

## Eğilmeye Maruz Tüp Kesitli Uzay Kafes Kirişlerde Geometrinin ve Diyagonallerin Yapısal Davranış Üzerindeki Etkisi

Muhammet Zeki ÖZYURT\*

*İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye*  
\* Muhammet Zeki ÖZYURT: ozyurt@sakarya.edu.tr

**Özet** –Uzay kafes sistemler; binaların, endüstriyel fabrikaların, karayolu ve demiryolu köprülerinin, anten direklerinin, enerji nakil hatlarının, kıyı platformlarının ve uzay yapıların inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay kafes sistemler yardımıyla daha büyük açıklıkları, düzlem kafes ve dolu gövdeli kirişlere göre daha küçük kesitlerle geçmek mümkündür. Bu çalışmada halka kesitli çubuklardan oluşan, dikdörtgen kesitli tübüler uzay kafes kirişlerin elastik analizi yapılarak davranışı incelenmiştir. Çalışmanın amacı, pratik bir analiz için uzun hesaplamalara gerek kalmadan faydalı bilgiler vermek ve ayrıca sistemin elastik bölgedeki davranışı hakkında detaylı bilgi edinmektir. Uzay kafes kirişlerin kayıcı ve sabit olmak üzere iki farklı mesnetlenme durumu dikkate alınmıştır. Eğilme yüklemeleri altında uzay kafes kirişlerin elastik analizleri yapılmıştır. Elastik analizde, incelenen uzay kafes kirişlerin eğilme yüklemesi durumunda orta en-kesitteki çökmeleri bulunarak, çökme-açıklık ( $\delta-L$ ) diyagramları çizilmiştir. Analizden elde edilen sonuçlar üzerinde; düğüm noktalarındaki birleşimin mafsallı veya rijit olmasının, uzay kafes kirişin dikme aralığının ve uzay kafes kirişin en-kesit genişliğinin, çapraz diyagonallerin kesişip kesişmemesinin, basınç diyagonallerinin bulunup bulunmamasının ve mesnetlenme durumlarının etkileri araştırılmıştır.

*Anahtar Kelimeler* –Uzay kafes kiriş, Elastik analiz, Eğilme, Yapısal davranış, Rijit düğüm noktası

## The Effect of Geometry and Diagonals on Structural Behavior in Tube Section Space Truss Beams Subjected to Bending

**Abstract** –Space truss systems; It is widely used in the construction of buildings, industrial factories, highway and railway bridges, antenna masts, power transmission lines, coastal platforms and space structures With the help of space truss systems, it is possible to pass larger spans with smaller cross-sections than plane trusses and full-bodied beams. In this study, elastic analysis of tubular rectangular space trusses consisting of hollow bars have been carried out. The aim of the study is to provide useful information for practice without the need for long calculations and also to obtain detailed information about the behavior of the system in elastic region. Space trusses are considered under two different support conditions as roller and hinged. Elastic analysis of the space trusses have been carried out under bending. In elastic analysis, under bending; deflection at middle of span have been calculated. According to these values, deflection-span ( $\delta-L$ ) diagrams have been drawn. The effects of pinned or rigid joint connections assumptions, vertical bar spacing, the size of the cross-section of space truss beams, the case that whether X-braced diagonals intersect each other or not, the case that whether compression diagonals exist or not and support conditions on the results of elastic analysis are investigated.

*Keywords* – Space truss beam, Elastic analysis, Bending, Structural behaviour, Rigid joint

### I. GİRİŞ

Uzay kafes çatı sistemler, doğru eksenli çubuklar ile bunların birleştiği mafsallı düğüm noktalarından oluşan üç boyutlu taşıyıcı sistemlerdir. Çok büyük açıklıkları örtmek için düzenlenen, bütün elemanları birbirine bağlı bu sistemler her doğrultuda bir bütün olarak çalışan 'üç boyutlu kafes' şeklinde de tanımlanır.

Bu çalışmada; dikdörtgen kesitli tübüler uzay kafes kirişin geometrisinin (dikme aralığı, en-kesit genişliği, yükseklik ve açıklık), düğüm noktalarının rijit ve mafsallı olarak kabulünün ve diyagonallerin kesişip kesişmemesi ile basınç diyagonallerinin bulunup bulunmamasının etkisi

araştırılmıştır. Çubukları halka kesitli olarak seçilen uzay kafes kirişlerin elastik analizi yapılarak davranışı incelenmiştir.

M. Noor, N. Topaloğlu, M. Temşi, H.T. Türker tarafından yapılan çalışmada, tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde, yaygın geometrik kusurlardan biri olan başlangıç eğrilik kusurunun mevcut olması durumunda, bu kusurun sistemin yük taşıma kapasitesine etkisini incelenmiştir. [1]. Çalışmada, elemanların tasarım hesabı “Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT)” yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Avent ve Issa [2], yaptıkları çalışmada çapraz diyagonalli kafes kirişlerin birim yer değiştirme sabitlerini bulmuşlardır.

Bu yer değiştirme sabitleri, doğrusal elastik kirişlerin analizinde kesin sonuçlar vermektedir. Belli açıklık değerleri için, elde edilen birim yer değiştirme sabitlerinin yaklaşık çözümlere göre değişimi araştırılmıştır.

