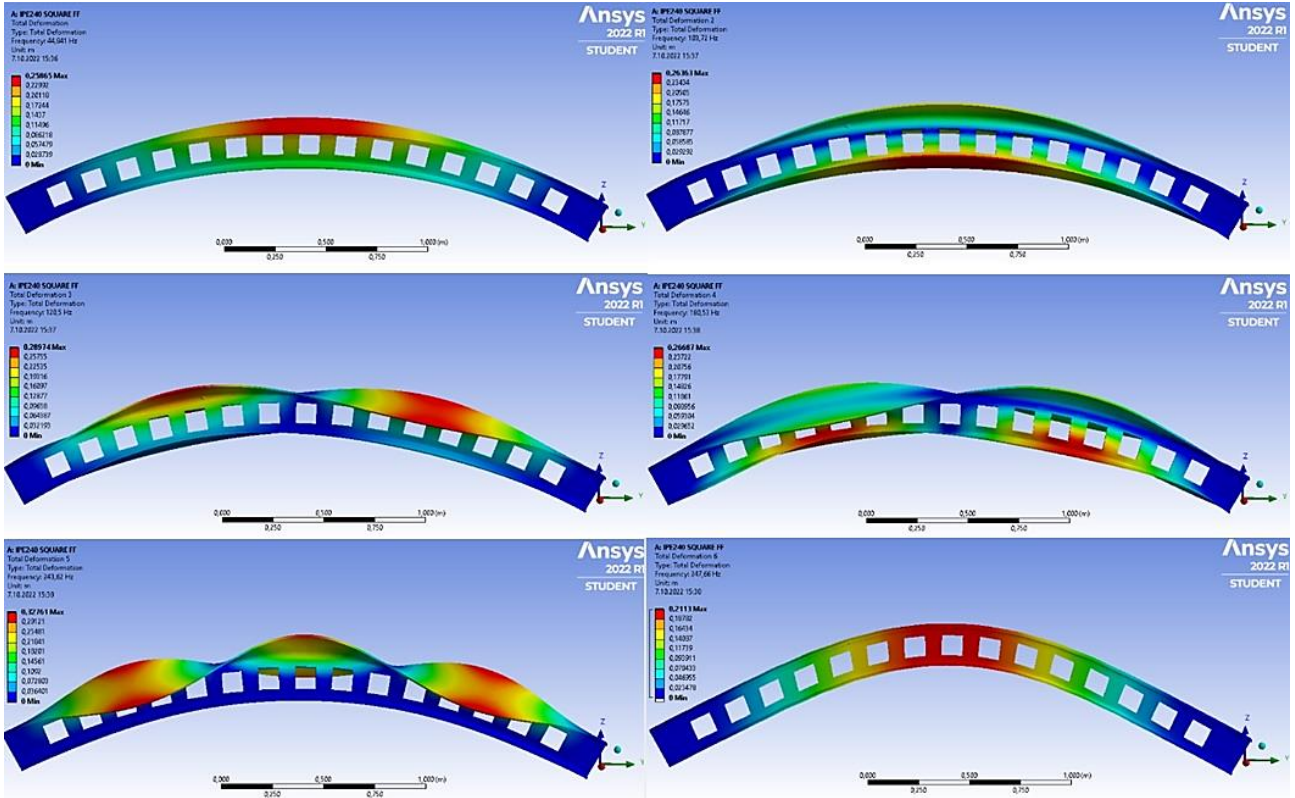
Şekil 3. IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri için genlik değerlerinin değişimi

Figure 3. Variation of amplitude values for IPE220, IPE240 and IPE300 profiles

Tablo 4. İlk 10 moda karşılık gelen genlik değerlerinin karşılaştırılması (m)
Table 4. Comparison of the amplitude values corresponding to the first 10 modes (m)

