Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 41:1 (2026) 495-506

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Effect of geometric parameters on the vibration performance of polymer honeycomb structures produced by additive manufacturing

Ufuk Kızılkaya[1], Kubilay Aslantas[1]*, Ekrem Özkaya[2], Adem Çicek[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, University of Afyon Kocatepe, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, RTE University, 53100, Rize, Türkiye
[3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Honeycomb-filled polymer beams were optimized for enhanced vibration damping
- Wall thickness and cell size significantly affect stiffness and damping performance
- Finite element simulations correlated well with experimental results despite manufacturing deviations

Keywords:

- Additive manufacturing
- FDM
- Honeycomb
- Vibration damping
- Finite elements

Article Info:

Research Article
Received: 27.04.2025
Accepted: 07.01.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1685046

Acknowledgement:

This study was supported by grants from the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBİTAK) and the Scientific and Technological Research Projects Support Program-2232 [grant number 121C068]

Correspondence:

Author: Kubilay Aslantas
e-mail: aslantas@aku.edu.tr
phone: +90 505 898 4971

Graphical/Tabular Abstract

The test specimens were manufactured using an FDM (Fused Deposition Modeling) open frame three-dimensional printer (Figure A-a). The produced beam specimens were fixed in place using a vice (Figure A-b). The test was conducted using a Dytran 5800B4 model hammer, and a Dytran 322F1 model accelerometer was employed to measure the frequency response. The experimental setup comprised a Novian four-channel data acquisition card, equipped with the Tap Testing measurement module of CutPRO software, utilised to ascertain the vibration amplitude and damping ratio (Figure A-c). Subsequent to the measurement, the force-time, acceleration-time graphs and real and imaginary components of the frequency response function were obtained. It is hypothesised that the geometrical differences of the honeycomb obtained after the production of the geometrical model affect the vibration amplitude and damping ratio. To investigate this, a series of analyses were performed using Ansys Workbench software (Figure A-d). The test and modeling results obtained were compared with each other (Figure A-e).

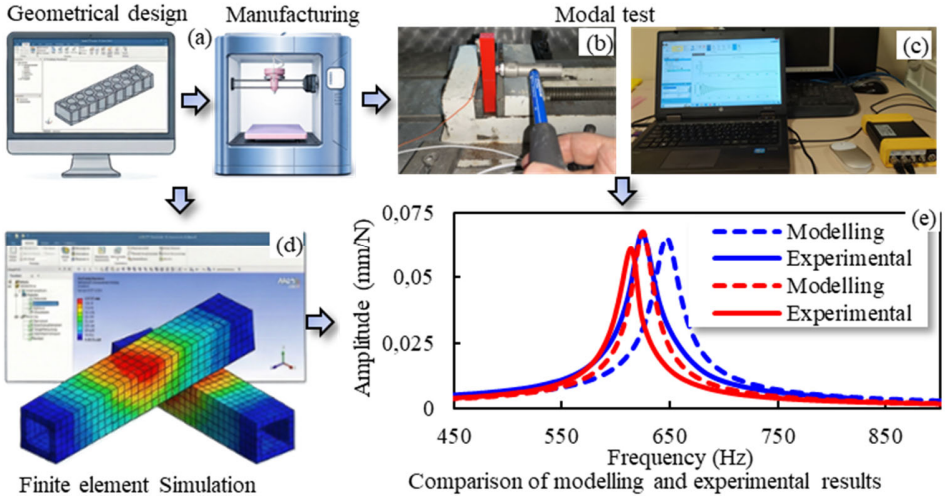


Figure A. Hammer Testing and Numerical Analysis Process Performed on Honeycomb Filled Beams

Purpose: This study investigates the vibration damping behavior of polymer beams with honeycomb structures produced by FDM. The effects of wall thickness, cell side length, and infill ratio on dynamic properties were examined to guide lightweight and high-performance vibration control designs.

Theory and Methods: Honeycomb-filled beams were designed with varying geometric parameters using SpaceClaim software. Specimens were fabricated by FDM and tested through modal hammer impact tests to obtain natural frequencies and damping ratios. Finite element analysis (ANSYS Workbench) was employed to simulate the vibration behavior, considering material properties and mesh quality.

Results: Increasing wall thickness reduced vibration amplitude without significantly affecting the natural frequency. Smaller cell sizes increased stiffness and improved damping. Finite element simulations matched experimental results well, although deviations were observed in thin-walled structures due to manufacturing imperfections.

Conclusion: Optimizing honeycomb structures enhances vibration damping while maintaining low weight. Wall thickness, cell size, and production quality are key factors influencing dynamic performance. Numerical models are useful, but experimental validation remains essential to capture real-world effects.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 41:1 (2026) 495-506

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Eklemeli imalatla üretilen polimer bal peteği yapıların titreşim performansına geometrik parametrelerin etkisi

Ufuk Kızılkaya[1], Kubilay Aslantas[1]*, Ekrem Özkaya[2], Adem Çicek[3]

[1]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye
[2]RTE Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye
[3]Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 06010, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Petek dolgulu polimer kirişler, gelişmiş titreşim sönümlemesi için optimize edilmiştir
- Duvar kalınlığı ve hücre boyutu sertlik ve sönümleme performansını önemli ölçüde etkilemektedir
- Sonlu eleman simülasyonları, üretim sapmalarına rağmen deneysel sonuçlarla iyi korelasyon göstermiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 27.04.2025
Kabul: 07.01.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1685046

Anahtar Kelimeler:
Eklemeli imalat, FDM, bal peteği, titreşim sönümleme, sonlu elemanlar

ÖZ

Bu çalışma, EYM (Eriyik Yığma Modelleme) yöntemiyle üretilen bal peteği yapısına sahip polimer kirişlerin titreşim sönümleme davranışını incelemektedir. Çalışmada, bal peteği dolgulu kiriş numuneleri farklı geometrik parametreler (cidar kalınlığı, hücre kenar uzunluğu, doluluk oranı) göz önünde bulundurularak üretilmiş ve bu parametrelerin titreşim karakteristiği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, iç dolgu içermeyen (kabuk tipi) ve tam dolu kirişlerle karşılaştırmalar yapılarak bal peteği geometrisinin sönümleme performansına katkısı değerlendirilmiştir. Modal analizlerde çekiç-darbe testi ve ivmeölçer kullanılarak frekans yanıtı ve sönüm oranları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ise üretim sürecinde oluşabilecek boyutsal hataların titreşim davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, bal peteği yapıların uygun geometrik tasarımıyla hafiflik sağlarken aynı zamanda titreşim sönümleme performansını artırabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle hafif ve yüksek performanslı pasif titreşim kontrol elemanlarının geliştirilmesine yönelik tasarımlar için yol gösterici niteliktedir.

