

3B Eklemeli Üretilmiş Farklı Hücresel Yapılı Sandviç Panellerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Eğilme Davranışının İncelenmesi

Necati Ercan¹⁺, Bahattin Kanber^{1*} and Doruk Erdem Yunus¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü/Mühendislik ve Doğa Bil. Fak., Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

*Corresponding author: bahattin.kanber@btu.edu.tr

+Speaker: necati.ercan@btu.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral

Özet – Eklemeli üretimdeki son gelişmeler ile birlikte, geleneksel tekniklerle üretimi oldukça zor olan hücresel yapılar, daha kolay bir şekilde üretilebilmektedir. Sandviç panellerde çekirdek olarak kullanılabilen hücresel malzemeler, düşük yoğunlukta yüksek rijitlik, eğilme dayanımı ve enerji absorbe etme gibi yeteneklerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu çalışmada, balpeteği, kübik, iskelet IWP ve truss olmak üzere dört farklı hücre topolojisine sahip sandviç panel, solidworks ortamında modellenmiştir. Balpeteği hücresel yapısına sahip sandviç panel, 3 boyutlu eklemeli üretim metodlarından eriyik yığıma yöntemiyle, polilaktik asit(PLA) malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numuneye, ASTM C393/C393M standardına uygun olarak üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Aynı numuneye uygun sınır şartları altında sonlu elemanlar analizi yapılmış ve elde edilen sonuç, deneysel test sonucuyla kıyaslanmıştır. Deneysel sonuç ile sonlu elemanlar sonucunun birbiri ile uyumlu olduğu görüldükten sonra, izafi yoğunluk sabit tutularak farklı hücre topolojilerine sahip sandviç panellerin modelleri üretilmiştir. Üretilen modellerin, hücre topolojisine bağlı olarak eğilmeye karşı olan davranışları, sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma ile aynı kütle ve temel boyutlara sahip sandviç panellerden, kübik hücresel yapıya sahip çekirdeğe sahip sandviç panelin, en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler – Sandviç Panel, Hücresel Yapılar, Eklemeli Üretim, ANSYS, Eğilme Davranışı

1. GİRİŞ

Düşük ağırlığa sahip sandviç yapılar sahip oldukları, yüksek eğilme dayanımı, titreşim sönümlenme, enerji emilimi, ısı yalıtımı gibi özelliklerinden dolayı, havacılık, otomotiv, biyomedikal, rüzgar türbini, denizcilik, inşaat gibi birçok endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1,2]. Tipik sandviç yapıları, alt ve üst yüzeyde bulunan mukavemeti yüksek plakalar ile orta kısımda bulunan düşük ağırlığa sahip çekirdek diye adlandırılan parçalardan oluşur. Yüzeydeki plakalar çoğunlukla eğme yüklerini taşıyan çekirdek yapıya enine kesme yüklerini iletir [3]. Çekirdek bölümü sandviç yapıya sağlamış olduğu kesme dayanımının yanı sıra bükülme ve burkulma direncini de arttırarak [4,5] yüzeydeki plakalarla küçük bir ağırlık artışı ile tutunmayı sağlar [6]. Sandviç panele çekirdek yapısı farklı malzemelerden oluşabilir. Sandviç panellerin çekirdek kısmında kullanılan ilk malzemeler köpükler olarak bilinmektedir [7]. Köpük malzemeleri rastgele sıralanmış gözenekli yapılara sahipken, gelişmiş mekanik özelliklere sahip düzenli yapılar daha homojen özellikler gösterir. Son zamanlarda eklemeli üretimin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla daha homojen özelliklere sahip hücresel malzemeler, sandviç yapılarda çekirdek olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

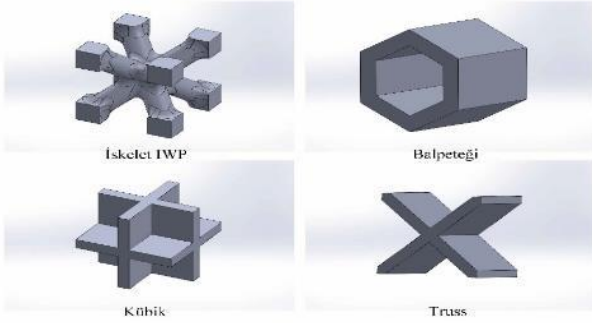
Hücresel malzemeler, istenilen özelliği belirgin hale getirmek için kasıtlı olarak boşluklara sahip malzemelerdir [8]. Hücresel malzemeler sahip oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı, ısı yalıtımı, ısı transfer kontrolü, gelişmiş enerji emme kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı sıklıkla tercih

