



Makale / Research Paper

Statik Yükleme Altında Oksetik İç Yapılı Sandviç Kompozitlerin İncelenmesi

Cihan KABOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, 16130, Bursa/Türkiye
cihan.kaboglu@btu.edu.tr

Received/Geliş: 03.08.2021

Accepted/Kabul: 23.11.2021

Öz: Sandviç kompozitler, farklı malzeme kombinasyonları ile birleştirilerek özel uygulamalar için oluşturulabilen optimum malzeme tasarımlarıdır. Çok sayıda alternatif sandviç kompozit yapı biçimi ile farklı yüzey ve çekirdek malzemeler birleştirilebilir. Bu çalışmada; özellikle otomotiv tampon uygulamalarına yönelik olarak geliştirilen sandviç kompozit malzeme, naylon Poli-amid 12 (PA12) polimer malzemesinden oluşan çekirdek ile cam fiber takviyeli Polipropilen (GFRPP) alt – üst yüzeylerin bir araya getirilmesi ile elde edilmiştir. Malzemelerin önemli bir özelliği olan Poisson oranı; bir malzemenin kuvvet uygulandığı yöndeki şekil değiştirme miktarı ile aksi yöndeki şekil değiştirme miktarı arasındaki bağıntıyı verir. Poisson oranı birçok malzemede pozitif iken bazı malzemelerde ise negatiftir. Poisson oranı negatif olan bu malzemelere "oksetik malzeme" denir. Üretilen sandviç kompozitte negatif Poisson oranına sahip olan oksetik özellikteki çekirdek, üç boyutlu yazıcılardan birisi olan Fused Deposition Modelling (FDM) ile üretilmiştir. Girintili bal peteği geometrisi sayesinde üstün esneme özellikleri beklenmektedir. Bu amaçla; iki farklı kalınlıkta üretilen çekirdek geometrisine sahip olan sandviç kompozit malzemeler üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında mukavemet ve darbe absorpsiyonu açısından sandviç yapılarda kullanılan oksetik yapıların arasındaki mesafenin yapının kalınlığından daha önemli bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sandviç kompozit, 3 boyutlu eklemeli imalat, mekanik özellikler, oksetik malzeme

Investigation of Sandwich Composites with Auxetic Core under Static Loading

Abstract: Sandwich composites are optimum material designs that can be created for special applications by combining with different material combinations. Different surface and core materials can be combined with a number of alternative sandwich composite structures. In this study, the sandwich composite material, developed especially for automotive bumper applications, is obtained by combining the core consisting of nylon Polyamide 12 (PA12) polymer material and glass fiber reinforced Polypropylene (GFRPP) lower - upper surfaces. Poisson's ratio, which is an important property of materials; It gives the relationship between the amount of strain of a material in the direction in which the force is applied and the amount of strain in the opposite direction. Poisson's ratio is positive in many materials and negative in some materials. These materials with a negative Poisson ratio are called "auxetic materials". The core with negative Poisson ratio in the produced sandwich composite was produced with Fused Deposition Modeling (FDM), one of the three-dimensional printers. Superior flexing properties are expected thanks to the re-entrant honeycomb geometry. For this purpose, sandwich composite materials with core geometry produced in two different thicknesses were subjected to three-point bending tests. Within the scope of this study, it has been revealed that the distance between the oxetic structures used in sandwich structures is a more important parameter than the thickness of the structure in terms of strength and impact absorption.

Keywords: Sandwich composites, 3D additive manufacturing, mechanical properties, oxetic material

Bu makaleye atıf yapmak için

Kaboğlu, C., "Statik Yükleme Altında Oksetik İç Yapılı Sandviç Kompozitlerin İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 8(2); 350-359.

How to cite this article

Kaboğlu, C., "Investigation of Sandwich Composites with Auxetic Core under Static Loading" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 8(2); 350-359.

ORCID ID: ⁰0000-0002-6249-0565

1. Giriş

Her geçen gün gelişen yöntemler ile en düşük maliyette ürün elde etmenin önemi artmakta ve bu kapsamda çeşitli araştırmalar ve denemeler yapılmaktadır. Bu çalışmada da belirli sektörlerde kullanılması planlanan özellikle ağırlığın enerjiyle doğrudan bağlantısının olduğu uygulamalarda kullanılmak üzere uygulamaya özgü malzeme tasarımı yapılmış ve mekanik karakteristik özellikleri incelenmiştir.

Bir malzeme tasarlanırken istenilen mekanik özelliklere sahip bir malzemenin elde edilmesinde kompozit malzemelerin kullanımı oldukça uygundur [1-4]. Günümüzde ncelikli alan uygulamalarında sandviç kompozit malzemelerinin kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır [5-14]. Bu alışma kapsamında sandviç kompozit malzemelerin çekirdek malzemesindeki farklı yapıların, yapı boyutlarının, çekirdek yapısının ve katman sayısının malzemenin mekanik davranışa olan etkisi incelenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar üç boyutlu yazıcılar tarafından üretilen numunelerin daha güvenilir olduğunu göstermiştir [15-18]. Bu çalışmada da kullanılacak olan gerekli numuneler üç boyutlu yazıcılar kullanılarak elde edilmiştir.

