

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi

Duygu ERTÜRKMEN*¹ ORCID 0000-0002-7073-6465
Ahmad Reshad NOORİ² ORCID 0000-0001-6232-6303

¹Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin
²İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 03.01.2023 Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ERTÜRKMEN, D., NOORİ, A.R., (2023). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 73-83.

Öz

Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışı, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, gövde boşluk geometrisinin petek kirişlerin yer değiştirme ve gerilme değerlerine etkisinin detaylı bir şekilde araştırılmasıdır. Analizlerde daire, kare, beşgen ve altıgen olacak şekilde 4 farklı gövde boşluk tipi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile model kurulurken 10 düğümlü tetrahedral tipi sonlu eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzeme lineer izotropik ve homojen olup, çeliğin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Sınır koşulları ankastre – ankastre, ankastre – basit ve ankastre – serbest olarak ele alınmıştır. Sonuçlar, IPE220 ve IPE300 profillerinden oluşan daire eksenli petek kirişler için detaylı bir şekilde sunulmuştur. Yapılan tahkiklere göre gövde boşluk tipinin, bu tür yapı elemanlarının yer değiştirme değerleri, von-Mises gerilmeleri ve maksimum asal gerilme değerleri üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, Eğri eksenli kirişler, Eğilme davranışı, Gerilme analizi, Statik analiz

Bending Analysis of Curved Castellated Beams Via the Finite Element Method

Abstract

In this study, the static behavior of curved castellated beams is investigated via the three-dimensional finite element method. The main purpose of the study is to investigate the effect of the geometry of the web opening on the displacement and stress values of the castellated beams in detail. In the analysis, 4 different web opening types circle, square, pentagon, and hexagon are used. To generate the models via the finite element method a 10-node tetrahedral type finite element is implemented. The material used in this study is linear isotropic homogeneous and the mechanical properties of steel are used. Fixed – fixed, fixed – pinned and fixed – free are considered as boundary conditions. The results are presented in detail

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Duygu ERTÜRKMEN, derturkmen@mersin.edu.tr

for circular castellated beams made up of IPE220 and IPE300 profiles. Based on the results, it is seen that the type of web opening has a significant effect on the displacements, von-Mises stresses, and maximum principal stress values of the considered structures.

Keywords: Finite element method, Curved beams, Bending response, Stress analysis, Static analysis

1. GİRİŞ

Betonarme elemanlar ile geçilemeyecek geniş açıklıkların mevcut olduğu yapı sistemlerinde, söz konusu açıklıkların geçilmesinde çelik taşıyıcı elemanların kullanımı büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Çelik taşıyıcı elemanlar, sadece geniş açıklıkların geçilmesinde değil, küçük açıklıklı yapı sistemlerinde de oldukça ekonomik bir tercih olmaktadır. Stadyum, spor salonu, alışveriş merkezi gibi geniş alanlara sahip yapılarda çelik kirişlerin kullanımı son derece yaygındır. Geniş gövde yüksekliğine sahip, dairesel veya altıgen boşluklu olarak planlanmış petek kiriş olarak da adlandırılan bu çelik kirişler kullanıldıkları mekana dayanım ve ekonomi yönünden katkı sağlamalarının yanı sıra estetik yönden de ayrı bir güzellik katmaktadır.

Çelik kiriş profillerinin ortalarında petek şeklinde bırakılan boşluklardan ismini alan bu petek kirişler, ekonomik ve hafif olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Genellikle H ve I profil türlerinin gövdeleri boyunca zikzaklı olarak kesilip, kesilen iki parçanın kesilmiş yüksek uçları birbirine denk getirilerek kaynaklanması sureti ile birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkarlar. Petek kirişlere en sık çatı açıklıklarında rastlanmaktadır.

Petek kirişler, yüksek gövdeleri sayesinde yapının düşey eğilme rijitliğini arttırmaları, aynı ağırlıktaki diğer kesit türlerine göre atalet momentlerinin, dolayısı ile rijitliklerinin fazla olması, yarattıkları boşluk alanlarının içerisinde her türlü tesisatın geçmesine olanak sağlaması ve bu sayede yerden tasarruf sağlamaları ve diğer kiriş türlerine nazaran kullanılmış oldukları yapılara daha estetik ve şık bir görünüm katmaları sebebiyle tercih edilmektedirler.

Jiang ve arkadaşları, [1] tarafından yapılan çalışmada, üzerinde yayılı yük bulunan iki

ucundan basit mesnetli, eğri eksenli, altıgen delik açıklıklı petek kirişler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları burkulma yükü ve burkulma modları bakımından değerlendirilmiş ve burkulma yükünün açıklıkların dairesel yarıçap değeri arttıkça kademeli olarak azaldığı, açıklıklar arasındaki boşluk değeri arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır.