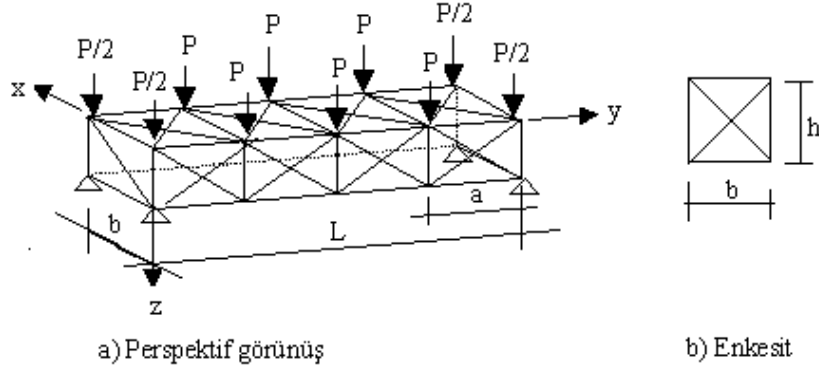
Kırgız tarafından [3] yapılan çalışmada, üzerindeki çevre koşullarını da dikkate alarak kafes sistemlerin statik analizini yapan bir bilgisayar programı sunulmuştur. Optimizasyon ve grafik teknikleri uygulanarak örnek bir yapı üzerinde yapılan çözümler sonucunda, düzlem ve uzay kafes kirişler için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ökten ve Kasap [4] tarafından yapılan çalışmada halka kesitli çubuklardan oluşan kare kesitli tübüler uzay kafeslerin

elastik analizleri yapılmıştır. Analizde; açıklığın, iç diyagonallerin, değişik mesnetlenme durumlarının, dikme aralığının ve çubuk en kesit alanlarının çökme, dönme ve açı değişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## II. MATERYAL - METOT

İncelenen tübüler uzay kafesler halka kesitli çubuklardan oluşmaktadır. İç diyagonallerin bulunup bulunmaması, basınç diyagonallerinin bulunup bulunmaması ve çapraz diyagonallerin kesişmesi veya kesişmemesi gibi çeşitli durumlar çalışmada ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. İncelenen uzay kafes kirişlere ait tipik bir örnek Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İncelenen Uzay Kafes Kirişlere Tipik Bir Örnek

Bu çalışmada ele alınan uzay kafes kirişleri oluşturan çubuklar, yaygın kullanımı nedeniyle halka kesitli olarak seçilmiştir. Çubukların malzemesi St 37 çeliğidir. İncelenen kafes kirişin geometrisi aşağıdaki gibi seçilmiştir:

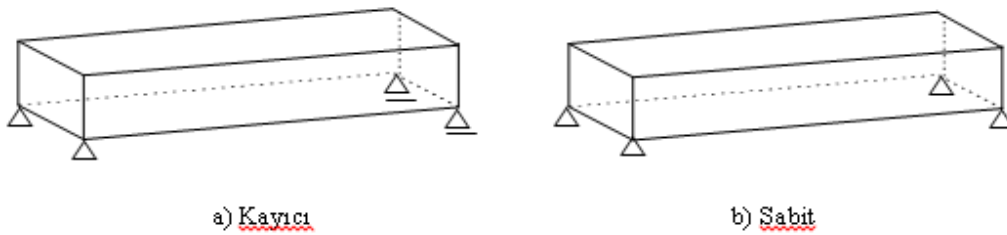
Tablo 1. Uzay kafes kirişin geometri değerleri.

Açıklık (L)	:	6 m; 9 m; 12 m; 15 m; 18 m
Kafes sistem genişliği (b)	:	0.75 m; 1.00 m; 1.50 m
Kafes kiriş yüksekliği (h)	:	1.00 m
Dikme aralığı (a)	:	0.75 m; 1.00 m; 1.50 m

Şekil 2’de gösterildiği gibi, uzay kafes kirişlerin kayıcı ve sabit olmak üzere iki farklı mesnetlenme durumu [5], [6] dikkate alınmıştır:

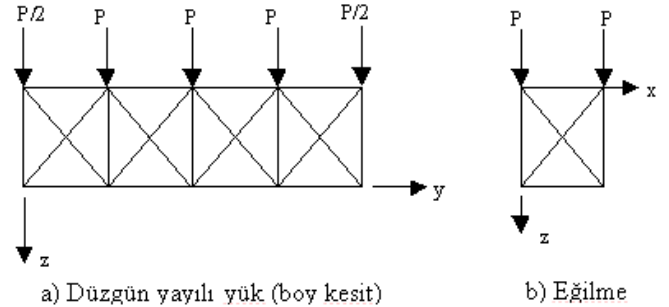
**Kayıcı Sistem:** Alt uçlarından dört noktada mesnetli olup, sağ uçtaki mesnetlerin her ikisi de her iki doğrultuda kayıcıdır. Sol uçtaki mesnetin biri sabit diğeri ise x doğrultusunda kayıcı, y doğrultusunda sabittir.

**Sabit Sistem:** Alt uçlarından dört noktada mesnetli olup, bu mesnetlerin tamamı her doğrultuda sabittir.



Şekil 2. Mesnetlenme durumları

**Yükleme durumları:** Uzay kafes kirişe yalnızca eğilme meydana getirecek şekilde yükleme uygulanmıştır (Şekil 3). Yükler başlıkların düğüm noktalarından uygulanan ve en kesitte iki eşit düşey yük oluşturan düşey yayılı yüklerdir.



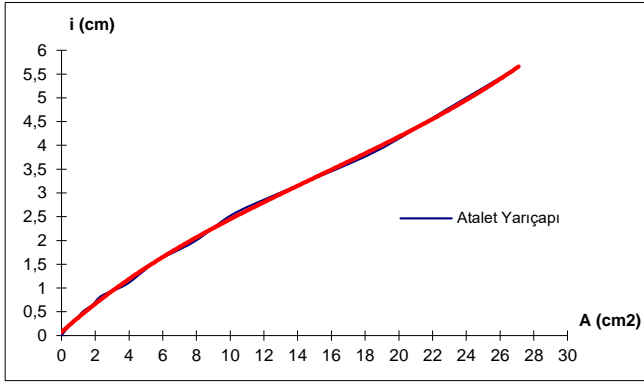
Şekil 3. Yükleme durumları

Bu çalışmada, matris-deplasman yöntemiyle hesap yapan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Çalışmada aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Düğüm noktaları ideal moment mafsallıdır (Ayrıca rijit düğüm noktalı durum için de inceleme yapılmıştır.).
- Yatay ve düşey düzlemlerde, kirişin en kesitlerinde, çapraz olarak bulunan diyagonaller birbirlerini kesmezler. Ayrıca, çapraz diyagonallerin birbirlerini kesip kesmeme durumları ile basınç diyagonallerinin bulunup bulunmama durumları ayrı ayrı dikkate alınmıştır.
- Çelik ideal elastik-plastik malzeme modeline uygun olarak şekil değiştirme ( $\sigma-\epsilon$ ) yapmaktadır.
- Çubuk en kesit alanları, teorik olarak herhangi bir değerde olabilir.
- Sistemin yanal burkulması yoktur.

