

EĞME VE UZAMA MODU BASKIN POLİMER MALZEMELİ LATİS HÜCRE YAPILARININ BASMA MUKAVEMETİNİN DENEYSEL VE SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Fatih Mehmet KARKINLI¹,
İlkay KOKOÇ² ve Hasan Can
AYDIN³

Gebze Teknik Üniversitesi / Makine
Mühendisliği, Kocaeli

Buğra AKSOY⁴
TUSAŞ / Ankara

Fatih USTA⁵
Gebze Teknik Üniversitesi/
Uçak Mühendisliği, Kocaeli

ÖZET

Bu araştırmada literatürde yaygın olarak kullanılan hücresel yapılardan dört farklı hücre konfigürasyonunun üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretimleri yapıp bu yapıların basma testleri ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar eğme modu baskın olan BCC ve Re-entrant ile uzama modu baskın FCC ve Oktet giriş latis yapılarıdır. Bu yapıların tasarımı için farklı kalınlıklarda çubuklardan oluşan modeller tasarlanmıştır. İdeal tasarımların belirlenmesi için Taguchi tasarım optimizasyonu yöntemi kullanılarak üç seviyeli ve iki faktörlü L9(3²) ortogonal dizi tablosu bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Hücre kalınlıkları için 0.5 mm, 1.25 mm ve 2 mm hücre kalınlıkları alt, orta ve üst seviyeler olarak belirlenerek 3 seviyeli bir tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Sonlu eleman analizleri için Abaqus yazılımı kullanılmıştır. Burada 3x3x3, 4x4x4 ve 5x5x5 hücreli yapılar için her bir farklı deney tasarım örneği için analizler yapılmıştır. Analizlerin ardından hücre sayısının, kafes giriş kalınlıklarının ve yatay giriş uzunluğunun özgül dayanım kapasitesi ve özgül enerji soğurma kapasitesi amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmaktadır. Bu analizler doğrultusunda en etkili modeller seçilerek SLA 3D yazıcı teknolojisi ile üretilmiştir. Yapılan basma testleri ile analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Oktet yapıların diğer yapılara göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır.

GİRİŞ

Kafes hücre yapıları, modern mühendislik uygulamalarında giderek daha önemli hale gelmiştir. Bu malzemeler, üstün mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri sayesinde çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda mühendislik disiplindeki hızlı gelişmeler, bu malzemelerin özelliklerini keşfetmek ve optimize etmek için çalışmalar artırmıştır. Bu bağlamda, kafes hücreleri, mühendislik yapılarının oluşturulması ve geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, mekanik dayanım ve gerinim gibi faktörlerin belirlenmesi, kafes hücre yapılarının kullanımında büyük önem taşımaktadır.

Kafes hücre yapıları, hafiflik, dayanıklılık ve enerji absorpsiyonu gibi avantajları nedeniyle mühendislik uygulamalarında tercih edilen yapılar arasında yer almaktadır. 3D yazıcı teknolojileri sayesinde üretimi kompleks olan bu yapıların imalatı kolay hale gelmiştir. Günümüzde kullanılan 3D yazıcı teknolojilerinde özellikle polimer malzemeli baskı yapabilen FDM ve SLA teknolojileri ile

¹ Lisans Araştırma Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: f.karkinli2019@gtu.edu.tr

² Lisans Araştırma Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: i.kokoc2019@gtu.edu.tr

³ Lisans Araştırma Öğrencisi, Makine Müh. Böl., E-posta: h.aydin2019@gtu.edu.tr

⁴ Uzman, E-posta: bugra.aksoy2@tai.com.tr

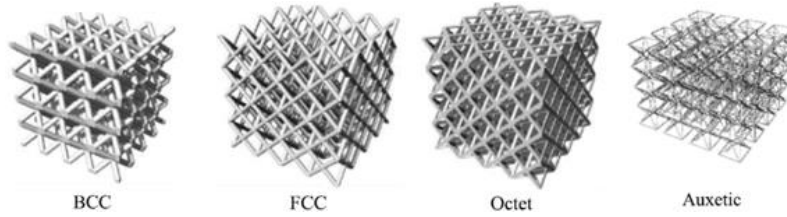
⁵ Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: fusta@gtu.edu.tr

ayrıca ucuza mal edilebilmektedir. Bu araştırmada polimer malzemeler kullanılarak üretilen kafes hücre yapıların üretimi, mekanik testleri, sonlu eleman analizler ve tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmanın amacı 3D yazıcı teknolojileri kullanarak polimer malzemeli kafes hücre yapılarının dış yük altında mekanik performanslarının karşılaştırılmasını sağlamak ve optimizasyon ile dört farklı hücre yapısının farklı hücre sayıları ve kalınlıklarında en ideal tasarımlarını belirlemektir.

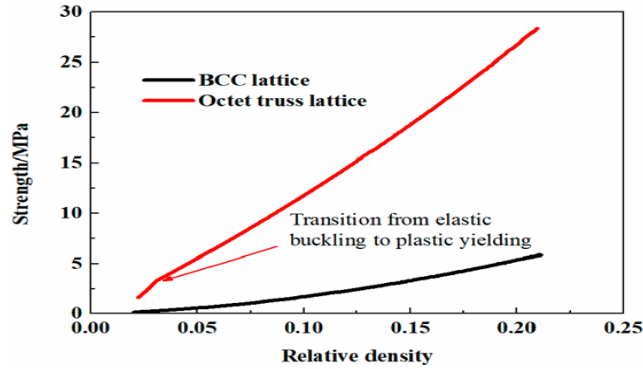
Problemin İfadesi

Latis yapıların küçük ölçekli topolojik özellikleri, büyük ölçekli mekanik özelliklerini belirler [Gibson, I. J., & Ashby, M. F. (1982)]. Bu araştırmanın konusu; 3D yazıcılar kullanılarak farklı boyutlarda (3x3x3, 4x4x4, 5x5x5) latis yapıların üretilmesi ve ayrıca farklı malzemeler kullanılarak basma testlerinin gerçekleştirilmesi ve bu yapıların mekanik performanslarının karşılaştırılmasıdır. Ayrıca, aynı modellerin yapısal analizleri yapılacak, deneysel sonuçlarla karşılaştırılacak ve doğrulanmış sonlu eleman modeli önerilecektir.

