

28 - 30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

BAL PETEĞİ DOLGUYA SAHİP SANDVIÇ YAPILARIN BÜKME YÜKÜ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ozan Yardımcı¹, Ercan Gürses²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

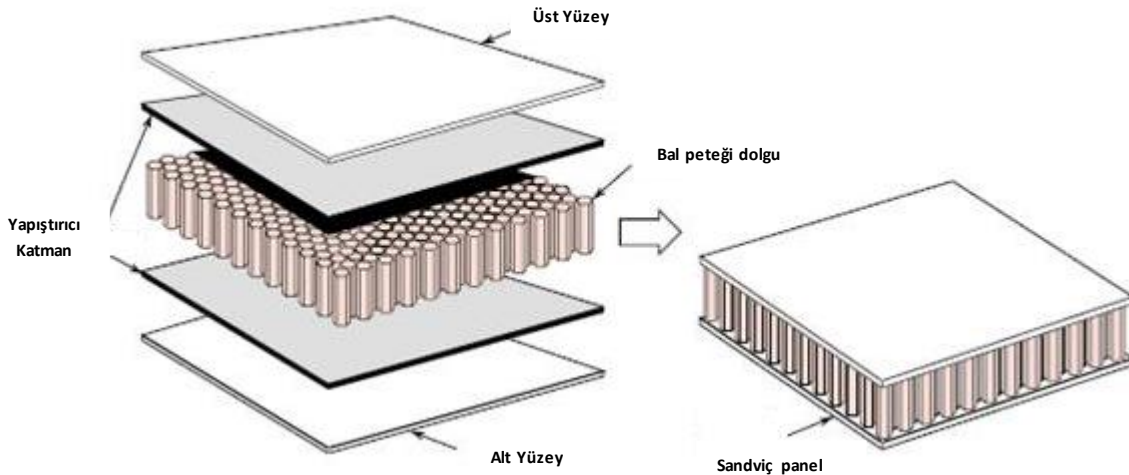
ÖZET

Bu çalışmada 4-noktadan bükme testine maruz kalan sandviç bir kirişin sayısal benzetimi yapılmıştır. Sandviç yapının yüzey ve dolgu malzemesi alüminyum olup dolgu geometrisi düzgün altıgen bal peteğidir. Bal peteği dolgunun davranışının geometrik özelliklere göre değişiyor olmasından yola çıkılarak farklı hücre boyutlarına sahip olan iki sandviç kiriş için sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerin yapıda plastik gerinimlere neden olacak büyüklükteki yer değiştirmeler altında gösterdikleri davranışları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bükme yüküne maruz kalan sandviç yapılarda en kritik hasar tipi hücre duvarlarına meydana gelen burkulma olarak belirlenmiş olup hücre boyutunun sandviç yapının performansı üzerinde ciddi farklılıklar yarattığı tespit edilmiştir.

GİRİŞ

Sandviç yapılar, iki ince plaka ve bu plakalar arasına yerleştirilmiş olan dolgudan oluşmaktadır (bkz.

Şekil 1 ve Şekil 6). Dayanımdan ödün vermeden ağırlıktan kazanç sağlayan sandviç yapılar havacılıkta sıklıkla tercih edilmektedir.

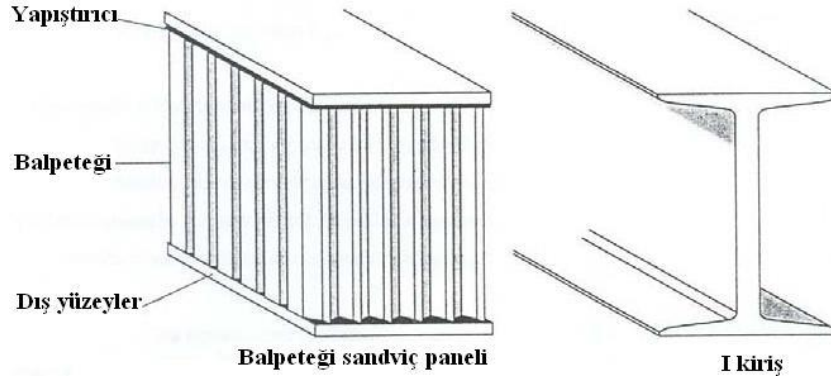


Şekil 1 Sandviç Panel [<http://www.stressebook.com/honeycomb-sandwich-panels>, 2016]

Sandviç yapıların davranışları ile geleneksel I kirişlerin davranışları arasında benzerlik kurulabilir.

¹ Yük. Lisans Öğr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: ozanyardimci@hotmail.com

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



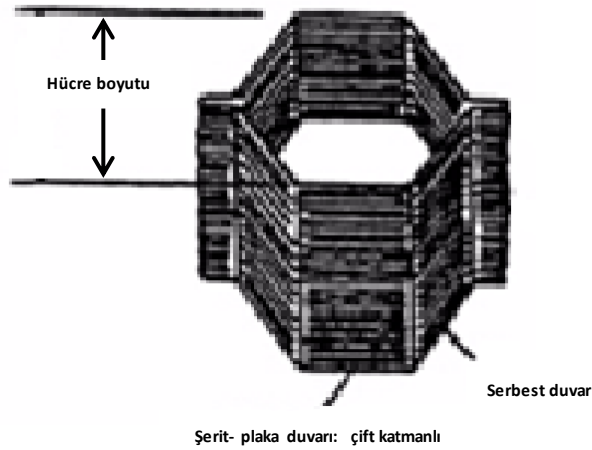
Şekil 2 Sandviç yapı ve I kiriş [Belkem et al., IATS, 2011]

Şekil 2'de gösterilen I kiriş enine yüklendiğinde bir yüzey basma diğer yüzey ise çekme gerilmesi altında kalmakta ve kirişin gövdesi kesme gerilmesini taşımaktadır. Sandviç yapılarda ise kiriş gövdesinin yerini bal peteği dolgu alır. Yani, bal peteği dolgunun duvarları bükme yükü altındayken yapının Şekil 1'de gösterilen alt ve üst yüzeyine göre çok daha yüksek miktarda kesme kuvvetine maruz kalır. Bu da, sandviç yapılarda özellikle eksen dışı yüklemelerde, 4-noktadan bükme testinde olduğu gibi, bal peteği dolgunun duvarlarında burkulma, ezilme, ya da yırtılma gibi hasar tiplerine neden olabilir.

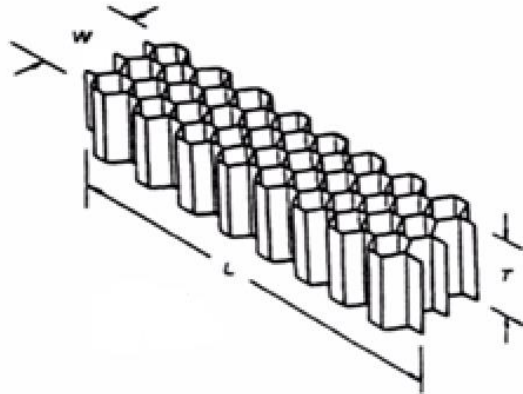
Sandviç yapılarda dolgu malzemesi olarak birden fazla geometri kullanılabilir ancak bu çalışmada yalnızca düzgün altıgen yapıya sahip olan bal peteği dolgu incelenmiştir.