Effect of geometric parameters on the vibration performance of polymer honeycomb structures produced by additive manufacturing

HIGHLIGHTS

- Honeycomb-filled polymer beams were optimized for enhanced vibration damping
- Wall thickness and cell size significantly affect stiffness and damping performance
- Finite element simulations correlated well with experimental results despite manufacturing deviations

Article Info

Research Article
Received: 27.04.2025
Accepted: 07.01.2026

DOI:
10.17341/gazimmfd.1685046

Keywords:
Additive manufacturing, FDM, honeycomb, vibration damping, finite elements

ABSTRACT

This study investigates the vibration damping behaviour of polymer honeycomb beams fabricated by FDM (Fused Deposition Modelling). In the study, honeycomb filled beam specimens are fabricated considering different geometrical parameters (wall thickness, cell edge length, fill ratio) and the effects of these parameters on the vibration characteristics are analysed. In addition, the contribution of the honeycomb geometry to the damping performance is evaluated by comparison with unfilled (shell type) and fully filled beams. In the modal analysis, the frequency response and damping ratios were obtained using a hammer impact test and an accelerometer. The finite element method was used to determine the effect of dimensional errors, which can occur during the manufacturing process, on the vibration behaviour. The results obtained show that with appropriate geometric design of honeycomb structures, vibration damping performance can be improved while maintaining low weight. These results are particularly instructive for the design of lightweight and high performance passive vibration control elements.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / *Corresponding Author / Authors: ufuk9595@hotmail.com, *aslantas@aku.edu.tr, ekrem.ozkaya@erdogan.edu.tr, acicek@aybu.edu.tr / Tel: +90 505 898 4971

1. Giriş (Introduction)

Eklemeli imalat, son yıllarda mühendislik ve tasarım alanlarında devrim yaratan bir teknoloji haline gelmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, katmanlı imalat, karmaşık geometrilerin hassas ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır [1]. Özellikle polimer bazlı kafes yapılar, hafiflik, yüksek özgül dayanım ve enerji sönümleme kabiliyetleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Polimer kafes yapılar, düşük yoğunluk ile yüksek özgül mekanik özellikleri bir arada sunabilen, periyodik veya stokastik geometriye sahip üç boyutlu hücresel sistemlerdir [3]. Bu yapılar, özellikle son yıllarda eklemeli imalat teknolojilerinin gelişimiyle birlikte karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren geometrik tasarımların üretilebilmesi sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmıştır. Stereolitografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik yığma modelleme (EYM) gibi üretim yöntemleri, polimer bazlı kafes yapıların katmanlı olarak üretilmesine olanak tanımakta; bu sayede farklı doluluk oranlarına, çubuk kalınlıklarına ve hücre geometrilerine sahip yapılar elde edilebilmektedir. Polimer kafes yapıların en dikkat çekici avantajları arasında hafiflik, enerji absorpsiyonu, darbe dayanımı, ısı ve kütle transferi verimliliği ile özelleştirilebilir rijitlik-darbe dayanımı dengesi yer almaktadır [4-6]. Bu özellikler, söz konusu yapıların biyomedikal implantlar [7], otomotiv ve havacılık uygulamaları [8], enerji sönümleyici sistemler [9, 10] ve yapısal kompozit çekirdek malzemeler [11] gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, mikro-yapısal parametrelerin değişimiyle makro düzeyde mekanik performansın doğrudan kontrol edilebilir olması, bu yapıların fonksiyonel gradyanlı malzeme (FGM) tasarımlarında da tercih edilmesine olanak sağlamaktadır [12]. Bu bağlamda, polimer kafes yapıların üretim süreçlerinin, geometrik parametrelerinin ve yükleme altındaki davranışlarının detaylı olarak incelenmesi hem yapısal optimizasyon hem de uygulama temelli özel tasarım süreçleri açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Polimer kafes yapılar, sahip oldukları geometrik esneklik ve malzeme özellikleri sayesinde yüksek düzeyde titreşim sönümleme potansiyeli sunmaktadır. Bu yapılar, geleneksel katı malzemelere kıyasla daha düşük elastik modüle ve daha yüksek iç yapısal sönüm kapasitesine sahip olmaları nedeniyle, mekanik titreşimleri etkili bir şekilde sönümleyebilmekte ve yayılmalarını sınırlandırabilmektedir. Özellikle, kafesin hücresel mimarisi, titreşim enerjisinin dağılımında ve lokalize edilmesinde önemli rol oynamakta, bu da rezonans frekanslarının kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Gibson ve Ashby [2] tarafından ortaya konulan klasik hücresel yapı teorileri, bu tür yapıların sönümleme mekanizmalarının hem malzemenin viskoelastik özelliklerinden hem de geometrik şekil değişimlerinden kaynaklandığını göstermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar da bu görüşü desteklemektedir; örneğin, Guo vd. [13], 3D baskı teknolojisiyle üretilen kum saati kafesli bir konsol sandviç kiriş için kapsamlı bir titreşim analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen bulgular, kafes yoğunluğunun artmasının rijitlik ve enerji absorpsiyonunu artırdığını, ancak bazı konfigürasyonlarda sönümleme performansının düzensiz hücre yapısı nedeniyle dalgalandığını göstermiştir. Ayrıca yapının morfolojisinin titreşim altında deformasyon karakteristiğini doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Benzer şekilde, Wang vd. [14], kafes yapılı enerji sönümleyicilerin özellikle darbe sonrası salınımlarda titreşim şiddetini ciddi oranda azalttığını ve bu özelliğin hafiflik ile birlikte önemli bir avantaj sağladığını rapor etmiştir. Bu bulgular, polimer kafes yapıların yalnızca taşıyıcı sistemler olarak değil, aynı zamanda pasif titreşim kontrol elemanları olarak da işlev görebileceğini ortaya koymaktadır.

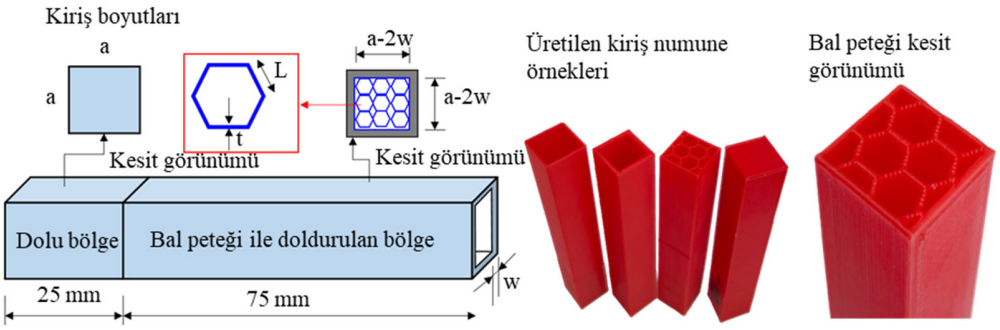
Bal peteği yapılar, doğadan esinlenen ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan yüksek özgül dayanım ve rijitlik sunan hücresel geometrilerdir. Düşük yoğunluklarına rağmen yüksek yük taşıma kapasiteleri, enerji sönümleme özellikleri ve yapısal kararlılıkları sayesinde özellikle havacılık, otomotiv, inşaat ve paketleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların altıgen hücre geometrisi, yüklerin homojen şekilde dağıtılmasını sağlarken, aynı zamanda mekanik titreşimlerin sönümlenmesinde de etkin bir rol oynamaktadır. Bal peteği yapılar, özellikle darbe sonrası titreşimlerin sönümlenmesinde, hücre duvarlarının elastik deformasyonu ve içsel sürtünme mekanizmaları yoluyla önemli miktarda enerji absorbe edebilmektedir. Zhang vd. [15] tarafından yapılan çalışmada, farklı hücre geometrisine sahip alüminyum bal peteği yapıların doğal frekans ve sönüm oranları üzerinde önemli etkiler yarattığı gösterilmiştir. Ayrıca, Rajesh vd. [16], polimer esaslı bal peteği yapıların frekans yanıt analizleri sonucunda, hücre boyutu ve duvar kalınlığının titreşim sönümleme performansını doğrudan etkilediğini rapor etmiştir. Bu bulgular, bal peteği yapıların yalnızca hafiflik ve taşıyıcılık açısından değil, aynı zamanda titreşim izolasyonu amacıyla da mühendislik sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bal peteği yapıların basma yükleri altındaki davranışlarına yönelik yapılan bir çalışmada [17], bal peteği, kafes (grid) ve üçgen PLA yapılarının simetrik ve asimetrik eğilme yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. Analizler sonucunda, aynı malzeme tüketimiyle üçgen hücre yapısının bal peteği hücre yapısına göre biraz daha küçük yer değiştirmeler sergilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte ızgara hücre yapısının bal peteği yapısına nazaran çok daha büyük yer değiştirmeye maruz kaldığı elde edilen diğer bir sonuçtur. Aslantas vd. [18] yenilenebilir enerji uygulamaları ve sürdürülebilir çözümler bağlamında, FDM yöntemiyle PLA malzemeden üretilen bal peteği hücre yapısına sahip kirişlerin titreşim analizini incelemiştir. Orijinal bal peteği yapısının yoğunluğu, hücre duvarının kalınlığı, düzgün altıgenlerin uzunluğu ve doluluk derecesi sayısal olarak varyasyonlara tabi tutulmuştur. Elde edilen bulgular, dolgu oranının artırılmasının titreşim genliklerinin ve frekanslarının azalmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Bal peteğinin titreşim davranışlarına yönelik bir çalışmada Günaydın vd. [19] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bal peteği ve re-entrant yapıdaki çok malzemeli kafes sistemlerin titreşim analizlerinde klasik sonlu eleman modelleri yerine, hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltan homojenleştirilmiş modellerin kullanılabilirliğini değerlendirmektir. Elde edilen bulgular, homojenleştirilmiş (implicit) modellerin doğal frekansları %6,5'ten düşük hata payı ile öngörebildiğini ve mod şekillerinin %99,6'nın üzerinde benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, farklı dolgu parametrelerinin ve üretim yöntemlerinin titreşim sönümleme performansı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Çalışma kapsamında, çekiç darbe testleri ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen veriler karşılaştırılarak, üretimden kaynaklanan boyutsal hataların etkisi tespit edilmiştir. Bu araştırma, hafif ve yüksek performanslı titreşim sönümleyici malzemelerin tasarımına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek optimize edilmiş bal peteği kafes yapıların geliştirilmesi için bir kılavuz niteliği taşımaktadır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