Tanımlanan dikdörtgen kesitli tübüler uzay kafesler, üst başlıkların düğüm noktalarından eğilme oluşacak biçimde  $\Sigma P=180$  kN olan düşey yayılı yüklerle yüklenmiştir. Kafes kirişi oluşturan çubukların kesit alanları, eğilme yüklemesini güvenle taşıyacak biçimde boyutlandırılmışlardır.

Önce her bir çubuk grubu için (Çubuk grupları: dikmeler, enlemeler, üst başlıklar, alt başlıklar, yatay diyagonaller, düşey diyagonaller ve iç diyagonaller) farklı ve keyfi bir en-kesit değeri ve buna bağlı olarak  $i$  atalet yarıçapı seçilerek sistem bilgisayar programı ile elastik olarak çözülmüştür [14]. Keyfi bir en-kesit değerine ait atalet yarıçapının hesabı için standart "Çekme patent borular" a ait en-kesit-atalet yarıçapı tablosundan faydalanarak, uygun eğri geçirme yöntemiyle  $i$  eşitliği elde edilmiştir [15] (Şekil 4).



Şekil 4. Kesit alanı (A) - atalet yarıçapı (i) değişimi

$$i = 9 * 10^{-08} * A^5 - 7 * 10^{-06} * A^4 + 0.0004 * A^3 - 0.0116 * A^2 + 0.3195 * A + 0.0721 \quad (1)$$

Grup çubukların kesitleri elde edilen çubuk kuvvetlerine göre  $\sigma_{max} \cong \sigma_{em}$  olacak şekilde yeniden boyutlandırılmış ve sistem bu yeni boyutlara göre tekrar çözülmüştür.  $\sigma_{em} = 140$  N/mm<sup>2</sup> olup çubukların burkulma hesabı  $\omega$  sayıları yöntemiyle yapılmıştır. Bu ardışık yaklaşım işlemi tüm çubuk gruplarında  $139 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{max} < 141 \text{ N/mm}^2$  durumu elde edilinceye kadar sürdürülmüş, bu koşulu sağlayan grup çubuklara ait en kesit değerleri ilgili yüklem durumu için geçerli boyutlar olarak alınmıştır. Bu boyutlara göre kafes sistem çözüldüğünde, tüm çubuk gruplarında  $\sigma_{max} \cong \sigma_{em}$  olduğu için kafes kiriş bir dereceye kadar optimum olarak boyutlandırılmış olmaktadır [16], [17] ve [18].

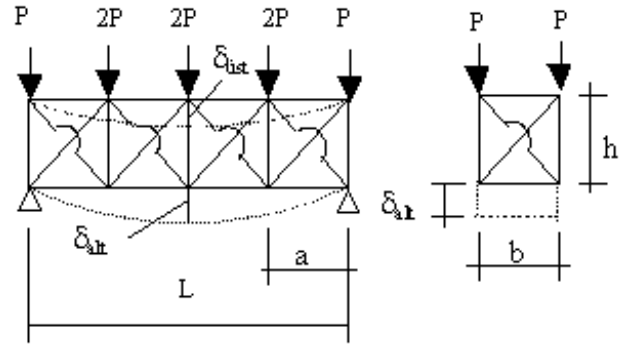
Dikdörtgen kafesin boyutlandırılması servis yükü için emniyet gerilmeleri yöntemiyle yapılmış olup, Elastisite modülü, E, 210000 N / mm<sup>2</sup> olarak alınmıştır.

### III. ANALİZ SONUÇLARI

Uzay kafes kirişler boyutlandırılırken aynı zamanda hizmet yükleri altında düğüm noktalarının yer değiştirmeleri de elde edilmiştir. Eğilme etkisinde kalan kirişin orta en-kesitinin alt noktalarındaki çökmeler,  $\delta_z$  (Şekil 5) Tablo 2-6'da verilmiştir.

Bu değerler yardımıyla her bir sistem için ayrı ayrı çökme-açıklık ( $\delta-L$ ) eğrileri çizilmiştir (Şekil 6-10). Eğrilerde çökmeler ( $\delta$ ) düşey ekseninde, açıklıklar (L) yatay ekseninde gösterilmiş olup, çökmeler uzay kafes kirişin orta en-kesitinin alt noktasındaki düşey yer-değiştirme ( $\delta_{alt}$ ) olarak alınmıştır.