Bal peteği sandviç yapıların geleneksel yapılara kıyasla farklı özellikler göstermesi bal peteği dolgunun tanımlanmasında kullanılan farklı bir terminolojinin doğmasına neden olmuştur. Bu terminolojiye ait bazı tanımlar şunlardır:

Bal peteği dolgu yoğunluğu	Birim metre küp dolgu malzemesinin ağırlığıdır.
Birim hücre	Bal peteği dolgunun bir ünitesidir. Genellikle altıgen şeklindeki yapıdır. (bkz. Şekil 3)
Şerit-plaka	Bal peteği yapıyı oluşturan malzemedan yapılmış olan düz plakadır. (bkz. Şekil 3)
Serbest hücre duvarı	Etrafındaki hücreler ile çakışık duvarı bulunmayan hücre duvarlarıdır. (bkz. Şekil 3)
L-yönü ya da şerit-plaka yönü	Devamlılığı olan plakanın yönüdür. Genellikle, dikdörtgen şeklindeki bir sandviç yapının uzun kenardır. Bu yöndeki hücre duvarları çakışık duvarlardır. Yani şerit plaka yönündeki duvar kalınlıkları, serbest hücre duvarlarının duvar kalınlığının iki katına eşittir. (bkz. Şekil 4)
W-yönü	Dolgu malzemesinin üretim aşamasındayken iki tarafından tutularak açıldığı yöndür. W-yönü şerit- plaka yönüne diktir. (bkz. Şekil 4)
T-yönü	L ve W yönüne düzlem dışı olacak şekilde dik olan yöndür. (Sağ el kuralı ile bulunabilir.) (bkz. Şekil 4)



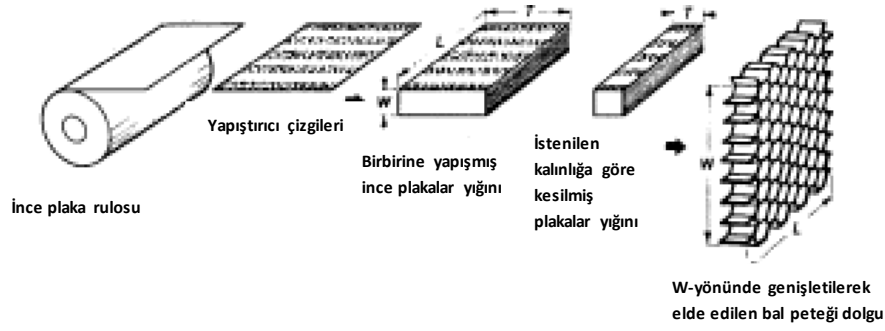
Şekil 3 Bal Peteği Dolgu Birim Hücresi [Bitzer, 1997]



Şekil 4 Bal Peteği Dolgu Yönleri [Bitzer, 1997]

Bal peteği dolgu malzemesini terminolojik tanımlarında da bahsedildiği gibi birim hücre içerisine bazı duvarlar çift katmanlı iken bazıları tek katmanlıdır. Yani, bazı duvarların kalınlıkları diğerlerinin iki katıdır. Bu bal peteği yapının üretim yönetiminden kaynaklanmaktadır. Bu yöntemler genişletme ve buruşturma yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır. Buruşturma yöntemi yüksek maliyeti nedeniyle pek tercih edilmez ancak yüksek yoğunluklu ve küçük hücreli dolguların üretimi için mecburen kullanılır. Bu çalışmada genişletme yöntemi ile elde edilmiş dolgu malzemesi incelenmiştir, bkz. Şekil 5. Bu yöntemin temel adımları kısaca şu şekilde özetlenebilir [Bitzer, 1997]:

1. İnce plakaların üstü aşınmaya karşı dirençli malzeme ile kaplanır.
2. İnce plakaların üstüne çizgi şeklinde yapıştırıcı sürülür.
3. İnce plakalar üstü üste dizilerek yapıştırılır.
4. Yapıştırıcıların daha kuvvetli bir şekilde yüzeylere tutunması için plakalara ısı verilir ve yüksek basınç uygulanır.
5. Birbirine yapıştırma çizgilerinden yapışmış olan plaka yığını istenilen kalınlığa göre kesilir.
6. Plakalar W-yönünde çekilerek açılır.
7. Genişletme sırasında şerit-plaka duvarları ve serbest duvarların kesiştiği noktalarda kontrollü plastik hasar oluşmasına izin verilir ve bu sayede altıgen hücre geometrisi elde edilir.



Şekil 5 Genişletme Üretim Yöntemi [Bitzer, 1997]

Şekil 6 Fabrikasyon Ürünü Alüminyum Sandviç Paneller
[http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html, 2016]

Malzeme Özellikleri

Sandviç yapının yüzey ve dolgu bölümlerinde kullanılan malzemeler ve birim hücrenin geometrik özellikleri Tablo 1’de ve Tablo 2’de görülebilir. Malzeme modeline ait gerinim - gerilme grafiği ise Şekil 7’de verilmiştir.

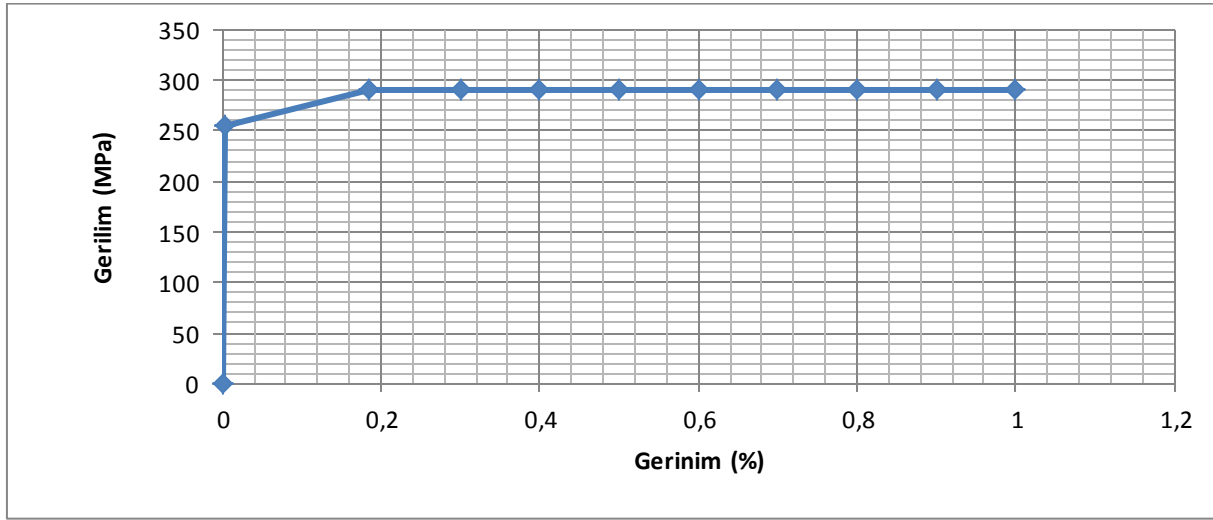
Tablo 1 Model Malzemeleri [Hexweb Bal Peteği Dolgu Malzeme Özellikleri Kataloğu, 1999]

	Yüzey Malzemesi	Bal Peteği Dolgu		
		Dolgu Malzemesi	Hücre Boyutu (mm-inç)	Hücre duvar kalınlığı (mm)
Model 1 (M01)	AL5052	AL5052	9.525 - 3/8	0.145*
Model 2 (M02)	AL5052	AL5052	4.763 - 3/16	0.145*

*Hexweb kataloğunda belirtilen duvar kalınlığından farklı bir kalınlık kullanılmıştır.