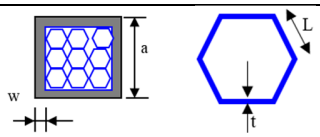
2.1. Kirişin Geometrik Tasarımı (Geometrical Design of Beam)

Çalışmada ilk olarak belirlenen bal peteği benzeri geometri ve tüm kirişin bilgisayar destekli tasarımı gerçekleştirilmektedir. Tasarımlar SpaceClaim yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de gösterilen kirişin 25 mm'lik kısmı, içi dolu ve kirişi sabitlemek amacıyla kullanılmaktadır. Kirişin diğer kısmı bal peteği geometrisine ve değişken duvar kalınlıklarına sahip olabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kirişin kenar ölçüleri 15x15 mm olarak sabit tutulmuş olup, duvar kalınlığı (w), petek kenar uzunluğu (L) ve petek cidar kalınlığı (t) değişken olarak alınmıştır.



Şekil 1. Kirişin boyutları ve üretilen kiriş numunesi örnekleri
(The dimensions of the beams and the beam sample specimens produced)

Tablo 1. Üretilen kirişlerin geometrik parametreleri (Geometric parameters of produced beams)

Geometri 

Model No	w (mm)	L (mm)	t (mm)	a (mm)	w/a	Doluluk Oranı (%)	Amaç
1	0,75	3	0,5	15	0,05	19	Cidar kalınlığının etkisi (w)
2	1,5	3	0,5	15	0,1	19	
3	3	3	0,5	15	0,2	19	
4	1,5	0,75	0,5	15	0,1	51,6	Bal peteği dolgu
5	1,5	1	0,5	15	0,1	43,4	geometrisinin kenar
6	1,5	1,5	0,5	15	0,1	32,9	uzunluğunun etkisi (L)
7	1,5	3	0,3	15	0,1	12,2	Bal peteği dolgu
8	1,5	3	0,75	15	0,1	26,50	geometrisinin cidar
9	1,5	3	1	15	0,1	32,9	kalınlığının etkisi (t)
10	0,75	0	0	15	0,05	0	
11	1	0	0	15	0,06	0	İç dolgusu olmayan kabuk
12	1,25	0	0	15	0,08	0	şeklindeki numunelerde
13	1,5	0	0	15	0,15	0	cidar kalınlığının etkisi (w)
14	3	0	0	15	0,2	0	
15	-	0	0	15	-	100	Dolu kiriş

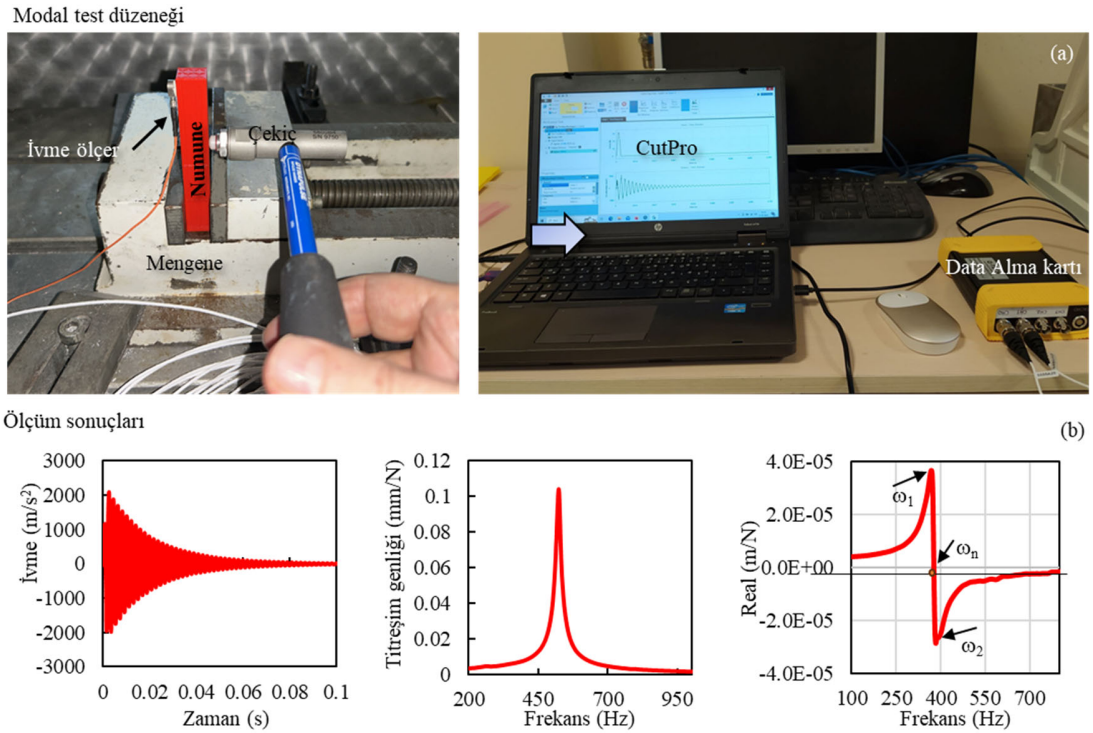
2.2. Numunelerin Üretimi (Manufacturing of Samples)

Creality markasının Ender 3 V2 model makinesi kullanılmıştır. Üretimler eSUN markasının PLA+ filamenti kullanılarak yine eSUN'un Creality yazıcılar için önermiş olduğu üretim parametreleriyle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kullanılan ham maddeye ait teknik veriler üretici firmanın internet sayfasından tedarik edilmiştir. [20]. Nozul çapı 0,4 mm filament çapı ise 1,75 mm'dir. Baskı hızı 65 mm/s olarak tercih edilmiştir. Nozul sıcaklığı 210 °C ve tabla sıcaklığı 60 °C dir. Numunelerin üretildiği laboratuvar sıcaklığı 23°C ± 1 °C dir. Üretim, kiriş boyu doğrultusunca yapılmış olup, en iyi baskı kalitesi için katman kalınlığı minimum değer olan 0,20 mm seçeneği kullanılmıştır. Parça konumlandırma ve dilimleme işlemleri için Ultimaker Cura 5.9.1 yazılımı kullanılmıştır. Tüm numuneler kirişin uzun ekseni doğrultusunda (Y yönü) üretilmiş olup üretim yönü sabit tutulmuştur. Ancak, katmanlı imalatta yaygın olarak karşılaşılan anizotropi, katmanlar arası yapışma kalitesi ve yönelime bağlı mekanik farklılıklar titreşim davranışı üzerinde etkili olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında bu etkiler modellenmemiş ve sayısal analizler ideal izotrop geometri varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin ağırlık ölçümleri yapılarak, yazıcı programında elde edilen ağırlıkla kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama neticesinde aralarında fark olan numuneler yeniden üretilmiştir. Tablo 1'de bal peteği geometrisi için dikkate alınan hücre parametreleri, doluluk oranları ve numunenin üretim amacı verilmektedir. Her bir numuneden en az üç adet üretim yapılmış ve çekiç testleri de en az üç kez tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar bu üç ölçümün ortalaması olup, çubuk grafik olarak verilen sonuçlarda minimum ve maksimum değerleri için hata çubukları kullanılmıştır.

