

BASINÇ TAHRİKİ İLE ŞEKİL DEĞİŞTİREN HÜCRE YAPISI TASARIMI VE ANALİZİ

Buğra KÖKSAL¹
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Melin Şahin²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada basınç tahriki ile şekil değiştiren hücre yapıları incelenmiş, literatürdeki örnek hücre yapılarından yola çıkarak aynı basınç değerlerinde daha düşük gerilme seviyeleri ile yüksek gerinim ve deformasyon değerleri sağlayan yeni hücre yapısı geometrileri ortaya konulmuştur. Şekil değiştiren hücre yapıları iç yüzeylerine uygulanan sıvı basıncı ile uzayabilen içi boş tüp yapılarıdır. Bu yapılar uzayıp kısılabilmesini sağlayan kauçuk malzemeden üretilmektedir. Kauçuk malzemenin iç basınç ile şişmesini engellemek ve istenilen yönde deforme olmasını sağlayabilmek için hücre yapısı alüminyum halka yapıları ile desteklenmektedir. Alüminyum halka yapıların dağılımı, kesit yüzeyinin geometrisi ve basınç uygulanan yüzeylerin genişliği bu yapıların şekil değiştirme kabiliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu bildiride aynı uzunluk ve yükseklikteki, uygun alüminyum halka dağılımına sahip üç farklı kesit alanına sahip hücre yapılarının sonlu elemanlar model ve analizleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

GİRİŞ

Şekil değiştirebilme özelliği doğada da birçok hayvanda gözlemleyebildiğimiz bir olgudur. Örneğin kuşlar kanatlarını farklı konumlarda tutarak hızlanma, yavaşlama veya daha iyi manevra yapabilmektedirler. Buna benzer özellikleri böcekler ve balıklarda da gözlemlememiz mümkündür. Birçok mühendislik disiplinlerinde de bu tarz şekil değiştirebilen yapılara da rastlamaktayız. Otomotiv endüstrisinde aracın hızına göre değişen lastik açılı veya bagaj üstü rüzgarlıklar sıkça karşımıza çıkan şekil değiştiren yapılara örnektir. Öte yandan havacılıkta yeni kanat tasarımları şekil değiştiren yapıları ile daha iyi performans ve manevra kabiliyetleri kazanmaya başlamıştır.

Literatürde şekil değiştirmeyi sağlamak amacıyla yönelik çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bunlardan başlıcaları; mekanizmalar kullanarak [Şahin, 2018; Yaman vd., 2015], piezoelektrik ve akıllı malzemeler kullanarak [Sun vd., 2016] şekil değiştirmedir. Diğer yandan son yıllarda malzeme ve üretim biliminin gelişmesi ile birlikte basınç tahriki ile şekil değiştirebilen hücre yapıları tasarlanmaya başlamıştır. Esnek yapıları, çok yönlülükleri ve daha az miktarda bozulabilecek mekanizma içermeleri bu hücre yapılarını diğerlerine nazaran avantajlı konuma getirmektedir. Bu hücre yapılarını kullanarak [Vasista vd., 2018] şekil 1'de görüldüğü gibi şekil değiştirebilen kanat yapıları da tasarlanabilmektedir.

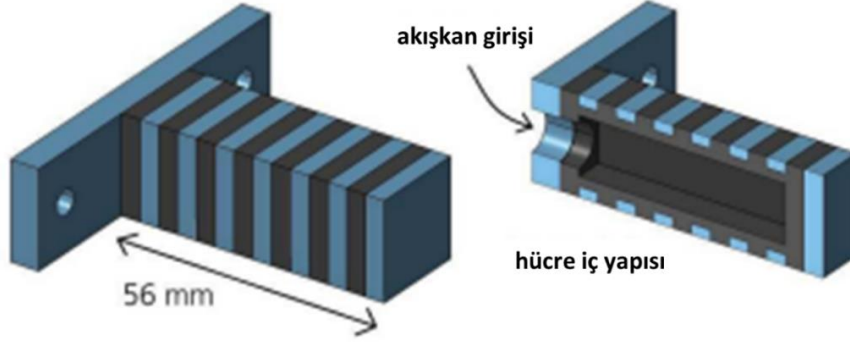


Şekil 1: Hücre yapısı kullanılarak tasarlanan bir kanat yapısı [Vasista vd., 2018]

¹ Öğrenci, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: koksal.bugra@metu.edu.tr

² Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: msahin@metu.edu.tr

Literatürde yayınlanan bir makalede [Vasista vd., 2018] kare kesit alanına sahip bir basınç tahriki ile şekil değiştiren yapı tasarlanmıştır. Şekil 2’de tasarlanan bu hücre yapısını görmekteyiz. Şekildeki siyah ile görünen kısım kauçuk, mavi ile görünen kısım ise alüminyum olarak modellenmiş ve basınç altında bu yapıların istenilen uzamaları sağlayabildiği de gözlemlenmiştir. Yapılan testlerle de [Vasista vd., 2021] bu hücre yapılarının basınç altında şekil değiştirme kabiliyetleri doğrulanmıştır. Bu hücre yapıları yan yana eklenip çoklu hücre yapıları tasarlanabilmekte ve uzama ve kısalmanın yanı sıra bükülme hareketi de elde edilebilmektedir. [Vasista vd., 2020]