Elaiwi ve arkadaşları, [2] yaptıkları çalışmada, gövde boşluklarının petek kirişlerin enine şekil değiştirmesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, değişken başlık genişlikli, çeşitli uzunluktaki iki açıklıklı sürekli kirişler yayılı yük etkisinde analiz edilmiştir. Çalışmalarında petek kirişlerin sehimi üzerinde gövdede oluşan kesme kuvvetlerinin etkisinin de dikkate alınması gerektiğini savunan araştırmacılar, kesme etkisinin göz ardı edilmesinin sehimin olduğundan az elde edilmesine yol açacağını savunmuş ve gövdedeki kesme kuvvetlerinin kirişin sehimi üzerindeki etkisinin, petek kirişin uzunluğu arttıkça azaldığı sonucuna varmışlardır.

Pandya ve Dhankot, [3] iki ucundan basit veya ankastre mesnetli eğri eksenli dairesel boşluklu çelik petek kirişlerin Sonlu Eleman Analizine odaklanmıştır. Çalışmalarında eğri eksenli çelik kirişlerin üzerindeki deliklerin açılma çapı değerleri ve kiriş yüksekliğinin kirişin davranışı üzerindeki etkisi farklı sıcaklık dereceleri de dikkate alınarak incelenmiştir. Kirişin açıklığı ile orantılı değişken eğrilik dereceleri için çeşitli derinlik-açıklık çap oranları ele alınarak kemerli petek kiriş üzerinde parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan sonlu eleman çalışması sonuçlarından, açıklık boyutu arttıkça kirişin orta açıklığında meydana gelen sehimin arttığı sonucu ortaya çıkmıştır. Açıklık/yükseklik oranı 7'den 6'ya düşürüldüğünde, gerilmelerde ani bir azalma olduğu da gözlemlenmiştir.

Zaher ve arkadaşları, [4] çalışmalarında eğri eksenli petek kirişlerin deneysel performansını incelemiştir. Çalışma kapsamında, iki tarafından basit mesnetli desteklere sahip eğri eksenli I kesitli dairesel boşluklu dört adet numune, orta açıklıklarına uygulanan düşey tekil yük altında test edilmiştir. Deneysel araştırmada ele aldıkları dört numunede yay uzunluğu, yay yüksekliği, alt açılar ve eğrilik yarıçapları gibi değerler değişken tutularak numunelere ait maksimum taşıma gücü değerleri, sehim değerleri ve göçme modları araştırılmıştır. Deneysel çalışmaya ek olarak, eğri eksenli çelik petek kirişlerin davranışını analiz etmek için bir sonlu eleman modeli önerilmiş ve önerilen modelin deneysel sonuçları doğruladığı belirtilmiştir.

De Oliveira ve arkadaşları, [5] başlık ve gövde kesiti arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak, eğilme etkisine maruz kalan petek kirişlerin kritik elastik yerel burkulma gerilmelerinin tahmini için açık denklemlerin geliştirilmesini sunmaktadır.

Chang ve arkadaşları, [6] tarafından yapılan çalışmada, petek kirişe benzer görünüme sahip, gövdesi boyu boyunca çelik sekizgen boşluklardan oluşturulan yeni bir çelik kiriş tasarımı ele alınmıştır. Çelik sekizgen gövdeli boşluklu kirişin, eğilme yükleri altındaki mekanik özellikleri teorik olarak analiz edilmiştir.

Jia ve arkadaşları, [7] basit mesnetli altıgen boşluklu düzlemsel petek kirişleri yanal destekli ve yanal desteksiz olacak şekilde ortasından tekil yük uygulamak sureti ile test etmişlerdir. Deneysel çalışmaya ek olarak sonlu eleman analizi yoluyla, petek kirişlerin farklı düzenlemelerinin altıgen delikli petek kirişlerin göçme modu, yerel burkulma ve genel performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Mehetre ve Talikot, [8] sinüs eğrisi şeklinde zikzaklar oluşturularak kesilip tekrar birleştirilmiş boşluklu petek kirişlerin dört nokta eğilme yüklemesi etkisindeki davranışlarını altıgen boşluklu petek kirişlerin davranışları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada, altıgen boşlukların köşelerinde oluşan kayma gerilmelerinin

yoğunluğundan dolayı, kirişin göçmesini önlemek ve ayrıca maksimum moment taşıma kapasitesinin değişimini incelemek için sinüzoidal bir açıklık olarak yeni bir gövde boşluk şekli denenmiştir.

Morkhade ve arkadaşları, [9] toplamda 15 adet değişik geometrik şekillerde boşluklar kullanılarak oluşturulmuş çelik petek kirişlerin farklı boşluk derinliklerine göre hem deneysel hem de doğrusal olmayan analizini ele almışlardır. Kullandıkları boşluk şekilleri kenarları yuvarlatılmış biçimde kare, altıgen, sekizgen ve daire şeklinde olup boşluk çap ve yükseklik değerleri kesit yüksekliğinin belli oranları kadar değişken tutularak hazırlanmış ve analizlerde o şekilde dikkate alınmıştır.