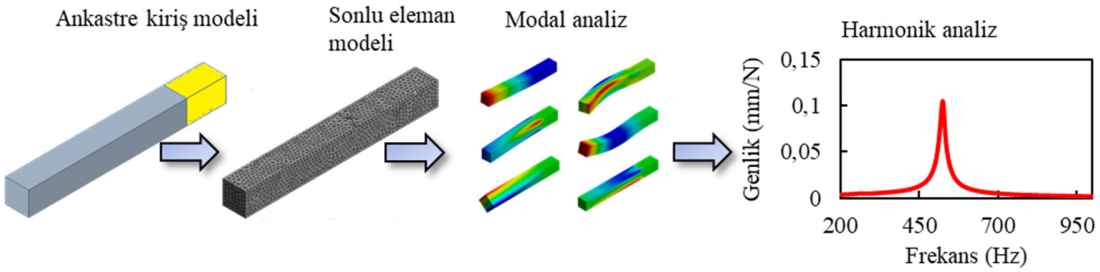
İlk üç modelde sabit doluluk oranında (%19) farklı duvar kalınlıklarının etkisi araştırılmak istenmiştir. İkinci üç modelde ise bal peteği hücresinin kenar uzunluğunun etkisi test edilmiştir. Petek kenar uzunluğunun azalması daha fazla hücrenin kiriş içerisinde yer almasına neden olduğundan doluluk oranı da doğal olarak değişmektedir. 7, 8 ve 9 nolu numuneler ile peteğin cidar kalınlığının etkisi araştırılmış olup sonraki numunelerde bal peteği yapısı kullanılmamıştır.

2.3. Modal Analiz (Modal Analysis)

Numunelerin titreşim karakteristiğini deneysel olarak test etmek adına modal testler yapılmıştır. Üretilen kiriş numuneler, A bölgesinden bir mengene aracılığıyla ankastre olacak şekilde sabitlenmiştir. Test için Dytran marka 5800B4 model bir çekiç, frekans tepkisini ölçmek için ise Dytran marka 322F1 model bir ivmeölçer kullanılmıştır. Titreşim genliği ve sönüm oranını tespit etmek üzere CutPRO yazılımının Tap Testing ölçüm modülüyle birlikte Novian marka dört kanallı bir veri toplama kartı kullanılmıştır (Şekil 2a). Ölçüm sonrasında kuvvet-zaman, ivme-zaman grafikleri ile frekans cevabı fonksiyonunun gerçek (real) ve sanal (imaginary) bileşenleri elde edilmiştir (Şekil 2b)



Şekil 2. a) Çalışmada kullanılan deneysel düzeneği, b) Modal analiz sonrasında elde edilen sonuçların örnek gösterimi
(a) The experimental setup used in the study, b) Example demonstration of the results obtained after modal analysis)



Şekil 3. Nümerik modellemede kullanılan basamakların şematik gösterimi
(Schematic representation of the steps used in numerical modeling)

Yapılan modal testi sonuçlarına dayanarak sönüm oranı hesaplanmıştır. Numuneye ait frekans yanıtı fonksiyonunun gerçek bileşeni kullanılarak sönüm oranı hesaplanmıştır. Gerçek kısım eğrisindeki tepe noktalar (ω_1 ve ω_2) ile doğal frekansa denk gelen (ω_n) değerleri Eş. 1'de yerine yazılmak suretiyle sönüm oranı (ζ) elde edilmiştir.

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (1)$$

2.4. Numerik Modelleme (Numerical Modelling)

Çalışmada nümerik modelleme yapılmasının nedeni, üretim hatalarının numunenin titreşim davranışlarını ne denli etkilediğini ortaya koymaktır. PLA ile kafes veya gözenekli yapılar üretilirken boyutsal hatalar kaçınılmazdır. Aslında bu tür hatalar tüm eklemeli imalat yöntemlerinde oluşabilmektedir [21]. Oluşturulan geometrik model üretim sonrasında elde edilen bal peteğine ait geometrik farklılıkların titreşim genliğini ve sönüm oranını etkileyeceği düşünüldüğünden, ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak önce modal, ardından harmonik analiz yapılmıştır (Şekil 3). Böylece her numunenin rezonans frekansı ve titreşim genliği elde edilmiştir. PLA malzemenin üretim yönüne bağlı olarak elastisite modülünün değişebileceğine yönelik yapılan bir çalışmada [22] elastisite modülünü 2200-2388MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte Poisson oranının ise 0,36 ile 0,38 arasında değişebileceği de elde edilen bulgular arasındadır. Bu çerçevede kirişin nümerik modellemesinde PLA malzemesinin elastik modülü 2300 MPa, Poisson oranı 0,37 ve yoğunluğu ise 1,25 g/cm³ olarak alınmıştır. Modellemede 31752 eleman (10 düğümlü tetrahedron) ve 56764 düğüm kullanılmıştır.

Nümerik modelleme çalışmalarında kullanılan düğüm ve eleman sayısının yeterli olup olmadığının kontrolü için ağ kalite ölçütü ve çarpıklık analizleri yapılmıştır. Ağ kalite ölçütü ortalama değerinin 0,748 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerin kabul edilebilir sınırı 0,5-0,9 aralığıdır [23]. Bununla birlikte kullanılan elemanların çarpılma durumlarını kontrol eden çarpıklık değerinin de 0,2-0,69 aralığında olması önerilir. Bu çalışmada oluşturulan ağ yapısının çarpıklık değeri 0,324 olarak tespit edilmiştir.

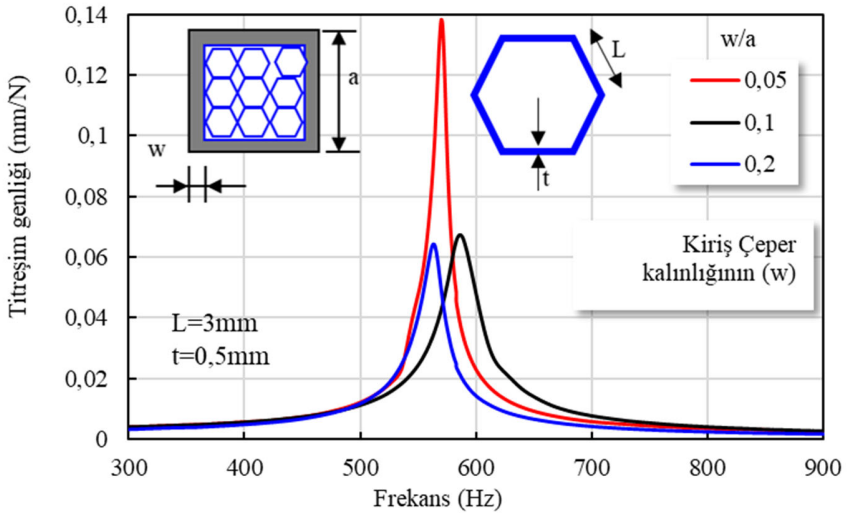
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