Şekil 2: Tekli prizmatik hücre tasarımı [Vasista vd., 2018]

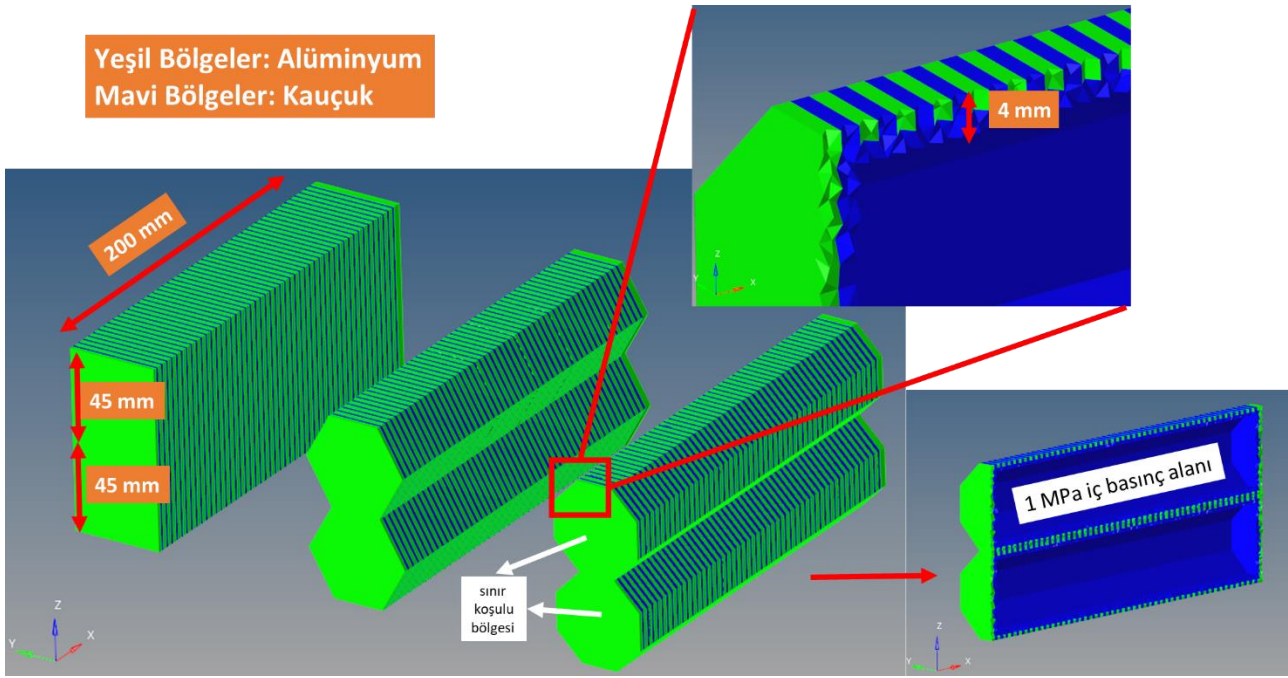
YÖNTEM

Basınç tahriki ile şekil değiştiren hücre yapılarının tasarımı:

Basınç tahriki ile şekil değiştiren hücre yapıları kullanım alanına ve işlevine bağlı olarak farklı şekiller ve büyüklüklerde tasarlanabilir. Bu yapılar ile inşa edilen ana yapı (örneğin kanat yapısı), bu hücre yapılarının geometrisini belirleyen en önemli faktörlerden biridir: Ancak bu hücre yapılarından daha fazla verim alabilmek için ana yapıya uyacak şekilde bazı değişiklikler yapılması gerekmektedir. Ana yapıdan bağımsız olarak bu hücre yapıları ve bükülme kabiliyetlerini incelemek için iki hücre yapı alt alta konumlandırılarak birkaç tasarım yapılmış ve karşılaştırılmıştır.

[Vasista vd., 2018] çalışmasından yola çıkarak başlangıçta 200 mm uzunluğunda, 45 mm genişliğinde iki kare hücre yapısı alt alta konumlandırılarak bükülme hareketi sağlanabilecek bir çoklu hücre yapısı modellenmiştir. Bükülme hareketi sağlayabilmek için yalnızca üstteki hücreye iç basınç olarak 1 MPa uygulanmıştır. Uygulanan bu basınca uyum sağlayabilmesi ve kauçuk malzemede şişmenin gözlemlenmemesi için 2 mm aralılarla alüminyum halka yapılar eklenmiş ve kalınlıkları da 4 mm olarak ayarlanmıştır. Hücrenin 4 mm duvar kalınlığının içerideki 2 mm kalınlıktaki bölgesini tamamen kauçuk malzeme, dış yüzeydeki kalan 2 mm’lik bölgesini ise alüminyum halkalar ve kauçuk oluşturmaktadır.