Bu bağlamda, literatürde geniş çapta araştırılan iki farklı deformasyon mekanizmasına sahip dört latis konfigürasyonu belirlenmiştir: hacim merkezli kübik (BCC), yüzey merkezli kübik (FCC), Oktet kiriş ve Re-entrant oksetik latis yapılarıdır (Şekil 1). FCC ve Oktet kiriş yapıları genellikle uzama modunu baskın deformasyon mekanizmasına sahipken, BCC ve Oksetik latis yapıları meta-malzeme sınıfında eğme modunu baskın deformasyon mekanizmasına sahiptir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, Oktet kiriş latis yapıları genellikle BCC latis yapılarına göre daha yüksek dayanıklılığa sahiptir [Xiao, L., Xu, X., Song, W., & Hu, M. (2020)].



Şekil-1: Projede incelenecek latis yapılar: hacim merkezli kübik (BCC), yüzey merkezli kübik (FCC), Oktet kiriş ve Re-entrant oksetik latis yapıları. [Xiao, L., Xu, X., Song, W., & Hu, M. (2020)]



Şekil-2: BCC ve Oktet Yapılarının Dayanımının Karşılaştırması [Gibson, I. J., & Ashby, M. F. (1982)].

3D latis yapılarında şekil değişimi esnasında hangi deformasyon türünün baskın olduğunu Maxwell kararlılık kriteri ile hesaplanabilmektedir [Chen, Z., Wu, X., Xie, Y. M., Wang, Z., & Zhou, S. (2020)].

$$M = n - 2j + 3 \quad (1)$$

Burada M Maxwell kararlılık faktörünü, n kiriş sayısını ve j bağlantı noktalarını temsil eder. $M < 0$ ise, bükülme modu baskın deformasyonu ifade etmektedir. Diğer yandan, $M \leq 0$ olduğunda, uzama modu baskın deformasyonu anlamına gelir. Maxwell kararlılık kriterine göre incelenen yapılar arasında, BCC ve Oktet modelleri eğilme modu baskın yapılar iken, FCC ve Oktet modelleri uzama modu baskın yapılar olarak belirlenmiştir.

YÖNTEM

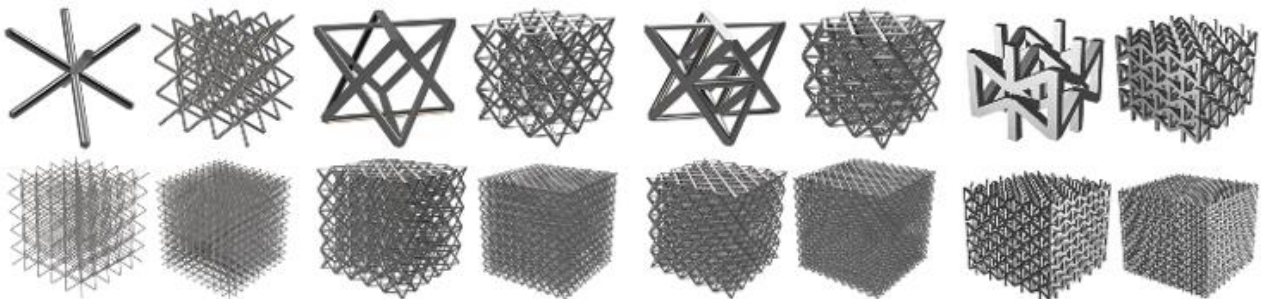
Literatür Taraması

Latis hücreleri, havacılık ve otomotiv sektörlerinde, koruyucu ekipmanlarda, spor ekipmanlarında, kargo ve taşıma ürünlerinde düşük ağırlık, yüksek enerji emilimi ve dayanıklılıkları nedeniyle yaygın olarak kullanılan yapısal elemanlardır. Latis yapıların birim hücre konfigürasyonu ve boyutları, yapı üzerine etki eden dış yüklerin transferini etkiler ve bağlı olduğu yapıların mekanik performansında belirleyici bir rol oynayabilir. Şekil 3'te gösterilen latis yapıların geliştirilmesine olan ilgi, özellikle mühendislik uygulamalarında sundukları avantajlar ortaya çıktıkça araştırma düzeyinde artmaktadır [Mirzaali, M. J., Hedayati, R., Vena, P., Vergani, L. A. U. R. A., Strano, M., & Zadpoor, A. A. (2017); Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S. (2022); Usta, F., Scarpa, F., Türkmen, H. S., Johnson, P., Perriman, A. W., & Chen, Y. (2021); Usta, F., Zhang, Z., Jiang, H., & Chen, Y. (2023); Kowsari, K., Akbari, S., Wang, D., Fang, N. X., & Ge, Q. (2018)].

Son yıllardaki çalışmalarda, iki önemli tasarım stratejisi öne çıkmaktadır:

- 1) Farklı konfigürasyonlara sahip latis yapılar
- 2) Farklı malzeme özelliklerine sahip latis yapılar.