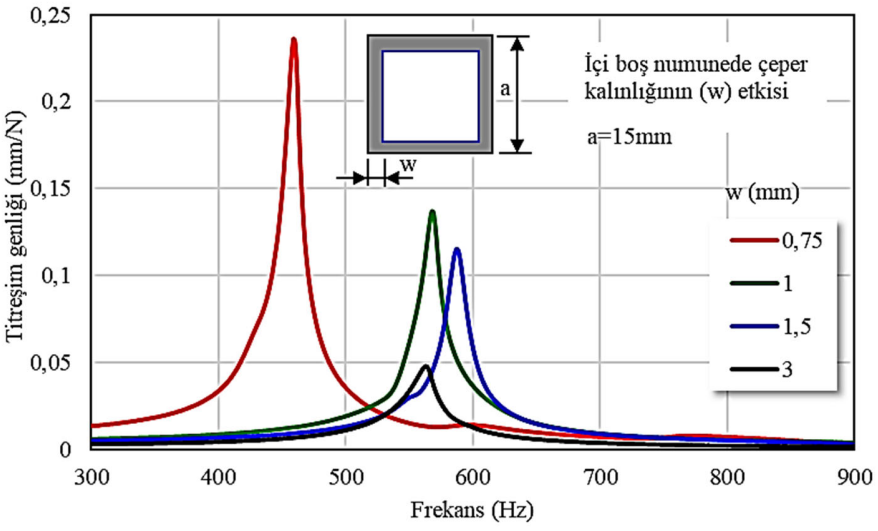
3.1.1. Kiriş Çeper Kalınlığının Etkisi (Effect of Beam Wall Thickness)

Şekil 4'te, iç dolgulu kiriş numunelerinde cidar kalınlığının titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel sonuçları verilmektedir. Numuneler, sabit doluluk oranına (%19) sahip olup, yalnızca cidar kalınlığı parametresi farklılık göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, çeper kalınlığı arttıkça kirişin rezonans frekansının yükseldiğini ve maksimum titreşim genliğinin azaldığını göstermektedir. Bu durum, artan çeper kalınlığının yapısal rijitliği artırarak doğal frekansı yukarı taşıdığını ve sistemin daha az deformasyonla titreşime yanıt verdiğini ortaya koymaktadır. Nitekim literatürde de benzer şekilde, yapı elemanlarının duvar kalınlığındaki artışın rijitliği artırarak dinamik performansı iyileştirdiği belirtilmiştir [15]. Ayrıca, kalın çeperli yapıların rezonans tepe noktalarının daha yayvan ve düşük genlikli olması, bu yapıların daha etkin sönümleme özelliğine sahip olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle 1 mm'den 1,5 mm'ye geçişte genlik değerinin %50 den fazla oranda azaldığı, ancak 1,5 mm'den 3 mm'ye geçişte bu azalmanın daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, belirli bir kalınlık değerinden sonra rijitlikteki artışın titreşim genliği üzerindeki etkisinin doygunluğa ulaştığını göstermektedir. Dolayısıyla, cidar kalınlığı parametresinin titreşim sönümleme performansı açısından optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Şekil 5, içi tamamen boş (kabuk yapı) olarak üretilen kiriş numunelerinde çeper kalınlığının frekans ve titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel sonuçlarını göstermektedir. Grafikte, PLA malzeme ile üretilmiş içi boş kesitli kirişlerin dinamik davranışları çeper kalınlığına (w) bağlı olarak karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, çeper kalınlığının artmasıyla birlikte rezonans frekansının belirgin biçimde yükseldiğini ve titreşim genliğinin azaldığını göstermektedir. Özellikle 0,75 mm çeper kalınlığına sahip numunede rezonans frekansı yaklaşık 490 Hz civarındayken, bu değer 3 mm çeper kalınlığında yaklaşık 610 Hz'e



Şekil 4. Kiriş çeper kalınlığının (w) rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi
(Effect of beam wall thickness (w) on resonance frequency and vibration amplitude)



Şekil 5. İçi boş numunede kiriş çeper kalınlığının frekans ve titreşim genliği üzerindeki etkisi
(Effect of beam wall thickness on the frequency and vibration amplitude in hollow specimen)

kadar çıkmaktadır. Aynı şekilde, maksimum titreşim genliği 0,75 mm kalınlığında 0,22 mm/N seviyesindeyken, bu değer daha kalın çeperli numunelerde kademeli olarak azalmaktadır.

Şekil 4 ve 5 titreşim genliği açısından değerlendirildiğinde, balpeteği yapısına sahip kiriş, içi boş yapıya kıyasla daha düşük genlik değerleri sunmaktadır. Örneğin 0,75 mm çeper kalınlığında, içi boş yapıda titreşim genliği 0,22 mm/N seviyesindeyken, balpeteği yapıda bu değer yaklaşık 0,11 mm/N'dir. Bu azalma, balpeteği yapının sadece rijitliği değil, aynı zamanda sönümleme kabiliyetini de artırdığını göstermektedir. Hücresel yapıların enerji yayılımını sınırlandırması ve yerel deformasyon bölgeleri oluşturması, bu tür yapıların daha etkin titreşim kontrolü sunduğuna işaret etmektedir.

3.1.2. Balpeteği Kenar Uzunluğunun Etkisi (Effect of Honeycomb Edge Length)

Şekil 6'da bal peteği dolgu geometrisinde hücre kenar uzunluğunun (L) titreşim genliği ve rezonans frekansı üzerindeki etkisi verilmektedir. Grafikte, kenar uzunluğu farklı olan balpeteği dolgularının (L = 0,75 mm, 1 mm ve 1,5 mm) içeren kirişlerin titreşim genliği ile frekans arasındaki ilişkisi incelenmiştir. Balpeteği hücre kenar uzunluğu arttıkça (yani doluluk oranı azaldıkça), sistemin rezonans frekansının düştüğü ve titreşim genliğinin arttığı gözlemlenmektedir. L = 0,75 mm (doluluk oranı %51) durumunda en yüksek rezonans frekansı ve en düşük titreşim genliği elde edilirken, L = 1,5 mm (doluluk oranı %33) durumunda sistem daha düşük frekanslarda rezonansa girerek daha büyük genlikli titreşimler üretmiştir. Bu durum, doluluk oranı arttıkça (yani hücreler sıklaştıkça) kirişin rijitliğinin arttığını ve böylece titreşime karşı daha dirençli hale geldiğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, daha küçük kenar uzunluğuna sahip, daha yoğun balpeteği yapısı, sistemin dinamik davranışını iyileştirerek rezonans frekansını yukarı taşımakta ve titreşim genliğini azaltmaktadır. Bu bulgular, yapısal titreşimlerin kontrolü ve mekanik dayanım açısından bal peteği geometrisinin optimize edilmesinde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Zang et al [24] tarafından yapılan bir çalışmada da dolgu olarak kullanılan birim hücre boyutunun küçülmesi rezonans frekansının artmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, yine aynı çalışmada, doluluk oranının artması da rezonans frekansını arttırdığı vurgulanmıştır. Bu çalışmada da L=0,75 mm için doluluk oranı %51,6 iken, L=1,5 mm için doluluk oranı %32,9 idi. Şekil 6'dan da görüldüğü üzere artan doluluk oranı ile birlikte frekans değeri artmış ve genlik değeri de azalmıştır. Hücresel yapılarda hücre boyutu küçüldükçe yapının etkin elastik modülü artmakta, bu da daha rijit bir yapı ve dolayısıyla daha yüksek doğal frekans anlamına gelmektedir [2].