Yüksek dayanım ve hafiflik istenen uygulamalar için sandviç kompozit malzemelerde gözenekli yapılar kullanılmaktadır [19-23]. Poisson oranı bir malzemenin kuvvet uygulandığı yöndeki kısılma miktarı ile diğer yöndeki uzama miktarı arasındaki ilişkiyi gösteren önemli bir parametredir. Poisson oranı negatif olan bir malzemeye belirli bir yönde çekme kuvveti uygulandığında 90° tersine yönde malzemenin boyunun uzadığı grlmektedir [24-27]. Bu özelliğe sahip malzemelerin darbelere karşı dayanımları yüksek ve statik yüklemelere karşı mukavemetleri fazladır [28-30].

Chen vd. [31] negatif Poisson oranına sahip çekirdek malzemesini dört farklı modelde tasarlayarak malzemeye bası kuvveti uygulamıştır. Ayrıca yapının katmanlı olmasının malzemenin mekanik özelliklere olan etkisi analitik ve deneysel olarak incelenmiştir. Kuvvetin uygulandığı doğrultunun 90° tersine olan bölgedeki yapının açılabilir/genişleyebilir olması nedeniyle, malzemenin dayanımı ve enerji absorpsiyonu gözle görülür bir şekilde artmıştır.

Xue ve Hutchinson [32] sandviç kompozit malzemeler için üç farklı çekirdek yapısını patlama yükleme altında test etmiştir. Bu üç çeşit çekirdek yapısı piramit atkı, kare bal peteği ve katlanmış olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda kare bal peteği ve katlanmış çekirdek yapısının patlamaya karşı direnç olarak piramit atkı çekirdek yapısına göre daha iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur. Ayrıca aynı ağırlığa sahip düz panel, piramit atkı, kare bal peteği ve katlanmış çekirdek yapısına sahip levhanın patlamaya karşı dirençleri karşılaştırıldığında düz panelin performansının diğerlerine oranla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kucewicz vd. [33] üç boyutlu yazıcılarda FDM yöntemiyle yazılmış hücresel boşluklu yapıların karakterizasyonu gerçekleştirmiş ve aynı zamanda modellemesini yapmıştır. Çalışmada üç farklı yapıyı (bal peteği, değiştirilmiş bal peteği ve sarmal) tek basma yükleme altında incelenmiştir. Çalışma kapsamında bu numuneler çift eksenli çekme test cihazı altında %50 plastik deformasyon oluşana kadar kuvvet bası yönünde arttırılıp test edilmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde sarmal yapının daha istikrarlı ve tutarlı bir şekilde davranış sergilediği grlmştir.

Harris vd. [34] eklemeli üretim yöntemlerinden lazer eritme yöntemini kullanarak üç farklı bal peteği yapısını (kare bal peteği, örgü şeklinde duvar yapısına sahip bal peteği ve boyutu yarıya düşürülmüş örgü şeklinde duvar yapısına sahip bal peteği) retmiş ve bu yapıların testlerini gerçekleştirmiştir. Bu üç farklı yapı statik ve dinamik basma kuvveti altında test edilmiştir. Her ne kadar literatürde örgü duvar yapısına sahip bal peteği yapılarının normalize edilmiş mukavemetinin ve enerji absorpsiyonunun iyi olduğu belirtilmişse de çalışma kapsamında bu yapıların mukavemeti

ve enerji absorpsiyonunun sıkılaşıma noktasına kadar normal bal peteği yapılarındakinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Xu vd. [35] bası kuvvetine karşı boşluklu kafes yapısına sahip değişik dizilimler ve kafes yapısının içerisine boş boru şeklinde destekler koyarak yapılar üretmiştir. Üretilen bu yapılar bası kuvveti altında test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar analitik olarak doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında, yapıların boru ile üç boyutlu yazıcıda yazdırılması ile sıkılaşıma süresi ve sıkılaşıma esnasında gerilmenin arttığı ve buna bağlı olarak enerji absorpsiyonu performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca içerisinde boru olmadan (üç boyutlu yazıcıda) yazdırılan yapıların mukavemeti ve sağlamlığının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Literatürde yapılan benzer bir araştırmada ise piramit kafes yapısına sahip malzeme içerisinde borulu ve borusuz olacak şekilde üç boyutlu yazıcıda yazdırılmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, içerisinde boru olan yapının borusuz yapıya kıyasla dört kat daha kuvvetli/dayanıklı olduğu belirlenmiştir [36].

Deshpande vd. [37] yapıların hangi kuvvetlere göre güçlendirildiğini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada yapıların eğmeye ve çekmeye göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, çekme eğilimi olan yapıların elastisite modülü ve ilk sürünme mukavemetinin eğilme eğilimi olan yapılara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çekme eğilimi olan yapılarda gerilme-şekil değiştirme diyagramında ilk plastik şekil değiştirmeden sonra uzun bir plato görülmemiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde eğme eğilimli yapıların enerji absorpsiyonu gerektiren uygulamalarda kullanılması önerilmiştir.