Örneğin, konfigürasyon ve malzeme özelliklerini bölgesel olarak değiştirerek mekanik özellikleri inceleyen çalışmalarda, yeni tasarımların eski modellere göre daha yüksek dayanıklılık ve enerji soğurma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kompleks konfigürasyonlara sahip olan ve üretimi zor olan latis yapıların son yıllarda daha popüler bir araştırma konusu haline gelmesinin önemli bir nedeni, eklemeli imalat teknolojilerindeki ve hesaplama yöntemlerindeki ilerlemelerdir. Bu şekilde, karmaşık latis yapıları deneysel ve sayısal olarak incelenmesi giderek daha kolay hale gelmiştir [Mirzaali, M. J., Hedayati, R., Vena, P., Vergani, L. A. U. R. A., Strano, M., & Zadpoor, A. A. (2017); Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S. (2022); Usta, F., Scarpa, F., Türkmen, H. S., Johnson, P., Perriman, A. W., & Chen, Y. (2021); Usta, F., Zhang, Z., Jiang, H., & Chen, Y. (2023); Kowsari, K., Akbari, S., Wang, D., Fang, N. X., & Ge, Q. (2018)]. Günümüzde, 3D yazıcılar sayesinde Sterolitografi, Polimer Püskürtme Yöntemi ve Erime Katmanı Modelleme gibi farklı yöntemler kullanılarak tek malzemeli ve çok malzemeli latis yapılar üretilebilmektedir. Latis yapılarının mekanik özelliklerini incelemek için çeşitli sınıflandırma yöntemleri bulunmaktadır. Örneğin, Poisson oranı değerinin işaretine göre latis yapıları gruplandırmak bir yöntemdir. Oksetik yapılar doğadaki çoğu malzemeden farklı olarak negatif bir Poisson oranı gösteren malzemelerdir. Oksetik yapılar, genellikle laboratuvar ortamlarında geliştirildiği için meta-malzemeler sınıfına dahil edilir [Lakes, R. S. (2017); Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., & Yang, M. B. (2004); Scarpa, F., Ciffo, L. G., & Yates, J. R. (2003)]. Bir başka sınıflandırma yöntemi, latis yapının dış yük altında maruz kaldığı deformasyon moduna göre yapılmaktadır. Burada, latis yapının bükülme veya germe modunun baskın olup olmadığına bağlı olarak geniş bir sınıflandırma kullanılmaktadır [Kaur, M., & Kim, W. S. (2019)].

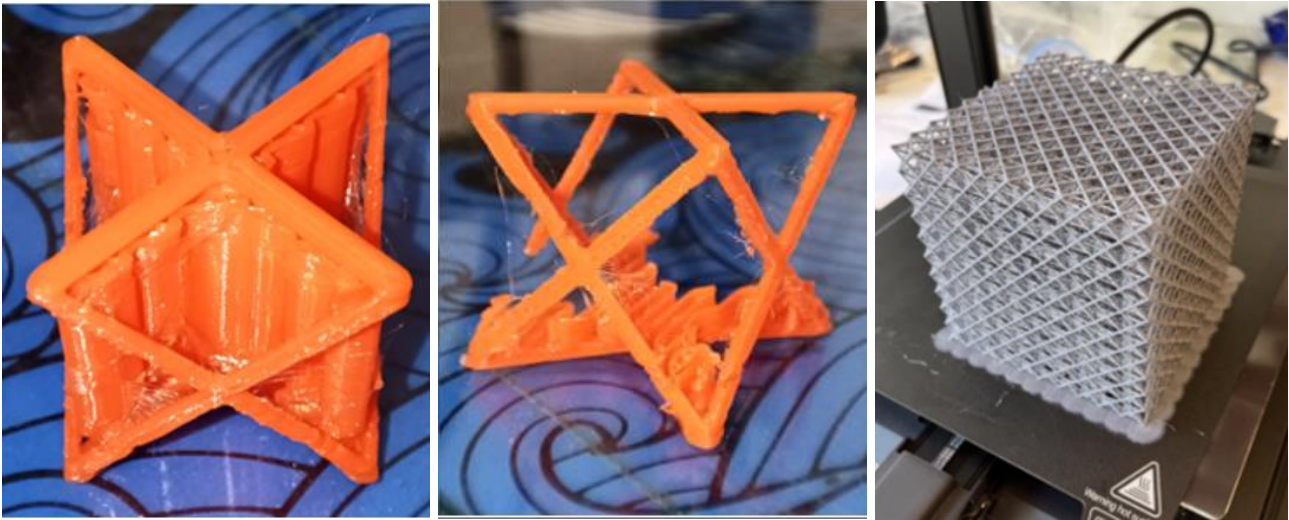


Şekil-3: BCC, FCC, Oktet, Re-entrant hücreler [Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S. (2022)].

Latis Hücrelerin Dizaynı

İkisi eğilme, ikisi uzama baskın toplam dört farklı tipte seçimi yapılan hücrelerin ilk olarak 3x3x3, 4x4x4 ve 5x5x5 hücre sayısına sahip tasarımları tabla boyutlarına uygun olacak şekilde CATIA programı kullanılarak yapılmıştır. Hücre sayısına ek olarak giriş kalınlıkları (0.5, 1.25, 2 mm) ve yatay giriş uzunluklarının (8, 10, 12 mm) da yapıların basma dayanımına olan etkisini gözlemlemek üzere tasarım kümesi oluşturulmuştur. Bu tasarım parametreleri kullanılarak elde edilen tasarım kümesi daha sonra Taguchi tasarım optimizasyonu ile tasarım parametrelerinin etkileri incelenmiştir.