Elde edilen sonuç çökmeler ve bu değerler yardımıyla çizilen çökme-açıklık ( $\delta-L$ ) eğrileri; uzay kafes kirişin düğüm noktalarındaki birleşimin rijit veya mafsallı olması, dikme aralığının ve en-kesit genişliğinin değişmesi, basınç diyagonallerinin bulunup bulunmaması, çapraz diyagonallerin kesişmesi veya kesişmemesi durumları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



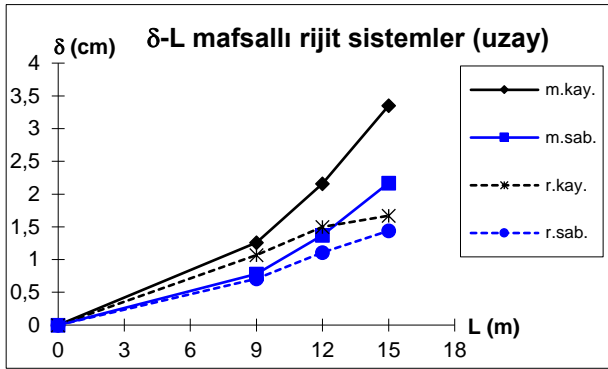
Şekil 5. Eğilme yüklemesine maruz uzay kafes kiriş

#### A. Düğüm Noktalarındaki Birleşimin Rijit veya Mafsallı Olması Durumları

Kafes kirişlerin çözümünde genellikle düğüm noktalarının mafsallı olarak birleştiği varsayırsa da uygulamada, düğüm noktalarının birleşiminde çubukların birbirine kaynaklanması veya bulonla birleştirilmesi neticesinde düğüm noktaları kısmen veya tamamen rijit olmaktadır [21]. Bu durumda uzay kafes kirişin orta en-kesitindeki çökmenin nasıl bir değişim gösterdiğini görmek amacıyla, düğüm noktalarının mafsallı birleştiği kabulüyle yapılan boyutlandırma esas alınarak düğüm noktalarının rijit birleştiği kabulüyle analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için Tablo 2'de ve bu değerler yardımıyla çizilen çökme-açıklık eğrileri Şekil 6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Mafsallı ve rijit bileşimlerde çökme değerleri (cm).

a = 1.5 m, b = 1 m		Ara en-kesitlerde			
Diyagonaller: X (kesişmiyor.)		İç diyagonaller / Dikmeler / Enlemeler			
		Var			
L (m)	Mesnetlendirme ve düğüm noktalarının bağlantı şekli				
	Kayıcı		Sabit		
	Mafsallı	Rijit	Mafsallı	Rijit	
6	0.61	0.58	0.35	0.34	
9	1.26	1.07	0.78	0.70	
12	2.16	1.50	1.36	1.10	
15	3.35	1.67	2.15	1.43	
18	4.81	1.60	3.12	1.61	



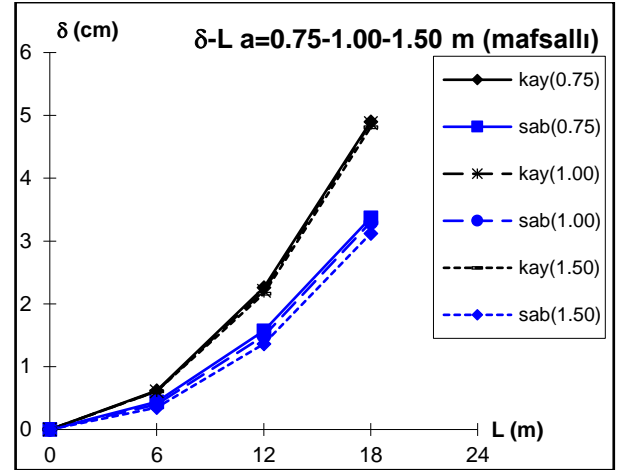
Şekil 6. Mafsallı (m) ve rijit (r) düğüm noktalı sistemler

### B. "a" Dikme Aralığının Etkisi

"a" dikme aralığının değişmesi durumunda, eğilme yüklemesine maruz uzay kafes kirişlerin orta en-kesitindeki çökmelerinin değişimini incelemek amacıyla üç farklı dikme aralığı seçilmiştir. Üç farklı dikme aralığı durumu ( $a=0.75$  m, 1.00 m ve 1.50 m) için de uzay kafes kiriş boyutlandırılmış ve orta en-kesitteki çökmeler elde edilmiştir. Açıklığı 6 m, 12 m ve 18 m olan uzay kafes kirişlerin çeşitli mesnetlenme durumları için elde edilen sonuçlar tablo ve şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 3. Dikme aralığının değişimi durumunda, çökme değerleri (cm).

b = 1.00 m		Ara en-kesitlerde			
Diyagonaller: X (kesişmiyor.)		İç diyagonaller		Dikmeler	Enlemeler
		Var		Var	Var
L (m)	a (m)	Mesnetlendirme durumu			
		Kayıcı		Sabit	
6	0.75	0.62			0.44
	1.00	0.61			0.40
	1.50	0.61			0.35
12	0.75	2.26			1.57
	1.00	2.21			1.49
	1.50	2.16			1.36
18	0.75	4.90			3.37
	1.00	4.88			3.30
	1.50	4.81			3.12



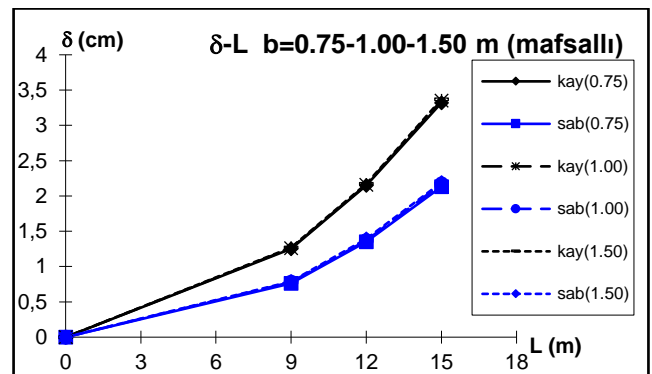
Şekil 7. Dikme aralığının değişmesi durumunda δ-L eğrileri

### C. "b" En-kesit Genişliğinin Etkisi

Üç en-kesit genişliği durumu ( $b=0.75$  m, 1.00 m ve 1.50 m) için de uzay kafes kiriş boyutlandırılmış ve orta en-kesitteki çökmeler elde edilmiştir. Açıklığı 9 m, 12 m ve 15 m olan uzay kafes kirişlerin çeşitli mesnetlenme durumları için elde edilen sonuçlar tablo ve şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Enkesit genişliğinin değişimi için çökme değerleri (cm).