Karşılaştırma yapabilmek için 200 mm uzunluk 45 mm yükseklik değerleri sabit tutularak kare kesit alanının yanı sıra eşkenar altıgen ve eşkenar sekizgen hücre yapıları da modellenmiştir. Bu yapılarda da kalınlık ve halka genişlikleri kare hücre yapısı ile aynı alınmıştır. Modellerde yükseklik değerleri sabit tutularak büküm hareketini sağlayan sıvı basınç kuvvetinin merkeze olan uzaklığının aynı olması sağlanmıştır. Bunun sebebi kuvvet merkezinin (yani kuvvet kolunun) bu yapılarda bükülmeyi sağlayan en önemli değişkenlerden biri olmasıdır. Bu değer daha sağlıklı karşılaştırma yapabilmek için sabit tutulmuştur. Fakat bunu sağlarken eşkenar geometri seçilmesinden dolayı, oluşturulan kesitlerin yüzey alanlarında farklı değerler elde edilmiştir. Tasarımların statik analizi için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur Şekil 3’te hazırlanan sonlu eleman modelini görmekteyiz.



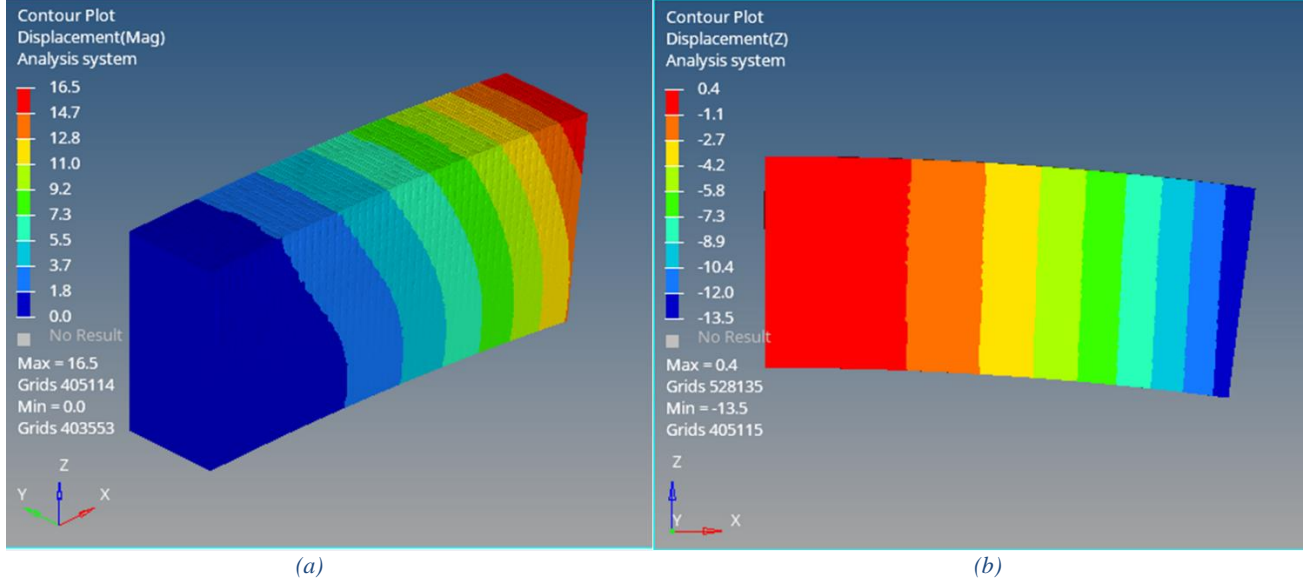
Şekil 3: Hücre geometrileri

Başlangıç olarak hücre yapıların katı geometrileri oluşturulmuş ve bu geometriler 3-boyutlu 2 mm boyutunda dört yüzlü ağlar (*tetramesh*) ile modellenmiştir. Kauçuk bölge için Neo Hookean malzeme modeli kullanılarak [Mostafapour vd., 2017; Vasista vd., 2018] malzeme tanımlaması da yapılmıştır. Oluşturulan geometrilerde Şekil 3'te de gösterildiği gibi hücre yapılarının yalnızca üst hücrelerine 1 MPa büyüklüğünde basınç uygulanmıştır. Sınır koşulu olarak yine Şekil 3'te gösterilen sınır koşulu bölgesinden tüm yönlerde tutularak geometrik doğrusal olmayan sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Geometrik doğrusal olmayan model toplam on kademede (her analizde 0.1 MPa artış uygulayarak) analiz yapacak şekilde ayarlanmıştır. Her kademede iç basınç yapıyı takip ederek (*following force* özelliği) her zaman yapının iç yüzeyine dik açı ile uygulanması sağlanmıştır. Yapılan sonlu eleman analizinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

UYGULAMA VE DEĞERLENDİRME

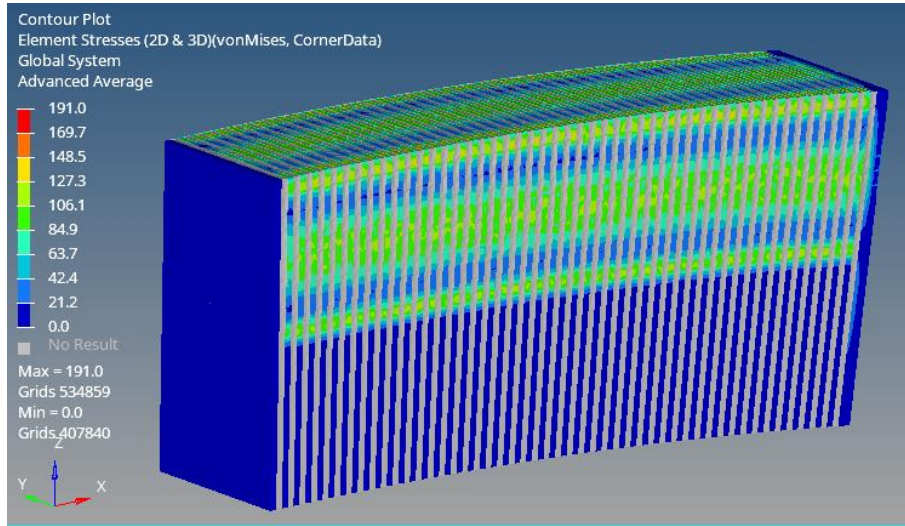
Kare Kesit Alanlı Şekil Değiştiren Hücre Yapısı Sonlu Eleman Analizi Sonuçları:

Kare kesit alanına sahip hücre yapısı doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde serbest olan uçta Şekil 4'te görüldüğü gibi toplamda 16.5 mm deplasman sonucu vermektedir. Serbest olan uçta yalnızca Z yönünde ise 13.5 mm bir deplasman değeri görülmektedir.



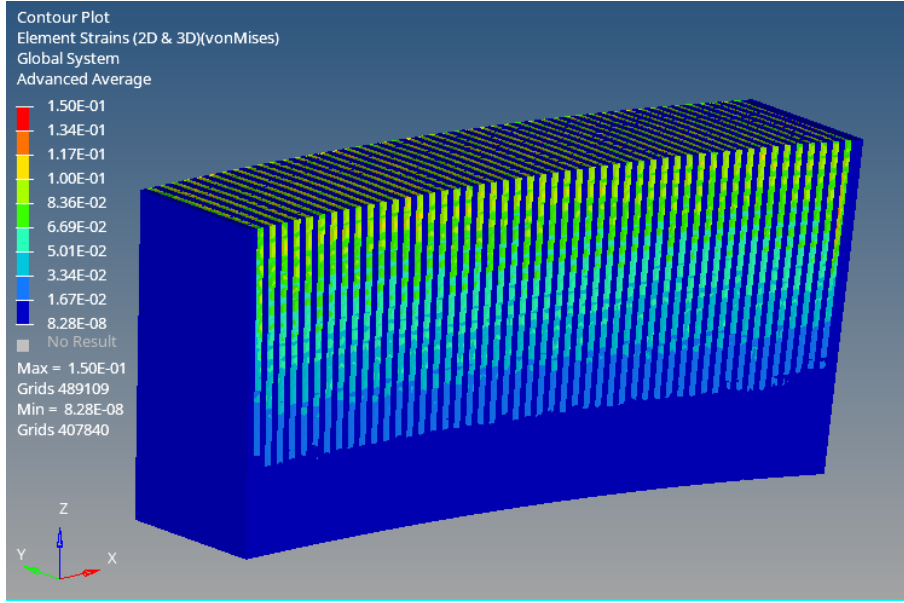
Şekil 4: Kare kesit alanlı hücre yapısı deplasman sonuçları [mm] a) izometrik görüntü b) yan görüntü

Hücre yapısındaki alüminyum bölgenin Von-Misses gerilme grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Gerilme değeri en fazla 191 MPa olarak görülmektedir. Gerilme değerleri, beklenildiği üzere köşelerde ve iç basınç kaynaklı hücrelerin şişme miktarının en fazla olacağı bölgelerde artış göstermektedir.



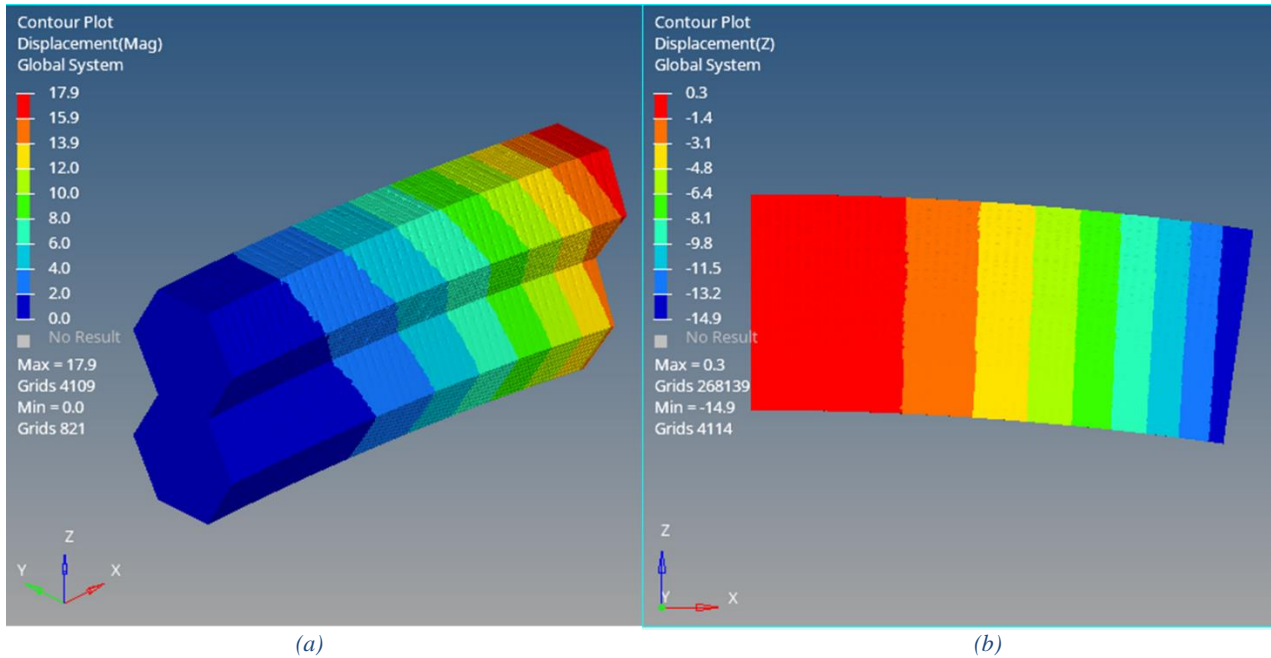
Şekil 5: Kare kesit alanlı hücre yapısı Von-Misses gerilmesi [MPa]