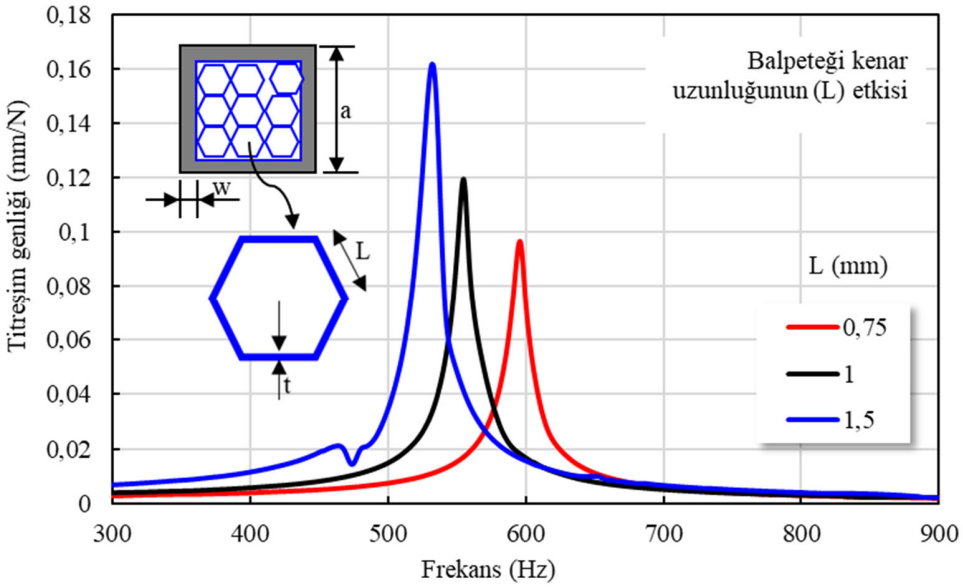
3.1.3. Kafes Cidar Kalınlığının Genliğe Olan Etkisi (Effect of Lattice Wall Thickness on Amplitude)

Şekil 7'de, bal peteği yapının cidar kalınlığının (t) rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkileri verilmektedir. Grafikte, bal peteği dolgulu bir kirişin titreşim genliği ile frekans ilişkisi, bal peteği çeper kalınlığı (t) parametresi değiştiğinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çeper kalınlığı arttıkça rezonans frekansının yükseldiğini ve titreşim genliğinin azaldığını göstermektedir. t = 0,3 mm (doluluk oranı %12,2) durumunda sistem daha düşük frekanslarda rezonansa girerek daha yüksek genlikli titreşimler üretirken, t = 1 mm (doluluk oranı %32,9) için daha yüksek bir rezonans frekansı ve daha düşük titreşim genliği gözlemlenmiştir. Bu durum, bal peteği yapısının çeper kalınlığının artmasının, yapının rijitliğini artırarak dinamik dayanımını iyileştirdiğini ve dolayısıyla titreşimleri bastırıcı bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, cidar kalınlığının azalmasıyla birlikte panelin efektif rijitliğinde bir azalma meydana geldiğini ve dolayısıyla sistemin doğal frekansının daha düşük değerlere kaydığını göstermektedir. Cidar kalınlığının artması kirişin doluluk oranının artmasına neden olmaktadır ki bu durumda kirişin titreşim genliğinin azalması da beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte Şekil 6 da verilen sonuçlara paralel olarak, artan doluluk oranının rezonans frekansının artmasına neden olduğu sonucu burada da gözlemlenmektedir.

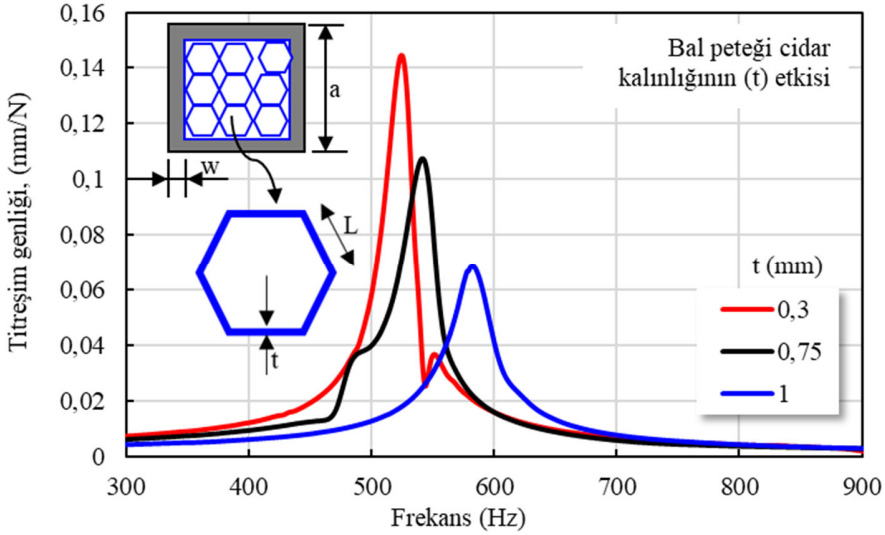
3.1.4. Sönüm Oranının Değişimi (Variation of Damping Ratio)

Sönüm oranı, salınan veya titreşen bir cismin nasıl durağan hale geldiğini tanımlayan boyutsuz bir parametredir. Sönümleme olmayan bir durumda, salınımlı bir sistem asla durmaz; ancak, doğada böyle bir durum gerçekleşmez. Her salınımlı sistem belirli bir süre sonra durmaya veya denge pozisyonuna gelmeye başlamaktadır. Bu süreçte genlik, zamanla kademeli olarak azalır ve nihayetinde sıfıra ulaşmaktadır [25]. Sönüm oranı, titreşimli bir sistemin genliğinin zamana göre ne kadar hızlı azaldığını belirlemektedir [26]. Sönüm oranı 1'den küçükse, sistem az sönümlü , sönüm oranı 1'e eşit olduğunda, sistem kritik sönümlü ve sönüm oranı 1'den büyükse, sistem aşırı sönümlü olarak kabul edilmektedir [27].