Waryosh ve Ali, [10] beş adet basit mesnetli altıgen boşluklu kompozit petek kiriş oluşturmuş, boşluk boyutlarının kompozit geopolimer beton petek kirişlerin davranışı ve mukavemeti üzerindeki etkilerini, tam etkileşimli ve (%70) kısmi etkileşimli statik yükler altında incelemiştir. Çalışmada ele alınan çelik petek kirişlerin gövdedeki deliklerinin açılma şekli altıgen olup, gövde alanından açılma boyutuna göre %35 ve %70 olarak farklı oranlardadır.

Rajana ve arkadaşları, [11] çeşitli geometrik parametrelerin etkisini araştırmak ve ayrıca sinir ağı tabanlı bir formülü doğrulamak ve geliştirmek için güçlü eksenel eğilmeye maruz kalan hücresel (delikli petek) kirişlerin elastik ve elastik olmayan burkulmasına ilişkin kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirmiştir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, delikli petek kirişlerin kritik elastik burkulma yükünün, basınç başlığının yanal hareketine karşılık geldiği, sonuçları etkileyen en kritik parametrelerin ise gövde kalınlığı ve başlık geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Xi ve Zhang, [12] çalışmalarında yerel gövde burkulmasına izin verilen I kesitli, gövde içinde dairesel boşlukları bulunan iki ucundan mafsallı eğri eksenli çelik petek kirişlerin düzlem içi stabilite analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir.

Abu-Sena ve arkadaşları, [13] 12 adet kısa ve uzun altıgen boşluklu olarak planlanmış petek kiriş-kolon elemanı üzerinde deneysel bir inceleme yapmıştır. Söz konusu petek kiriş-kolonlar, farklı yük eksantrikliği altında, elemanlar üzerindeki deliklerin kiriş-kolon mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için test edilmiştir. ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak test edilen petek kiriş-kolonun davranışı ve mukavemeti sayısal olarak da incelenmiştir. Al-Mawashee ve Al-Kannoon, [14] aynı uzunluktaki (1,7m) dört kiriş üzerinde, açıklık ortasında tek bir noktasal yük altında deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, yanal takviyeleri olan ve olmayan oluklu ağlara sahip iki petek kiriş ile ilgilidir. Deneylerdeki en önemli değişken, kirişlerin toplam yüksekliğidir. Düz ve oluklu ağ kirişlere kıyasla delikli-oluklu ağ kirişlerin nihai yük kapasitesi karşılaştırılmıştır. Anbarasu ve arkadaşları, [15] boşluklu petek kiriş uygulamasının kare en kesitli sıcak haddelenmiş çelik boru kirişlerin eğilme mukavemeti ve rijitliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla 8 adet boşluklu boru kesit numune oluşturmuş ve deneysel olarak ortasında tekil bir yük olacak şekilde basit eğilme altında test etmişlerdir.

Barkiah ve Darmawan, [16] kesit ortasında bırakılan boşluğun dolu kesitli çelik kirişlere kıyasla altıgen delikli petek kirişlerin eğilme kapasiteleri üzerindeki etkisini elde etmek amacıyla ANSYS programını kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Braga ve arkadaşları, [17] yanal olarak desteklenmiş kompozit olmayan Litzka tipi petek kirişlerin göçme modlarını sonlu eleman simülasyonları kullanarak araştırmış, kirişi oluşturan parçaların davranışa karşılıklı etkisini, bireysel modların etkileşimi ve burkulma sonrası dayanım rezervi gibi hususları değerlendirmiştir. Doori ve Noori, [18] farklı gözenekli petek kirişlerin statik davranışını incelemiştir. Benzer üniform yayılı yük ve sınır şartları etkisinde, hangi kiriş tipinin daha iyi performans gösterdiğini belirlemek için ABAQUS programı yardımıyla kirişlerin sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Pandey ve Rathour, [19] 25 adet farklı başlık genişliği ve gövde yüksekliğindeki I profilden

çelik kirişlere ait sonlu eleman analiz sonuçlarını incelemiştir. Analizlerde en çok zorlanan bölgenin gövde ortaları olduğu ve bu kısmın yüksekliğinin artırılması ile oluşacak sehim değerlerinin azalacağı sonucuna varılmıştır. Singh, [20] gövde ortasında profil yüksekliğinin yarısı çapında dairesel bir boşluk bulunan 20 adet farklı sınır koşullarında tanımlanan kirişin düzgün yayılı yük altındaki sonlu eleman analizini ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirerek kirişlere ait gerilme ve deformasyon değerlerini incelemiştir.

