

KATLANABİLİR MAFSALLI KAFES DİREKLERİN KATLANMA ORANLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ VE YENİ BİR TASARIM YÖNTEMİNİN ARAŞTIRILMASI

Yunus CEBECİ, Murat DEMİREL, Gökhan KİPER

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.
yunuscebeci@iyte.edu.tr, muratdemirel@iyte.edu.tr, gokhankiper@iyte.edu.tr

Bu çalışmanın temel amacı uzay uygulamalarında kullanılan katlanabilir mafsallı kafes direklerin katlanma oranına etki eden parametrelerini incelemek ve katlanma oranını artırıcı iyileştirmeler üzerine araştırmalar yapmaktır. Çalışma kapsamında katlanabilir mafsallı kafes direkleri oluşturan yapılar incelenmiş ve tasarımda kritik rol oynayan uzunluklar belirlenerek ve uzuvlar üzerinde iyileştirme yöntemleri önerilerek katlanma oranının artırılması hedeflenmiştir. Önerilen yöntem ile ön çalışmalar yapılarak literatürdeki benzer katlanabilir direklere kıyasla daha fazla katlanma oranının elde edildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uydu mekanizmaları, katlanabilir yapılar, katlanabilir direkler

EXAMINING THE FACTORS AFFECTING THE PACKING RATIO OF DEPLOYABLE ARTICULATED TRUSS MASTS AND INVESTIGATION OF A NEW DESIGN METHOD

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the factors which affect the packing ratio of deployable articulated truss masts and new design methods for increasing the packing ratio. First, the components forming the deployable articulated truss masts are explained and the parameters for the design of these structures are determined in order to enhance the packing ratio via new design methods. Finally, an increased packing ratio compared to similar ones in the literature is obtained by applying the proposed method.

Keywords: Satellite mechanisms, deployable structures, deployable masts

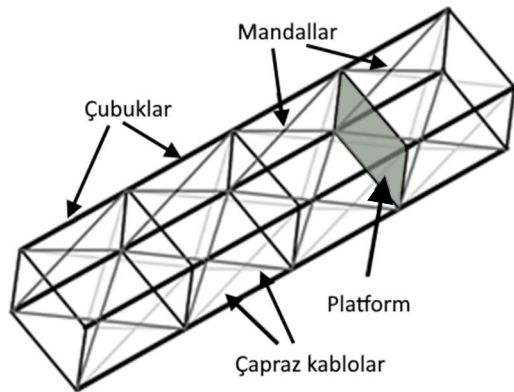
1. GİRİŞ

Son yıllarda uzay uygulamalarındaki artış, uzaya gönderilecek yapıların uzay araçlarının kargo bölme hacmiyle kısıtlı olması gibi önemli bir problemi beraberinde getirmiştir. Açıklık çapı ve odak uzunluğunun artırılmak istenildiği yapılarda çözünürlük ve işlevselliği direkt olarak etkilediği için bu kısıtlayıcı geometrik sınır ana tasarım parametresi olmaktadır [1]. Bu gibi taşıma durumunda kompaktlık, çalışma koşullarında ise büyük hacme ihtiyaç duyulan alanlarda, istenilen özelliklere göre kapalı ve açık konumları özel olarak tasarlanmış katlanabilir yapılar diye adlandırılan özel bir mekanizma ailesi kullanılır. Araştırmacılar bu yapıları tasarlarken özellikle yapıların açık ve kapalı hallerinde ölçülen tasarım parametresinin oranı olan katlanma oranlarını artırmaya

odaklanmışlardır. Örneğin, bu parametre katlanabilir antenler için açıklık çapı, katlanabilir direkler için ise odak uzunluğudur.

Uzaya gönderilecek yapıların tasarımlarında önemli rol oynayan bu hacim sınırının üstesinden gelebilmek için geliştirilmiş yapıları kapsayan ve bu yapıları kategorilere ayıran pek çok çalışma bulunmaktadır [1-7]. Bu çalışmanın odak noktasındaki katlanabilir direkler genel olarak tüp şeklindeki borular ile kafes yapısında, uzuvları rijit olan mafsallı direkler olarak iki sınıfa ayrılabilir [7]. Uygulama için gerekli olan açık direk boyu ve faydalı yük miktarı katlanabilir direk seçiminde belirleyici olmaktadır. Uç nokta konumlama hassasiyeti düşük olan (mm-cm seviyesinde) ve daha az yük taşıyacak uygulamalarda (4 kg'a kadar), şişirilebilir direkler tercih edilirken, yük gereksinimi daha