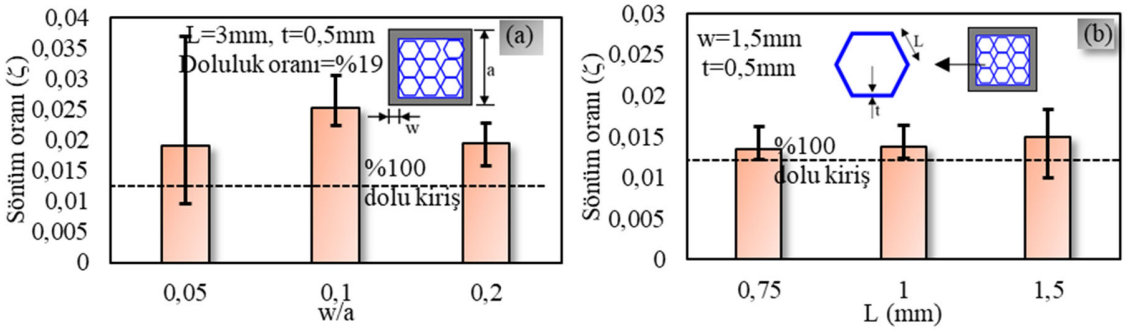
Çalışmasının bu bölümünde farklı cidar kalınlığında ve kafes boyutlarında tasarlanan bal peteği geometrisinin sönüm oranı üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu araştırılmıştır. Yapılan çekiç ve ivme ölçer testi sonrasında, Denklem 1 kullanarak, her bir kiriş geometrisinin sönüm oranları tespit edilmiştir. Şekil 8'de w/a oranına bağlı olarak sönüm oranının değişimi verilmektedir. Grafikte verilen kesik çizgi dolu olan kiriş malzeme için elde edilen sönüm oranını temsil etmektedir. Şekil 8(a)'da, sabit hücre uzunluğu (L = 3 mm) ve cidar kalınlığı (t = 0,5 mm) altında, farklı w/a oranlarının sönüm oranı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. w/a oranı petek gözeneklerinin duvar kalınlığının hücre kenar uzunluğuna oranı olarak tanımlanmakta olup, yapının rijitliğini ve enerji sönümleme kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Bu grafikten de görüldüğü üzere, w/a oranı 0,1 olduğunda sönüm oranı en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum, belirli bir optimum hücre geometrisinin, hem rijitlik hem de yerel deformasyon mekanizmaları açısından enerji sönümlemeye daha elverişli bir yapı sunduğunu göstermektedir. w/a = 0,05 olduğunda elde edilen sönüm oranlarında hata oranının çok yüksek olduğu da dikkati çekmektedir. Bu durum üretilen numuneler arasında küçükte olsa boyutsal farklılıkların olduğunun bir göstergesidir. Şekil 8b' içi boş (hücresiz) kiriş yapısında farklı w/a oranlarının sönüm oranı üzerindeki etkisini göstermektedir. Doluluk oranının %0 olduğu bu durumda, yapıda herhangi bir petek veya gözenekli iç yapı bulunmamakta, yalnızca dört duvardan oluşan çerçeve tipi ince cidarlı bir yapı söz konusudur. Sönüm oranındaki bu davranış, duvar kalınlığının artmasıyla birlikte kütle, rijitlik oranında meydana gelen değişimlerin dengelenmesiyle açıklanabilir. İnce cidarlı yapılar, elastik burkulma, yerel şekil değiştirme ve malzeme içi mikro sürtünme gibi sönümleyici mekanizmalara sahiptir. Ancak duvar kalınlığı arttıkça bu tür deformasyonlara olanak veren esneklik azalırken, yapının rijitliği artar; bu durum enerjiyi sönümlemek yerine daha çok iletme eğilimi yaratabilir [2]. Diğer yandan, ince cidarlı yapıların bağlantı köşeleri veya birleşim noktalarında oluşabilecek mikro yapısal sürtünmeler, viskoelastik kayıplara katkı sağlayabilir. Grafikte hata çubuklarındaki değişim dikkate alındığında, özellikle düşük ve yüksek w/a oranlarında sönüm davranışının daha değişken olabileceğini sonucuna varılmıştır. Bu, yapısal homojenliğin ve geometrik stabilitenin bu tür ince cidarlı boş yapıların dinamik tepkisinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, petek yapıların bulunmadığı bu konfigürasyonda gözlemlenen sönüm oranlarının, %100 dolu kirişin sönüm oranına yakın veya üzerinde olması, sönümün yalnızca kütle ve doluluk oranıyla değil; aynı zamanda yapının şekli, cidar düzeni ve lokal deformasyon kabiliyeti gibi parametrelerle de ilişkili olabileceği sonucunu göstermektedir.



Şekil 6. Bal peteği geometrinin kenar uzunluğunun titreşim genliği ve frekans değeri üzerindeki etkisi
(The effect of honeycomb edge length on vibration amplitude and frequency)



Şekil 7. Bal peteği cidar kalınlığının (t) rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi
(Effect of honeycomb wall thickness (t) on resonance frequency and vibration amplitude)



Şekil 8. a) Farklı w/a değerleri ve b) L değerleri için sönüm oranın değişimi
(a) Variation of damping ratio for different w/a values and b) L values)

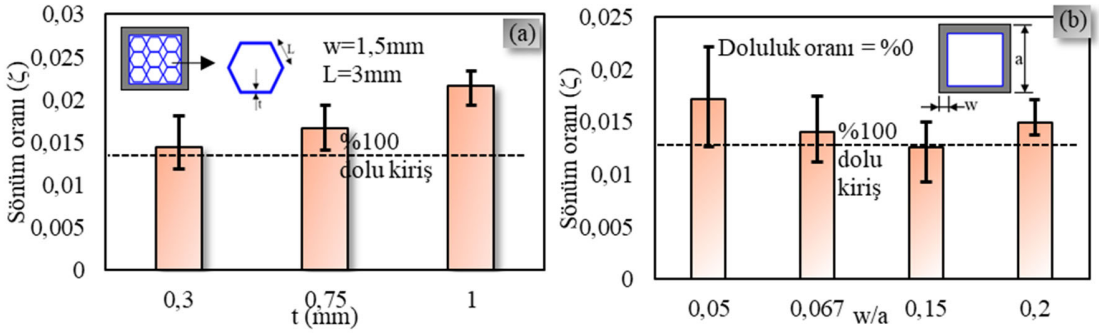
Şekil 9a' da t değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi verilirken, Şekil 9b' de L değerinin etkisi verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, duvar kalınlığının 0,3 mm'den 1 mm'ye artması, sönüm oranının da yaklaşık %34 artmasına neden olmuştur. Bu durum, artan kalınlık ile birlikte yapının deformasyon sırasında daha fazla iç sürtünme ve plastikleşme potansiyeline sahip olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, bal peteği yapısındaki boşluklar sayesinde ağırlıkta ciddi bir artış olmaksızın sönüm performansında iyileşme sağlanmaktadır. Literatürde benzer eğilimler Chen vd. [28] tarafından yapılan bir çalışmada, bal peteği içeren sandviç yapılarda hücre duvar kalınlığı, yapının rezonans frekansını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Şekil 9b' de L değerinin sönüm oranına etkisi verilmektedir w=1,5 mm ve t=0,5 mm olarak sabit alınmıştır ve bu kirişlerde doluluk oranı sırasıyla, %51, %43 ve %32'dir (Tablo 1). Hücre uzunluğunun 0,75 mm'den 1,5 mm ye artmasıyla sönüm oranı da %22 artmaktadır. Bu durum, daha büyük hücre boyutlarının yapıda daha fazla lokal deformasyona izin vererek enerji sönüm kapasitesini artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak bu artışın sınırlı kalması, doluluk oranının düşmesiyle yapının genel rijitliğinin azalmasından kaynaklanıyor olabilir. Öteyaka et al [29] tarafından yapılan bir çalışmada %40' a kadar olan doluluk oranı sönüm oranının artmasına neden olduğu ortaya konulmuştur. Buna karşın %60 doluluk oranı, sönüm oranının azalmasına neden olduğu da elde edilen diğer bir sonuçtur.

3.2 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları (Finite Element Analysis Results)