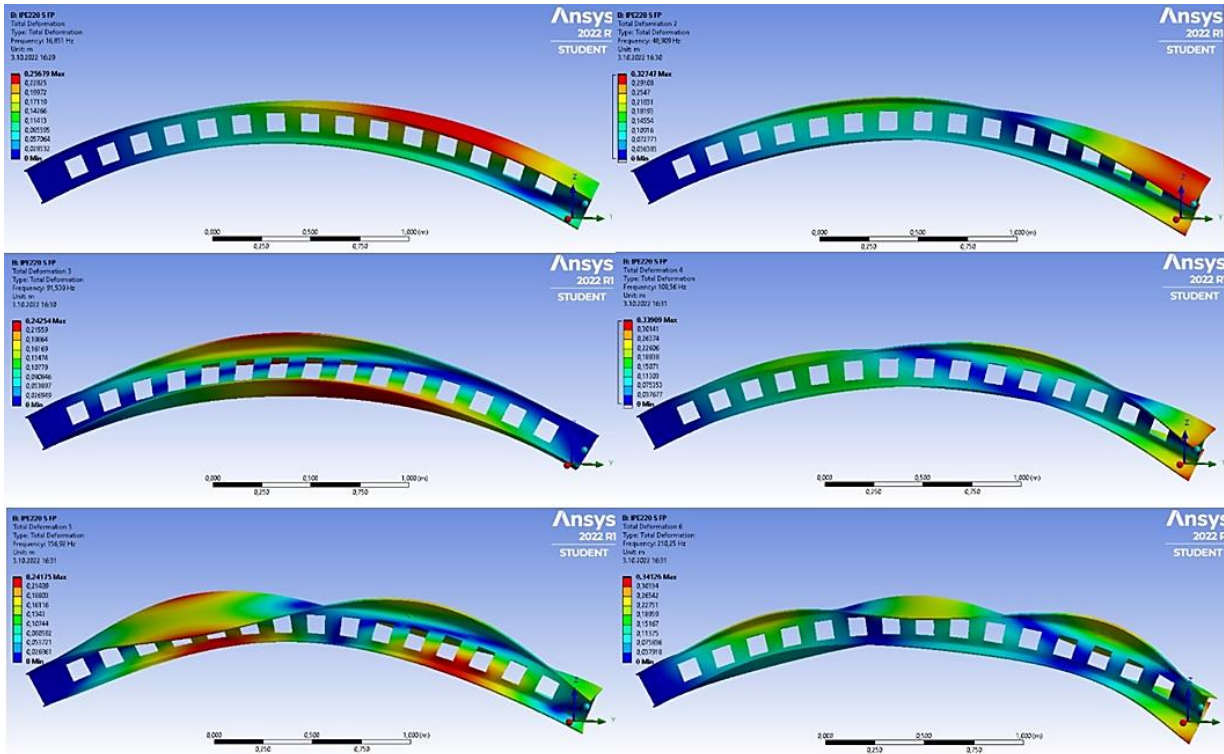
Mesnet koşulu	Mod	IPE220 Dairesel	IPE240 Dairesel	IPE300 Dairesel	IPE220 Kare	IPE240 Kare	IPE300 Kare	
Ankastre – Ankastre (Fixed-Fixed) (FF)	1	0.26822	0.25850	0.23365	0.26823	0.25865	0.23360	
	2	0.27605	0.26331	0.22342	0.27579	0.26363	0.22368	
	3	0.29658	0.28979	0.27686	0.29654	0.28974	0.27648	
	4	0.26554	0.26253	0.26857	0.26784	0.26687	0.27205	
	5	0.32478	0.32839	0.29018	0.32346	0.32761	0.28517	
	6	0.21586	0.20726	0.17570	0.21934	0.21130	0.18012	
	7	0.31324	0.18125	0.28679	0.18972	0.18376	0.15821	
	8	0.18856	0.31452	0.30328	0.31215	0.30717	0.28770	
	9	0.34859	0.34331	0.15946	0.34885	0.34253	0.30516	
	10	0.35995	0.37919	0.32918	0.35536	0.38209	0.31770	
		Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
		1	0.26840	0.25883	0.23375	0.26823	0.25858	0.23354
		2	0.27614	0.26341	0.22352	0.27618	0.26359	0.22341
		3	0.29678	0.28996	0.27672	0.29648	0.28970	0.27619
		4	0.26583	0.26378	0.26697	0.26565	0.26228	0.26757
		5	0.32454	0.32826	0.29087	0.32406	0.32760	0.28658
		6	0.21644	0.20766	0.17637	0.21603	0.20718	0.17550
		7	0.31181	0.18206	0.29295	0.31181	0.18221	0.28423
		8	0.18905	0.31387	0.15939	0.18896	0.31278	0.30172
		9	0.34637	0.34129	0.29896	0.34922	0.34274	0.15979
	10	0.35806	0.37991	0.32590	0.35607	0.37809	0.32580	
Mesnet koşulu	Mod	IPE220 Dairesel	IPE240 Dairesel	IPE300 Dairesel	IPE220 Kare	IPE240 Kare	IPE300 Kare	
Ankastre – Sabit (Fixed-Pinned) (FP)	1	0.25689	0.24641	0.21647	0.25679	0.24646	0.21651	
	2	0.32722	0.31898	0.28605	0.32747	0.31904	0.28610	
	3	0.24311	0.23407	0.20362	0.24254	0.23451	0.20375	
	4	0.33845	0.33219	0.30642	0.33909	0.33522	0.30808	
	5	0.23852	0.23893	0.25611	0.24175	0.24186	0.25786	
	6	0.33915	0.37032	0.40645	0.34126	0.37896	0.41093	
	7	0.22284	0.21410	0.17728	0.22324	0.21165	0.18596	
	8	0.31260	0.32248	0.30076	0.22754	0.21689	0.29237	
	9	0.22669	0.21789	0.31456	0.30914	0.30997	0.18881	