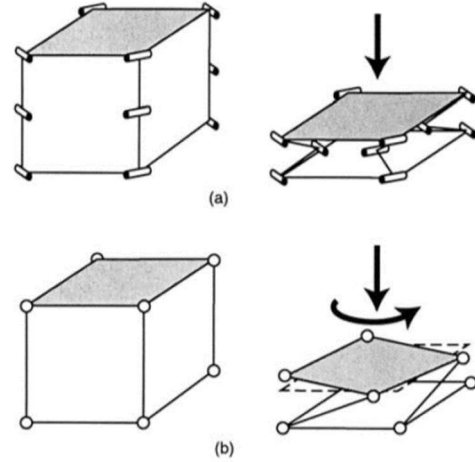
yüksek olan (100 kg'a kadar) ve uç konumlama hassasiyeti yüksek olan (μm - mm seviyesinde) uygulamalarda teleskopik ya da mafsallı direkler kullanılmaktadır [1]. Tüp şeklindeki borular mafsallı direklerle kıyaslandığında daha yüksek katlanma oranına sahiptirler, fakat mafsallı direkler daha yüksek taşıma kapasitesi, açılma güvenilirliği ve konumlandırma hassasiyeti gerektiren uzay uygulamaları için daha caziptirler. Ek olarak, bu çalışmanın ilgili olduğu katlanabilir mafsallı kafes direkler (KMKD), genel olarak benzer parçaları içerirler ve bu parçalar boyuna uzuvlar için "çubuk" ve çokgen uzuvlar için "platform" olarak adlandırılabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Katlanabilir mafsallı kafes direk (KMKD) mekanizması

Bunun yanı sıra çubuk ve platformların kesişim noktalarında bağıl hareketi sağlayan bağlantı parçaları bulunmaktadır. Ayrıca, bu yapıların direngenliklerini arttırmak için çapraz kablolar ve mandal mekanizmaları da kullanılabilir. İki platform ve onları birleştiren çubuklardan oluşan yapı bir katlanabilir birim olarak adlandırılabilir ve genel olarak bu birimlerin uç uca eklenmesiyle bir katlanabilir direk elde edilebilir. Buna ek olarak Şekil 2'de gösterildiği üzere katlanabilir direk yapılarında iki çeşit katlanma prensibi vardır [8]. Bunlar öteleme tipi katlanma ve vida tipi katlanma olarak adlandırılabilir. Bu katlanma tipleri KMKDlerin açılma hareketini doğrudan etkilediği için genellikle katlanabilir birimlerin eş zamanlı açılması istendiğinde vida tipi

katlanma, ardışık açılması istenildiğinde ise öteleme tipi katlanma tercih edilmelidir.

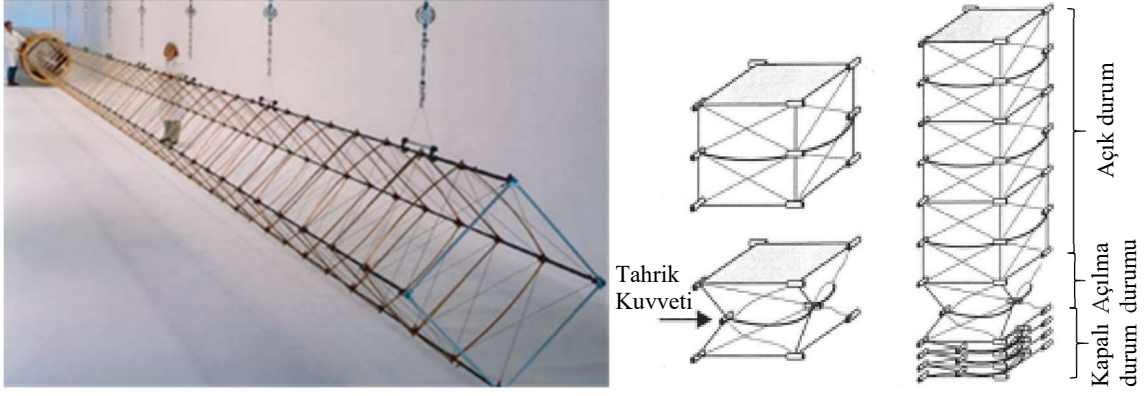


Şekil 2. Katlanma prensipleri a) öteleme tipi katlanma, b) vida tipi katlanma [2]