Hundley vd. [38] foto polimer işlemleri sonucu üç boyutlu oluşturulan çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit malzemenin düşük hızlı darbe davranışını incelemiştir. Çeşitli darbe enerjileri altında numuneler test edilip değerlendirilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre kafes yapıları çekirdek malzemesinin darbe sonucunda oluşan hasara rağmen belirli bir sağlamlığa sahip olduğu belirlenmiş ve kafesli yapıların özellikle darbe kuvvetine maruz kalan uygulamalarda çok önemli bir tasarım çıkış noktası olduğu vurgulanmıştır.

Servastani vd. [39] üç boyutlu yazıcı kullanılarak yazdırılmış sandviç kompozit malzemeler için çekirdek yapıların mekanik davranışını ve enerji absorpsiyonunu incelemiştir. Çalışma kapsamında, enerji absorpsiyonu fazla olması nedeniyle Poisson oranı sifıra yakın veya negatif olan yapılar (dikdörtgen, hegzagonal ve oksetik yapılar) seçilmiştir. Bu çalışmada geometrik ebatlar sabit tutulmuş, sandviç kompozit malzemeler FDM yöntemiyle yazılmıştır. İlgili bu yapıların mekanik özelliklerini incelemek için çekme testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, oksetik yapıya sahip çekirdek malzemesiyle oluşturulmuş sandviç kompozitin diğer iki dikdörtgen ve hegzagonal yapıya sahip çekirdek malzemesiyle üretilmiş sandviç kompozite göre %33 daha fazla enerji absorbe ettiği ortaya konulmuştur.

Servastani vd. [40] üç boyutlu yazıcılarla yazdırılmış ve değişik topolojiye sahip çekirdek yapılarıyla (izomaks, oktet, kübik, oksetik yapılar) oluşturulmuş sandviç kompozit malzemelerin kırılma mekanizmalarını, enerji absorpsiyonlarını ve tekrarlı yüklemeler sonucunda davranışlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında üç nokta eğme ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucu elde edilen veriler, oksetik yapıya sahip sandviç kompozit malzemelerin darbe enerjisi ve mekanik özelliklerinin diğer yapılara kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir.

Al-Saedi vd. [41] AlSi-12 alüminyum alaşımından yapılmış ve seçici lazer eritme yöntemi ile üretilmiş üniform ve fonksiyonel dereceli BCC tipi kafes yapıların mekanik özelliklerini ve enerji yutma kabiliyetini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kafes yapılarının, tek biçimli kafes yapısına kıyasla farklı deformasyon davranışı sergiledikleri görülmüştür. Ayrıca birim hacim başına toplam kümülatif enerji absorpsiyonunun, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kafeste tek tip kafese göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Li and Wang [42] farklı çekirdek yapılarından oluşan sandviç kompozitlerin eğilme sertliği, mukavemeti ve enerji absorpsiyonu gibi mekanik özelliklerini incelemek amacıyla üç nokta eğme testlerini gerçekleştirmiştir. Eğilme deformasyonu altında, kafes çekirdekli sandviç kompozitlerin eğilme sertliği ve mukavemetinin diğer yapılarla göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Choy vd. [43] yapı malzemesi olarak Ti-6Al-4V kullanıldığı ve seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş üniform ve fonksiyonel dereceli kafes yapıların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında kübik ve bal peteği yapıları ele alınmış ve sonuç olarak bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür.

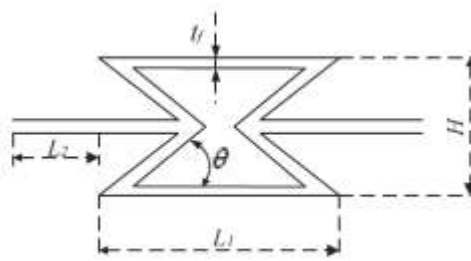
Hou vd. [44] sürekli elyaf takviyeli kompozit hafif yapıların üç boyutlu yazıcılar kullanılarak sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlere dayalı üretim sürecini değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında farklı lif oranları denenmiş ve %11,5 lif oranında maksimum basma gerilmesine ulaşılmıştır.