Subramanian ve Jagadeesan, [21] petek kirişlerde kesme mukavemetinin artırılmasını sağlamak amacı ile I profilleri zikzak şeklinde kesip sonrasında uç bölgelerinden kaynaklamak sureti ile birleştirerek oluşturdukları altıgen boşluklu petek kirişlerin kesme kuvvetlerinin yoğun olarak kiriş mukavemetini etkilediği bölgelerde rijitliği artırıcı çapraz çubuk elemanlar ve düşey elemanlar kullanarak deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. Weidlich ve arkadaşları, [22] petek kirişlerin yanal burkulma ve basınç altındaki yerel burkulma modları arasındaki etkileşimi araştırmıştır. Geliştirdikleri yöntemi, mevcut standart yöntemlerle karşılaştırmış ve sonuçların önerilen denklemin özellikle göçme modlarının kirişin davranışına hakim olduğu durumlarda dayanım değerlerini daha gerçekçi bir şekilde verdiğini belirtmişlerdir.

Nabil ve arkadaşları, [23] altıgen açıklıklara sahip betonarme petek kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Kirişlerin maksimum taşıma kapasitesini tahmin etmek için petek kiriş yüksekliği ve açıklık boyutları üzerinde sayısal olarak bir parametrik çalışma yapmışlardır.

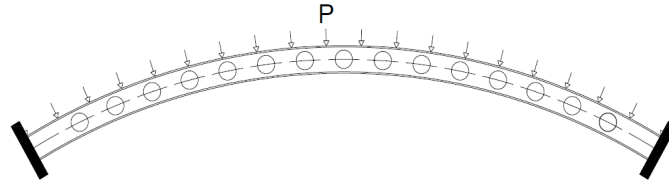
Yazarların bilgisine göre, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin eğilme davranışına etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz eden herhangi bir çalışma ile literatürde karşılaşmamıştır. Bu çalışmada, düzgün yayılı yük etkisine olan daire eksenli petek kirişlerin eğilme davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar ile araştırılmıştır. Araştırmada farklı sınır koşullarının ve ele alınan petek kirişlerin gövdesinde açılan delik geometrisinin (kare, daire, beşgen ve altıgen) yer değiştirmeler

ve gerilmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Şekil 1'de verilen eğri eksenli sisteme düzgün yayılı yük ekti etmektedir. Bu sistem için ankastre

– ankastre, ankastre – basit ve ankastre – serbest olmak üzere üç farklı sınır koşulu dikkate alınmıştır. İzotropik homojen malzemeden yapılmış olan bu yapının malzeme özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur.



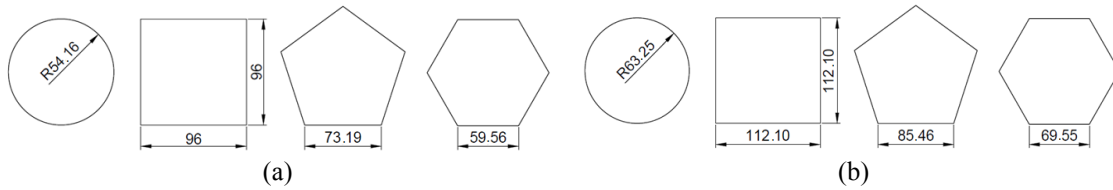
Şekil 1. Eğri eksenli petek kiriş geometrisi

Çizelge 1. Malzeme özellikleri

Elastisite modülü (Pa)	Poisson oranı	Hacim modülü (Pa)	Kayma modülü (Pa)
2E+11	0,3	1,667E+11	7,692E+10

Bu çalışmada, farklı boşluk geometrisine sahip eğri eksenli petek kirişlerin zamandan bağımsız statik yükler etkisindeki davranışı sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Workbench [24] ile analiz edilmiştir. Analizlerde IPE220 ve IPE300 profilleri kullanılmış olup, bu kirişler için gövde boşluklarının geometrik özellikleri Şekil 2'de sunulmuştur.

Şekil 2'de verilen boşluk tiplerinin geometrik ölçüleri toplam boşluk alanı eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Ele alınan daire eksenli petek kirişin uzunluğu 3 metre, yay açısı 60° ve yarıçapı ise 2.865 metre olarak dikkate alınmıştır. Tüm durumlarda boşluk sayısı 15 adet ve boşluklar arası mesafe (α) ise 0,18 metredir, mesnet ile kenar boşluğu arasındaki uzunluk (β) 0,24 metre olarak tayin edilmiştir. Bu özellikler Çizelge 2'de özetlenmiştir.