a = 1.50 m		Ara en-kesitlerde			
Diyagonaller: X (kesişmiyor.)		İç diyagonaller		Dikmeler	Enlemeler
		Var		Var	Var
L (m)	b (m)	Mesnetlendirme durumu			
		Kayıcı		Sabit	
9	0.75	1.25			0.76
	1.00	1.26			0.78
	1.50	1.27			0.79
12	0.75	2.15			1.35
	1.00	2.16			1.37
	1.50	2.17			1.39
15	0.75	3.32			2.13
	1.00	3.35			2.17
	1.50	3.37			2.19



Şekil 8. En-kesit genişliğinin değişmesi durumunda δ-L eğrileri

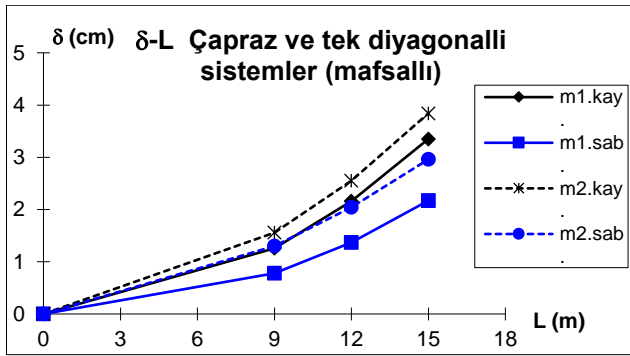
### D. Basınç Diyagonallerinin Etkisi

Basınç diyagonallerinin etkisini incelemek amacıyla, kafes kirişler çapraz diyagonalli olarak ve bu diyagonallerden basınç çubuğu olanların sistemden çıkarıldığı tek diyagonalli olarak ayrı ayrı boyutlandırılmış ve orta en-kesitteki çökmeler elde edilmiştir.

edilmiştir. Açıklığı 9 m, 12 m ve 15 m olan uzay kafes kirişlerin çeşitli mesnetlenme durumları için elde edilen sonuçlar tablo ve şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5. Basınç diyagonalı olan / olmayan sistemlerde çökme (cm)

a= 1.50 m; b= 1.00 m		Ara en-kesitlerde	
Diyagonaller: X (kesişmiyor.)		Dikmeler	Enlemeler
		Var	Var
L (m)	Basınç Diyagonalleri	Mesnetlendirme durumu	
		Kayıcı	Sabit
9	Var	1.26	0.78
	Yok	1.56	1.30
12	Var	2.16	1.37
	Yok	2.55	2.04
15	Var	3.35	2.17
	Yok	3.84	2.96



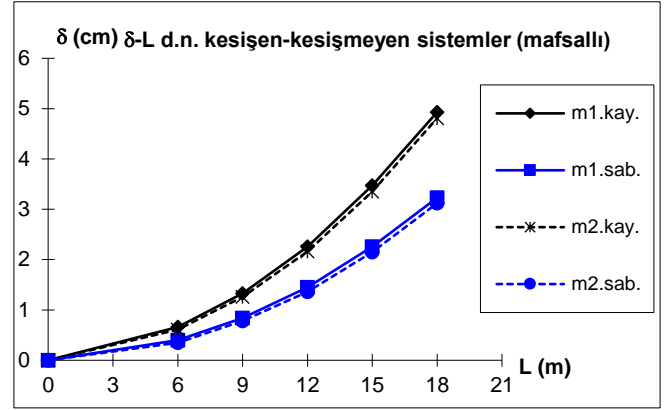
Şekil 9. Basınç diyagonalı olan (m1)/olmayan (m2) sistemlerde  $\delta$ -L eğrileri

#### E. Diyagonallerin Kesişmesi / Kesişmemesi Durumları

Uzay kafes kirişlerin çözümünde, çapraz diyagonal sistemlerde diyagonalin birbirini kesmediği varsayılır. Oysa uygulamada bu çubuklar birbirini kesmektedir. Bu durumun, etkisini incelemek amacıyla, kafes kirişler diyagonalin kesişen ve kesişmeyen sistemler olarak ayrı ayrı boyutlandırılarak orta en-kesitteki çökmeler elde edilmiştir. Açıklığı 6 m, 9 m, 12 m, 15 m ve 18 m olan uzay kafes kirişlerin çeşitli mesnetlenme durumları için elde edilen sonuçlar tablo ve şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 6. Diyagonalin kesişen ve kesişmeyen sistemlerde çökme (cm)

a = 1.50 m; b = 1.00 m		Ara en-kesitlerde		
Diyagonaller: X		İç Diyagonaller	Dikmeler	Enlemeler
			Var	Var
L (m)	Diyagonaller	Mesnetlendirme durumu		
		Kayıcı	Sabit	
6	Kesiyor	0.66	0.40	
	Kesmiyor	0.61	0.35	
9	Kesiyor	1.33	0.84	
	Kesmiyor	1.26	0.78	
12	Kesiyor	2.26	1.45	
	Kesmiyor	2.16	1.36	
15	Kesiyor	3.47	2.26	
	Kesmiyor	3.35	2.15	
18	Kesiyor	4.93	3.23	
	Kesmiyor	4.81	3.12	