Bu çalışmada ise, sandviç kompozit malzemeler için çekirdek tasarımı konusunda bir prosedür sunulmuştur. Çalışma kapsamında özellikle otomotiv tampon uygulamalarına yönelik olarak geliştirilen sandviç kompozit malzeme, naylon Poli-amid 12 (PA12) polimer malzemesinden oluşan çekirdek ile cam fiber takviyeli Polipropilen (GFRPP) alt – üst yüzeylerin bir araya getirilmesi ile elde edilmiştir. İki farklı kalınlıkta üretilen çekirdek geometrisine sahip olan sandviç kompozit malzemeler üç okta eğme testlerine tabi tutulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Malzeme olarak sandviç kompozit yapılar test edilecektir. Sandviç kompozit malzemeler üç ana kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar; çekirdek, alt ve üst yüzeylerden oluşmaktadır. Bu çalışmada girintili bal peteği geometrisine sahip çekirdek malzemesinin et kalınlığının statik yüklemelere karşı etkisini araştırmak için iki farklı (0,78mm ve 1mm) et kalınlığı kullanılmıştır. Çekirdek malzemesinin ağırlığı mekanik davranışları etkilediğinden dolayı et kalınlığı değiştirildiğinde Şekil 1’de görüldüğu gibi girintili bal peteği arasındaki mesafe arttırılmış, çekirdek kısmının ağırlığı sabit tutulmuştur.



Şekil 1. Sandviç Panel Kompozit Malzemenin Çekirdek Geometrisi ve Ölçülendirmesi (L_1 :Çekirdek uzunluğu, L_2 : İki çekirdek arası mesafe, H : Çekirdek yüksekliği, t_f : Çekirdek kalınlığı)

Grup 1 ve Grup 2 sandviç kompozit malzemelerine ait girintili bal peteği ölçüleri Tablo 1’de verilmiştir. Naylon Poli-amid 12 malzemesi kullanılarak iki grup çekirdek malzemesi elde edilmiştir.

Sandviç yapının alt ve üst yüzeyi cam fiber takviyeli polipropilen (PP) olarak üretilmiştir. %45 oranında $0^\circ - 90^\circ$ açılarında yerleştirilen dokuma cam elyaf malzemesi ile polipropilen plakaların kesilmesi işleminin ardından katmanlar halinde yerleştirilerek üretim sağlanmıştır. Buna göre; 0,5

mm kalınlığında ve 325 gr/m^2 ağırlığındaki Polipropilen levhalar ve 25 gr/m^2 dokuma E-Cam fiber tedarik edilmiştir.

Tablo 1. Sandviç Kompozitin Çekirdek Geometrisi Ölçüleri

Ölçülendirme	L_1	L_2	t	θ
Grup 1	12 mm	5,25 mm	0,78 mm	60°
Grup 2	12 mm	15,60 mm	1 mm	60°

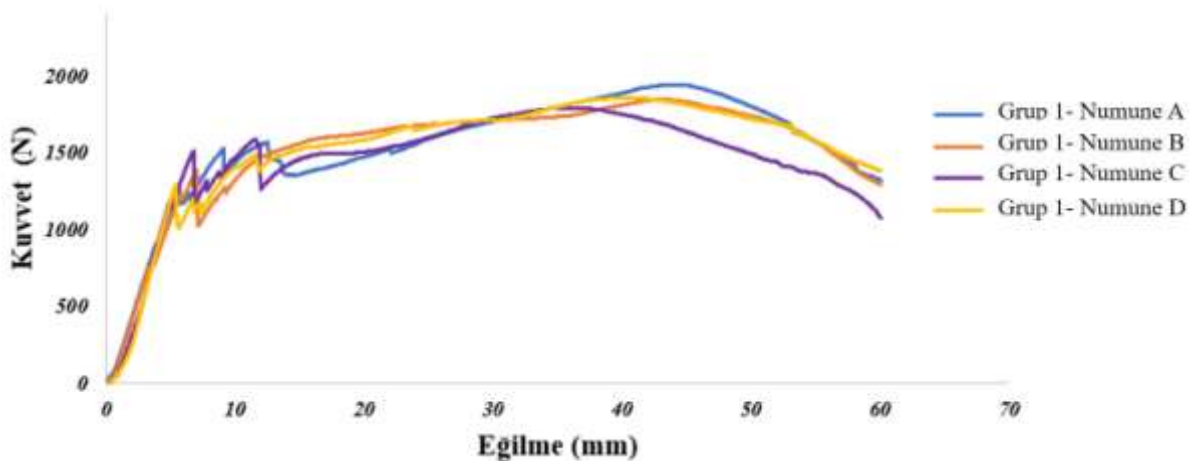
Elde edilen çekirdek ve alt – üst yüzeylerin birleştirilerek sandviç yapıyı elde etmek için; Araldite AW 106 Resin ile HV 953U sertleştirici katalog bilgisine dayanarak %80 resin - %20 sertleştirici olacak şekilde numunelerin epoksi yapıştırıcıları hazırlanmıştır. Buna göre; 25 gr resin ve 20 gr sertleştirici bir kap içerisinde 5 dakika karıştırılmış ve epoksi reçinenin kıvamlanması sağlanmıştır. Ardından alt ve üst yüzeylere sürülen epoksi yapıştırıcı ile üzerine kuvvet uygulanarak 12 saat oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Böylelikle malzemenin tam olarak birleştirilmesi sağlanmıştır.