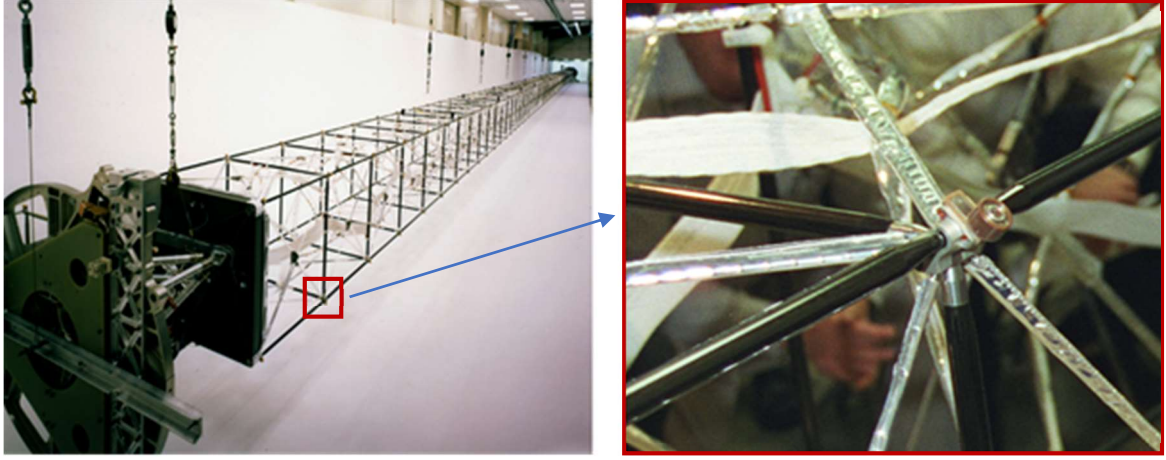
Bu bildiriye öncelikle mevcut KMKD sistemleri tanıtılmaktadır. Daha sonra incelenen KMKD sistemlerine göre katlanma oranı yüksek bir sistem önerisi sunulmaktadır.

2. MEVCUT SİSTEMLER

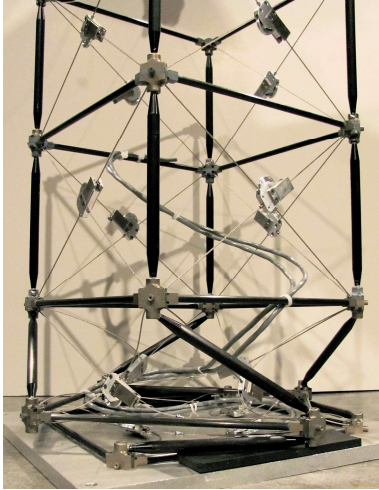
İkisi de ATK/ABLE şirketi tarafından geliştirilmiş KMKD tipindeki en önemli iki yapıdan biri Uluslararası Uzay İstasyonunun güneş panellerini açmak ve daha sonra desteklemek için kullanılan "Folding Articulated Square Truss" (FAST) diye adlandırılan katlanabilir direk [9] (Şekil 3), diğeri ise bu katlanabilir direğin gelişmiş bir sürümü olan ve NASA tarafından yürütülen yeryüzünün topoğrafik haritasının çıkarıldığı "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) projesi [10] gibi birçok uzay uygulamasında kullanılan "Able Deployable Articulated Mast" (ADAM) katlanabilir direğidir [11] (Şekil 4). ATK, ADAM direğinin patentini alarak ilk üretimini gerçekleştirmiştir. ADAM katlanabilir direğinin etki parametreleri Xue vd. tarafından ayrıca incelenmiştir [12]. FAST direği öteleme tipi katlanma prensibi ile çalışırken (Şekil 3), ADAM direği vida tipi katlanma prensibi ile çalışmaktadır (Şekil 5).