3D yazıcı üretim zorlukları: İlk olarak FDM teknolojisinin kullanılabilirliği test edilmiştir. Sonuç olarak, dikey destek ihtiyacından kaynaklı hücreli yapıların FDM yazıcılar ile üretime uygun olmadığına karar verilmiştir. Şekil 4'te boşluk kısımlarına atanan destek malzemesinden dolayı istenilen geometrilerin bu üretim yöntemiyle uygun şekilde elde edilebileceği görülmektedir. Destek malzemesi tanımlanmadığı durumda ise istenilen konfigürasyon şekli üretilmemektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda SLA (Stereolitografi) teknolojisine sahip üç boyutlu yazıcı kullanılmasının daha uygun karar verilmiştir. SLA yazıcılarda ise bu destek malzemesi sıvı yapıda olduğu için üretilen numunelerden alkol veya su yardımıyla destek bölümleri arındırılabilen ve istenilen latis yapı konfigürasyonu elde edilebilmektedir.



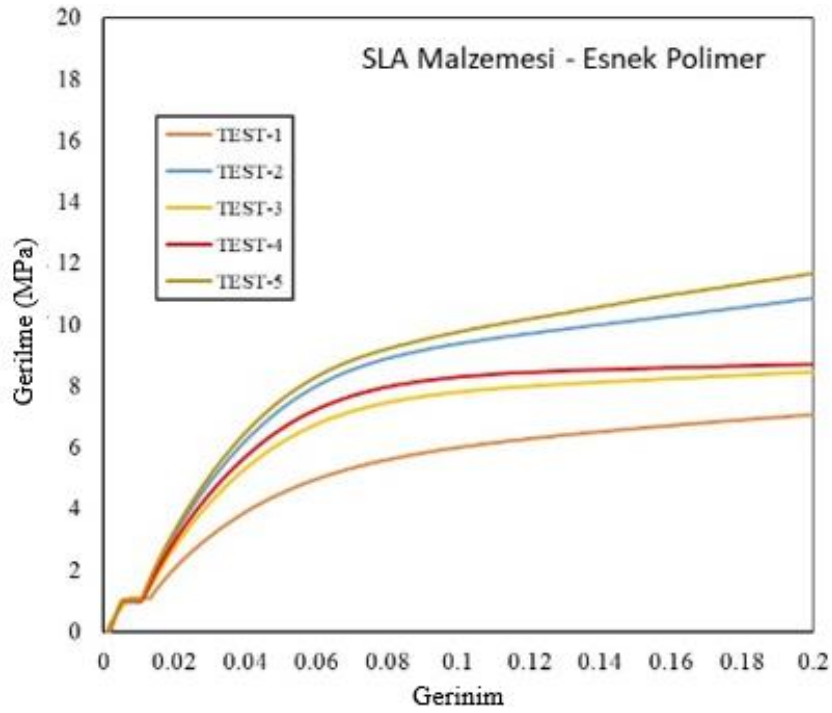
Şekil-4: FDM yazıcı baskı örnekleri

Çekme Testi ile Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapılacak olan analizlerde, kullanılan polimer malzemenin maksimum çekme gerilmesi gibi değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bu değerler daha sonra da üretimde kullanılacak olan sıvı reçine için hazır şekilde bulunamamaktadır. Bu nedenle ASTM D638 test standardına göre SLA tip yazıcı kullanılarak çekme numuneleri üretilmiş statik çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te solda çekme deneyi yapılan bir test gösterilmektedir, sağda ise tekrar testi yapılan beş adet numunenin deney sonrası kopma davranışı gösterilmektedir. Numuneler uygulanan çekme yüküne dik yönde yanal ekseninde kopma hasarına maruz kalmıştır. Ardından sonucunda elde edilen veriler ile analizlerde kullanılacak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Şekil 6'da her bir teste ait mühendislik gerilmesi ve birim şekil değiştirme verileri grafik olarak gösterilmektedir. Tablo 1'de ise elde edilen malzeme özellikleri değerleri sunulmaktadır.



Şekil-5: Çekme testi ve kopan numuneler



Şekil-6: Gerilme-Gerinim eğrisi

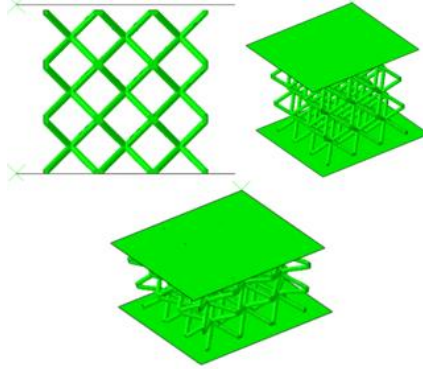
Tablo-1: Malzeme Özellikleri

Yoğunluk	1.15 gr/cm ³
Elastisite Modülü	0.25 GPa
Poisson's oranı	0.3
Akma gerilmesi	6.5 MPa