Şekil 2. Gövde boşluk geometrisi (a) IPE220 ve (b) IPE300 kesitleri için

Çizelge 2. Geometrik özellikler

Model	Profil tipi	Gövde boşluk tipi	Boşluk alanı (mm ²)	α (m)	β (m)	Boşluk sayısı
I	IPE220	Daire	9216	0,18	0,24	15
II	IPE220	Kare	9216	0,18	0,24	15
III	IPE220	Beşgen	9216	0,18	0,24	15
IV	IPE220	Altıgen	9216	0,18	0,24	15
V	IPE300	Daire	12566.41	0,18	0,24	15
VI	IPE300	Kare	12566.41	0,18	0,24	15
VII	IPE300	Beşgen	12566.41	0,18	0,24	15
VIII	IPE300	Altıgen	12566.41	0,18	0,24	15

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS Workbench ile analiz yaparken, SOLID187 elemanı kullanılmıştır. Bu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu eleman 10 adet düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktasında 3 adet serbestlik derecesi vardır. Elemandaki serbestlik dereceleri x , y ve z eksenleri yönünde ötelenmelerden oluşmaktadır. Bu elemanın teorisi, yapılan kabuller ve kısıtlamalar ANSYS programının teorileri kaynağında [25] mevcuttur. Mesnet sınır koşullarını tanımlamak için, ankastre mesnet için programın ara yüzünde bulunan “Fixed” koşulu kullanılmıştır. Basit mesnet için ise “Remote Displacement” komutu kullanılarak dönme değerleri sıfır olarak girilmiştir. Serbest uç için ise herhangi bir sınır şartı girilmemiştir. Bu çalışmada düzgün yayılı yükler Pa cinsinden girilmiştir. Bu çalışmada, sistemlerin sonlu eleman ağını oluştururken programın “Mesh” ayarlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Her bir durum için eleman ve düğüm noktası sayısı Çizelge 3’te sunulmuştur.

Çizelge 3. Sonlu eleman ağı özellikleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı
I	5655	12943
II	4835	10331
III	4515	10027
V	4886	11067
V	4379	9661
VI	4388	9521
VII	4748	10378
VIII	4968	11019

Maksimum asal gerilmeler ve von-Mises gerilmeleri, ele alınan yapı elemanlarının kırılma varsayımları hakkında fikir edinebilmek için incelenmiştir. Literatürde von-Mises gerilmeleri (σ_v) için çeşitli bağıntılar verilmektedir. Bu çalışmada von-Mises gerilmesi asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) cinsinden verilmiştir [25].

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada, eğri eksenli petek kirişlerin statik analizi üç boyutlu sonlu elemanlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ANSYS Workbench paket programı kullanılmıştır. Boşluk tipi geometrisinin ele alınan yapı elemanların eğilme performansına etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu kapsamda, her bir profil için karşılaştırılan durumlarda kirişin uzunluğu, eğrilik yarıçapı, boşluk alanı ve boşluklar arasındaki mesafe eşit tutularak yalnız boşluk tipi değiştirilmiştir. Basınç kirişin üst başlığına uygulanıp, değeri 10 Pa olarak alınmıştır. Bu bölümde, öncelikle tüm modeller için elde edilen toplam yer değiştirme değerleri ele alınacaktır.

Çizelge 4. En büyük toplam yer değiştirme değeri (m) x 10^{-8}

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük toplam yer değiştirme değeri (m) x 10^{-8}
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	2,5894
		II	2,6473
		III	2,6117
		IV	2,5941
	IPE300	V	2,1664
		VI	2,2804
		VII	2,2127
		VIII	2,1751
Ankastre - Basit	IPE220	I	2,7910
		II	2,8180
		III	2,8165
		IV	2,7960
	IPE300	V	2,3532
		VI	2,4161
		VII	2,3853
		VIII	2,3577
Ankastre - Serbest	IPE220	I	306,400
		II	310,680
		III	307,710
		IV	306,480
	IPE300	V	166,610
		VI	172,280
		VII	168,220
		VIII	166,810