Şekil 3. FAST direği ve katlanma prensibi [6]



Şekil 4. SRTM projesinde kullanılan ADAM direği ve bağlantı detayı [10]



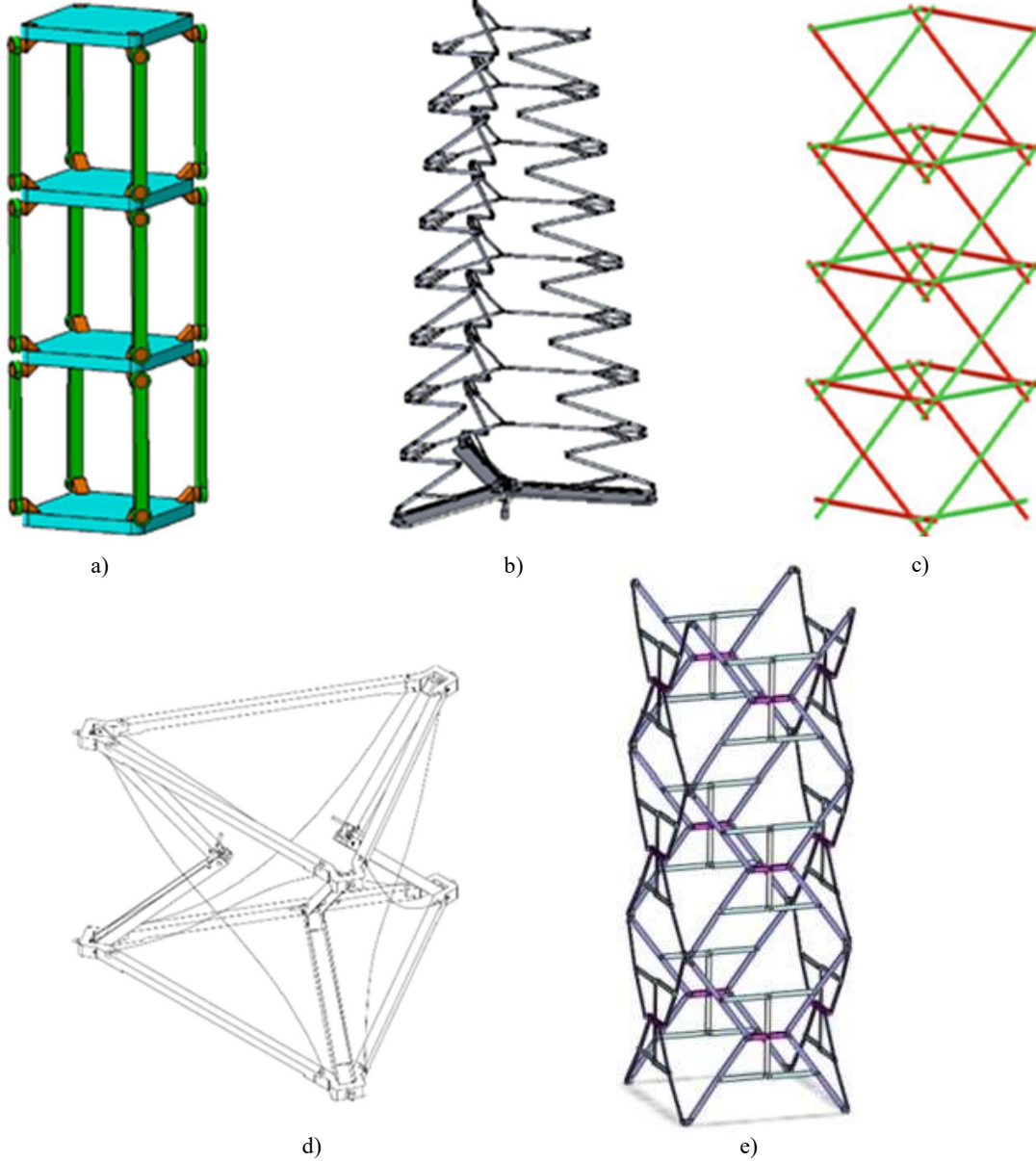
Şekil 5. ADAM direğinin vida tipi katlanması [13]

Uzay uygulamalarında cazip oldukları için Kiper ve Söylemez [14] Borel-Bricard hareketi içeren tek serbestlik dereceli fazla kısıtlı yapıları incelemiş ve ayrıca bu özellikleri barındıran kare platformlu bir KMKD önermişlerdir. Fakat bu direğin her birimi bağımsız hareket ettiği için ancak kablo tahrik sistemleri gibi kuvvet aktarıcılar kullanılarak direğin tamamen açılması sağlanabilmektedir