Elastik malzeme (yani kauçuk) ile modellenen bölgedeki Von-Misses gerinmesi aşağıdaki grafikte görüldüğü gibi maksimum 0.150'dir, Şekil 6. Gerinme incelendiğinde beklenildiği gibi hücre yapısı bükülürken üst yüzeyde yarattığı çekme kuvvetinden kaynaklı merkezden üst yüzeye doğru gerinme değerinde artış gözlemlenmektedir.



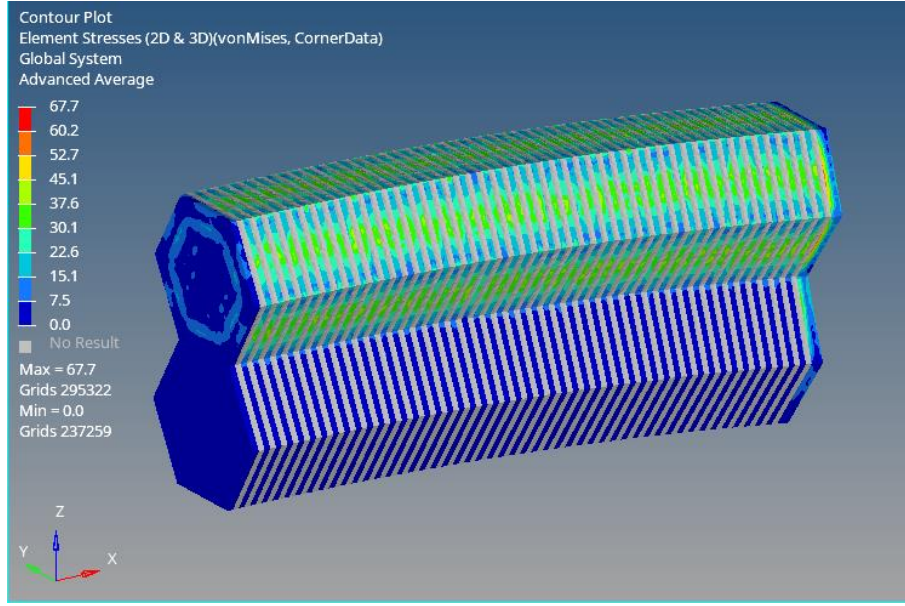
Şekil 6: Kare kesit alanlı hücre yapısı Von-Misses gerinmesi [ε]

Eşkenar Altıgen Kesit Alanlı Şekil Değiştiren Hücre Yapısı Sonlu Eleman Analizi Sonuçları: Eşkenar altıgen kesit alanlı hücre yapısı, üzerinde yapılan sonlu eleman analizi sonucunda Şekil 7'de görüldüğü üzere serbest uçta toplamda 17.9 mm deplasman göstermektedir. Bu deplasmanın 14.9 mm'si Z yönünde olmuştur. Bu sonucu, kare kesit alanlı hücre yapısı ile karşılaştırıldığında çok küçük bir fark gözlemlenmektedir.



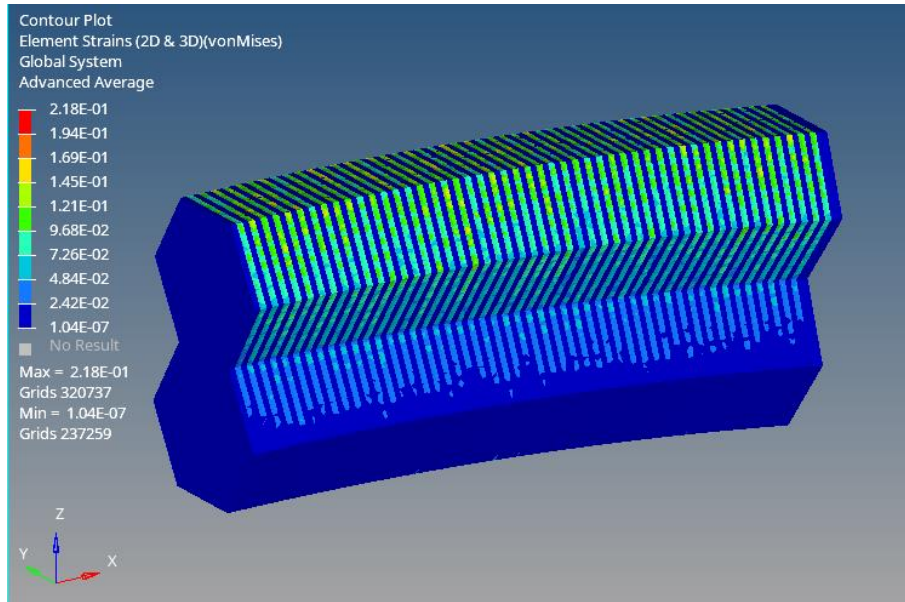
Şekil 7: Eşkenar altıgen kesit alanlı hücre yapısı deplasman sonuçları [mm] a) izometrik görüntü b) yan görüntü