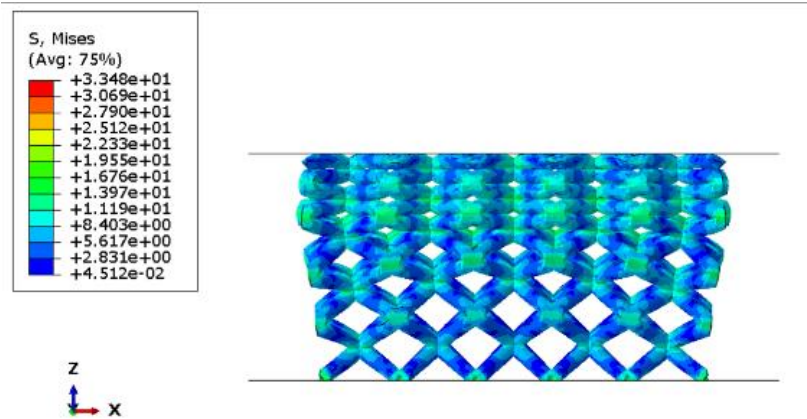
Sonlu eleman analizleri

Sonlu eleman analizleri için Abaqus yazılımı kullanılmıştır. Abaqus CAE programı kullanılarak 3x3x3, 4x4x4 ve 5x5x5 hücelere her bir farklı konfigürasyonda analizler yapılmıştır. Analizlerin ardından amaç hücre sayısının ve kafes kiriş kalınlıklarının özgül dayanım kapasitesi ve özgül

enerji soğurma kapasitesi amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmaktadır. Ardından ideal tasarımlar için statik basma testleri yapılması planlandığı için analizler de benzer şekilde statik yük uygulanarak yapılmıştır. Tasarımı programa aktarılan hücreli yapının alt yüzeyinde zeminle temas eden elemanları sınır koşulu olarak ankastre mesnetli tanımlanmıştır. Yükün uygulanması için rijit bir plaka çizilip modelin üst yüzeyini kaplayacak şekilde üst yüzeye dik doğrultuda numuneye basma yükü uygulaması için deplasman değişimi sabit olacak şekilde hareket verilmiştir. SLA baskı cihazında üretilecek numunelerin Anycubic Suda Yıkabilir Reçine malzemesinin testlerde belirlenen özellikleri programda tanımlanmıştır. Daha sonra ağ yakınsama çalışması yapılarak ideal sonlu analiz eleman boyutu belirlenmiştir. Şekil 7'de seçilen BCC modelin için analiz öncesi ve sonrası görüntüleri yer almaktadır. Şekil 8'de ise bu modele ait von Mises gerilme dağılımı gösteren analiz sonucu simülasyon görüntüsü yer almaktadır.



Şekil-7: Örnek BCC farklı konfigürasyon analizi.



Şekil-8: Örnek BCC von Mises gerilme dağılımı.

Taguchi tasarım optimizasyonu

Optimizasyon çalışmasında, kafes yapıların basma yükü altında mekanik davranışı üzerindeki geometrik etkiyi araştırmak için Taguchi Deney Tasarımı (DoE) yöntemi kullanıldı. Taguchi yöntemi, ortogonal deney tasarımı yaklaşımına dayanarak tasarım parametrelerinin en uygun kombinasyonunu belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Taguchi yöntemi kullanılarak üç seviyeli ve iki faktörlü L9(3²) ortogonal dizi tablosu kullanılmıştır. Hücre kalınlıkları için 0.5 mm, 1.25 mm ve 2 mm hücre kalınlıkları alt, orta ve üst seviyeler olarak belirlenerek 3 seviyeli bir inceleme yapılmıştır. Benzer şekilde hücre sayısının etkisi için 3x3x3, 4x4x4 ve 5x5x5 olmak üzere 3 farklı hücre sayısı için alt, orta ve üst seviyeler belirlenmiştir. Yani iki farklı tasarım parametresinin etkisi (kalınlık ve hücre sayısı) üç seviyede incelenmiştir L9(3²). Taguchi tasarım optimizasyonu incelenecek tasarım kümesinin sayısını daha az sayıda tutarak inceleme için avantaj sağlamaktadır. Toplam 9 adet tasarım dört farklı hücre (BCC, FCC, Oktet kiriş ve Re-entrant oksetik) için ayrı ayrı toplam 36 tasarım incelenmektedir.

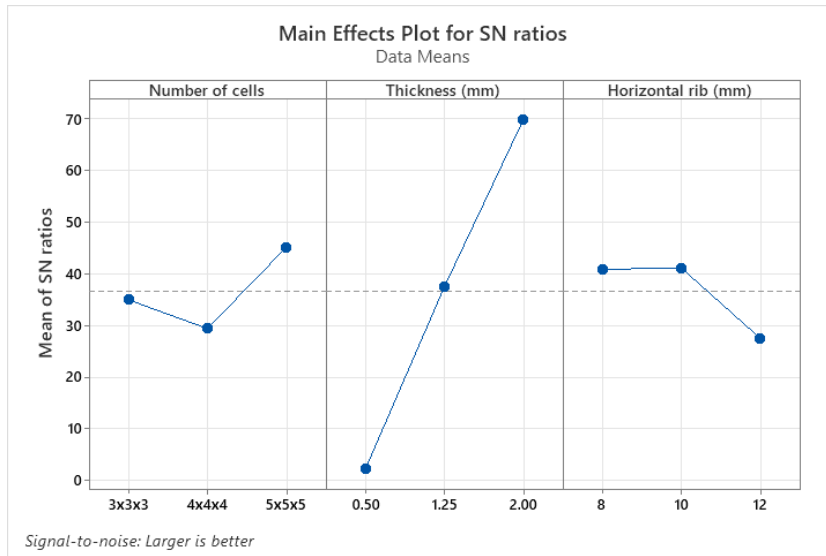
Her bir oksetik konfigürasyon için mekanik performansı etkileyen faktörler ve üç seviyeli tasarım optimizasyonu için Tablo 2'de belirlenen seviyeler göz önünde bulunduruldu. Analiz, üretilebilirlik

ve mekanik test düzeneği de dikkate alınarak üst ve alt sınırlar belirlendi. Bu doğrultuda, BCC, FCC, Oktet ve Re-entrant yapılar için belirlenen faktörler ve seviyeler şu şekildedir:

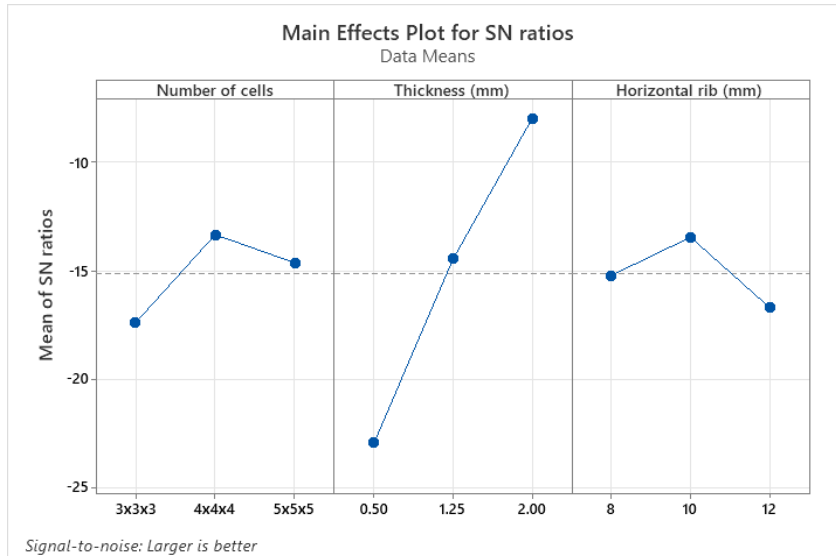
Tablo-2: BCC, FCC, Oktet ve Re-entrant yapıları için Taguchi DoE tablosu: faktör ve seviyeler.

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Hücre sayısı, n (mm)	3x3x3	4x4x4	5x5x5
Kiriş kalınlığı, t (mm)	0.5	1.25	2
Yatay kirişi uzunluğu, h	8	10	12

Taguchi optimizasyonunun ardından her bir model için sinyal gürültü oranları incelenerek tasarım parametrelerinin performans verilerine etkileri irdelenmiştir. Örneğin BCC modele ait sinyal gürültü oranı grafikleri Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil-9: BCC model Özgül dayanım sinyal gürültü oranları



Şekil-10: BCC Özgül enerji soğurma kapasitesi sinyal gürültü oranları.

Şekil 9 ve Şekil 10'da bulunan grafiklerde görüldüğü üzere BCC hücre modelleri için kalınlık değeri sonuçları en çok etkileyen parametre olurken kalınlık artışıyla birlikte mekanik performans verileri artmaktadır. BCC modele benzer şekilde; FCC, Oktet ve Re-entrant yapıları arasında da en yüksek hücre sayısına sahip olan 5x5x5 hücrelerin ve en yüksek kalınlık değeri olan 2 mm kiriş kalınlığı kullanılarak tasarlanan hücrelerin en yüksek özgül enerji soğurma kapasitesine sahip olduğu sonucuna varıldı.

Optimal Hücrelerin Üretimi

Farklı 3D yazıcı teknolojileri ile üretimler denenmiştir. İlk olarak FDM tabanlı yazıcılarla latis yapıları üretilebilirken, 3D latis yapılarının üretiminde, destek malzemesinin iç boşluklarda tanımlanması gerektiğinden planlanan geometriler için uygun olmadığı görülmüştür. Creality Ender 3 S2 model yazıcının 3D latis yapıları üretimi için istenilen geometriyi elde etmek için uygun olmadığı deneyler yoluyla anlaşılmıştır. Ayrıca, yazıcı marka modelinin uygunluğu yerine yazıcı tipinin uygun olup olmadığı sorusu ortaya çıkmıştır. Daha sonra 3D latis yapılarının üretimi için Stereolitografi (SLA) teknolojisi ve ışıkla reçineyi sertleştirerek çalışan 3D yazıcı teknolojisinin kullanımının daha uygun olacağına karar verilmiştir. Ardından SLA yazıcı ile numune üretimine başlanmış olup, düşünüldüğü gibi SLA teknolojisinin bu proje için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan analizler doğrultusunda elde edilen özgül enerji soğurma kapasitesi ve özgül dayanım kapasitesi verilerine göre en optimum tasarımların 5×5×5 hücre sayısına ve 2 mm kiriş kalınlığına sahip yapılar olduğu tespit edildi. 3 adet 5×5×5 hücre sayısında, 2 mm kalınlığında FCC yapı, 3 adet 5×5×5 hücre sayısında, 2 mm kalınlığında BCC yapı, 3 adet 5×5×5 hücre sayısında, 2mm kalınlığında Oktet yapı ve 3 adet 5×5×5 hücre sayısında, 2 mm kalınlığında Re-entrant yapı üretilerek basma testi numuneleri SLA tip yazıcı kullanılarak üretilmiş daha sonra UV led ışık kullanılarak tarafımızca yapılan kütleme cihazında kürlenmiştir.



Şekil-11: SLA yazıcı ve kütleme cihazı.



Şekil-12: Üretilen 2mm kiriş kalınlığına sahip 5×5×5 numuneler.