Tablo 2 AL5052 Malzeme Özellikleri [<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>, 2016]

AL5052		
Doğrusal özellikler	Young Modülü (MPa)	70300
	Poisson Oranı	0.33
Akma özellikleri	Akma Gerilmesi (MPa)	Plastik Gerinim (%)
	255	0
	290	0.18
Yoğunluk	Fiziksel Yoğunluk (g/cm ³)	2.6

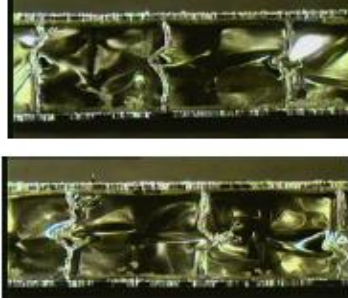


Şekil 7 AL5052 Malzeme Modeli Gerinim – Gerilme Eğrisi

Şekil 7’de verilen grafiğe göre teorik olarak başlangıçta yapıya uygulanan yer değiştirme ile yapıda oluşan tepki kuvveti arasında doğrusal bir ilişki olması beklenmektedir. Ancak yapı üzerinde belli bölgelerde oluşan gerilme, kritik gerilme değeri olan 255 MPa’ya ulaştıktan sonra yapıda bölgesel olarak plastik akmanın başlaması ve davranışın doğrusallıktan uzaklaşması beklenmektedir. Şekil 7’de gösterilen malzeme davranışı sünek olarak tanımlanabilir. Sünek malzemelerdeki deformasyonun başlıca sebebi ise kesme gerilmesidir [Beer et al., 2012]. Sünek malzeme kullanılan yapılarda yapı üzerinde oluşan tepki kuvveti belirli bir değerin üzerine çıktığında ise bölgesel istikrarsızlıklar başlayacak ve küçük yüklemeler bile yapıda oluşan deformasyonu önemli ölçüde artırebilecektir.

Bal Peteği Yapının Düzlem Dışı Yükleme Altındaki Davranışı

Bal peteği yapılar düzlem dışı yüklere düzlemdeki yüklere göre çok daha dayanıklıdır. Bükme yükü altındaki bir sandviç yapıda doğrusal elastik deformasyon ilk önce hücre duvarlarında aksenal ve kesme deformasyonu olarak başlar. Yapının özellikle basma yükü altında kalan bölgelerinde ise deformasyon, plastik burkulma ile başlar. Akma burulması bal peteği dolgunun duvarlarında Şekil 8'deki gibi kalıcı deformasyona neden olabilir.

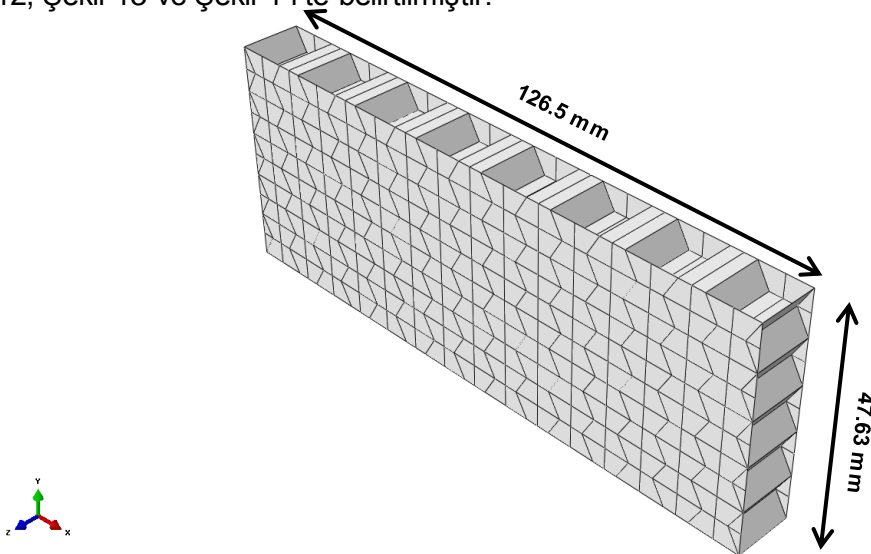


Şekil 8 Bal peteği yapıda oluşan akma menteşeleri [Abbadi ,2009]