Alüminyum modellenen bölge için analiz sonucunda aşağıdaki Von-Misses gerilmesi grafiği incelendiğinde maksimum gerilme değeri 67.7 MPa olarak görünmektedir, Şekil 8. Bu değer kare kesit alanlı hücre analizi sonuçları ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bunun sebebi ise köşe açısının 90 dereceden 120 dereceye düşürülmesiyle köşelerde gerilme konsantrasyonunun azalması ile açıklanabilir.



Şekil 7: Eşkenar altıgen kesit alanlı hücre yapısı Von-Misses gerilmesi [MPa]

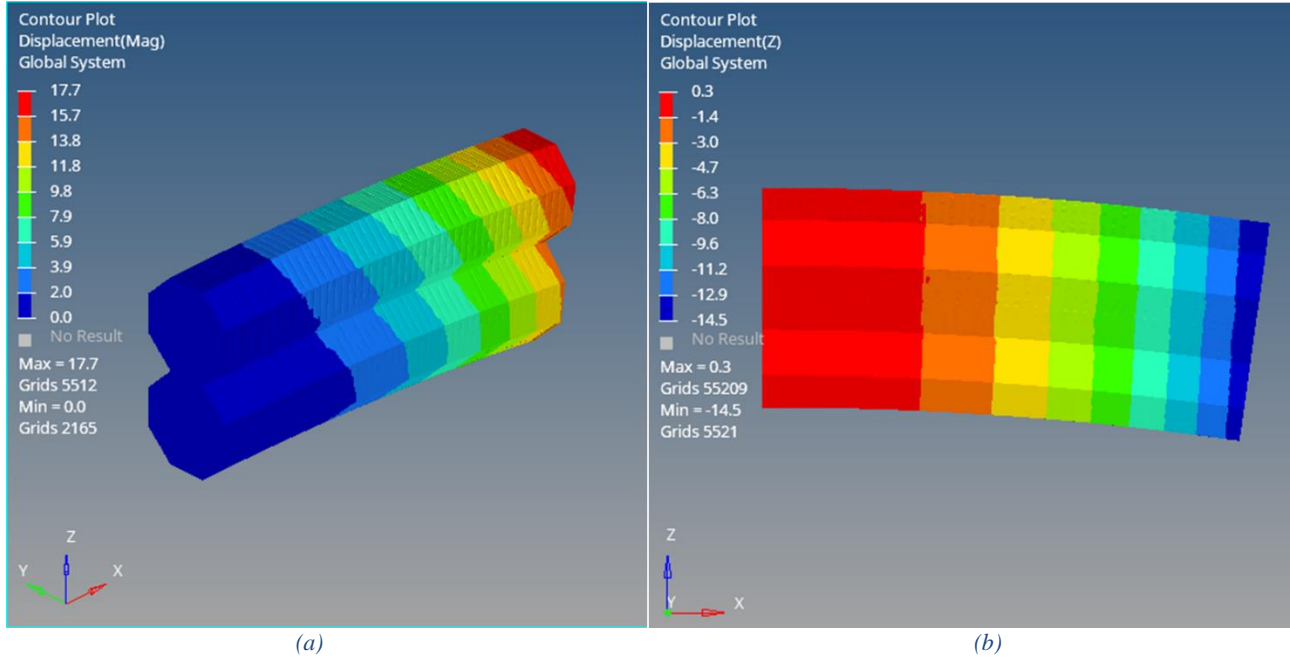
Kauçuk Von-Misses gerinimi değeri Şekil 9'da 0.218 olarak görünmektedir. Gerinme dağılımı kare kesit alanlı hücre yapısında olduğu gibi yapının merkezinden üstüne doğru artmaktadır. Kare kesit alanına göre eşkenar altıgen kesit alanlı hücre yapısı gerinim değerinde küçük bir artış göstermektedir.



Şekil 8: Eşkenar altıgen kesit alanlı hücre yapısı Von-Misses gerinmesi [ϵ]