2.2. Metot

Çalışma kapsamında sandviç kompozit yapıların üç nokta eğme testi ASTM C393 standartına göre yapılmış ve testler için SHIMADZU-AG-XPLUS 250 kN cihazı kullanılmıştır. Numune boyutları $150 \times 55 \times 24$ mm olarak belirlenmiş, test hızı ise 6 mm/dk olarak sabitlenmiştir. Çalışmada, üretilen yapıların alt ve üst doğrultusunda kuvvet uygulanarak kuvvet yönünde oluşan lokal hasarları ve destekleyici bloklar ile itici blok arasında oluşan kayma gerilmesinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen Grup 1 ve Grup 2 sandviç kompozit malzemelerinde; Grup 1 her bir hücrelerinin arasındaki L_2 uzunluğu $5,25 \text{ mm}$ iken bu değer Grup 2’de $15,6 \text{ mm}$ ’dir. Buna karşılık; L_2 uzunluğuna bağlı olarak seçilen kalınlık değerleri Grup 1 için $0,78 \text{ mm}$ iken grup 2 için 1 mm olarak tasarlanmıştır.



Şekil 2. Grup 1 için üç nokta eğme testi kuvvet–eğilme grafiği

Hem Grup 1 hem de Grup 2 için çekirdek geometrisi negatif Poisson oranına bağlı oksetik özellikteki girintili bal peteği geometrisidir. Buna göre; elde edilen sonuçlarda malzemenin enerji absorbe etme ve kayma kuvvetine karşı mukavemeti ön plana çıkmaktadır. Yapılan üç nokta eğme

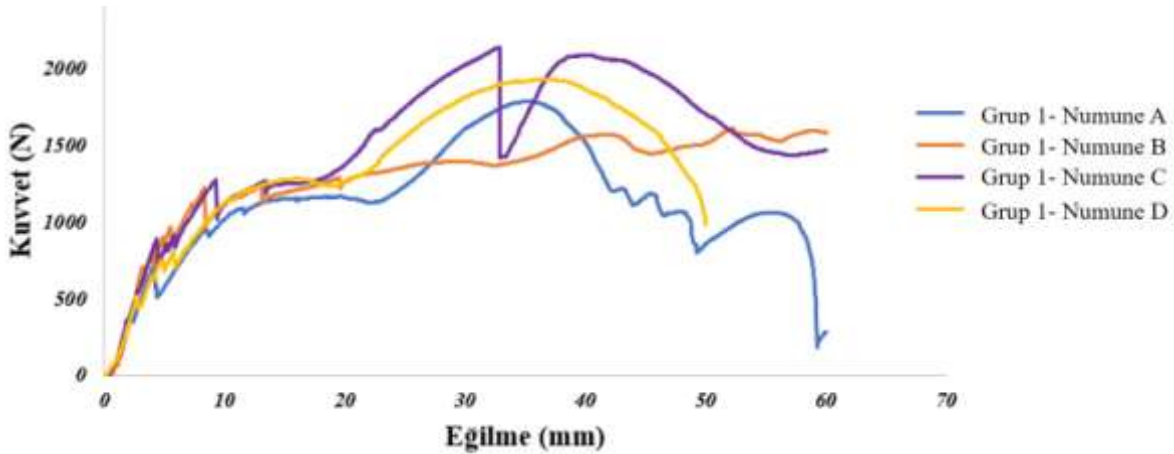
testi ile çekirdek malzemesinin et kalınlığının eğilme mukavemetine ve enerji absorbe etme özelliğine etkisi ortaya konulmuştur.

Üç nokta eğme testi Grup 1 için 4 adet ve Grup 2 için 4 adet üretilmiş ve teste tabi tutulmuşlardır. Grup 1 için dört adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Kuvvet-Eğilme grafikleri Şekil 2’de verilmiştir. Buna göre, ortalama 1860 N’luk maksimum kuvvete ulaştığı görülmüştür. İlk iç hasarın ise ortalama 1215 N’da başladığı tespit edilmiştir. Elastik bölgedeki esneklik değerine göre enerji absorbe etme miktarı 3552 N.mm olarak hesaplanmıştır. Ortalama 1308 N’da elastik kuvvetine ulaşılmış ve bu noktada iç hasar ve yapışma kopmaları meydana gelmiştir. Eğilme mesafesinin 45 mm dolaylarında maksimum kuvvete ulaştığı görülmüştür.

Tablo 2. Grup 1 için Üç Nokta Eğme Testi Verileri

Numune	Maksimum Kuvvet (Newton)	Elastisite Modülü (MPa)	Eğrinin Altında Kalan Alan (Enerji Absorbe Etme Miktarı)(N.mm)
Numune A	1943, 19	33, 30	3604,17
Numune B	1844, 36	35, 20	3683, 56
Numune C	1791, 55	38, 40	3949, 00
Numune D	1857, 28	36, 70	2974, 41
Ortalama	1860,00	35,90	3552,79
Standart Sapma	214, 73	1, 88	357,50