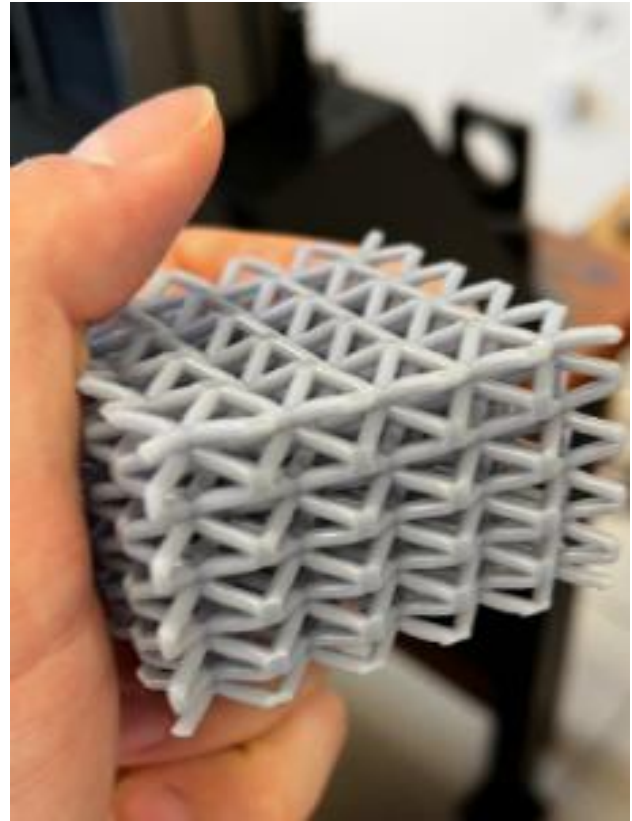
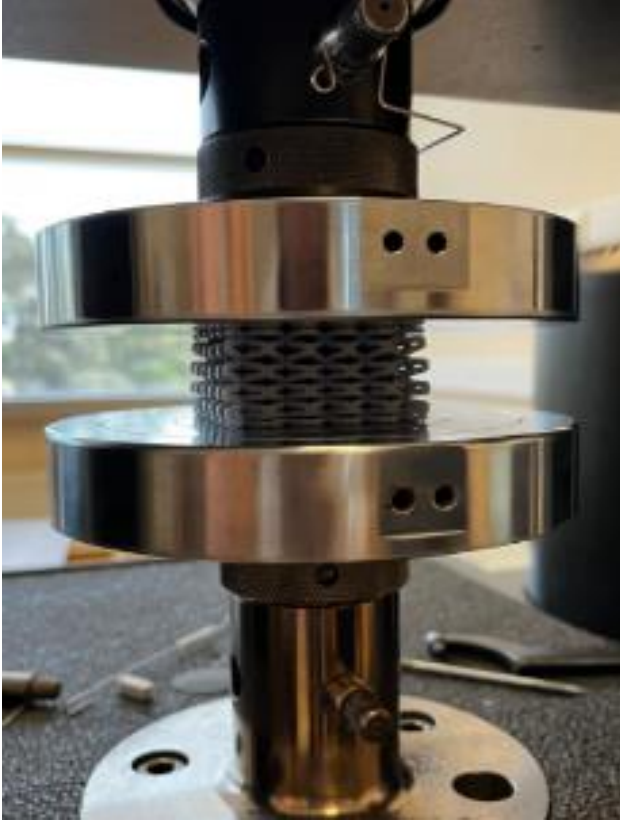
Basma Testleri

Üretimi yapılan hücrelere basma testleri uygulanmış testler sonucunda dayanımı en yüksek hücreli yapıları belirlemek için test sonucu özgül basma ve enerji soğurma kapasiteleri elde edilmiştir. Testler için Instron basma test cihazı kullanılmıştır. Bu deneylerde, cihaz tepki kuvveti, emilen enerji ve eksenel deformasyon verilerini kaydeder. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, latis yapılarının mekanik dayanıklılığı ve enerji emme kapasiteleri karşılaştırmaya yarar. Konfigürasyon değişikçe farklı yapılarda farklı bağıl yoğunluklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ağırlık etkisini hesaba katmak için basma dayanımı ve emilen enerji kapasiteleri, bağıl yoğunluklarla normalize edilmiştir.

$$\text{Özgül basma dayanımı} = \frac{\text{Kritik basma gerilmesi}}{\text{Kütle}} \quad (2)$$

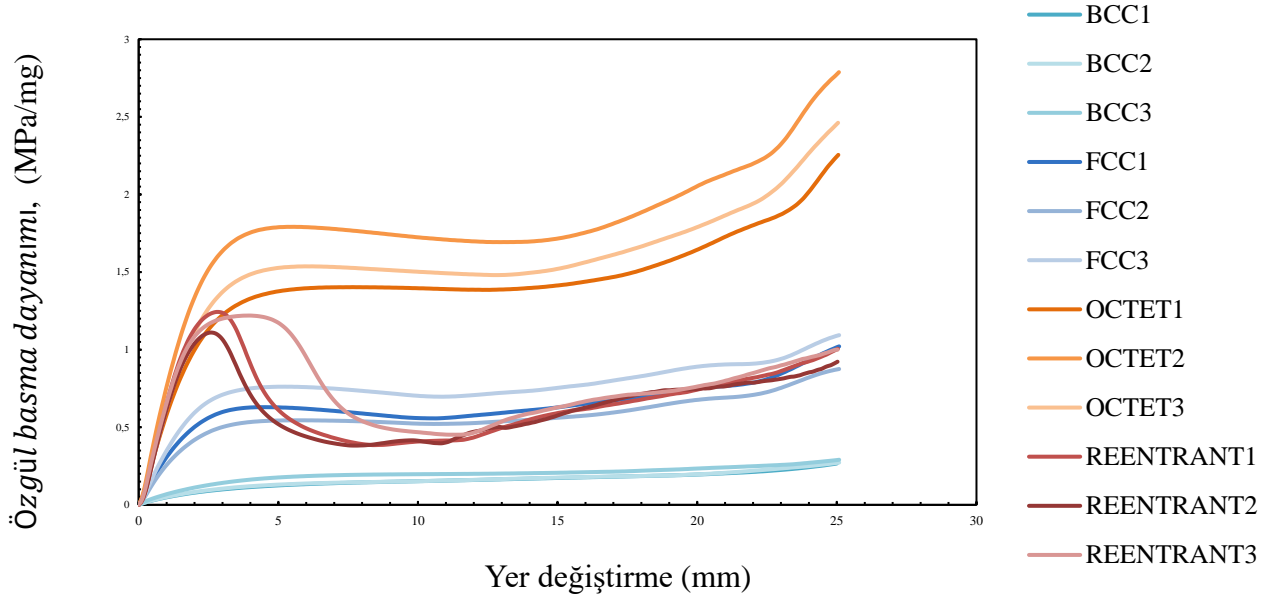
$$\text{Özgül enerji emilimi} = \frac{\text{Soğurulan enerji}}{\text{Kütle}} \quad (3)$$