Şekil 10. Diyagonalin kesişmesi (m1)/kesişmemesi (m2) durumları

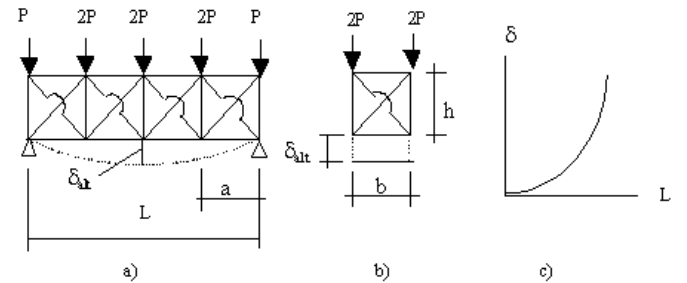
#### IV. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Burada, elastik çözümlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla eğilme yüklemesi için çökme-açıklık ( $\delta$ -L) ilişkileri üzerinde genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Eğilme yüklemesine maruz uzay kafes kirişler boyutlandırılırken aynı zamanda hizmet yükleri altında düğüm noktalarının deplasmanları da elde edilmiş, eğilmeye maruz kirişin orta en kesitinin alt noktalarındaki çökmeler ( $\delta_{alt}$ ), yukarıda verilmiştir. Bu değerlerden en küçük kareler yöntemiyle geçirilen sürekli eğri denklemi,

$$\delta = m_{\delta} L^{n_{\delta}} \quad (2)$$

bağıntısına uygun olmaktadır (Şekil 11)



Şekil 11 Eğilmeye maruz kafes kirişte  $\delta$ -L ilişkisi

İfadedeki  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları; uzay kafes kirişin düğüm noktalarındaki birleşimin rijit veya mafsallı olması, dikme aralığının ve en kesit genişliğinin değişmesi, basınç diyagonalinin bulunup bulunmaması, çapraz diyagonalin kesişmesi veya kesişmemesi durumları için ayrı ayrı elde edilerek tablolar halinde verilmiştir. Boyutlandırma, çubuk gruplarında  $\sigma_{max} \cong \sigma_{em}$  olacak şekilde yapılmış olduğu için bağıntılarda yük ifadesi bulunmamaktadır.

Ayrıca, yine aynı parametrelerin hizmet yükündeki çökme üzerindeki etkileri için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılmıştır.

#### A. Düğüm Noktalarındaki Birleşimin Rijit veya Mafsallı Olması Durumları

Aynı boyutlara sahip olan mafsallı ve rijit düğüm noktalı kafes kirişler için elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 7'de  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları verilmiş olup, Tablo 8'de ise

çökme değerlerinin birbirine oranlanması ile elde edilen ve düğüm noktalarındaki birleşimin etkisini gösteren katsayılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

 Tablo 7. Mafsallı ve rijit bağlı sistemlerde  $m_{\delta}$  ,  $n_{\delta}$  değerleri

a = 1.5 m , b = 1 m		Ara en kesitlerde			
Diyagonaller : X (kesişmiyor)	Var	İç diyagonaller	Dikmeler	Enlemeler	
		Var	Var	Var	
Düğüm noktaları	Mesnetlendirme durumu ve $m_{\delta}$ , $n_{\delta}$ değerleri				
	Kayıcı		Sabit		
	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	
Mafsallı	0.0207	1.8792	0.0099	1.9873	
Rijit	0.1164	0.9664	0.0276	1.4452	

 Tablo 8. Eğilmede  $\delta_{\text{mafsallı}} / \delta_{\text{rijit}}$  oranları

a = 1.5 m, b = 1 m, Diyagonaller: X (kesişmiyor)						
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler	
	Var		Var		Var	
Mesnet durumu	L (m)					Ortalama
	6	9	12	15	18	
Kayıcı	1.05	1.18	1.44	2.01	3.01	1.77
Sabit	1.03	1.11	1.24	1.50	1.94	1.36

Düğüm noktaları mafsallı sistemlerin çökmeleri düğüm noktaları rijit sistemlerin çökmelerinden fazla olmaktadır. Bu fazlalığın miktarı açıklıkla beraber artmaktadır. Eğilmeye maruz uzay kafes kirişlerin çökmesi açısından, kısa açıklıklarda düğüm noktalarının birleşiminin mafsallı veya rijit kabul edilmesinin fazla bir önemi olmamasına rağmen, örneğin kayıcı mesnetli sistemde açıklığın artmasıyla birlikte mafsallı sistemlerin çökmesi rijit sistemlerin çökmesinden üç kat fazla olabilmektedir. Mafsallı sistemlerdeki çökmenin, rijit sistemlerin çökmesine oranı mesnetlenme durumuna göre değişmektedir. Mafsallı sistemlerin çökmesi, rijit sistemlerin çökmesine göre en fazla kayıcı sistemde artmaktadır. Diğer bir deyişle, mesnetlerdeki bağ sayısı arttıkça bu oran azalmakta, yani çökme değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

### B. "a" Dikme Aralığının Etkisi

Üç farklı dikme aralığına sahip olan kafes kirişler için elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 9'da  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları verilmiş olup, Tablo 10'da ve 11'de ise çökme değerlerinin birbirine oranları ile dikme aralığının etkisini gösteren katsayılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

 Tablo 9. Dikme aralığının değişimine göre  $m_{\delta}$  ,  $n_{\delta}$  değerleri

b = 1 m		Ara en kesitlerde			
Diyagonaller : X (kesişmiyor)	Var	İç diyagonaller	Dikmeler	Enlemeler	
		Var	Var	Var	
Dikme aralığı (m)	Mesnetlendirme durumu ve $m_{\delta}$ , $n_{\delta}$ değerleri				
	Kayıcı		Sabit		
	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	
0.75	0.0213	1.880	0.0159	1.8512	
1.00	0.0206	1.889	0.0128	1.9183	
1.50	0.0211	1.8737	0.0099	1.9877	

 Tablo 10. Eğilmede ( $\delta_{a=0.75} / \delta_{a=1.00}$ ) oranları

b = 1 m, Diyagonaller: X (kesişmiyor)					
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler
	Var		Var		Var
Mesnet durumu	L (m)				Ortalama
	6	12	18		
Kayıcı	1.016	1.023	1.004		1.014
Sabit	1.100	1.054	1.021		1.058

 Tablo 11. Eğilmede ( $\delta_{a=1.50} / \delta_{a=1.00}$ ) oranları

b = 1 m, Diyagonaller: X (kesişmiyor)					
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler
	Var		Var		Var
Mesnet durumu	L (m)				Ortalama
	6	12	18		
Kayıcı	1.000	0.977	0.985		0.987
Sabit	0.875	0.912	0.945		0.911

Görüldüğü gibi, kayıcı ve sabit mesnetli sistemlerde dikme aralığı arttıkça kafes kirişlerin çökmeleri azalmakta, bu azalma sabit mesnetli sistemlerde kayıcı sistemlere göre daha fazla olmaktadır. Kafes kirişin açıklığının artmasıyla beraber, dikme aralığının önemi azalmakta ve çökmeler birbirine yaklaşmaktadır.