Benzer şekilde, Grup 2 için de dört adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Kuvvet-Eğilme grafikleri Şekil 3’te gösterilmiştir. Buna göre, ortalama 1863 N’luk maksimum kuvvete ulaştığı görülmüştür. İlk iç hasarın ise ortalama 1035 N’da başladığı belirlenmiştir. Elastik bölgedeki esneklik değerine göre enerji absorbe etme miktarı 1249 N.mm olarak hesaplanmıştır. Ortalama 661 N’da elastik kuvvetine ulaşılmış ve bu noktada iç hasar ve yapışma kopmaları meydana gelmiştir. Eğilme mesafesinin 35 mm dolaylarında maksimum kuvvete ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3. Grup 2 için üç nokta eğme testi kuvvet-eğilme grafiği

Grup 1 ve Grup 2’ye uygulanan üç nokta eğme testinde, daha fazla hücreli yapıya sahip olan Grup 1’e ait olan çekirdek geometrisinin, et kalınlığının azalmasına rağmen daha iyi esneklik ve buruşma gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni ise, Grup 1 numunelerinin daha düşük L_2 değerine sahip olmasıdır. Ayrıca hücre sayısının artması malzemenin kırışma özelliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte, numunelerin et kalınlığının azaltılması, sandviç kompozit malzemelerin sertliğini düşürerek daha esnek bir yapı elde edilmesini sağlamakta ve malzemenin enerjii absorbe etme

yeteneğini arttırmaktadır. Grup 2'ye uygulanan üç nokta eğme testlerine göre, artan L_2 değerine bağlı olarak Grup 2 numunelerinde görülen ilk iç hasar Grup 1'e kıyasla daha düşük kuvvetlerden itibaren başlamaktadır. Öte yandan çekirdek yapısının et kalığının artırılması, ilk iç hasarın daha düşük kuvvetlerde görülmesini engelleyememiştir. Elde edilen tüm bu sonuçlar dikkate alındığında, Grup 1'deki numunelerin yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Grup 2 için Üç Nokta Eğme Testi Verileri

Poli-amid 12 (PA12) polimer malzemesinden oluşan oksetik girintili bal peteği çekirdeği ve %45 cam fiber takviyeli Polipropilen (GFRPP) içeren sandviç kompozitler (Grup2-150mmx55mmx27 mm)

Numune	Maksimum Kuvvet (Newton)	Elastisite Modülü (MPa)	Eğrinin Altında Kalan Alan (Enerji Absorbe Etme Miktarı)(N.mm)
Numune A	1782, 21	10,20	966, 94
Numune B	1609, 36	10,50	1114, 26
Numune C	2133, 96	12,20	2220, 94
Numune D	1926, 58	10,10	695, 00
Ortalama	1863, 03	10,75	1249, 29
Standart Sapma	54,44	0, 85	580, 80

Grup 1 ve Grup 2 numunelerine uygulanan üç okta eğme testleri değerlendirildiğinde, L_2 değerinin yapının esneme ve buruşma kabiliyetini azalttığı ve ilk iç hasarın erken oluşmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda L_2 değeri daha büyük olan Grup 2 numunelerinin esneme kabiliyetlerinin daha düşük olması beklenmektedir.

4. Sonuç

Sandviç kompozitlerde çekirdek, alt – üst yüzey ve yapışma yüzeyi önemlidir. Buna göre; Negatif Poisson oranına sahip oksetik özellikte girintili bal peteği geometrisinden üretilen çekirdek, Nyalon PA12 malzemesinden 3 Boyutlu yazıcı olan FDM ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, alt ve üst yüzeylerin elde edilmesi için sıcak presleme tekniği kullanılarak lamine şeklindeki yüzeylerin lamine olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Bunun için ağırlıkça %45 dokuma cam fiber takviyeli Polipropilen matrisli t yüzeyler elde edilmiştir. Son olarak, üretilen çekirdek ile alt-üst yüzeyler, epoksi reçine ile 7,5 kg'lık yük altında yapıştırılması sağlanmıştır. Ardından; elde edilen numuneler, üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuşlardır. Bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Grup 1 ve Grup 2 numunelerin test sırasında ilk iç hasarı Grup 1 için 1215 N aldığı görülürken Grup 2 için bu değer 1035 N dur. Buna göre Grup 1 numunelerin daha mukavemetli ve darbeye karşı daha fazla dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.
- Grup 1 ve Grup 2 numuneleri için elastisite modülleri sırasıyla 35,9 Pa ve 10,75 Pa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar Grup 1 numunesinin elastik olarak daha fazla kuvvet taşıma kapasitesi olduğunu ortaya koymuştur.
- Grup 1 ve Grup 2 için absorbe edilen enerji miktarları sırası ile ortalama olarak 3552,79 N.mm ve 1249,29 N.mm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında çekirdek içerisindeki yapıların arasındaki mesafelerin daha az olması yapıların kalınlığından absorbe edilen enerji ve mukavemet açısından daha etkili bir parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Genel olarak bu tip yapıların darbeye karşı mukavemet gerektiren uçak-uzay sektöründe özellikle uçak burun kısmında, uçak alt taban uygulamalarında ve otomotiv

sektöründe özellikle tampon malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir. Gelecek çalışma konusunda yavaş hızlı darbe dayanımının yanı sıra yüksek hızda darbe dayanımı ölçülerek kullanım alanları genişletilmesi ön görölmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 200Y003 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine desteklerinden dolayı teşekkür eder.