(Şekil 6a). Borel-Bricard hareketi [15, 16], hareketli cismin tüm noktalarının küresel yörüngelere sahip olduğu bir tür uzaysal harekettir. KMKDlerin açık ve kapalı hallerinin parametrik olarak modellenmesi üzerine çalışan Deng vd. [17] ise KMKD yüksekliğinin geometrik analiz ile belirlenebildiği düşük kütle ve artırılmış direngenlik özellikleri olan konik uçlu bir katlanabilir direk tasarlamışlardır (Şekil 6b). Bu çalışmalarında özdeş kesit alanına sahip katlanabilir direklere kıyasla konik tasarımın mekanik özelliklerinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Bennett mekanizmalarını seri olarak birbirine ekleyerek oluşturdukları katlanabilir direk örneklerinde Guo ve You [18], bu yapının tek serbestlik derecesine sahip olduğunu ve açık ve kapalı hal ebatlarının parametrik olarak hesaplanabileceğini göstermişlerdir (Şekil 6c). Shan vd. [19] ise üçgen prizma modülleri kullanarak yüksek katlanma oranına sahip bir katlanabilir direk tasarlamışlardır (Şekil 6d). Bu katlanabilir direğin kinematik ve direngenlik özelliklerini çalışarak uzay uygulamalarına uygun

olduğunu göstermişlerdir. Hookens doğrusal hareket mekanizmasının özelliklerinden yararlanılarak yeni bir katlanabilir mekanizma ailesi oluşturan Lu vd. [20] ayrıca statik

analizler ve yapısal davranışlarına göre yapıya en uygun tahrik sistemlerini belirlemişlerdir (Şekil 6e).

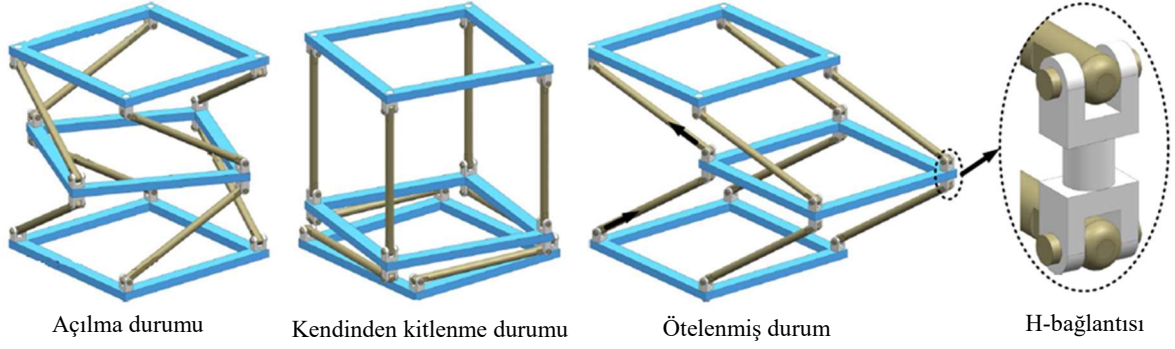


Şekil 6. a) Kiper ve Söylemez'in kare platformlu KMKD tasarımı [14], b) Deng vd.'nin konik uçlu KMKD tasarımı [17], c) Guo ve You'nun seri bağlı Bennett mekanizmaları ile oluşturulan KMKD tasarımı [18], d) Shan vd.'nin üçgen prizma birimlerden oluşan KMKD tasarımı [19], e) Lu vd.'nin Hookens mekanizması kullandıkları KMKD tasarımı [20]

KMKD tipindeki en güncel katlanabilir direk Zhao vd. [21] tarafından tasarlanmıştır (Şekil 7). Bu katlanabilir direğin tasarımında ADAM'ın avantajlarından yararlanılmış ve onun daha direngen bir sürümü geliştirilmiştir.

Kendinden kitlenebilir katlanabilir direk olarak isimlendirilen bu direk, Wang vd. [22] tarafından patentlenen ve aynı zamanda Borel-

Bricard hareketi gerçekleştirebilen katlanabilir birimlerden oluşmaktadır. Bu KMKDnin farklı durumlarının gösterildiği Şekil 7'de ayrıca H-bağlantısı olarak adlandırılan ve bacaklar ile platform arasında bağlı hareketin oluşmasını sağlayan bir bağlantı yapısı görülmektedir. Bu bağlantının iki mafsalı birbirine paralel iken aradaki diğer mafsal bunlara diktir.