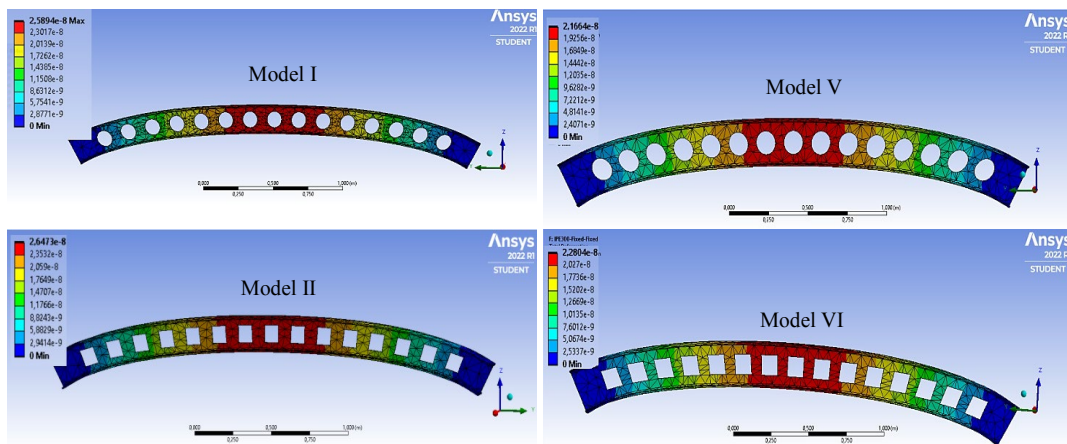
Elde edilen sonuçlar Ankastre – Ankastre sınır koşulu için Şekil 3'te gösterilmiş olup, diğer sınır koşulları için liste halinde Çizelge 4'te verilmiştir. Şekil 3 ve Çizelge 4 incelendiğinde tüm mesnet koşullarında, eğri eksenli petek kirişte en büyük yer değiştirmeler kare boşluk durumunda oluşmakta olup, en küçük toplam yer değiştirmeler ise dairesel boşluk kullanıldığı zaman meydana gelmektedir. Altıgen boşluk geometrisi kullanıldığında ise, toplam deplasman değerleri

daireysel boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonuçlarına yaklaşmaktadır.

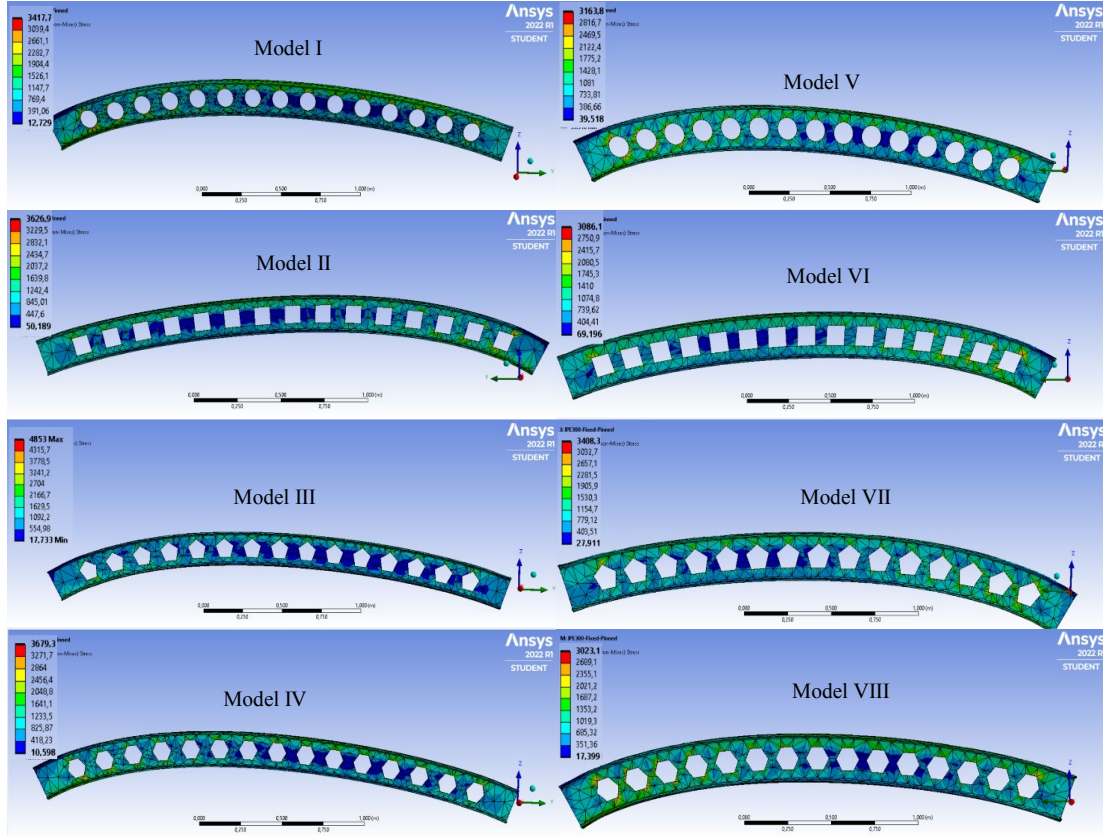
Çalışma kapsamında ele alınan tüm modeller için yapılan statik analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme değerleri ise Ankastre – Basit mesnet sınır koşulu için Şekil 4'te verilmiş olup, diğer tüm sınır şartları için hesaplanan minimum ve maksimum von Mises gerilme değerleri tablo halinde Çizelge 5'te incelemeye sunulmuştur.