Yazar(lar)ın Katkıları

Yazar, deneysel çalışmaları gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları yorumlayarak makaleyi yazmıştır. Yazar makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Nasirzadeh, R., Sabet, A.R., Study of Foam Density Variations in Composite Sandwich Panels under High Velocity Impact Loading, *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 129-139.
- [2]. Rajaneesh, A., Sridhar, I., Rajendran, S., Relative Performance of Metal and Polymeric Foam Sandwich Plates under Low Velocity Impact, *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 126-136.
- [3]. Ashwill, T. D., Paquette, J. A., *Composite Materials for Innovative Wind Turbine Blades*, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, United States, 2008.
- [4]. Mishnaevsky, Jr. L., Favorsky, O., *Composite Materials in Wind Energy Technology, Thermal to Mechanical Energy Conversion Engines and Requirements*, EOLSS Publ. Oxford, UK, 2011.
- [5]. Steeves, C. A., Fleck, N. A., Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-Point Bending, Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design, *Inter. Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(4): 561-583.
- [6]. Steeves, C. A., Fleck, N. A., Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-Point Bending, Part II: Experimental Investigation and Numerical Modelling, *Inter. Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(4): 585-608.
- [7]. Abbadi, A., Koutsawa, Y., Carmasol, A., Belouettar, S., Azari, Z., Experimental and Numerical Characterization of Honeycomb Sandwich Composite Panels, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17(10): 1533-1547.
- [8]. Juntikka, R., Hallstrom, S., Shear Characterization of Sandwich Core Materials Using Four-Point Bending, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2007, 9(1): 67-94.
- [9]. Fathi, A., Wolff-Fabris, F., Altstädt, V., Gätzi, R., An Investigation on The Flexural Properties of Balsa and Polymer Foam Core Sandwich Structures: Influence of Core Type and Contour Finishing Options, *J. Sandwich Structures & Materials*, 2013, 15(5): 487-508.
- [10]. Fathi, A., Keller, J. H., Altstädt, V., Full-Field Shear Analyses of Sandwich Core Materials Using Digital Image Correlation (DIC), *Composites Part B: Engineering*, 2015, 70: 156-166.

- [11]. Kaboglu, C., Pimenta, S., Morris, A., Dear, J. P., The Effect of Different Types of Core Material on the Flexural Behavior of Sandwich Composites for Wind Turbine Blades, *Journal of Thermal Engineering*, 2017, 3(2): 1102-1109.
- [12]. Battley, M., Burman, M., Characterization of Ductile Core Materials, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2010, 12(2): 237-252.
- [13]. Gupta, N., Woldeesenbet, E., Characterization of Flexural Properties of Syntactic Foam Core Sandwich Composites and Effect of Density Variation, *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(24): 2197-2212.
- [14]. Gupta, N., Woldeesenbet, E., Hore, K., Sankaran, S., Response of Syntactic Foam Core Sandwich Structured Composites to Three-Point Bending, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2002, 4(3): 249-272.
- [15]. Dong, G., Wijaya, G., Tang, Y., Zhao, Y. F., Optimizing Process Parameters of Fused Deposition Modeling by Taguchi Method for the Fabrication of Lattice Structures, *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 62-72.
- [16]. Yang, L., Experimental-Assisted Design Development for an Octahedral Cellular Structure Using Additive Manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(2): 168-176.
- [17]. Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C. W., Wang, L., 3D Printed Hierarchical Honeycombs with Shape Integrity under Large Compressive Deformations, *Materials & Design*, 2018, 137, 226-234.
- [18]. Hofstätter, T., Pedersen, D. B., Tosello, G., Hansen, H. N., Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Additive Manufacturing", *Procedia CIRP*, 2017, 66: 312-316.
- [19]. Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. F., Wadley, H. N. G., The Topological Design of Multifunctional Cellular Metals, *Progress in Materials Science*, 2001, 46(3-4): 309-327.
- [20]. Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., Gibson, L. J., *Metal Foams: A Design Guide*, Elsevier, USA, 2000.
- [21]. Brittain, S. T., Sugimura, Y., Schueller, O. J. A., Evans, A. G., Whitesides, G. M., Fabrication and Mechanical Performance of a Mesoscale Space-Filling Truss System, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(1): 113-120.
- [22]. Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., Multifunctionality of Cellular Metal Systems, *Progress in Materials Science*, 1998, 43(3): 171-221.
- [23]. Ashby, M. F., The Properties of Foams and Lattices, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 2006, 364(1838): 15-30.
- [24]. Lakes, R., Advances in Negative Poisson's Ratio Materials, *Advanced Materials*, 1993, 5(4): 293-296.
- [25]. Milton, G. W., Composite Materials with Poisson's Ratios Close to-1, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992, 40(5): 1105-1137.
- [26]. Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., Yang, M. B., Review on Auxetic Materials, *Journal of Materials Science*, 2004, 39(10): 3269-3279.
- [27]. Doyoyo, M., Wan, H. J., Plastic Failure Analysis of an Auxetic Foam or Inverted Strut Lattice under Longitudinal and Shear Loads, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006, 54(7): 1479-1492.
- [28]. Stephani, G., Andersen, O., Göhler, H., Kostmann, C., Kummel, K., Quadbeck, P., Reinfried, M., Studnitzky, T., Waag, U., Iron Based Cellular Structures – Status and Prospects, *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8(9): 847-852.
- [29]. Li, M. Z., Stephani, G., Kang, K. J., New Cellular Metals with Enhanced Energy Absorption: Wire-Woven Bulk Kagome (WBK)-Metal Hollow Sphere (MHS) Hybrids, *Advanced Engineering Materials*, 2011, 13(1-2): 33-37.
- [30]. Goehler, H., Jehring, U., Meinert, J., Hauser, R., Quadbeck, P., Kuemmel, K., Stephani, G., Kieback, B., Functionalized Metallic Hollow Sphere Structures, *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(3): 335-339.