edilmektedirler [9]. Tüm bu sahip oldukları özelliklerinden dolayı hücresel malzemeler, biyomedikal implantlar [10], filtreler [11], ısı değiştiriciler [12] ve düşük ağırlıklı diğer yapılarda [13] tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Hücresel malzemelerde boşluklar, periyodik olarak düzenli bir şekilde oluşturulduğunda, hücresel malzemeler kafes yapılı malzeme adını almaktadır. Tasarlanan hücresel malzemeler balpeteği hücre yapısında olduğu gibi iki boyutlu yada kübik kafes hücre yapısındaki gibi üç boyutlu geometrilere sahip olabilir. Sandviç panellerde çekirdek olarak kullanılan birçok hücre topolojisi mevcuttur. Bir sandviç panelin mekanik özelliklerini etkileyen parametreler; hücre topolojisi, geometri(hücre boyutu), kullanılan malzeme, izafi yoğunluk, işleme sıcaklığı şeklinde sıralanabilir.

Sandviç yapıların imalatında eklemeli üretimin kullanılması çok çeşitli avantajlar sağlamıştır. Bu avantajların en önemlisi, hücresel çekirdeğin yapısını ve geometrik özelliklerini değiştirerek, geniş bir ölçekte fonksiyonel özelliklerin programlanabilmesine imkan sağlayabilmektedir[14]. Yakın zamana kadar karmaşık hücre geometrilerinin geleneksel üretim teknikleriyle üretimi büyük bir zorlukta ve istenilen hücre boyutu küçüldükçe üretimdeki zorluklar artmaktaydı. Eklemeli üretimdeki son gelişmeler ile birlikte istenilen hücre topolojileri, büyük bir doğrulukla ve çok küçük boyutlarda bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak üretilmeye başlandı.

Bu çalışmada, Şekil 1’de gösterilen iki boyutlu balpeteği ve truss [15] ile üç boyutlu kübik ve iskelet IWP [9] hücresel

yapıları SOLIDWORKS bilgisayar destekli yazılım programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan sandviç panellerden, balpeteği hücresel yapısına sahip olan sandviç panel üç boyutlu eklemeli üretim yöntemlerinden eriyik yığıma yöntemi (FDM) ile 220 °C işleme sıcaklığında polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen balpeteği hücresel yapısına sahip sandviç panele 3 nokta eğme testi yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçla sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarının uyumu gözlenmiştir. Mevcut çalışmada, bahsedilen dört farklı hücre tipi için, işletme sıcaklığı, izafi yoğunluk ve kullanılan malzeme sabit tutularak, hücre topolojisi değişiminin eğilme davranışına etkileri incelenmiştir.