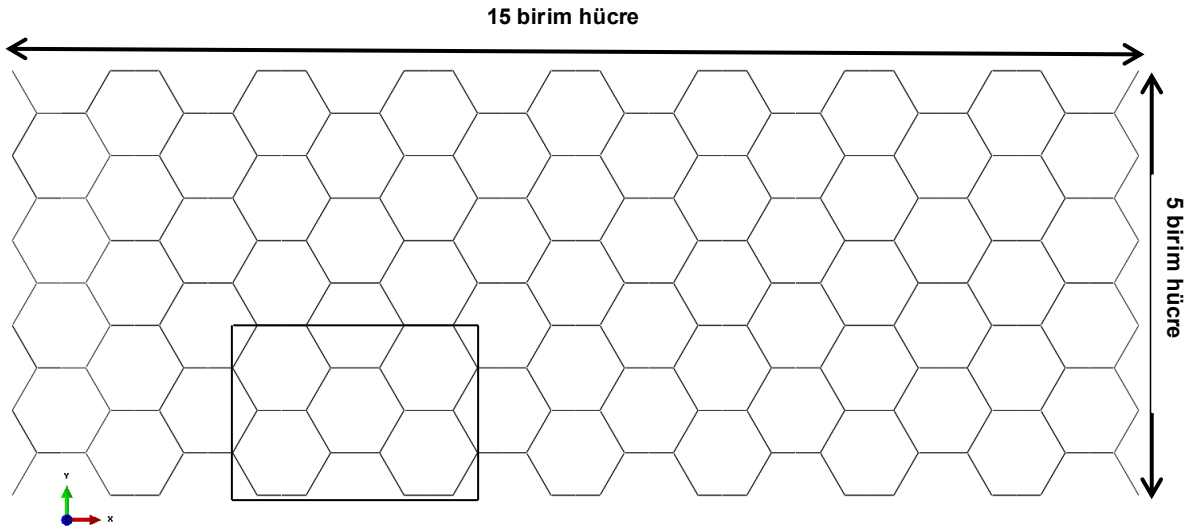
YÖNTEM

Geometrik Özellikler

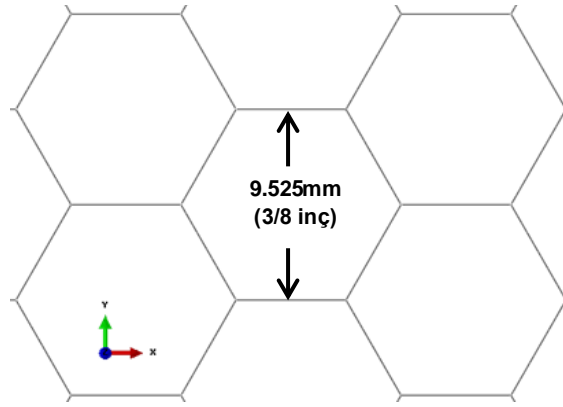
Sandviç panel iki farklı hücre boyutu için modellenmiştir. Dikdörtgen şeklindeki panelin boyutu sabit tutularak dolgu malzemesinin hücre boyutu değiştirilmiştir. Her iki modelde de yüzeylerin kalınlığı aynı olup 0.58 mm'dir. Birinci modelde 3/8 inç (9.525 mm) olan hücre boyutu ikinci modelde yarıya düşürülmüştür. Her iki modelde kullanılan bal peteği dolgu düzgün altıgen geometriye sahiptir. Dolgu malzemesinin derinliği yarım inç (12.7mm) olarak belirlenmiştir. Bal peteği dolgu malzemesi gerçek geometrik özelliklerine sadık kalınarak birebir modellenmiştir. Giriş bölümünde bahsedilen genişletme üretim yöntemi dikkate alınarak dolgu malzemesinin şerit-plaka yönündeki duvar kalınlığı W-yönündeki duvar kalınlığının iki katı olarak belirlenmiştir. Şerit-plaka duvar kalınlığı 0.290 mm, W-yönü duvar kalınlığı ise 0.145mm'dir. Bal peteği dolgu ile yüzeyler arasındaki yapıştırıcı katman modelde dikkate alınmamış olup yapıştırıcı katmanın mükemmel çalıştığı varsayılmıştır. Geniş hücre boyutuna (3/8 inç) sahip sandviç panel Model 1, daha küçük hücre boyutuna sahip olan panel ise model 2 olarak adlandırılmıştır. Geniş hücre boyutuna sahip sandviç panele ait geometrik özellikler Şekil 9, Şekil 10, ve Şekil 11'de gösterilmiş olup Model 2'ye ait olanlar Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te belirtilmiştir.



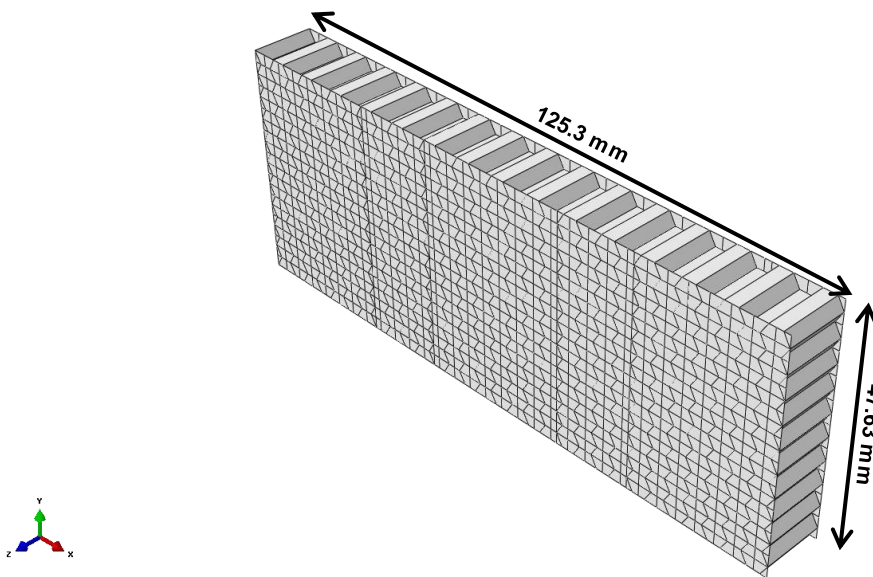
Şekil 9 Geniş hücre boyutuna sahip model (Model 1 – hücre boyutu: 3/8 inç)



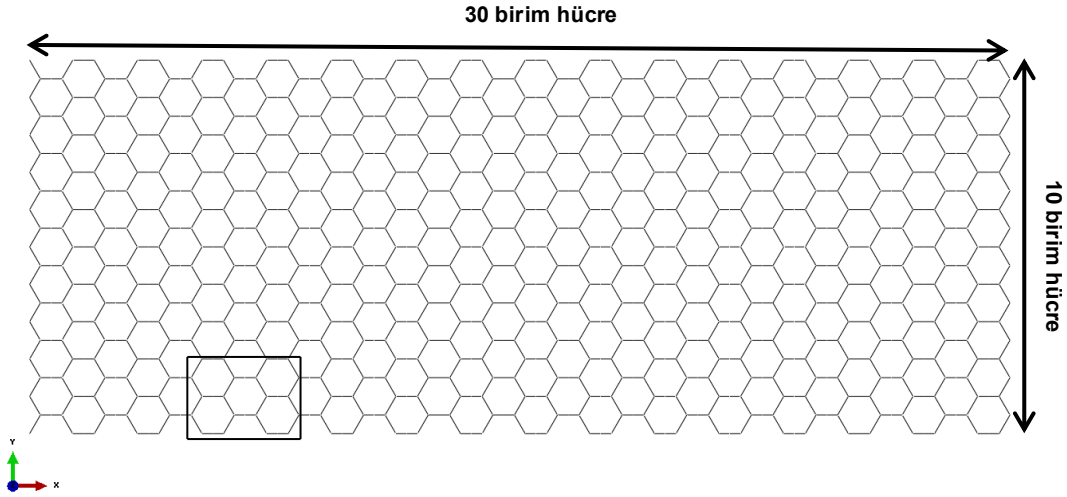
Şekil 10 Bal peteği dolgu (Model 1)



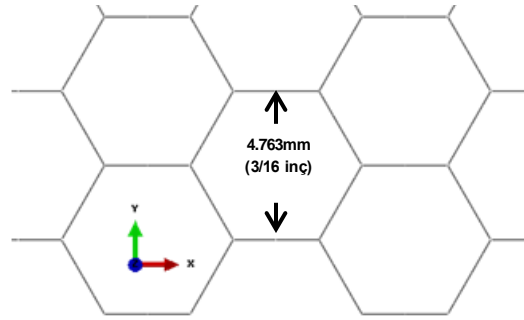
Şekil 11 Bal peteği dolgu birim hücresi (Model 1)



Şekil 12 Daha küçük hücre boyutuna sahip model (Model 2 – hücre boyutu: 3/16 inç)



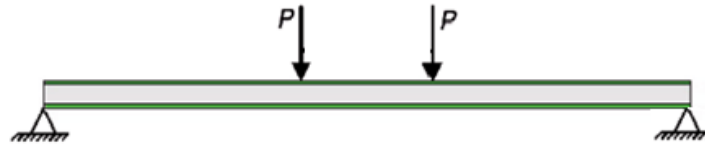
Şekil 13 Bal peteği dolgu (Model 2)



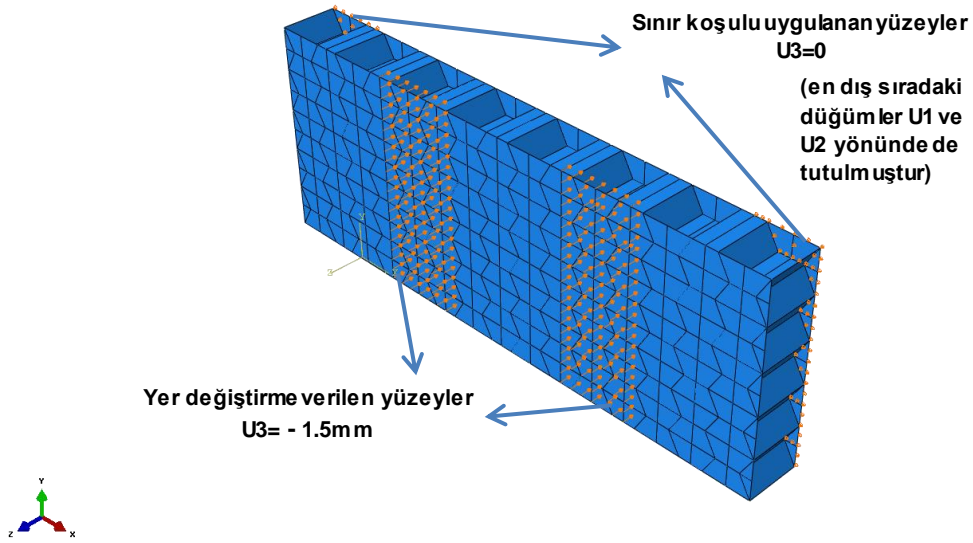
Şekil 14 Bal peteği dolgu birim hücresi (Model 2)

Sonlu Eleman Modelleri

Sandviç panelin sonlu eleman modeli ABAQUS programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modele Şekil 15'teki gibi dört noktadan bükme testi yük ve sınır koşulları uygulanmıştır. Modelin üst yüzeyine 16.5 mm genişliğindeki iki ayrı bölgede z-yönünde -1.5 mm yer değiştirme uygulanmıştır. Sınır koşulu olarak ise modelin alt yüzeyinin iki ucu 13.75 mm genişliğinde bir alandan U3 yönünde tutulmuştur. Model üzerine uygulanan yük ve sınır koşulları Şekil 16'da gösterilmiştir.