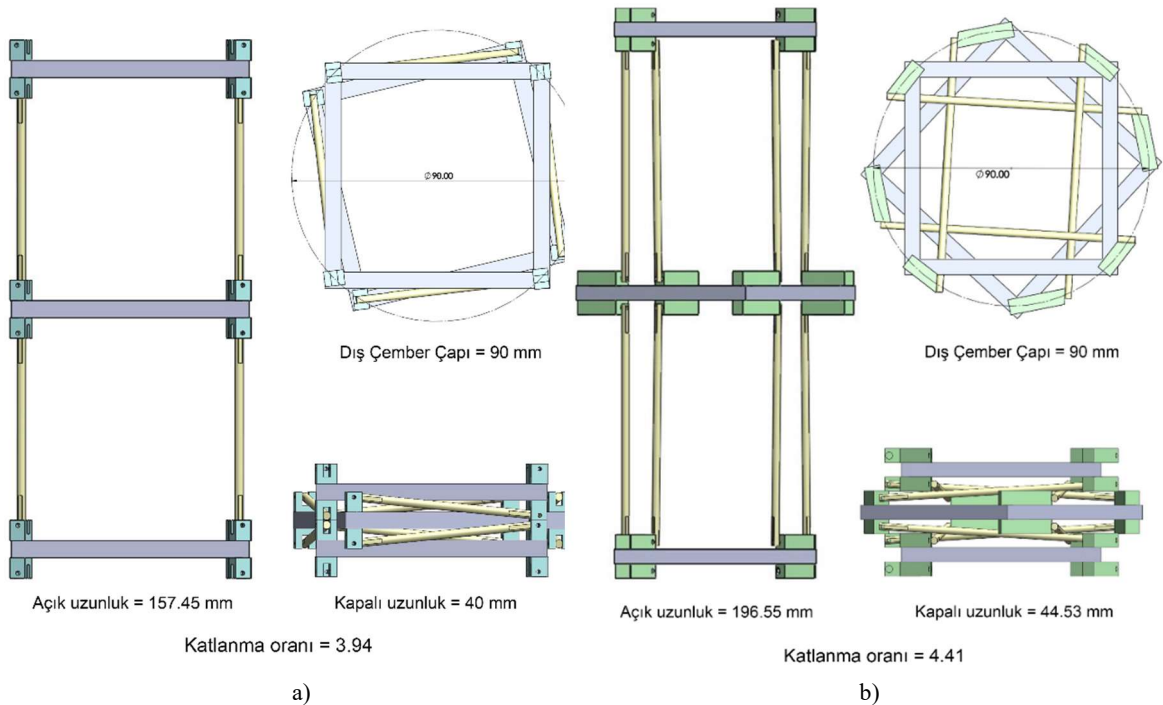
Şekil 7. Zhao vd.'nin önerdiği kendinden kitlenebilir katlanabilir direk [21]

Literatürdeki bu yapılar incelendiğinde KMKDlerde bazı geometrik ve yapısal değişiklikler yapılarak katlanma oranının artırılacağı görülmektedir. 3. kısımda katlanma oranını artırma amaçlı bazı iyileştirme önerileri sunulmaktadır.

3. KMKDLERDE KATLANMA ORANINI ARTIRMAK İÇİN İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

Uzay mekiklerinin kargo bölmesine entegre edilmiş faydalı yük hazneleri genellikle silindirik olduğu için [23] tasarlanacak katlanabilir direklerin kapalı halleri bir daire içinde kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Ana amaç direkte katlanma oranını artırmaya yönelik olduğu için yapının hem kapalı hem de açık yüksekliğini belirleyen uzuv yükseklikleri