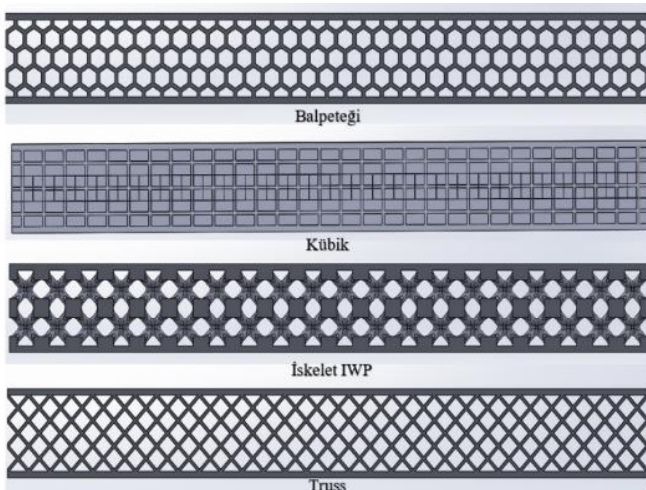


Şekil 1. Birim hücre geometrileri

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Sandviç Panel Tasarımları

Bu çalışmada sandviç panelin çekirdek bölümünde balpeteği, kübik, truss, iskelet IWP olmak üzere dört farklı hücresel kafes yapısı kullanılmıştır. Kullanılan farklı topolojilere sahip sandviç paneller Şekil 2’ de gösterilmektedir. Sandviç panellerin tasarımları SOLIDWORKS bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak yapılmıştır. Sandviç panellerin izafi yoğunlukları %40 olarak belirlenmiş olup tüm tasarımlar bu değere bağlı kalınarak yapılmıştır. İzafi yoğunluk sandviç panelin mevcut ağırlığının, hücresel malzemenin içi dolu olması halindeki ağırlığına oranı olarak tanımlanabilir. Tüm tasarımların boyutları eşittir ve 150×25×17,5 mm’dir. Ayrıca tüm tasarımlarda yüzey levhalarının kalınlığı 1,25×2=2,5 mm ve çekirdek bölümünün kalınlığı 15 mm’dir. Bu yapılardan sadece iskelet IWP yapısı açık hücre yapısına sahip olup diğer yapılar kapalı hücre yapısındadır.



Şekil 2. Farklı hücresel yapıları sandviç panel tasarımları

2.2 Numunelerin Hazırlanması

Üç nokta eğme ve çekme testleri için hazırlanacak numuneler eriyik yığıma modelleme(FDM) yöntemi ile üretilmiştir. Çekme ve eğme numuneleri Şekil 3’de gösterilmektedir.. Eriyik yığıma modelleme bir ekstrüzyon işlemi olarak düşünülebilir. Filament diye adlandırılan termoplastik malzeme, sıcaklığı ayarlanabilir bir nozzle vasıtasıyla eritilir. Eritilen malzeme, uygun takım yolu boyunca katmanlar halinde üst üste biriktirilerek nihai parça elde edilir. Bilgisayar destekli tasarım programıyla tasarımı yapılan modelin, FDM cihazının tanıyabileceği STL dosya formatına dönüştürülmesi gerekir. STL dosya formatındaki model üç boyutlu dilimleme programı olan CURA ile katmalara ayrılır. Bu çalışma için hazırlanan numuneler, Ultimaker/3 Extended üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Malzeme olarak FROSCHE ticari markasının ürettiği 2.85 mm polilaktik asit(PLA) filament kullanılmıştır. Önerilen işleme sıcaklığı ürün kataloğunda 190-230 °C olarak belirtilmiştir. 190, 210, 230 °C’de üretilen numunelerden 230 °C sıcaklığında üretilen numunenin elastite modülü ve kopma dayanımının en yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği 230 °C sıcaklığı işleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Ayrıca üretilen numuneler %100 doluluk oranına sahiptir ve 45 derecelik baklava deseni modeli ile üretilmiştir. Katman kalınlığı 0.1mm, tabla sıcaklığı 60 °C, işleme hızı 70 mm/s olarak ayarlanmıştır. Cihazın tablasına yatay olarak yerleştirilen numunelerin üretiminde destek malzemesine ihtiyaç duyulmamıştır. Yapılan tüm bu ayarlar neticesinde çekme ve üç nokta eğme testi için numuneler üretilmiştir. Eğme testi için üretilen balpeteği hücresel yapısına sahip sandviç panel numunesinin hücre çeper kalınlığı boyutu, tasarım esasında t=0.8 mm olarak belirlenmesine rağmen, FDM yöntemiyle üretim esnasında bu hücre kalınlığının yaklaşık olarak t=0.9 mm olduğu gözlemlenmiştir. Diğer ana boyutlarda herhangi bir değişim görülmemiştir.