	10	0.49668	0.46127	0.18148	0.50131	0.46468	0.31806	
		Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
		1	0.25701	0.24657	0.21649	0.25687	0.24648	0.21645
		2	0.32791	0.31819	0.28655	0.32722	0.31887	0.28699
		3	0.24306	0.23444	0.20366	0.24321	0.23434	0.20374
		4	0.34147	0.33265	0.30819	0.33889	0.33218	0.31218
		5	0.24023	0.24010	0.25480	0.23809	0.23798	0.25447
		6	0.34485	0.37516	0.40566	0.34101	0.37180	0.41237
		7	0.22410	0.21553	0.17945	0.22334	0.21463	0.17691
		8	0.31057	0.21856	0.29937	0.31181	0.22218	0.30364
		9	0.22771	0.31793	0.18455	0.22716	0.31428	0.32739
	10	0.49918	0.46087	0.30968	0.49773	0.46518	0.18159	
Mesnet koşulu	Mod	IPE220 Dairesel	IPE240 Dairesel	IPE300 Dairesel	IPE220 Kare	IPE240 Kare	IPE300 Kare	
Ankastre- Serbest (Fixed-Free) (FFixed)	1	0.33210	0.31896	0.28186	0.33225	0.31900	0.28194	
	2	0.36354	0.34841	0.29377	0.36425	0.34809	0.29421	
	3	0.24971	0.23780	0.19901	0.24820	0.23600	0.19637	
	4	0.33333	0.32533	0.30377	0.33365	0.32517	0.30363	
	5	0.26934	0.25623	0.22048	0.26907	0.25645	0.22197	
	6	0.40863	0.23640	0.28136	0.24463	0.23136	0.19083	
	7	0.24885	0.38404	0.19518	0.40758	0.38465	0.28089	
	8	0.33565	0.31892	0.25747	0.33545	0.32006	0.26181	
	9	0.35529	0.33042	0.38332	0.35652	0.32868	0.38657	
	10	0.35241	0.31034	0.31932	0.35114	0.20938	0.31806	
		Mod	IPE220 Beşgen	IPE240 Beşgen	IPE300 Beşgen	IPE220 Altgen	IPE240 Altgen	IPE300 Altgen
		1	0.33234	0.31902	0.28200	0.33246	0.31914	0.28205
		2	0.36383	0.34806	0.29410	0.36416	0.34851	0.29324
		3	0.24945	0.23739	0.19845	0.24956	0.23768	0.19910
		4	0.33390	0.32566	0.30338	0.33358	0.32568	0.30400
		5	0.26935	0.25627	0.22143	0.26962	0.25653	0.22305
		6	0.40877	0.23498	0.28036	0.40701	0.23580	0.28217
		7	0.24823	0.38439	0.19418	0.24836	0.38424	0.19533
		8	0.33684	0.31902	0.25638	0.33446	0.31818	0.25646
		9	0.35432	0.33084	0.38129	0.35682	0.32833	0.38945
	10	0.35139	0.30771	0.31783	0.35214	0.31004	0.31630	