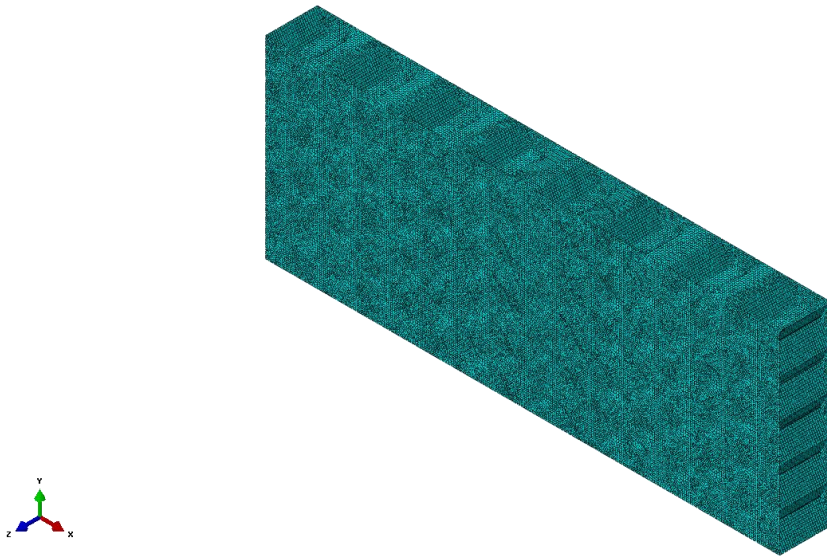


Şekil 15 4-noktadan bükme test düzeneği



Şekil 16 Yük ve sınır koşulları

Sandviç panelin sonlu eleman modeli Şekil 17'de gösterilmiştir. Sonlu eleman modelinin büyük bir bölümü S4R tipi kabuk elemanlardan oluşmaktadır. Çözüm ağı kalitesinin artırılması için S3 tipi kabuk elemanlar da kullanılmıştır. S4R tipi elemanların kullanımı sayısal benzetimi yapılan panelin kalınlığının, genişlik ve uzunluğundan daha küçük olduğu durumlarda doğru sonuçlar verir. S4R tipi elemanlar 4 adet düğüm noktasına sahip dörtgenler şeklinde olup indirgenmiş integrasyon ve yüksek gerinim formülasyonuna sahiptir. İndirgenmiş integrasyonda, S4R elemanları katılık matrisini oluştururken indirgenmiş integrasyon formülünü kullanır ancak kütle ve dağıtılmış yük matrisleri olağan integrasyon formülü ile hesaplanır; bu sayede hesaplama hızı ve sonuçların doğruluğu artırılmış olur. [Abaqus Kullanıcı El Kitabı, 2016]. Modellerin çözüm ağlarına ilişkin bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

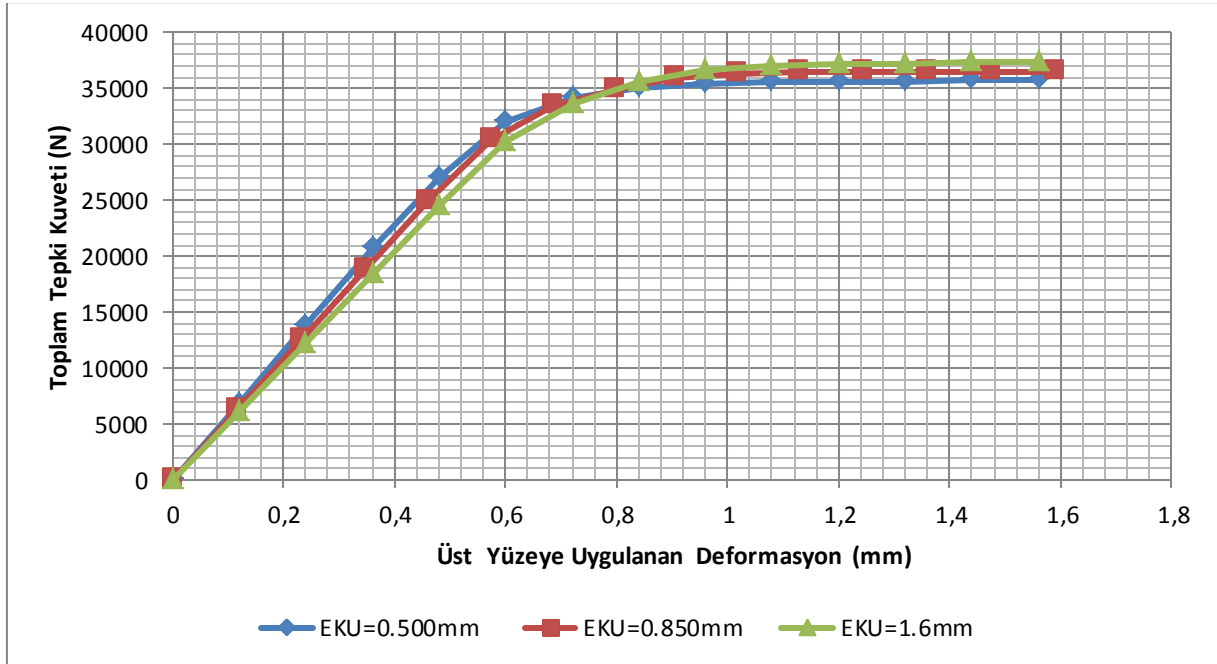


Şekil 17 Sonlu eleman modeli (Model 1)

Tablo 3 Model 1 ve Model 2'ye İlişkin Çözüm Ağı Özellikleri

Model 1 (M01)	Model 2 (M02)
<ul style="list-style-type: none"> • Toplam düğüm noktası sayısı: 37762 • Toplam eleman sayısı: 40076 • S4R tipinde 39414 adet doğrusal dörtgen kabuk eleman • S3 tipinde 662 adet doğrusal üçgen kabuk eleman 	<ul style="list-style-type: none"> • Toplam düğüm noktası sayısı: 175016 • Toplam eleman sayısı: 187097 • S4R tipinde 185429 adet doğrusal dörtgen kabuk eleman • S3 tipinde 1668 adet doğrusal üçgen kabuk eleman