- [31]. Chen, Z., Wang, Z., Zhou, S., Shao, J., Wu, X., Novel Negative Poisson's Ratio Lattice Structures with Enhanced Stiffness and Energy Absorption Capacity, *Materials*, 2018, 11(7): 1095.
- [32]. Xue, Z., Hutchinson, J. W., A Comparative Study of Impulse-Resistant Metal Sandwich Plates, *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(10): 1283-1305.
- [33]. Kucewicz, M., Baranowski, P., Malachowski, J., Poplawski, A., Platek, P., Modelling, and Characterization of 3D Printed Cellular Structures", *Materials & Design*, 2018, 142: 177-189.
- [34]. Harris, J. A., Winter, R. E., McShane, G. J., Impact Response of Additively Manufactured Metallic Hybrid Lattice Materials", *Inter J. Impact Engineering*, 2017, 104: 177-191.
- [35]. Xu, J., Wu, Y., Wang, L., Li, J., Yang, Y., Tian, Y., Gong, Z., Zhang, P., Nutt, S., Yin, S., Compressive Properties of Hollow Lattice Truss Reinforced Honeycombs (Honeytubes) by Additive Manufacturing: Patterning and Tube Alignment Effects, *Materials & Design*, 2018, 156: 446-457.
- [36]. Yin, S., Wu, L., Ma, L., Nutt, S., Pyramidal Lattice Sandwich Structures with Hollow Composite Trusses, *Composite Structures*, 2011, 93(12): 3104-3111.
- [37]. Deshpande, V. S., Ashby, M. F., Fleck, N. A., Foam Topology: Bending Versus Stretching Dominated Architectures, *Acta Materialia*, 2001, 49(6): 1035-1040.
- [38]. Hundley, J. M., Clough, E. C., Jacobsen, A. J., The Low Velocity Impact Response of Sandwich Panels with Lattice Core Reinforcement, *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 64-77.
- [39]. Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K., 3D Printed Architected Polymeric Sandwich Panels: Energy Absorption and Structural Performance, *Composite Structures*, 2018, 200: 886-909.
- [40]. Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K., 3D Printed Meta-Sandwich Structures: Failure Mechanism, Energy Absorption and Multi-Hit Capability, *Materials & Design*, 2018, 160: 179-193.
- [41]. Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., Ponnusamy, P., Mechanical Properties and Energy Absorption Capability of Functionally Graded F2BCC Lattice Fabricated by SLM, *Materials & Design*, 144: 32-44.
- [42]. Li, T., Wang, L., Bending Behavior of Sandwich Composite Structures with Tunable 3D-Printed Core Materials, *Composite Structures*, 2017, 175: 46-57.
- [43]. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J., Compressive Properties of Functionally Graded Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting, *Materials & Design*, 2017, 131: 112-120.
- [44]. Hou, Z., Tian, X., Zhang, J., Li, D., 3D Printed Continuous Fibre Reinforced Composite Corrugated Structure, *Composite Structures*, 2018, 184: 1005-1010.
- [45]. Kaboglu, C., Yu, L., Mohagheghian, I., Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Dear, J. P., Effects of the Core Density on the Quasi-Static Flexural and Ballistic Performance of Fibre-Composite Skin/Foam-Core Sandwich Structures, *Journal of Materials Science*, 2018, 53(24): 16393-16414.
- [46]. Kaboglu, C., Mohagheghian, I., Zhou, J., Guan, Z., Cantwell, W., John, S., Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Dear, J. P., High-Velocity Impact Deformation and Perforation of Fibre Metal Laminates, *Journal of Materials Science*, 2018, 53(6): 4209-4228.
- [47]. Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A., Two-Dimensional Digital Image Correlation for In-Plane Displacement and Strain Measurement: A Review, *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 62001.