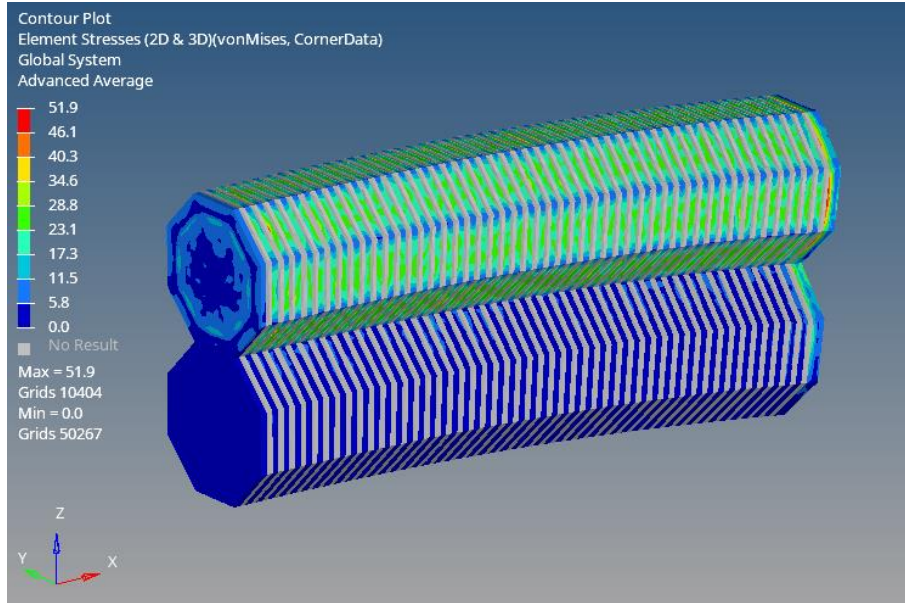
Eşkenar Altıgen Kesit Alanlı Şekil Değiştiren Hücre Yapısı Sonlu Eleman Analizi Sonuçları:

Eşkenar sekizgen kesit alanlı hücre yapısı tasarımı sonlu elemanlar analiz sonucunda aşağıdaki deplasman grafiğinde görüldüğü gibi Z yönünde 14.5 mm olmak üzere toplamda 17.7 mm deplasman değeri elde edilmiştir, Şekil 10. Eşkenar altıgen kesit alanlı tasarımda olduğu gibi bu tasarım da kare tasarımdan çok farklı bir deplasman değerleri sergilememiştir.



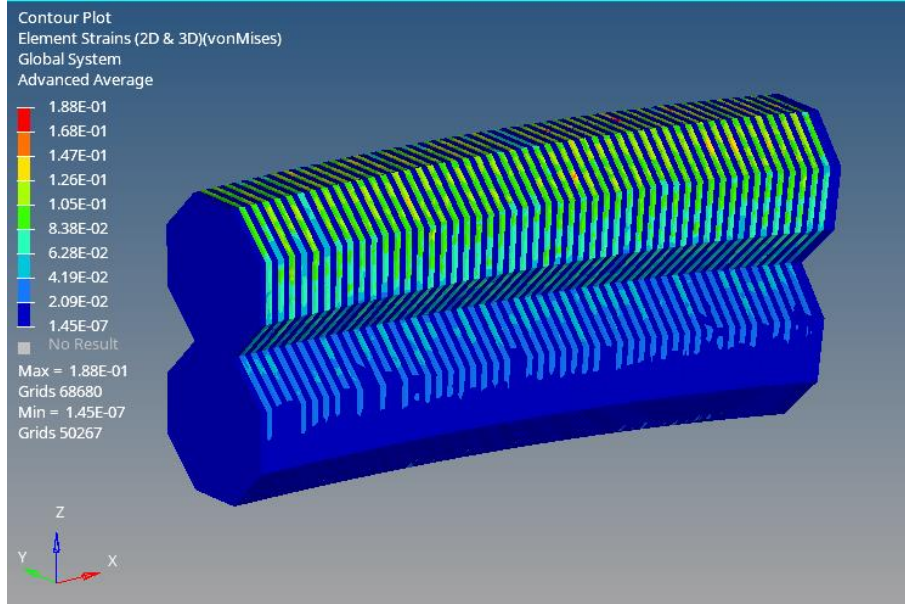
Şekil 10: Kare kesit alanlı hücre yapısı deplasman sonuçları [mm] a) izometrik görüntü b) yan görüntü

Alüminyum malzeme ile modellenen kısımdaki Von-Mises gerilimi değeri maksimum 51.9 MPa olarak Şekil 11'de görülmektedir. Bu değer kare kesit alanlı tasarım ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Altıgen yapı gibi sekizgen yapı da kenar açılarının büyümesinden kaynaklı olarak daha düşük seviyelerde gerilme göstermektedir.



Şekil 9: Eşkenar sekizgen kesit alanlı hücre yapısı Von-Mises gerilmesi [MPa]

Kauçuk Von-Misses gerinimi değeri aşağıdaki grafikte [Şekil 12] 0.188 olarak görünmektedir. Gerinme dağılımı kare kesit alanlı hücre yapısında olduğu gibi yapının merkezinden üstüne doğru artmaktadır. Altıgen hücre yapısında olduğu gibi sekizgen tasarım da aynı basınç değerinde kare kesit alanlı tasarıma göre daha yüksek gerinim değerleri göstermiştir.



Şekil 10: Eşkenar sekizgen kesit alanlı hücre yapısı Von-Misses gerinmesi [ϵ]

Kare, eşkenar altıgen ve eşkenar sekizgen kesit alanlı hücre yapılarının deformasyon, gerilme ve gerinme değerleri ayrıca Tablo 1'de de derlenmiştir.