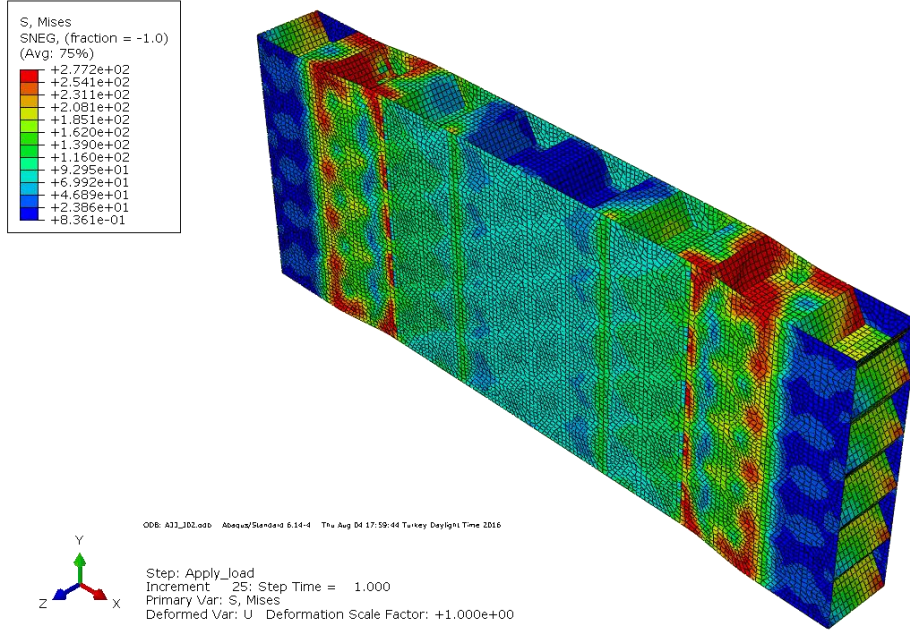
Modelin üst yüzeyine uygulanan 1.5 mm büyüklüğündeki yer değiştirme dolgu malzemesinin duvarlarına akma deformasyonuna neden olup modeli doğrusal bölgeden çıkaracak nitelikte seçilmiştir. Çalışmanın hedefi kesme yüküne maruz kalan farklı hücre boyutlarındaki bal peteği dolguya sahip sandviç yapıların performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bunun için sınır koşulu uygulanan düğüm noktalarındaki toplam tepki kuvveti değerleri dikkate alınmıştır. Ancak, sandviç panelin üzerine uygulanan deformasyon sonucu sayısal benzetimin doğrusal bölgeden çıkıp doğrusal olmayan bölgeye geçmesi sayısal yakınsama problemini doğurmuştur. Bunun için sonlu eleman modeli aynı koşullar altında farklı eleman kenar uzunluklarına sahip olan çözüm ağları ile denenmiş sonunda sayısal yakınsama sağlayan model sonuçların elde edilmesinde kullanılmıştır. Çözüm ağı sayısal yakınsama çalışmasının sonuçları Şekil 18'de verilmiştir. Bu grafiğe göre element kenar uzunluğu (EKU) 0.850 mm olan model sayısal betimleme sonuçlarının elde edilmesine kullanılacaktır.



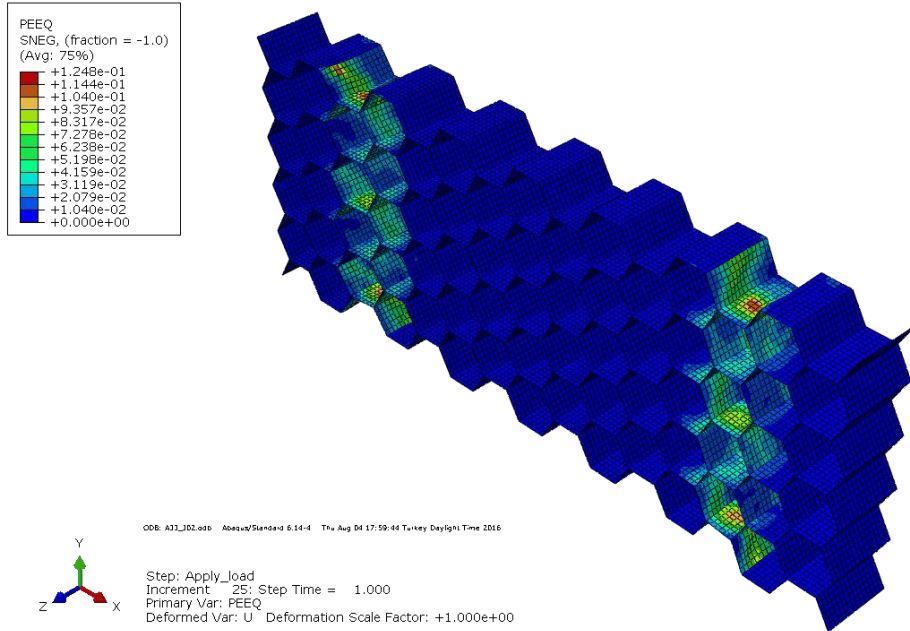
Şekil 18 Çözüm ağı sayısal yakınsama çalışması

UYGULAMALAR

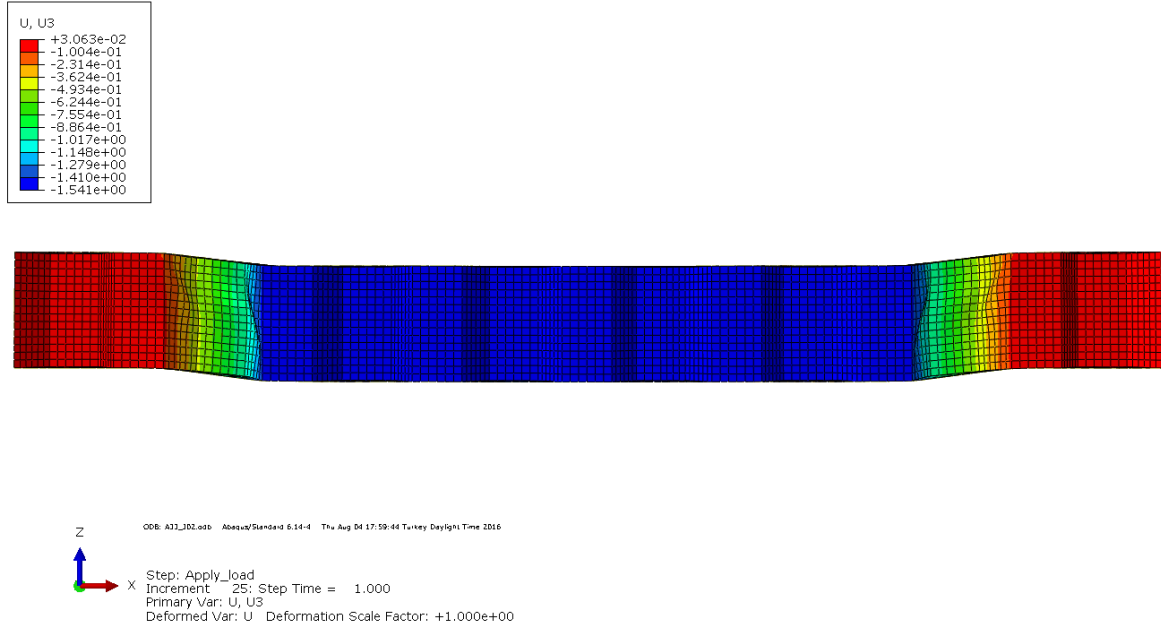
Yapılan sayısal betimlemeler sonucunda elde edilen sonuçlar Model 1 ve Model 2 için görseller şeklinde verilmiştir. Hücre boyutu büyük olan Model 1'e ait Mises Gerilmesi grafiği Şekil 19'da, dolgu malzemesi üzerinde oluşan eşdeğer plastik gerinim Şekil 20'de, sandviç panelde oluşan z-yönündeki deformasyonun xz-düzlemindeki görüntüsü Şekil 21'de verilmiştir