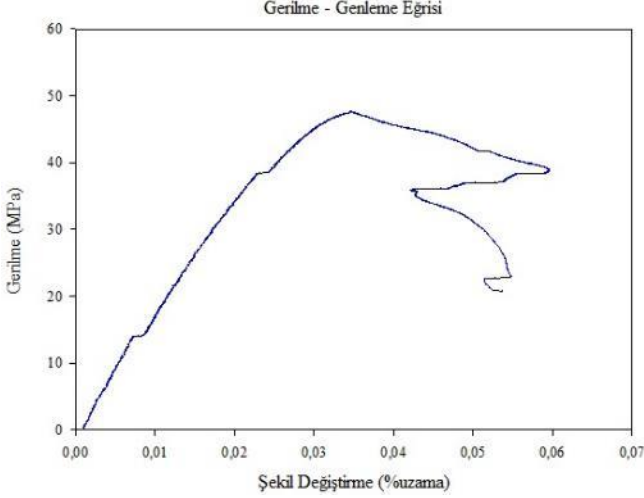


Şekil 3. Eriyik yığıma modelleme yöntemiyle üretilmiş çekme ve eğme numuneleri

2.3. Mekanik Testler

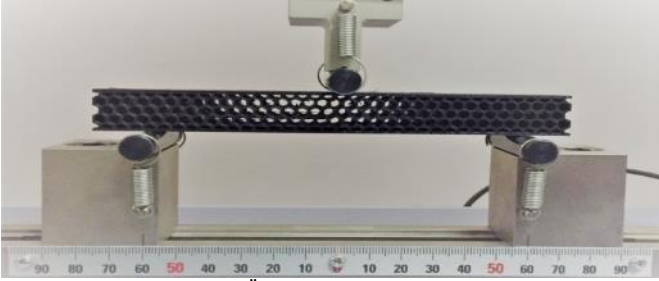
Sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak olan PLA malzemenin elastite modülü (E) ve poisson oranını belirlemek için, çekme numuneleri ASTM D638 standardında belirtilen boyutlarda üretilmiştir. Ayrıca üç nokta eğme testi için üretilen numuneler de ASTM C393/C393M standardına uygun olarak üretilmiştir. Çekme testi numunesinin boyutları standartta belirtilen tip 1 numune boyutuna eşittir. Çekme testi Shimadzu markalı 100 kN maksimum yükünde çalışan cihazda gerçekleştirilmiştir. 230 °C işleme sıcaklığında üretilen PLA malzemesine uygulanan çekme hızı standartta

belirtildiği üzere 5 mm/dk olarak seçilmiştir. Bu değerler altında malzemenin çekme dayanımı 47 MPa, elastite modülü 2243 MPa olarak bulunmuştur. Çekme testinin sonuçları Şekil 4' de gerilme-uzama eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4. Pla malzemesinin çekme testine göre gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Üç nokta eğme testi ise Shimadzu 1 kN test cihazında yapılmıştır. Numune boyutları 150×25×17,5 mm'dir Span mesafesi olarak 130 mm seçilmiştir, yani numune her iki ucundan 15mm boşluk bırakılarak mesnetlenmiştir. Shimadzu test cihazında standartta belirtildiği üzere 0,5 mm/dk hızında, 1 N'luk ön yüklemle ile üç nokta eğme testi yapılmıştır. Test sonucunda numunenin kırıldığı kuvvet değeri 755 N ve uzama miktarı 3,15 mm olarak bulunmuştur. Üç nokta eğme test cihazı ve numuner Şekil 5' de gösterilmiştir.



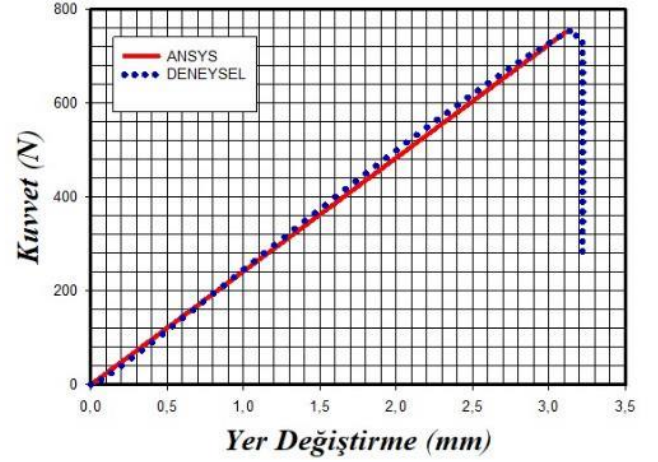
Şekil 5. Üç nokta eğme test düzeniği

2.4 Sonlu Elemanlar

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için ticari bir program olan ANSYS 19.1 paket programı kullanılmıştır. Solidworks te tasarlanan eğme numuneleri parasolid dosya formatında Ansys programına aktarılmıştır. Uygulanacak model engineering data bölümünden "İsotropic Elasticity" olarak seçilmiştir. Polilaktik asit malzemesinin özellikleri test sonuçlarından elde edilen değerlerden, elastite modülü 2243 MPa ve poisson oranı 0,35 olarak tanıtılır. Mesh işlemi sonucunda modelimiz 13273 elemana ayrılmıştır. Static structural bölümünde mesnetler gerçeğe uygun şekilde konumlandırılır ve sınır şartları belirlenmiş olur. Y ekseninde parçanın tam orta noktasından kuvvet, yayılı bir şekilde 100 adımda uygulanmıştır. Çözüm(solution) bölümünde, verilen kuvvet neticesinde elde edilen yerdeğişimi miktarları bulunmuştur. Dört farklı hücre topolojisine sahip model için ayrı ayrı çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. 0.8 mm çeper kalınlığında tasarlanan balpeteği hücresel sandviç yapısının FDM yöntemi ile üretimi esnasında çeper kalınlığının %10 oranında arttığı ve çeper