Çizelge 5. von Mises Gerilme değerleri (Pa)

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük gerilme değerleri	En küçük gerilme değerleri
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	3551,9	3,6361
		II	3959,5	34,425
		III	4233,9	20,137
		IV	4153,2	8,2929
	IPE300	V	3250,8	15,025
		VI	3315,5	41,737
		VII	3549,1	15,525
		VIII	3122,7	27,206
Ankastre - Basit	IPE220	I	3417,7	12,729
		II	3626,9	50,189
		III	4853,0	17,733
		IV	3679,3	10,598
	IPE300	V	3163,8	39,518
		VI	3086,1	69,196
		VII	3408,3	27,911
		VIII	3023,1	17,399
Ankastre - Serbest	IPE220	I	26189	0,35321
		II	26255	1,2285
		III	30940	1,3505
		IV	30676	0,64518
	IPE300	V	24810	2,4311
		VI	25582	2,8404
		VII	27956	1,5756
		VIII	21549	1,5098



Şekil 3. Ankastre – Ankastre mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için toplam deplasman değerleri



Şekil 4. Ankastre – Basit mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için von-Mises gerilme değerleri

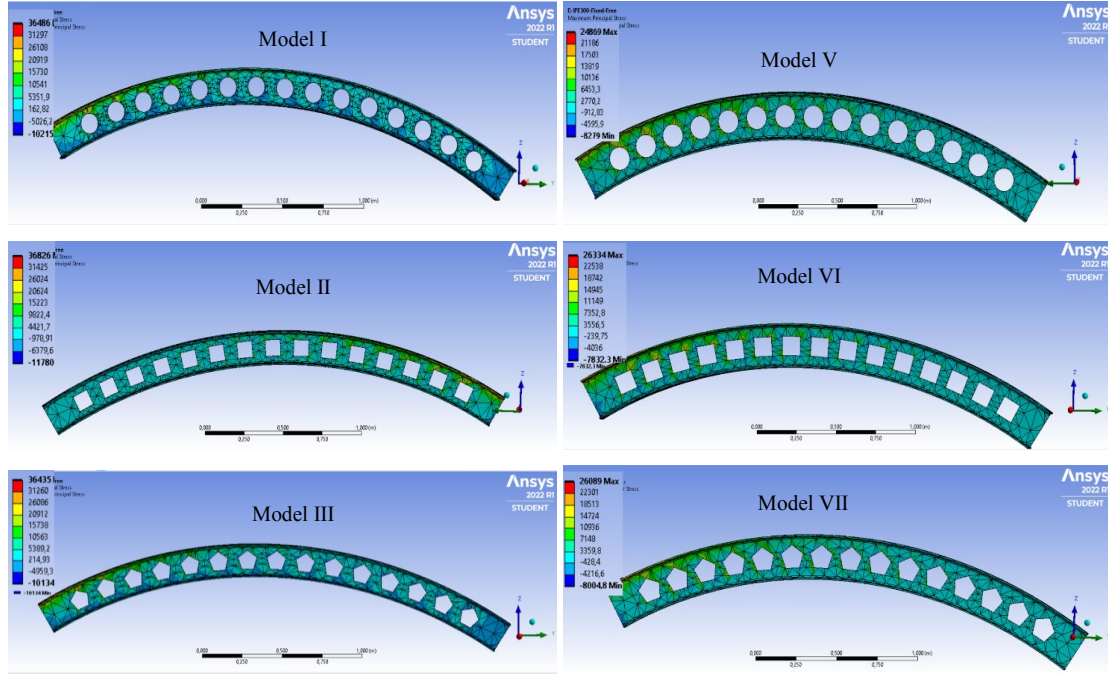
Şekil 4 ve Çizelge 5’te görüldüğü gibi IPE220 profili için en düşük von-Mises gerilme değerleri dairesel boşluk kullanıldığında meydana gelmektedir. IPE300 profili için ise, bu değerler altıgen boşluk kullanıldığında en küçük değerleri almaktadır.

Her iki profil için de beşgen boşluk tipi kullanıldığında von-Mises gerilmeleri en büyük değerleri almaktadır.

Gövde boşluk geometrisinin eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışına etkisinin daha iyi bir şekilde belirlenebilmesi için maksimum asal gerilme değerleri elde edilmiştir. Konsol kiriş için bu değerler Şekil 5’te verilmiştir. Ele alınan tüm mesnet koşulları için bu değerler Çizelge 6’da sunulmuştur.