IPE220 elemanına ait sonuçlar incelendiğinde sonuçların elemanın modelinden yani daire, kare, beşgen veya altıgen boşluklu olmasından bağımsız olduğu sadece uç mesnetlenme şekline bağlı olduğu görülmektedir. Aynı uç mesnetlenme şekline sahip olan farklı boşluk tipleri kullanılarak teşkil edilmiş IPE220 kesitli petek kirişleri için frekans değerleri boşluk türü farklı da olsa değişmemiştir (Şekil 4).

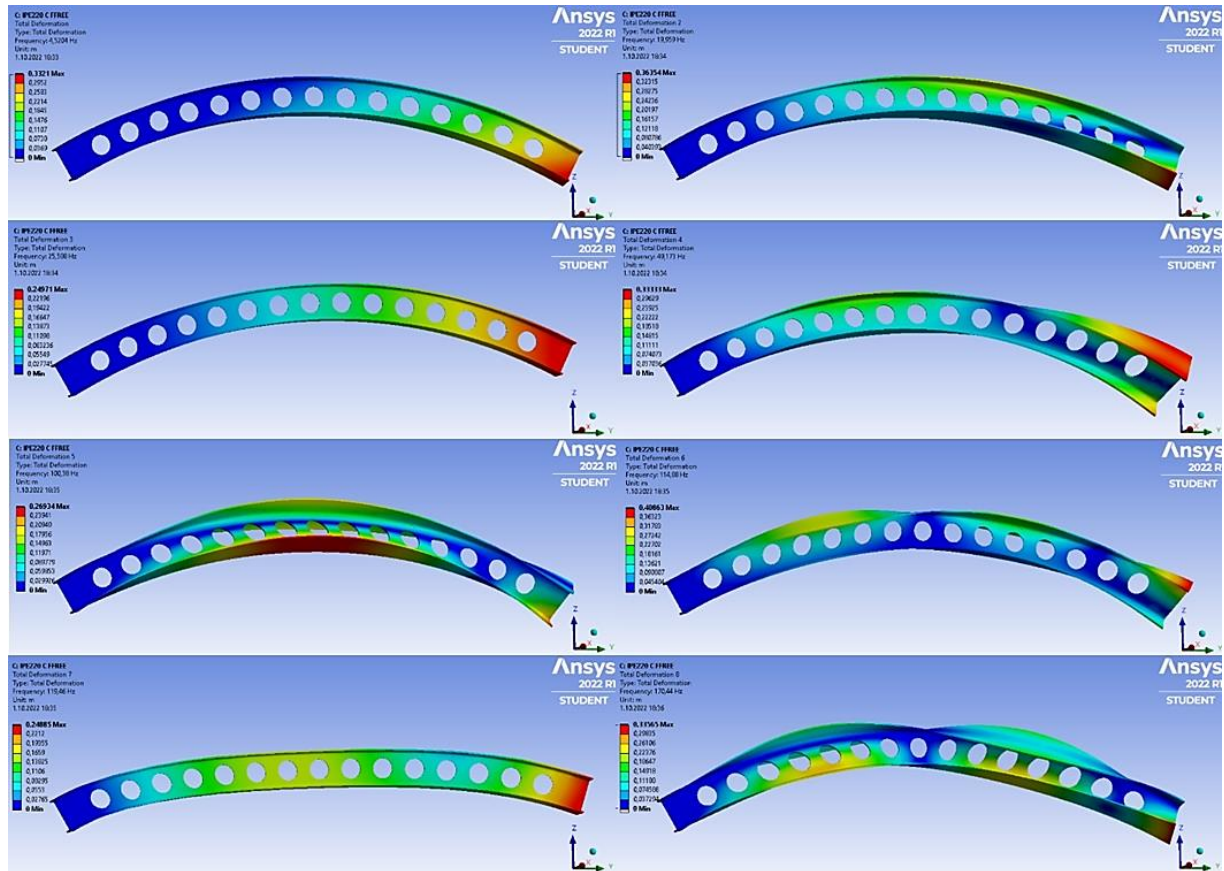


Şekil 4. Ankastre - ankastre uç mesnetli, eğri eksenli, kare boşluklu IPE240 profiline ait mod görselleri
Figure 4. Mode images of IPE240 profile curved castellated beam with fixed - fixed end support and square web opening

Serbest titreşim frekans değerleri, ankastre - ankastre mesnetli durumda her boşluk tipi için ve her petek kiriş profili için en büyük değerleri almıştır (Şekil 5). Elemanların uç serbestliklerinin artması ile yani ankastre - sabit ve ankastre - serbest mesnetli durumlar için ise oluşan frekans değerleri tüm modeller için azalmıştır. Bu durumda en yüksek frekanslar, ankastre - ankastre mesnetli, en düşük frekanslar ise ankastre - serbest uç sınır koşulunda meydana gelmiştir. En rijit durum, her iki ucun ankastre olduğu durum olduğu için bu durumda periyot azalacak ve frekans değerleri de artacaktır. Beklendiği şekilde bir ucun serbest olduğu durumda rijitlik azalacağından frekans değerleri periyodun artması ile azalacaktır. Yine Tablo 5'te verilen sonuçlara bakıldığında kesit boyutunun arttırılması ile rijitlik arttığından petek kiriş kesitinin IPE220'den IPE240'a ve IPE300'e çıkarılması durumlarında da yine periyot değerleri düşeceğinden frekans değerlerinde her mesnetlenme türü için artış gözlenmiştir.