### C. "b" En-kesit Genişliğinin Etkisi

Üç farklı en kesit genişliğine sahip olan kafes kirişler için elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 12'de  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları verilmiş olup, Tablo 13 ve 14'de ise çökme değerlerinin birbirine oranlanması ile elde edilen ve en kesit genişliğinin etkisini gösteren katsayılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

 Tablo 12. Sistem genişliğinin değişimine göre  $m_{\delta}$  ,  $n_{\delta}$  değerleri

a = 1.50 m		Ara en kesitlerde				
Diyagonaller : X (kesişmiyor)	Var	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler
		Var		Var		Var
En-kesit genişliği (m)	Mesnetlendirme durumu ve $m_{\delta}$ , $n_{\delta}$ değerleri					
	Kayıcı		Sabit			
	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$		
0.75	0.0187	1.9110	0.009	2.0165		
1.00	0.0188	1.9123	0.0096	2.0009		
1.50	0.0191	1.9082	0.0098	1.9945		

 Tablo 13. Eğilmede ( $\delta_{b=0.75} / \delta_{b=1.00}$ ) oranları

a = 1.50 m, Diyagonaller: X (kesişmiyor)					
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler
	Var		Var		Var
Mesnet durumu	L (m)				Ortalama
	9	12	15		
Kayıcı	0.992	0.995	0.991		0.993
Sabit	0.974	0.985	0.982		0.980

Tablo 14. Eğilmede ( $\delta a=1.50 / \delta a=1.00$ ) oranları

a = 1.50, Diyagonaller: X (kesişmiyor)					
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller	Dikmeler	Enlemeler		
	Var	Var	Var		
Mesnet durumu	L (m)				Ortalama
	9	12	15		
Kayıcı	1.008	1.005	1.006	1.006	
Sabit	1.013	1.015	1.009	1.012	

En kesit genişliği arttıkça, kafes kirişlerin çökmeleri artmaktadır. Kafes kirişin açıklığının artmasıyla beraber, en kesit genişliğinin önemi azalmakta ve çökmeler birbirine yaklaşmaktadır. En kesit genişliğinin etkisi mesnetlenme durumuna göre değişmektedir. En kesit genişliğinin artmasıyla birlikte çökmeler, en az kayıcı sistemde artmaktadır. Diğer bir deyişle, mesnetlerdeki bağ sayısı arttıkça en kesit genişliğinin etkisi de artmaktadır.

#### D. Basınç Diyagonallerinin Etkisi

Basınç diyagonalleri bulunan ve bulunmayan kafes kirişler için elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 15’de  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları verilmiş olup, Tablo 16’da çökme değerlerinin birbirine oranlanması ile elde edilen ve basınç diyagonallerinin etkisini gösteren katsayılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

 Tablo 15. Basınç diyagonali olan / olmayan sistemlerde  $m_{\delta}$ ,  $n_{\delta}$  değerleri

a = 1.50 m, b = 1 m		Ara en kesitlerde			
Diyagonaller: X (kesişmiyor)	Mesnetlendirme durumu ve $m_{\delta}$ , $n_{\delta}$ değerleri	Dikmeler		Enlemeler	
		Var	Var	Var	Var
Basınç diyagonalleri	Kayıcı	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$
		Var	0.0188	1.9123	0.0096
Yok		0.0324	1.7608	0.0378	1.6087

 Tablo 16. Eğilmede  $\delta_{b,d,var} / \delta_{b,d,yok}$  oranları

a = 1.50 m, b = 1 m, Diyagonaller: X (kesişmiyor)					
Ara en kesitlerde	Dikmeler		Enlemeler		
	Var		Var		
Mesnet durumu	L (m)				Ortalama
	9	12	15		
Kayıcı	0.808	0.847	0.872	0.842	
Sabit	0.600	0.672	0.733	0.668	

Yukarıdaki tablolardan görüldüğü üzere; basınç diyagonalli sistemlerin çökmesi, basınç diyagonalsiz sistemlere göre daha az olmaktadır. Kafes kirişin açıklığının artmasıyla beraber, basınç diyagonallerinin eğilmeye maruz uzay kafes kirişin çökmesi üzerindeki etkisi azalmakta ve çökmelerin oranı lineer bir şekilde artarak birbirine yaklaşmaktadır. Basınç diyagonallerinin etkisi mesnetlenme durumuna göre de değişmektedir. Basınç diyagonalleri olmayan sistemlerin çökmesi basınç diyagonalli sistemlere göre en az kayıcı sistemde artmaktadır. Diğer bir deyişle, mesnetlerdeki bağ

sayısı arttıkça basınç diyagonallerinin çökmeler üzerindeki etkisi de artmaktadır.