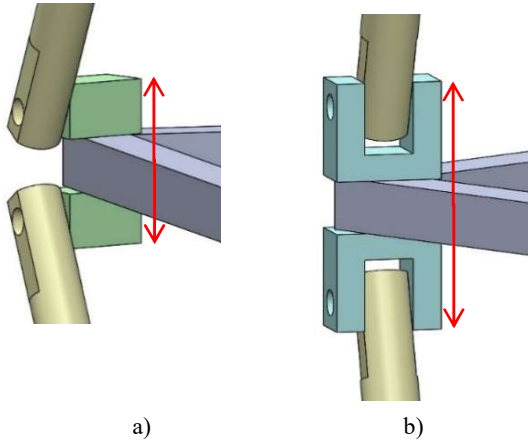
karşılaştırılarak düzlemsel iş düşümü belirli bir daire içinde kalacak şekilde en uygun hale getirilmelidir. Bir KMKD incelendiğinde kapalı haldeki yüksekliği bağlantı boyutları belirlerken, açık yükseklik için en önemli boyut çubuk uzunluklarıdır. Dolayısıyla yapının katlanmasını etkilemeyecek şekilde ve kapalı halde çakışmaların en aza indirildiği bir daire içerisine konumlandırılacak en uzun çubuk uzunluğu hedeflenmelidir. Bunlar ışığında Zhao vd. [21] tarafından sunulan katlanabilir direk incelendiğinde kapalı durumdaki yüksekliğinde köşelerdeki bağlantı çakışmalarını engellemek için çubuk boylarının kısaltıldığı görülmektedir. Bu kapalı hal yüksekliğini düşürmeye yardımcı olsa da yapının açık yüksekliğini de düşürdüğü için katlanma oranının artırmadaki etkisi önemli olmamaktadır. Hem bacak boyunun artırıldığı



Şekil 8. Katlanabilir direk ebat kıyaslaması a) Zhao vd. (2018) katlanabilir direk tasarımı, b) önerilen tasarım

hem de köşe bağlantılarının çakışmasının önleildiği bir yapı düşünüldüğünde, kullanılan H-bağlantısı yerine paralel mafsallara dik olan mafsallın bir kaçıklık içerecek şekilde tasarlanmasının buna imkân verebileceği görülmüştür (Şekil 8). Önerilen bu bağlantı modeli herhangi bir çokgen platform için kullanılabilir de karşılaştırma yapabilmek için kare platformun kullanıldığı bir katlanabilir direk yapısı üzerinde uygulanmıştır. Şekil 8’de, 90 mm çapındaki eş daire içinde kaçıklık içeren bağlantı elemanı kullanılarak oluşturulan katlanabilir direk ile Zhao vd.’nin [21] katlanabilir direk tasarımı kıyaslanmıştır ve katlanma oranında önemli ölçüde bir artış olduğu gösterilmiştir.

Örneğin, Şekil 9a’da görüldüğü üzere kare platformun köşesinden dışa doğru verilen kaçıklık, bacağın bağlantı parçasına daha az yükseklik gerektirecek şekilde bağlanmasına olanak vermektedir. Şekil 9b’deki kaçıklık olmayan tasarımda bacağın bağlantı parçasına çarpmasını önlemek için bağlantı parçasının yüksekliği kaçıklık içeren tasarıma göre daha yüksek olmaktadır. Böylece, bağlantı parçasının kaçıklık içermesiyle kinematik yapıyı değiştirmeden hem daha yüksek bacak boyu kullanılabilir hale gelmekte hem de bağlantı parçasının yüksekliği azaltılabilmektedir. Bağlantı parçasının yüksekliğinin azaltılması da direğin kapalı haldeki yüksekliğini doğrudan düşürmektedir.



Şekil 9. Bağlantı parçası karşılaştırması a) önerilen tasarımın kaçıklıklı bağlantı parçası, b) Zhao vd.’nin [21] tasarladığı katlanabilir direğin bağlantı parçası

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada temel olarak katlanabilir mafsallı kafes direklerin katlanma oranının artırılmasına yönelik incelemeler yaparak ulusal bir bilgi birikimi oluşturulması hedeflenmiştir. Bu ön çalışmada, genel olarak uzay uygulamalarında kullanılan katlanabilir mafsallı kafes direkleri oluşturan benzer yapılar gösterilmiş, bu tipteki katlanabilir direklerin katlanma oranlarının artırılması hususunda kritik noktalara değinilmiştir. Önerilen katlanabilir direk tasarım yöntemi, literatürdeki benzer katlanabilir direklerle karşılaştırılarak ön çalışmalara göre katlanma oranının %12 artırıldığı gösterilmiştir.