Kritik basma dayanımı ve soğurulan enerji miktarları ortalama basma gerilemesi-şekil değişimi eğrilerinde gerilmelerin kritik değere ulaştığı noktada (yoğunlaşma noktası) hesaplanmıştır [Mirzaali, M. J., Hedayati, R., Vena, P., Vergani, L. A. U. R. A., Strano, M., & Zadpoor, A. A. (2017)].



Şekil-13: Basma testindeki numune.

BCC, FCC, Oktet ve Re-entrant yapılar içinden seçilen birer adet en iyi performansı sağlayan modele ait üçer tekrar testi olmak üzere toplam 12 adet basma deneyi yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen özgül basma dayanımının şekil değişimi ile değişimini ifade eden eğriler Şekil 12'de gösterilmedi.



Şekil-14: İdeal tasarımlara ait testlerin özgül basma dayanımı.

SONUÇ

Araştırmada belirlenen dört farklı hücreli yapı için L9(3²) ortogonal veri setine göre dokuz adet toplam 36 modelin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Taguchi tasarım optimizasyonunda BCC, FCC, Oktet ve Re-entrant oksetik yapılar için ayrı ayrı inceleme yapılmıştır. Bu inceleme sonucunda BCC, FCC, Oktet ve Re-entrant modellerine ait farklı kalınlıklarda ve hücre sayısında özgül enerji soğurma kapasitesi ve özgül dayanım verilerine göre en iyi sonuçları veren üçer adet model belirlenip test edilmektedir. Elde edilen basma testi verileri ve bilgisayar destekli mühendislik programlarında yapılan analizler sonucu elde edilen çıktılar karşılaştırılmıştır. Yapılan basma testlerinin sonuç verileri kullanılarak her bir hücreli yapı için özgül basma dayanımı ve şekil değişimi grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler yorumlanarak en dayanıklı hücre yapısı seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en dayanıklı hücrelerin oktet latis yapısına sahip hücreler olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİİ A.Ş. (TUSAŞ) LIFT UP Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri kapsamında desteklenmektedir. Bu desteklerinden dolayı TUSAŞ ve TUSAŞ mühendislerine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Chen, Z., Wu, X., Xie, Y. M., Wang, Z., & Zhou, S. (2020). Re-entrant auxetic lattices with enhanced stiffness: A numerical study. *International Journal of Mechanical Sciences*, Science Direct, 178, 105619.

Gibson, I. J., & Ashby, M. F. (1982). *The mechanics of three-dimensional cellular materials*. Proceedings of the royal society of London. A. Mathematical and physical sciences, The Royal Society Publishing, 382(1782), 43-59.

Kaur, M., & Kim, W. S. (2019). Toward a smart compliant robotic gripper equipped with 3D-designed cellular fingers. *Advanced intelligent systems*, Wiley.vch, 1(3), 1900019.

Kowsari, K., Akbari, S., Wang, D., Fang, N. X., & Ge, Q. (2018). High-efficiency high-resolution multimaterial fabrication for digital light processing-based three-dimensional printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Mary Ann Liebert, Inc. Publishers, 5(3), 185-193.

Lakes, R. S. (2017). Negative-Poisson's-ratio materials: auxetic solids. *Annual review of materials research*, Annual Reviews, 47, 63-81.

Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S. (2022). A novel hybrid design method of lattice structure based on failure mode. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, Science China Press, 65(9), 294611.

Mirzaali, M. J., Hedayati, R., Vena, P., Vergani, L. A. U. R. A., Strano, M., & Zadpoor, A. A. (2017). Rational design of soft mechanical metamaterials: Independent tailoring of elastic properties with randomness. *Applied Physics Letters*, AIP Publishing, 111(5).

Usta, F., Scarpa, F., Türkmen, H. S., Johnson, P., Perriman, A. W., & Chen, Y. (2021). Multiphase lattice metamaterials with enhanced mechanical performance. *Smart Materials and Structures*, IOP Science, 30(2), 025014.

Usta, F., Zhang, Z., Jiang, H., & Chen, Y. (2023). Harnessing structural hierarchy and multi-material approaches to improve crushing performance of re-entrant honeycombs. *Journal of Manufacturing Processes*, Science Direct 92, 75-88.

Scarpa, F., Ciffo, L. G., & Yates, J. R. (2003). Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam. *Smart materials and structures*, IOP Science 13(1), 49.

Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., & Yang, M. B. (2004). Review on auxetic materials. *Journal of materials science*, JMS Publishing, 39, 3269-3279.

Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2022). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, Science Direct, 116397.

Xiao, L., Xu, X., Song, W., & Hu, M. (2020). A multi-cell hybrid approach to elevate the energy absorption of micro-lattice materials. *Materials*, MDPI Open Access Journals, 13(18), 4083.