Şekil 19 Mises Gerilmesi (Model 1)

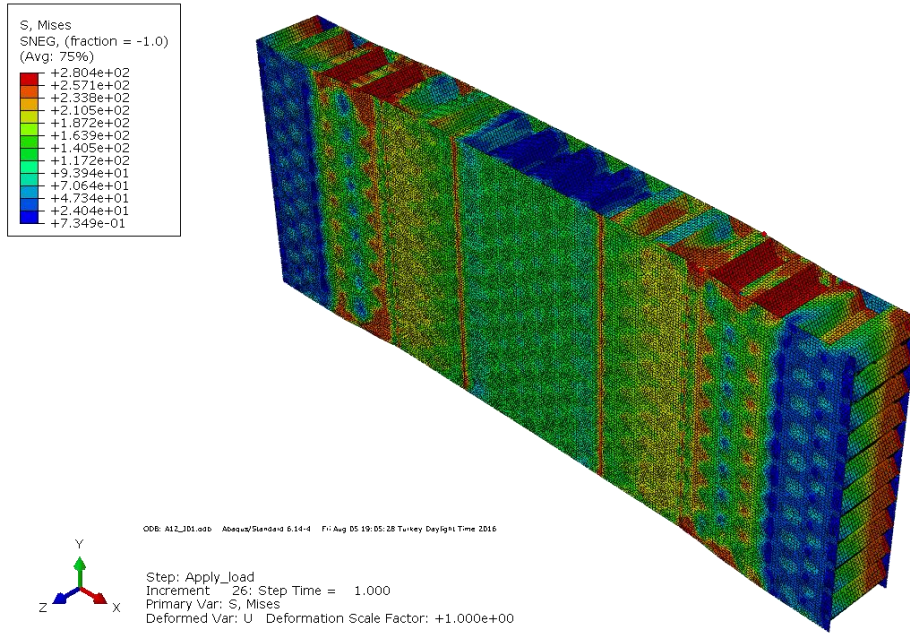


Şekil 20 Bal peteği dolgu üzerinde oluşan eşdeğer plastik gerinim (Model 1)

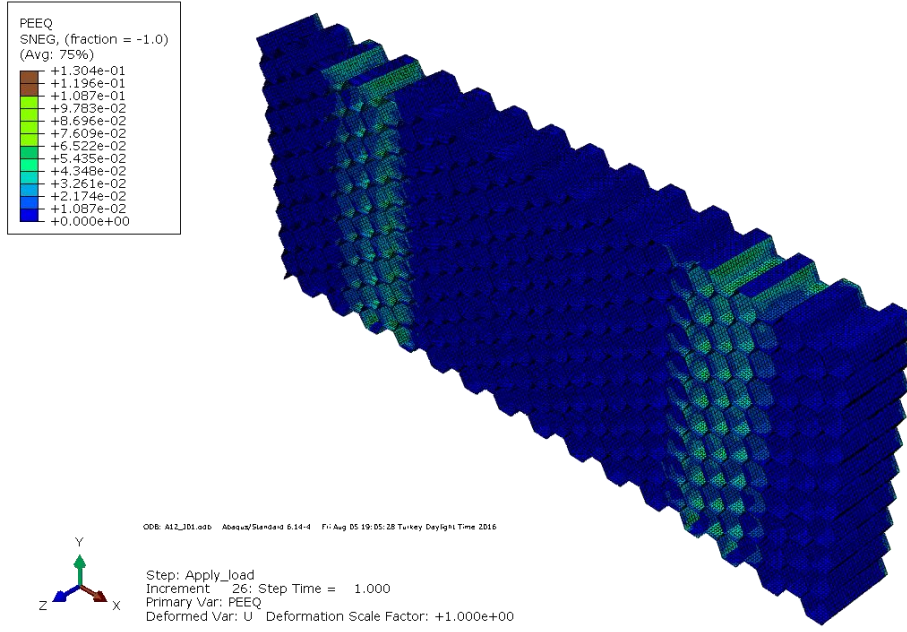


Şekil 21 Z-yönündeki deformasyon (Model 1)

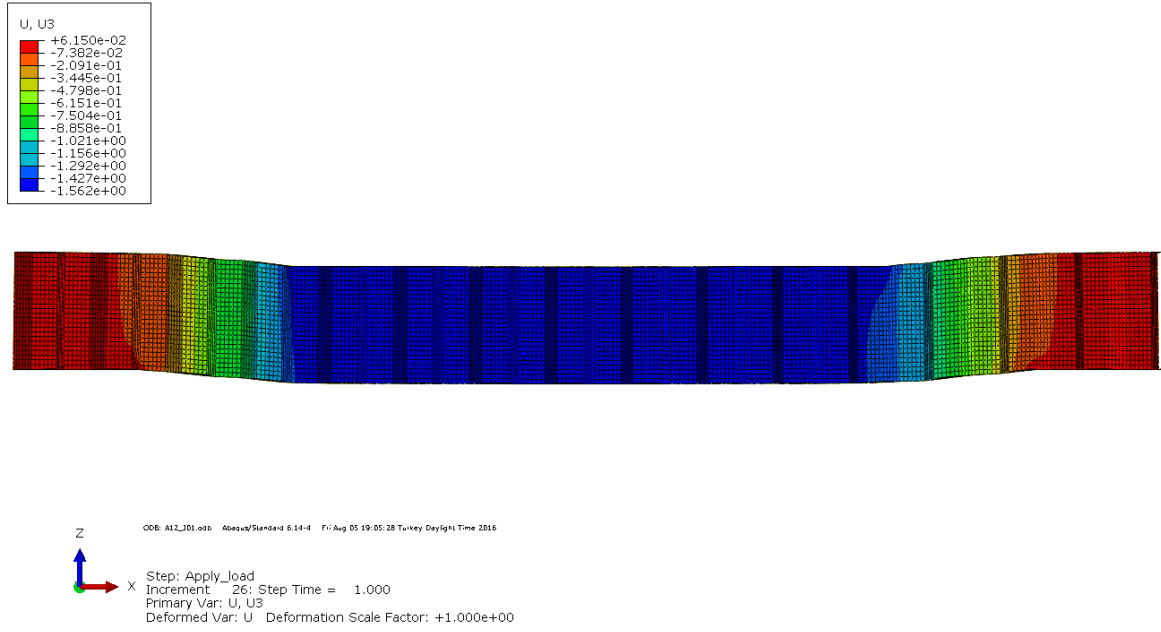
Daha küçük hücre boyutuna sahip olan Model 2 içinse Mises Gerilmesi Şekil 22'de, dolgu malzemesi üzerinde oluşan eşdeğer plastik gerinim Şekil 23'te, sandviç panelde oluşan z-yönündeki deformasyonun xz-düzlemindeki görüntüsü Şekil 24'te verilmiştir



Şekil 22 Mises gerilmesi (Model 2)