Çizelge 6. Maksimum asal gerilme değerleri (Pa)

Mesnet koşulu	Profil	Model	En büyük gerilme	En küçük gerilme
Ankastre - Ankastre	IPE220	I	2059,6	-878,39
		II	2010,1	-941,91
		III	1917,2	-885,05
		IV	1644,8	-928,8
	IPE300	V	2644,2	-828,15
		VI	2159	-766,76
		VII	2880,4	-832,03
		VIII	2197,8	-833,77
Ankastre - Basit	IPE220	I	1580,8	-939,37
		II	1413,7	-925,28
		III	1467,9	-829,5
		IV	1276,3	-893,92
	IPE300	V	36486	-10215
		VI	1837,9	-770,39
		VII	2461,1	-821,05
		VIII	1888,6	-838,1



Şekil 5. Ankastre – Serbest mesnetli eğri eksenli petek kirişleri için maksimum asal gerilme değerleri

Çizelge 6 ve Şekil 5 incelendiğinde, Ankastre – Ankastre ve Ankastre – Basit mesnet durumlarında IPE200 profili için maksimum asal gerilme değerleri gövdesinde altıgen boşluk olan eğri eksenli petek kirişlerinde en düşük değerleri almaktadır. IPE 300 profili için ise en küçük maksimum asal gerilme değerleri kare tipi boşluk kullanıldığında oluşmaktadır. Konsol kiriş durumunda, en küçük maksimum asal gerilme IPE200 profili için beşgen ve IPE300 profili için dairesel boşluk kullanıldığında oluşmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, boşluk tipinin eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışına etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. Ele alınan yapı elemanlarının üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri kurulmuştur. Dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere dört adet farklı boşluk tipi kullanılmıştır. IPE200 ve IPE300 profillerinden yapılmış olan daire eksenli petek kirişlerin statik analizi gerçekleştirmek için

ankastre – ankastre, ankastre – basit, ve ankastre – serbest sınır koşulları kullanılmıştır. Çalışmanın önemli sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Maksimum toplam yer değiştirme değerleri kare boşluklu eğri eksenli petek kirişlerinde oluşurken, en küçük toplam yer değiştirme değerleri dairesel boşluk tipi kullanıldığında meydana gelmektedir. Gövdesinde altıgen boşluk bulunan petek kirişlerin toplam yer değiştirme değerleri dairesel boşluklu duruma yaklaşmaktadır. Beklendiği gibi en büyük toplam yer değiştirmeler ankastre–serbest durumunda oluşmuştur. Von-Mises ve maksimum asal gerilme değerlerine, boşluk tipinin yanı sıra profil tipi ve mesnet koşulları da etki etmektedir. IPE220 ve IPE300 profilleri için en büyük von-Mises gerilme değerleri beşgen boşluk kullanıldığında meydana gelmektedir. IPE 220 profili için maksimum asal gerilme değerleri, gövdesinde dairesel boşluk olan eğri eksenli petek kirişlerinde en büyük değerleri almaktadır. IPE 300 profili için ise en büyük maksimum asal gerilme değerleri beşgen tipi boşluk kullanıldığında oluşmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. 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*, 193-194, 1296-1299.
2. 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)*, IIsan (Seoul), Korea, 28 August- 1 September 2017.
3. 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.
4. 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.
5. Oliveira, J.P., De, Cardoso, D.C.T., Sotelino, E.D., 2019. Elastic Flexural Local Buckling of Litzka Castellated Beams: Explicit Equations and FE Parametric Study. *Engineering Structures*, 186, 436-445.
6. Chang, S., Yang, M., Tian, L., Yuan, P., 2020. Bending Behavior of Steel Octagon-Web Beam. *Advances in Structural Engineering*, 23(12), 2694-2708.
7. Jia, L.G., Bi, R., Lang, Y.X., Li, X.F., 2020. Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Castellated Beam with Hexagonal Holes. *Advanced Steel Construction*, 16(3), 233-245.
8. 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.
9. 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.
10. Waryosh, W.A., Ali, A.S., 2020. Effects of Web Opening Size on the Behavior of Castellated Concrete Geopolymer Composite Beam. *International Journal of Latest Engineering Research and Applications (IJLERA)*, ISSN: 2455-7137, 05(05), 17-28.
11. 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.
12. Xi, K., Zhang, Y., 2020. Design Method of Compression-Bending Arches with Web Openings Considering Local Buckling of Web. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, 1676(1), 012116.
13. Abu-Sena, A.B.B., Fares, M.W., El-Tobgy, H.H., 2021. Experimental and Numerical Investigation of the Behavior of Castellated Steel Beam-Columns. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 10(4), ISSN: 2277-8616.
14. 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.
15. Anbarasu, M., Pandey, A.K.P.K., Patton, M.L., Carvalho, H., 2021. Testing and Modelling of Hot-Rolled Steel Castellated Hollow Tubular Beams. *Structures*, 34, 4025-4040.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. 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.
20. 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.
21. 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*, DOI:10.36909/jer.11907.
22. 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.
23. 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.
24. ANSYS, Inc Release Ansys 2022 R2, Canonsburg, PA, 2022.
25. Mechanical APDL Element Reference, 2013, Inc., 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.