Şekil 5. Ankastre-basit mesnetli, eğri eksenli, kare boşluklu IPE220 profiline ait mod görselleri
 Figure 5. Mode images of IPE220 profile curved castellated beam with fixed-pinned end support and square web opening



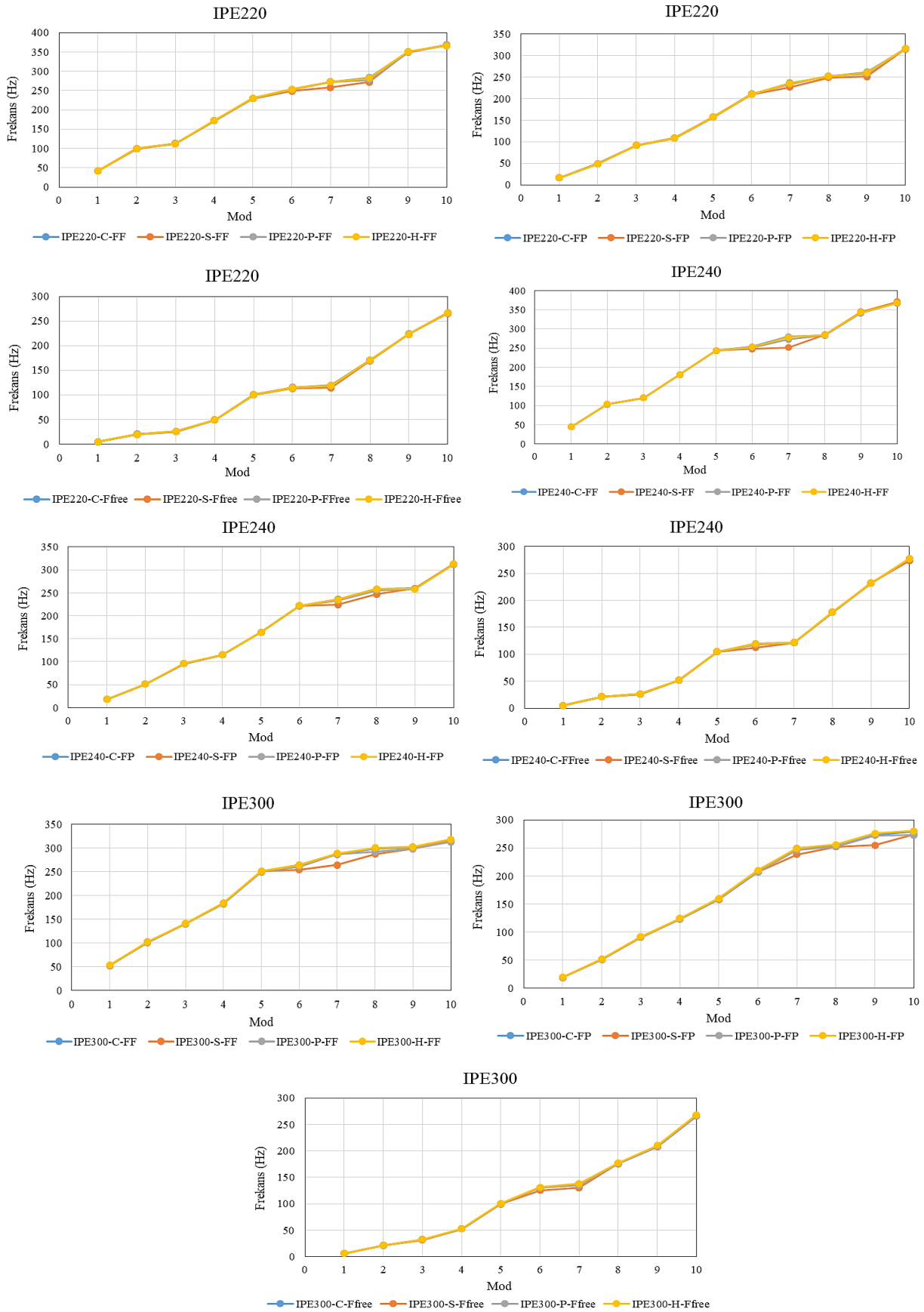
Şekil 6. Ankastre-serbest uç mesnetli, eğri eksenli, dairesel boşluklu IPE220 profiline ait mod görselleri
 Figure 6. Mode images of IPE220 profile curved castellated beam with fixed-free end support and circular web opening

Tablo 5. Frekans değerleri değişimi (Hz)**Table 5.** Variation of frequency values

Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
IPE220	1	41.61	41.51	41.68	41.53	16.93	16.85	16.92	16.86	4.52	4.50	4.54	4.51
	2	99.42	98.93	99.48	99.44	49.05	48.91	49.15	48.87	19.96	19.90	19.98	19.90
	3	112.59	112.38	112.69	112.42	91.95	91.54	92.01	91.98	25.59	25.30	25.48	25.56
	4	172.22	171.52	172.18	172.28	108.74	108.56	109.18	108.62	49.17	48.95	49.19	48.91
	5	229.78	229.50	229.89	229.67	157.65	156.92	157.82	157.69	100.3	99.85	100.48	100.38
	6	253.63	248.54	251.55	253.03	210.37	210.25	211.24	210.26	114.88	113.1	114.95	114.51
	7	272.79	258.29	272.74	272.88	236.22	226.59	233.64	235.50	119.4	114.4	117.91	118.95
	8	283.90	272.06	277.59	281.68	251.72	249.23	252.14	251.84	170.4	169.5	170.38	170.45
	9	349.88	350.46	348.96	350.86	261.24	250.91	257.47	259.96	223.8	223.1	223.95	223.24
	10	367.92	366.30	368.48	366.69	315.61	315.28	316.75	315.68	266.6	265.5	266.51	266.68
Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		V	VI	VII	VIII	V	VI	VII	VIII	V	VI	VII	VIII
IPE240	1	44.74	44.84	44.78	44.81	17.97	17.98	17.96	17.97	4.84	4.84	4.85	4.84
	2	103.78	103.72	103.90	104.00	51.30	51.44	51.35	51.29	21.02	21.03	21.00	21.01
	3	120.43	120.50	120.44	120.48	96.05	95.95	96.08	96.23	26.19	25.81	26.04	26.16
	4	180.68	180.53	180.60	181.04	114.83	115.23	115.09	114.98	51.44	51.54	51.45	51.39
	5	243.60	243.62	243.48	243.67	164.05	164.14	164.04	164.35	104.47	104.4	104.53	104.67
	6	253.67	247.66	251.31	253.18	221.64	222.40	222.20	222.06	120.00	112.5	118.03	119.50
	7	280.11	251.87	272.88	278.15	236.20	224.05	233.12	235.56	121.5	121.7	121.45	121.49
	8	283.71	284.83	283.10	284.19	258.13	247.24	255.51	258.68	177.73	177.6	177.64	178.10
	9	342.30	344.97	341.27	343.64	259.64	259.64	258.14	258.74	231.8	232.5	231.75	232.12
	10	367.53	370.73	367.60	368.30	312.04	313.48	311.75	312.76	277.0	273.6	276.89	277.66
Profil	Mod	Ankastre - Ankastre (FF)				Ankastre - Basit (FP)				Ankastre - Serbest (FFree)			
		IX	X	XI	XII	IX	X	XI	XII	IX	X	XI	XII
IPE300	1	52.84	52.86	52.74	53.16	19.46	19.50	19.43	19.59	5.96	6.00	5.97	6.04
	2	101.71	101.39	101.79	102.61	51.42	51.52	51.31	51.96	21.33	21.39	21.30	21.49
	3	140.86	141.01	140.79	141.44	91.23	90.80	91.19	92.08	32.61	31.73	32.37	32.65
	4	183.27	183.03	183.29	184.30	123.83	123.88	123.47	124.99	52.52	52.64	52.42	53.04
	5	250.15	250.88	249.96	251.43	159.02	158.47	158.89	160.53	99.89	99.43	99.89	100.84
	6	264.35	254.47	261.09	264.53	207.92	207.66	206.84	209.96	130.52	125.46	130.18	131.56
	7	287.09	264.51	286.46	288.75	249.41	238.09	246.50	249.49	137.66	130.64	134.59	138.01
	8	298.76	287.16	292.07	300.17	252.80	252.31	252.20	255.98	176.36	175.75	176.38	177.57
	9	301.82	298.90	298.41	302.57	273.45	255.04	272.35	276.01	208.49	208.29	207.47	210.53
	10	314.12	316.36	313.23	317.95	279.33	273.88	273.07	279.99	266.09	266.62	265.55	268.35