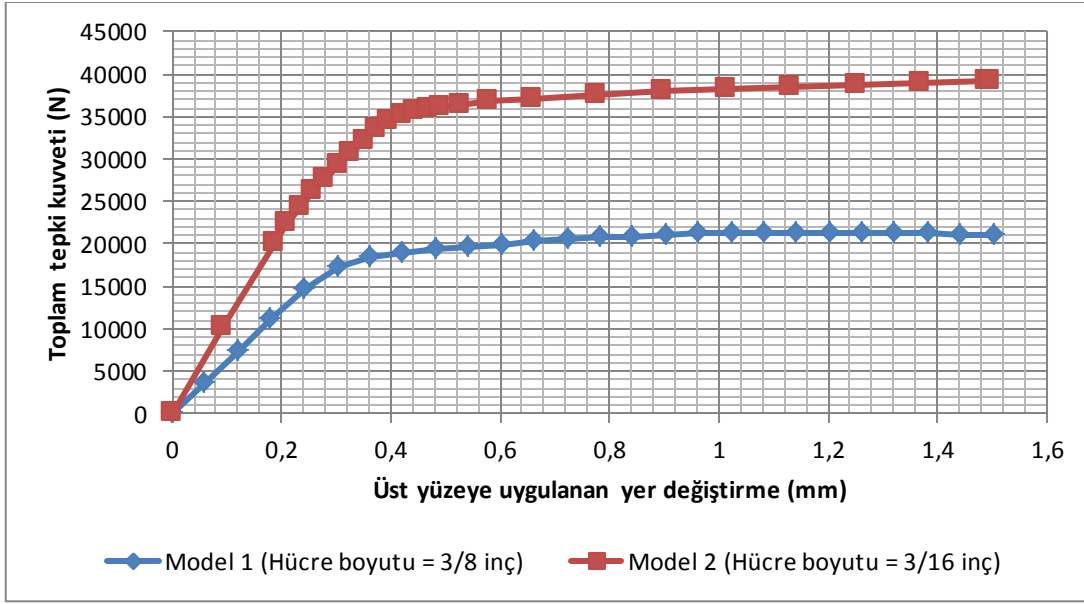
Şekil 23 Bal peteği dolgu üzerinde oluşan eşdeğer plastik gerinim (Model 2)



Şekil 24 Z-yönündeki deformasyon (Model 2)

SONUÇ

Uygulamalardan elde edilen sonuçlara göre Şekil 25'teki grafik çizdirilmiştir. Bu grafiğe göre daha küçük hücre boyutuna sahip olan Model 2, Model 1'e göre doğrusal bölgeden daha yüksek gerinim değerlerinde çıkmaktadır. Ancak her iki model üzerinde de plastik gerinim yaklaşık olarak aynı miktarda yer değiştirmeye maruz kaldıklarında ilk defa oluşmaktadır. Ayrıca daha küçük hücre boyutuna sahip olan Model 2 yaklaşık olarak 30,000 N değerindeki toplam tepki kuvveti değerinde doğrusal bölgeden ayrılırken birinci model yaklaşık 17,000 N değerinde doğrusal bölgeden çıkmaktadır. Buradan küçük hücre boyutuna sahip olan dolgu malzemesinin büyük hücre boyutuna sahip olan dolgu malzemesine göre aynı koşullar altında yaklaşık %77 daha fazla kuvvet taşıyabildiği sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 25 Uygulanan Yer Değiştirme - Desteklerde Oluşan Tepki Kuvveti Grafiği

Sandviç panel hasar cinsi bakımından incelendiğinde ise sonuçlar 4-noktadan bükme testinde sıklıkla görülen dolgu duvarlarının burkulması hasar tipini doğrular niteliktedir. Kesme tipi yüke maruz kalan bu tür yapılarda hücre duvarındaki burkulma en kritik hasar tipi olarak öne çıkmaktadır. Pek çok kaynak ise dolgu malzemesi kaynaklı hasarların sandviç yapılarda en sık görülen hasar tipi olduğunu öne sürmektedir. [Allen, 1969; Hall ve Robson, 1984; Zenkert ve Vikström, 1992; Zenkert, 1995]. Bunlara ek olarak, Daniel, Gdoutos, Wang ve Abot tarafından 2002 yılında yazdıkları makalede, yüzey kalınlığının dolgu derinliğine oranı küçük olan sandviç kirişlerde (bu çalışmada olduğu gibi) kesme yükünün neredeyse tamamının dolgu tarafından taşındığını ve yüksek kesme yükü altındaki sandviç kirişlerde hücre duvarı burkulmasının görüldüğünü belirtmişlerdir. Şekil 20 ve Şekil 23'te plastik gerinimlerin oluştuğu bölge, yük ve sınır koşullarının uygulandığı bölgeler arasında kalmaktadır. Yapı mukavemet açısından düşünüldüğünde bu bölge maksimum kesme yükünün oluştuğu bölgedir ve akma gerinimi bu bölgede yüzeye kıyasla çok daha belirgin bir şekilde dolgu üzerinde oluşmuştur. Şekil 21 ve Şekil 24 incelendiğinde görsel olarak burkulmanın yine bu bölgeye denk geldiğine ulaşılabilir.

Bu çalışmada kullanılan modelin sayısal betimlemesi sadece elastik malzeme girdisi kullanılarak plastik akmaya izin verilmeden tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda maksimum tepki kuvvetleri elastoplastik analizlere göre ciddi miktarda artış göstermiş ve model 1 için 19.500 N, model 2 için 62.300 N mertebesinde çıkmıştır. Bu kıyaslama beklendiği gibi burkulmanın etkisiyle yapıda önemli miktarda plastik akmanın gerçekleştiğini göstermektedir.

Bunlara ek olarak iki model arasında ağırlık bakımında bir karşılaştırma da yapılabilir. Büyük hücreli dolguya sahip Model 1'in ağırlığı 26.7 gram, Model 2'nin ağırlığı ise 34.4 gram olarak ölçülmüştür. Buna göre küçük hücre boyutuna sahip Model 2, Model 1'e göre yaklaşık %29 daha ağır olurken yaklaşık %77 daha fazla toplam kuvvete dayanabilmektedir.

Bu çalışmanın devamında yapılan sonlu eleman modeli geliştirilerek özellikle hücre duvarları üzerinde oluşan hasarlar üzerinde daha detaylı çalışmalar yapılabilir ve daha fazla değişken dikkate alınarak sandviç yapılar üzerinde oluşması muhtemel diğer hasar tiplerinin de modellenmesi sağlanabilir.

REFERANSLAR

1. Abbadi A., Koutsawa Y., Carmasol A., Belouettar S., Azari S. (2009), Experimental and Numerical Characterization of Honeycomb Sandwich Composite Panels, Elsevier
2. Allen, H.G. (1969). Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Pergamon, London.
3. Beer F., Johnston E., Dewolf J., Mazurek D. (2012), Mechanics of Materials, McGraw Hill, NY
4. Bekem A., Ercan H., Doğu M., Ünal A (2011)., Uçak Sanayiinde Kullanılan Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye
5. Bitzer T. (1997), Honeycomb Technology, Springer-Science+Business Media B.V, Dublin, CA
6. Daniel I.M., Gdoutos E.E., Wang K.-A., Abot J.L. (2002), Failure Modes of Composite Sandwich Beam, International Journal of Damage Mechanics, 11(4): 309-334
7. Hall, D.J. ve Robson, B.L. (1984). Composites, 15: 266–276.
8. Hexweb Bal Peteği Dolgu Malzeme Özelliktreri Kataloğu, 1999
9. Zenkert, D. ve Vikström, M. (1992). J. Comp. Res. Tech., 14: 95–103.
10. http://www.admatis.com/eng/competencies_material_science_sandwich.html, 2016
11. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5052H34>, 2016
12. <http://www.stressebook.com/honeycomb-sandwich-panels>, 2016