Tablo 1: Sonlu eleman analizi sonuçları

	Kare Hücre Yapısı	Eşkenar Altıgen Hücre Yapısı	Eşkenar Sekizgen Hücre Yapısı
Kesit Alanı [mm^2]	2025.00	1753.73	1677.64
Z Deformasyonu [mm]	13.5	14.9	14.5
Gerilim [Von-Misses, Alüminyum, MPa]	191.0	67.7	51.9
Gerinme [Von-Misses, Kauçuk, ϵ]	0.150	0.218	0.188

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere tasarımda en büyük kesit alanına sahip olan kare hücre yapısı olmasına rağmen (bükülmeyi sağlayan kuvvet, kesit alanı ve uygulanan basıncın çarpımı ile doğru orantılı artmaktadır.) altıgen ve sekizgen kesit alanlı hücre tasarımları kare tasarımdan yaklaşık %10 daha yüksek Z deplasman değeri göstermektedir. Ayrıca çok daha düşük gerilme seviyelerinde altıgen ve sekizgen kesit alanlı hücre tasarımları benzer Z deplasmanı değerlerine ve gerinme değerlerine ulaşabilmektedir.

SONUÇ

Hücre yapılar yalnızca dayanıklılığa bağlı tasarlanamaz. Kullanım amaçları (bükülme ve/veya uzama), kullanım yerleri (kanat firar ve/veya hücum kenarı), üretim ve ana tasarıma uygunluk gibi birçok faktör hücre geometrilerini etkilese de hücrelerin çalışma mantığını anlayıp, en verimli olduğu çalışma basınç aralığını bulup doğru hücre geometrisini seçmek önemlidir. Yüksek basınç aralıklarında çalışmayı gerektiren yapılarda bu basınca dayanabilen geometriler tasarlanmalıdır.

Yapılan statik sonlu eleman analiz sonuçlarına göre eşkenar altıgen ve eşkenar sekizgen kesitli basınç tahriki ile şekil değiştiren hücre yapıları kare kesitli hücre yapılarına nazaran aynı basınç değeri altında aynı deformasyon değeri ile çok daha düşük gerilme değerleri göstermiştir. Bu sonuç altıgen ve sekizgen kesitli hücre yapılarının iç basınca daha dayanıklı olduklarını ve daha yüksek basınç değerlerinde de çalışabileceklerini göstermiştir.

Bu sonucun çıkmasının sebebi bilindiği üzere iç basınca en dayanıklı geometrinin çember kesit alanı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple kesit alanı kareden sekizgene doğru ilerlerken geometrinin de çembere daha da yaklaşmış olması nedeniyle iç basınç sonucunda oluşan yüzey gerilimi miktarı da azalmaktadır.

Yapıların kesit yüzeyi alanları incelendiğinde en hafif tasarım da yine sekizgen kesitli hücre yapısına ait olduğu, Tablo 1 'den kesit yüzeyi alanlarının kareden sekizgene doğru azalmakta olduğu da görülmektedir. Bükülmeyi sağlayan basınç kuvveti [N] de kesit yüzeyi alanı ile orantılı olarak azalmasına rağmen bu üç hücre yapısı da yaklaşık (%10 fark) deformasyon değerlerini vermiştir.

Tüm sonuçlar incelendiğinde basınç tahrikli hücre yapılarının tasarımında kare kesit alanlarının yanı sıra altıgen, sekizgen hatta daire gibi farklı kesit alanları kullanılarak daha dayanıklı, kuvvet altında daha düşük gerilim sonuçları veren yapılar inşa edilebilir. Daha yüksek basınç değerlerinde çalışabildikleri için bu yapılar kare kesit alanlı hücre yapılarına nazaran basınç artırımını ile yüksek deformasyon değerlerine erişebilmektedirler.

Kaynaklar

- Mostafapour, A., Naderi, G., & Nakhaei, M. R. (2017, January 1). *Theoretical models for prediction of mechanical behaviour of the PP/EPDM nanocomposites fabricated by friction stir process*. Polyolefins Journal. Retrieved March 1, 2022, from http://poj.ippi.ac.ir/article_1370.html
- Sun, J., Guan, Q., Liu, Y., & Leng, J. (2016). Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(17), 2289–2312. <https://doi.org/10.1177/1045389x16629569>
- Şahin, H.L. (2018). Synthesis, analysis and design of a novel mechanism for the trailing edge of a morphing wing. (tez). Middle East Technical University
- Vasista, S., Büchner, K., Titze, M., Riemenschneider, J., Monner, H. P., & Seitz, V. (2021) Modeling and experiments of additively manufactured fluid actuated morphing unit structures. Institute for Composite Structures and Adaptive Systems, Germany Aerospace Center (DLR), Braunschweig 38108, Germany
- Vasista, S., Riemenschneider, J., Mendrock T., & Monner, P., H., (2018). Pressure driven morphing devices for 3D shape changes with multiple degrees of freedom. Institute for Composite Structures and Adaptive Systems, Germany Aerospace Center (DLR), Braunschweig 38108, Germany
- Vasista, S., Titze, M., Schäfer, M., Bertram, O., Riemenschneider, J., & Monner, H. P. (2020). Structural and systems modelling of a fluid-driven morphing winglet trailing edge. *AIAA Scitech 2020 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2020-2010>
- Yaman, Y., Tunçöz, İ., Yang, Y., Arslan, P., Kalkan, U., Tıraş, H., Gürses, E., Şahin, M., & Özgen, S. (2015). Decamber morphing concepts by using a hybrid trailing edge control surface. *Aerospace*, 2(3), 482–504. <https://doi.org/10.3390/aerospace2030482>