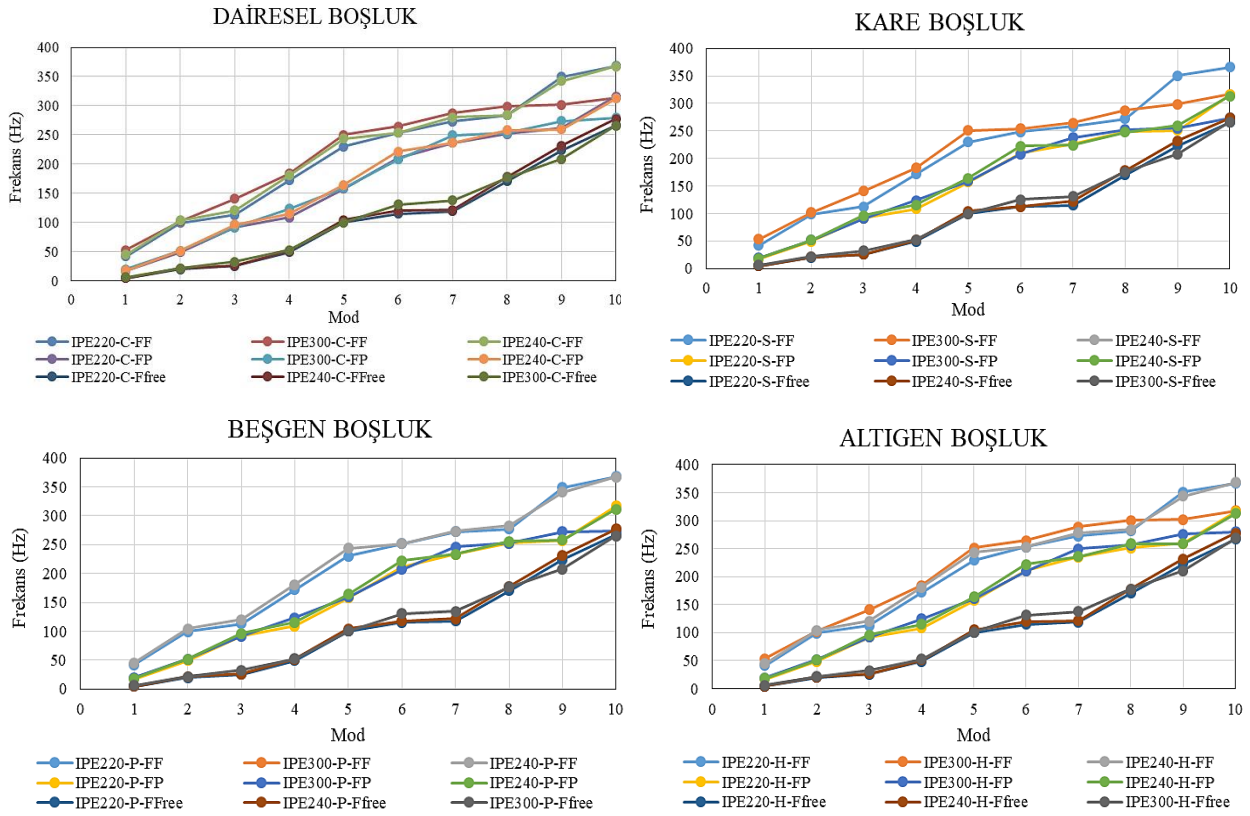
Modal analiz sonucunda modellere ait elde edilen frekans değerleri değişimi Tablo 5'te verilmiştir. Tüm modellere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans değerlerinin elemanın boşluk tipinden bağımsız olacak şekilde sadece uç mesnetlenme çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Gövdesinde aynı tür geometrik boşluk bulunan, kesitleri farklı profilden teşkil edilmiş olan eğri eksenli boşluklu petek kirişlere ait frekans değerleri değişimi incelendiğinde en düşük frekans değerlerinin tüm profil tipleri için en az rijit olan ankastre - serbest uç durumu için meydana geldiği görülmektedir. Profil kesiti arttığında yine rijitlik artışından dolayı frekans değerlerinin arttığı gözlenmektedir.



Şekil 7. Farklı geometrik boşluklu IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli eğri eksenli petek kirişler için uç mesnetlenme türlerine göre frekans değerleri değişimi

Figure 7. Variation of frequency values according to end support types for curved axis castellated beams with different geometric gaps for IPE220, IPE240 and IPE300 sections



Şekil 8. Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişler için uç mesnetlenme türlerine ve profil tipine bağlı frekans değerleri değişimi

Figure 8. Variation of frequency values depending on end support types and profile type for curved axis castellated beams with different geometric gaps