#### E. Diyagonallerin Kesişmesi / Kesişmemesi Durumları

Çapraz diyagonallerin birbirini kestiği ve kesmediği kabulüyle ayrı ayrı çözülmüş olan kafes kirişler için elde edilen sonuçlar, çeşitli açıklıklar ve mesnetlendirme durumları için tablolar halinde verilmiştir. Tablo 17’de  $m_{\delta}$  ve  $n_{\delta}$  katsayıları verilmiş olup, Tablo 18’de çökme değerlerinin birbirine oranlanması ile elde edilen ve bu kabulün çökme üzerindeki etkisini gösteren katsayılar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

 Tablo 17. Diyagonalleri kesişen ve kesişmeyen sistemlerde  $m_{\delta}$ ,  $n_{\delta}$  değerleri

a= 1.50 m, b= 1 m		Ara en kesitlerde					
Diyagonaller: X	Mesnetlendirme durumu ve $m_{\delta}$ , $n_{\delta}$ değerleri	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler	
		Var	Var	Var	Var		
Diyagonaller	Kayıcı	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	$m_{\delta}$	$n_{\delta}$	Sabit	
		Kesişiyor	0.0243	1.832	0.013	1.9027	
Kesişmiyor		0.0207	1.8792	0.0099	1.9873		

 Tablo 18. Eğilmede  $\delta_{kesişiyor} / \delta_{kesişmiyor}$  oranları

a = 1.50 m, b = 1 m, Diyagonaller: X						
Ara en kesitlerde	İç diyagonaller		Dikmeler		Enlemeler	
	Var		Var		Var	
Mesnet durumu	L (m)					Ortalama
	6	9	12	15	18	
Kayıcı	1.082	1.056	1.046	1.036	1.025	1.049
Sabit	1.143	1.077	1.066	1.051	1.035	1.074

Çapraz diyagonalleri kesişen sistemlerin çökmesi, kesişmeyen sistemlere göre daha fazla olmaktadır. Çökmelerdeki bu artış, kafes kirişin açıklığının artmasıyla beraber azalmakta ve çökmelerin oranı lineer bir şekilde azalarak birbirine yaklaşmaktadır. Çapraz diyagonalleri kesişen sistemlerin çökmesi diyagonalleri kesişmeyen sistemlere göre, en az kayıcı sistemlerde artmaktadır. Diğer bir deyişle, mesnetlerdeki bağ sayısı arttıkça diyagonalleri kesişen sistemlerin çökmelerinin, diyagonalleri kesişmeyen sistemlerin çökmelerine olan oranı artmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] M. NOOR, N. TOPALOĞLU, M. TEMŞİ, H.T. TÜRKER, “Başlangıç eğrilik kusurlarının mesnetlenme durumu ve modül sayısına göre düzlemsel çift tabakalı uzay kafes sistemlerin davranışına etkisi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3, 2019.
- [2] G.S. Kırgız, “Düzlem ve uzay kafes sistemlerinde statik analiz, optimizasyon ve çizim tekniği”, Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik Bilimleri Bölümü, ODTÜ, Şubat, Ankara, 1988.
- [3] S. Ökten, H. Kasap, “The torsion with bending behaviour of a tubular truss”, *Institute of Fundamental Technological Research, Engineering Transactions*, 45, 1, pp. 119-131, Poland, 1997.
- [4] A. Affan, C.R. Calladine, “Initial bar tensions in pin-jointed assemblies”, *International Journal of Space Structures*, 4(1), 1–16, 2017.

- [5] H.E Alçiçek, C. V., “Uzay kafes çatı sistemlerinin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışı”, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 83–92, 2016.
- [6] M.T. Roudsari, M. Gordini, “Random imperfection effect on reliability of space structures with different supports”, *Structural Engineering and Mechanics*, 55(3), 461–472, 2015.
- [7] H.E. Alçiçek, C. Vatansver, “Uzay kafes çatı sistemlerinin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışı”, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, S. 83-92, 2017.
- [8] P.S. Lee, H.C. Noh, “Inelastic buckling behavior of steel members under reversed cyclic loading”, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 9, pp. 2579-2595, 2010.
- [9] F. Piroglu, K.Ozakgul, “Partial collapses experienced for a steel space truss roof structure induced by ice ponds”, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 60, pp. 155-165, 2016.
- [10] G. Riley, K.G. Gebremedhin, R.N. White, “Semi-rigid analysis of metal plate-connected wood trusses using fictitious members”, *Transactions of the ASAE*, 36, 3, pp. 887-894, May-Jun 1993.
- [11] J. Onoda, “Two-dimensional deployable truss structures for space applications”, *J. Spacecraft*, 25, 2, pp. 109-116, March-April 1988.
- [12] M. Farshchin, C.V. Camp, M. Maniat, “Optimal design of truss structures for size and shape with frequency constraints using a collaborative optimization strategy”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 66, pp. 203–18, 2016.
- [13] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Truong-Khac, L. Le-Anh, T. Vo-Duy, “An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp.167–185, 2018.
- [14] M.Z. Özyurt, “Dikdörtgen kesitli tübüler uzay kafes kirişlerin elastik ve elastik-plastik analizi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mayıs 2000.
- [15] ODABAŞI, Y., *Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları*, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, Türkiye: 2000.
- [16] A. Kaveh, S. Mahjoubi, “Hypotrochoid spiral optimization approach for sizing and layout optimization of truss structures with multiple frequency constraints”, *Eng. Comput.*, vol. 35, pp. 1443-1462, 2019.
- [17] M.P. Saka, , M. Ülker, “Optimum design of geometrically nonlinear space trusses”, *Computers and Structures*, 41, 6, pp. 1387-1396, 1991.
- [18] S.O. Degertekin, L. Lamberti, I.B. Ugur, “Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm”, *Appl. Soft. Comput.*, vol. 70, pp. 903-928, 2018.
- [19] K. Zhu, F.G.A. Al-Bermani, S. Kitipornchai, “Nonlinear dynamic analysis of lattice structures”, *Computers and Structures*, 52, 1, pp. 9-15, 3 July 1994.
- [20] S.S. Rao, K.Sundararaju, B.G. Prakash, C. Balakrishna, “Multiobjective fuzzy optimization techniques for design”, *Engineering Computers and Structures*, 42, 1, pp. 37-44, January 1992.
- [21] R. Levy, O. Vilnay, K.B. Acheampong, “Exact geometry considerations in buckling analysis of trusses”, *Computers and Structures*, 41, 6, pp. 1241-1248, 1991.