İleriki çalışmalarda, önerilen tasarım modelinin kinematiği ve uzuv kalınlıklarının parametrik olarak ifade edildiği bir matematiksel model oluşturularak katlanma oranının eniyilenmesi çalışması yürütülecektir. Eniyileme çalışmalarında katlanabilir direğin ağırlık ve doğal frekansı da ölçüt olarak yer alacaktır. Malzeme seçimi, konstrüksiyonel tasarım iyileştirmeleri ve tahrik sistemi çalışmaları da ileriki çalışmaların konusudur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 120M812 nolu proje ile TÜBİTAK tarafından finansal olarak desteklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Puig, L., Barton, A., Rando, N. (2010). A review on large deployable structures for astrophysics missions, *Acta Astronaut*, 67(1-2), 12-26.
- [2] Darooka, D., Jensen, D. (2001). Advanced space structure concepts and their development, *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Anaheim, California.
- [3] Hanaor, A., Levy, R. (2001). Evaluation of deployable structures for space enclosures, *International Journal of Space Structures*, 16(4), 211-229.
- [4] Jensen F., Pellegrino, S. (2001). *Arm Development Review of Existing Technologies*, Teknik Rapor CUED/D-STRUCT/TR198, Cambridge Üniversitesi.
- [5] Kiper, G., Söylemez, E. (2009). Deployable space structures, *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*,

Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul, 131-138.

[6] Tibert, G. (2002). *Deployable tensegrity structures for space applications*, Doktora Tezi, KTH.

[7] Straubel, M. (2012). *Design and sizing method for deployable space antennas*, Doktora Tezi, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt eV.

[8] Pellegrino, S. (2014). *Deployable Structures*, Springer.

[9] Warden, R. M. (1987). Folding, articulated, square truss, *21st Aerospace Mechanisms Symposium*, LB Johnson Space Center, Houston, Texas.

[10] Ramirez, E. (1998). Shuttle Radar Topography Mission.

www2.jpl.nasa.gov/srtm/mast_photos.html,

Erişim: 5 Haziran 2021

[11] Gross, D., Messner, D. (1999). The Able deployable articulated mast-enabling technology for the Shuttle Radar Topography Mission, *33rd Aerospace Mechanisms Symposium*, Pasadena, California.

[12] Xue N., Ding F., Li, B., Wu, Q., Xie, D. (2018). The influence parameters of 60m able deployable articulated mast mode, *Proceedings of the International Symposium on Big Data and Artificial Intelligence*, 299-305.

[13] Stohlman, O. R., Pellegrino, S. (2010), Shape Accuracy of a Joint-Dominated Deployable Mast, *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Orlando, Florida.

[14] Kiper, G., Söylemez, E. (2011). Modified Wren platforms, *13th IFToMM World Congress*, Guanajuato, Mexico, Cilt 1, 1183-1187.

[15] Borel, É. M. (1908). Mémoire sur les déplacements à trajectoires sphériques, *Mémoires Présentés par Divers Savants à l'Académie des Sciences de l'Institut National de France*, 33(1), 1-128.

[16] Bricard, R. (1896). Géométrie cinématique - sur un déplacement remarquable, *Comptes-Rendus l'Académie des Sciences*, 123(22), 939-940.

[17] Deng, Q., Li, B., Huang, H. L., Liu, R. Q.,

Deng, Z. Q. (2011). Design and analysis of a tapered deployable mast, *Key Engineering Materials*, 450, 31-34.

[18] Guo H., You, Z. (2012). Deployable masts based on the Bennett linkage, *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, Springer, 739-747.

[19] Shan, M., Guo, H., Liu, R., Wang, Y. (2013). Design and analysis of a triangular prism modular deployable mast, *2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Kagawa Üniversitesi, Takamatsu, 1546-1551.

[20] Lu, S., Zlatanov, D., Ding, X., Molfino, R. (2014). A new family of deployable mechanisms based on the Hoekens linkage, *Mechanism and Machine Theory*, 73, 130-153.

[21] Zhao, L., Wang, H., Chen, G., Huang, S. (2018). Sequentially Assembled Reconfigurable Extended Joints: Self-Lockable Deployable Structure, *Journal of Aerospace Engineering*, 31(6), 4018103.

[22] Wang, H., Zhao, L., Yu, H., Zhao, Y., Chen, G. (2016). *Reconfigurable Extended Joint*, Patent no: CN104608117B.

[23] Galvez, R., Gaylor, S., Young, C., Patrick, N., Johnson, D., Ruiz, J. (2011). The Space Shuttle and Its Operations, *WingsIn Orbit Scientific and Engineering Legacies of the Space Shuttle*, Government Printing Office, 3409, 53-73.