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada, IPE220, IPE240 ve IPE300 kesitli gövdesinde farklı geometrik şekillerde boşluk bulunan eğri eksenli petek kirişlerin sönümsüz serbest titreşim davranışı teorik olarak araştırılmıştır. Analizlerde hesaplamaları sonlu elemanlar yöntemine dayanan ANSYS workbench paket programı kullanılmıştır. Programda daire, kare, beşgen ve altıgen gövde boşluklarına sahip farklı profil boyutlarına sahip eğri eksenli I kesitli petek kirişler için üç boyutlu sonlu eleman modelleri kurulmuştur. IPE220, IPE240 ve IPE300 profillerinden teşkil edilen eğri eksenli petek kirişlerin dinamik analizleri için modellerin uçlarında ankastre - ankastre, ankastre - sabit ve ankastre - serbest mesnet olmak üzere 3 farklı uç mesnetlenme koşulu kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Tüm modellere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans değerlerinin elemanın boşluk tipinden bağımsız olacak şekilde sadece uç mesnetlenme çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlenmiştir. En yüksek frekanslar, ankastre - ankastre mesnetli, en düşük frekanslar ise ankastre - serbest uç sınır koşulunda meydana gelmiştir. Petek kiriş kesitinin boyutunun IPE220'den IPE240'a ve IPE300'e çıkarılması durumlarında artan rijitlik nedeni ile periyot değerleri düşmüş ve frekans değerlerinde her mesnetlenme türü için artış gözlenmiştir. Modlara ait genlik değerleri incelendiğinde tüm mesnet koşullarında, eğri eksenli petek kirişte en büyük genliklerin 10. modda ve elemanda kare ile beşgen boşluk kullanılması durumunda meydana geldiği, 6. veya 7. modda ise tüm durumlar için meydana gelen deplasman genlik değerlerinin bir anda düştüğü ve sonrasında tekrar artarak maksimum değere ulaştığı görülmektedir.

Yazar katkısı

Author contribution

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Al-Mawashee, H. S., & Al-Kannoon, M. A. A. (2021). Flexural strength of castellated beams with corrugated webs. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 1973*(1), 012213.
- ANSYS, (2022). *Inc Release Ansys R2*, Canonsburg, PA.
- Barkiah, I., & Darmawan, A. R. (2021). Comparative analysis of the flexural capacity of conventional steel beams with castellated beams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 780*(1), 012013.
- Braga, J. J., Linhares, D. A., Cardoso, D. C., & Sotelino, E. D. (2021) Failure mode and strength prediction of laterally braced Litzka-type castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research, 184*, 106796. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106796>
- Doori, S., & Noori, A. R. (2021). Finite Element Approach for the bending analysis of castellated steel beams with various web openings. *ALKU Journal of Science, 3*(2), 38-49, ISSN: 2667-7814. <https://doi.org/10.46740/alku.88318>
- Elaiwi, S., Kim, B., & Li, L. Y. (2017). Bending analysis of continuous castellated beams. *The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)*, 28, IIsan (Seoul), Korea.
- Jiang, L. Y., Liu, M. X., & Kang, L. Q. (2012). Studies on in-plane stability behavior of arches with web openings. *Applied Mechanics and Materials, 193*, 1296-1299. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.1296>
- Mechanical APDL Element Reference, (2013). *Inc 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317*.
- Mehetre, A. J., & Talikoti, R. S. (2020). Effect of fillet radii on moment carrying capacity of sinusoidal web opening castellated steel beams in comparison with hexagonal web openings. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 44*(1), 151-161. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00378-w>
- Morkhade, S. G., Lokhande, R. S., Gund, U. D., Divate, A. B., Deosarkar, S. S., & Chavan, M. U. (2020). Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Asian Journal of Civil Engineering, 21*(6), 1067-1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y>
- Nabil, A., Afefy, H. M., & Kassem, N. M. (2022). Ultimate capacity of reinforced concrete castellated beams subjected to external pre-stressing. *Engineering Structures, 250*, 113471. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113471>
- Pandey, D., & Rathour, T. S. (2021). Numerical analysis and validation with experimental method of castellated steel beams with hexagonal web opening. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 4*(3), 66-69.
- Pandya, S., & Dhankot, M. (2017). FE analysis of curved castellated girder for variable thermal condition. *International Conference on Research and Innovations in Science, Engineering and Technology. Kalpa Publications in Civil Engineering, 1*, 192-197.

- Rajana, K., Tsavdaridis, K. D., & Koltsakis, E. (2020). Elastic and inelastic buckling of steel cellular beams under strong-axis bending. *Thin-Walled Structures*, 156, 106955. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106955>
- Singh, S. (2021). Static bending analysis of arbitrary supported steel beams with circular web opening using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3700-3705. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.158>
- Subramanian, R., & Jagadeesan, K. (2021). Experimental analysis and study on shear performances of castellated beam chassis under three cases of stiffener. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.11907>
- Weidlich, C. M., Sotelino, E. D., & Cardoso, D. C. (2021). An application of the direct strength method to the design of castellated beams subject to flexure. *Engineering Structures*, 243, 112646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112646>
- Zaher, O. F., Yossef, N. M., El-Boghdadi, M. H., & Dabaon, M. A. (2018). Structural behaviour of arched steel beams with cellular openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 756-767. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.029>