kalınlığının yaklaşık 0.9 mm' ye çıktığı gözlemlenmiştir. Çeper kalınlığı= 0.9 mm için ansys sonlu elemanlar analizi yapılmış ve elde edilen kuvvet- yerdeğiştirme eğrisinin üç nokta eğme testi sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu uyum neticesinde diğer sandviç panellerin analizlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Çeper kalınlığı 1 mm olan balpeteği hücresel çekirdeğine sahip modelin, deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarının uyumu Şekil 6' da açıkça görülmektedir.

Kuvvet- Yer Değiştirme Grafiği

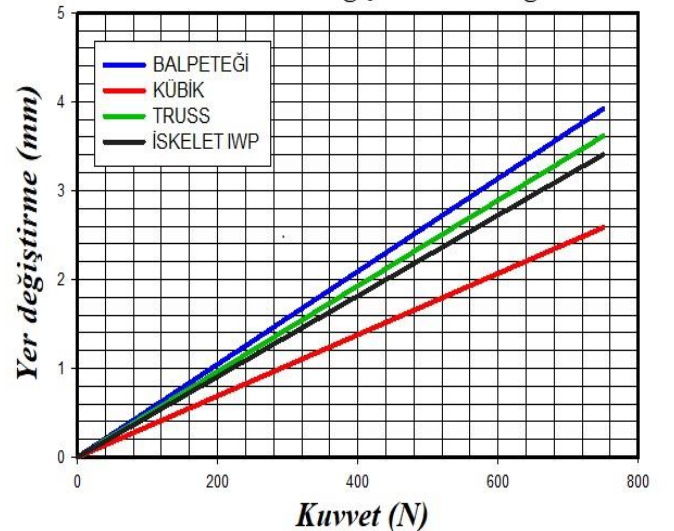


Şekil 6. Balpeteği hücresel çekirdeğine sahip eğme numunesinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları

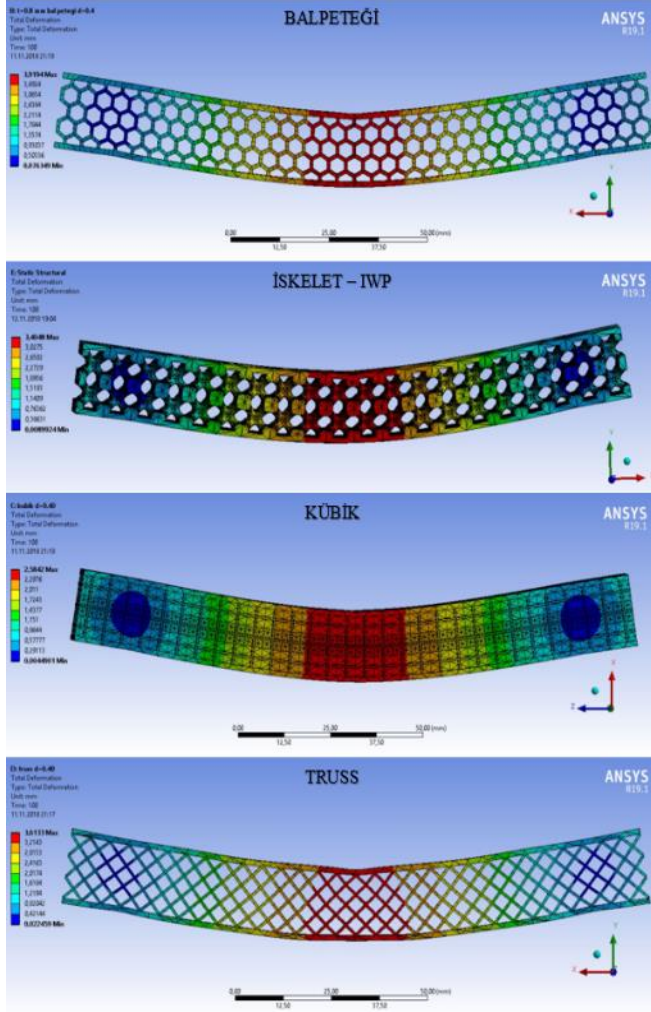
3. BULGULAR

Balpeteği, kübik, iskelet iwip ve truss olmak üzere dört farklı hücresel yapı kullanılarak oluşturulmuş 150×25×17,5 mm boyutlarındaki, aynı izafi yoğunluğa sahip(0,4) sandviç panellere, Şekil 5' de gösterildiği üzere tam orta noktadan 750 N' luk sabit yük uygulanmıştır. Uygulanan bu sabit yüke karşılık aynı boyutlara ve aynı kütleye sahip yapılar farklı deformasyonlara uğramıştır. Elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre sabit yük altında y eksenindeki yerdeğiştirmeler Şekil 7' de kuvvet-yerdeğiştirme grafiği olarak verilmiştir. Şekil 8' de ise Ansys' den alınan çözümlerin ekran görüntüleri verilmiştir.

Kuvvet - Yer değiştirme Grafiği



Şekil 7. Sandviç panellerin ANSYS' de elde edilen , kuvvet - yerdeğiştirme grafiği



Şekil 8. Ansys sonuçlarının görselleri

Şekil 8' de görüldüğü üzere, 750'lık yükün yapının tam orta noktasından uygulanması sonucunda; balpeteği 3.92mm, truss 3.61mm, iskelet iwp 3.40mm, kübik 2.58mm y ekseninde yer değiştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre en rijit yapılar sırası ile kübik, iskelet iwp, truss ve balpeteği olarak sıralanmıştır.

4. SONUÇ

Yapılan bu çalışma ile farklı hücresel yapılarda çekirdeklere sahip sandviç panellerin, eğilme yüklemesi altında y eksenindeki yerdeğiştirmeleri Sonlu Elemanlar Analizi (SAE) ile hesaplanmıştır. SAE ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla yüksek doğrulukta uyum sağladığı görülmüştür. Aynı kütleye sahip olmasına rağmen, farklı hücresel yapıları sandviç panellerin eğilmeye karşı farklı tepkiler verdiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde eğilmeye karşı en dayanıklı yapının kübik, dayanımı en düşük yapının ise balpeteği hücresel yapısı olduğu sonucuna varılmıştır.

REFERENCES

- [1] T.A. Schaedler, W.B. Carter, Architected cellular materials, *Annu. Rev. Mater. Res.* 46 (2016) 187–210.
- [2] L.A. Carlsson, G.A. Kardomateas, *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [3] Schaedler TA, Carter WB. Architected cellular materials. *Annu Rev Mater Res* 2016;46:187–210.
- [4] Zenkert D, Nordisk I. *The handbook of sandwich construction*. Cradley heath. West Midlands: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS); 1997.
- [5] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge University Press; 1999.
- [6] Allen HG. *Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*. Elsevier; 2013.
- [7] Triantafyllou TC, Gibson LJ. Failure mode maps for foam core sandwich beams. *Mater Sci Eng* 1987;95:37–53.
- [8] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties* Cambridge, University Press, 1999.
- [9] A.K. Oraib, R. Rowshan K.A. Rashid, Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing* 19 (2018) 167–183
- [10] D.K. Pattanayak, A. Fukuda, T. Matsushita, M. Takemoto, S. Fujibayashi, K. Sasaki, N. Nishida, T. Nakamura, T. Kokubo, Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: fabrication by selective laser melting and chemical treatments, *Acta Biomater.* 7 (2011) 1398–1406.
- [11] P. Jain, T. Pradeep, Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foams as antibacterial water filter, *Biotechnol. Bioeng.* 90 (2005) 59–63.
- [12] D.P. Haack, K.R. Butcher, T. Kim, T. Lu, Novel lightweight metal foam heat exchangers, 2001 ASME Congress Proceedings (2001).
- [13] A. Simone, L. Gibson, Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Mater.* 46 (1998) 2139–2150.
- [14] H.Y. Sarvestani, A.H. Akbarzadeh, N. Niknam, K. Hermenean, 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance, *Composite Structures* 200 (2018) 886–909.
- [15] L. Tiantian, W. Lifeng, Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures* 175 (2017) 46–57.