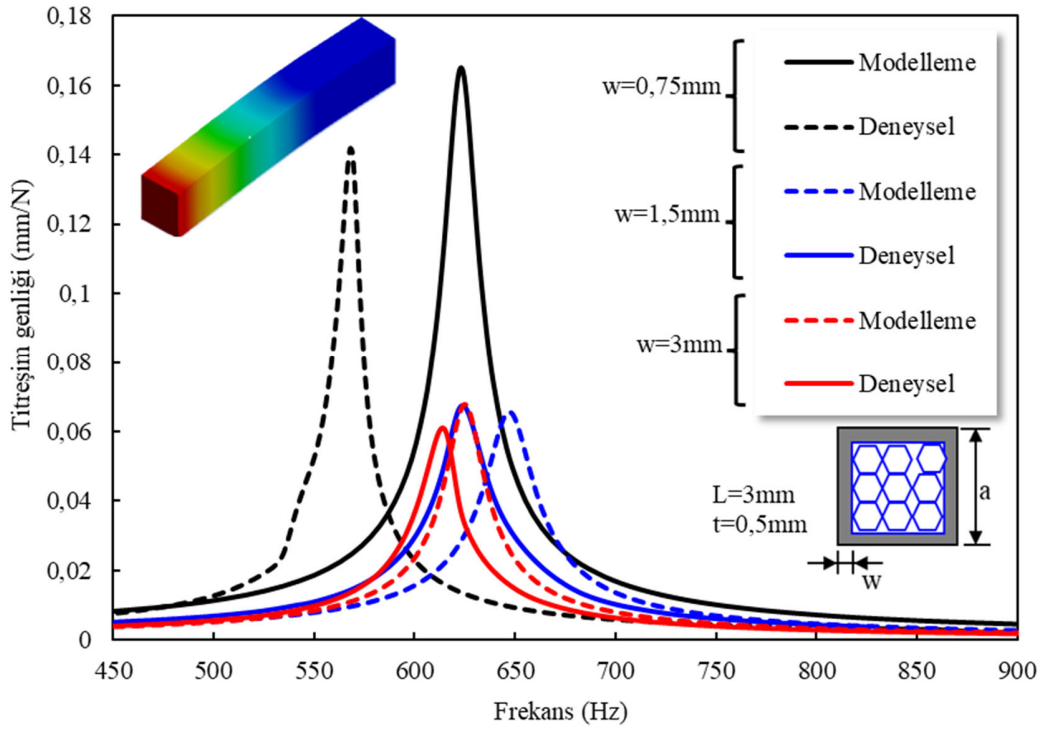
Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi, FDM yöntemiyle üretilen numunelerde oluşabilecek boyutsal sapmaların titreşim davranışına etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. FDM yöntemiyle yapılan üretimlerde, özellikle z ekseni boyunca katman birikimi nedeniyle geometrik doğruluk sınırlı olabilmekte ve bu durum, yapıların dinamik yanıtlarını etkileyebilmektedir. Tasarlanan model ile üretilen numune arasında oluşabilecek farkların titreşim genliği ve rezonans frekansı üzerindeki etkilerini tespit edebilmek adına, ANSYS Workbench ortamında modal ve harmonik analizler yürütülmüştür. Şekil 10 'da duvar kalınlığı (w) değişiminin titreşim genliği üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçları verilmektedir. Şekil 10'da ayrıca 1.moda ait kirişin deformasyon davranışı dair örnek bir şekil de verilmektedir. w=0,75 mm için deneysel ile nümerik modelleme arasındaki titreşim genliği farkı %15,5 iken, w=1,5 mm ve w=3 mm için bu fark sırasıyla %4,1 ve %10,8 dır. Rezonans frekansları arasındaki maksimum fark w=0,75 mm de yaklaşık %9,5 iken, w=1,5 mm ve 3 mm için sırasıyla %4,2 ve %2,1 olarak tespit edilmiştir.

Deneysel verilerle karşılaştırıldığında, özellikle düşük duvar kalınlığına sahip numunede modelleme ile deneysel sonuçlar arasında belirgin farklar gözlemlenmiştir. Bu durum, üretim hatalarının ve malzeme homojenliğindeki farklılıkların yapının titreşim karakteristiğini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar analizi yalnızca teorik bir değerlendirme değil, aynı zamanda üretim sürecinin dinamik performans üzerindeki etkilerini irdelemek adına kritik bir araç olarak kullanılmıştır. Şekil 11'de, bal peteği hücre kenar uzunluğunun (L) artışına bağlı olarak rezonans frekansında (11a) ve titreşim genliğindeki (11b) değişim verilmektedir. Hem deneysel hem de nümerik analizlerde sınırlı da olsa bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, hücre sayısının azalmasına ve buna bağlı olarak yapının rijitliğinin düşmesine rağmen, genel yapı boyutlarının aynı kalması nedeniyle frekans üzerinde doğrudan bir etki yaratmadığını göstermektedir. Ancak titreşim genliği açısından özellikle L = 0,75 mm olan numunede deneysel verilerin, nümerik analizlere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu farkın başlıca nedeni, üretim sürecine bağlı olarak ortaya çıkan katmanlar arası yapışma problemleri ve geometrik tutarsızlıklardır. FDM yönteminin doğası gereği, büyük hücre kenar uzunluklarında doluluk oranı azalmakta ve yapının iç bağlantı yoğunluğu düşmektedir. Bu da titreşim altında yapının daha fazla deformasyona uğramasına neden olur. Deneysel ölçümlerde bu tür mikro yapı hatalarının etkisi doğrudan yansıdığı için, titreşim genliğinde beklenenden yüksek değerler gözlemlenmiştir. Bu durum, özellikle düşük doluluk oranına sahip yapılarda, üretim kaynaklı sapmaların titreşim davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Deneysel ve modellemeden elde edilen frekans değerleri arasındaki farklar sırasıyla %4,9, %5 ve %3,7'dir. L=0,75 mm olan kirişte deneysel ile modelleme arasındaki fark %19,5 olarak hesaplanmıştır. Buna karşın L=1,5 mm için fark %9,6 olarak elde edilmiştir.

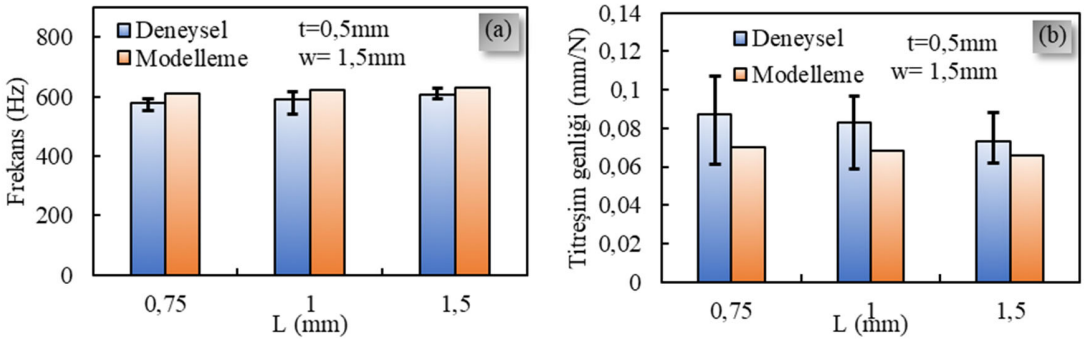
Şekil 12'de ise, bal peteği cidar kalınlığının (t) rezonans frekansı (12a) ve titreşim genliği (12b) üzerindeki etkileri deneysel ve nümerik analizler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, frekans değerlerinde deneysel bulgular genellikle nümerik modellere kıyasla daha düşük olup, bu durum üretim esnasında karşılaşılan boyutsal sapmalar ve malzeme homojenliği eksikliklerinden kaynaklanmaktadır. Deneysel ve modellemeden elde edilen frekans değerleri arasındaki hata payları sırasıyla %15, %7,9 ve %8,9 olarak hesaplanmıştır. Özellikle t = 0,3 mm gibi ince cidarlı yapıda, FDM üretiminde karşılaşılan yapışma zayıflıkları ve katman birikimi sorunları, yapının rijitliğini azaltarak titreşim genliğinin artmasına neden olmuştur. Nümerik modellerin ideal geometri varsayımı ile oluşturulması, bu tür mikro düzeydeki üretim hatalarını göz ardı etmekte; dolayısıyla deneysel ve nümerik sonuçlar arasında özellikle ince cidarlı yapılarda daha büyük farklar oluşmaktadır. Daha düşük t değerlerinde deneysel ile modelleme arasındaki fark titreşim genlikleri sonucunda daha net olarak gözlemlenmektedir (Şekil 12b). t=0,3 mm de bu fark %16,6 iken, t=1 mm için %2,9 olarak gerçekleşmiştir. t=1 mm için deneysel ve modelleme arasındaki fark önemli oranda azalmaktadır. Bu da söz konusu kalınlığın üretim açısından daha kararlı bir yapı sunduğunu ve modelleme ile deneysel veriler arasında daha yüksek uyum sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, cidar kalınlığı gibi parametrelerin yalnızca geometrik değil, aynı zamanda üretim süreciyle etkileşim içinde değerlendirilmesi gerektiği açıkça ortaya çıkmaktadır.



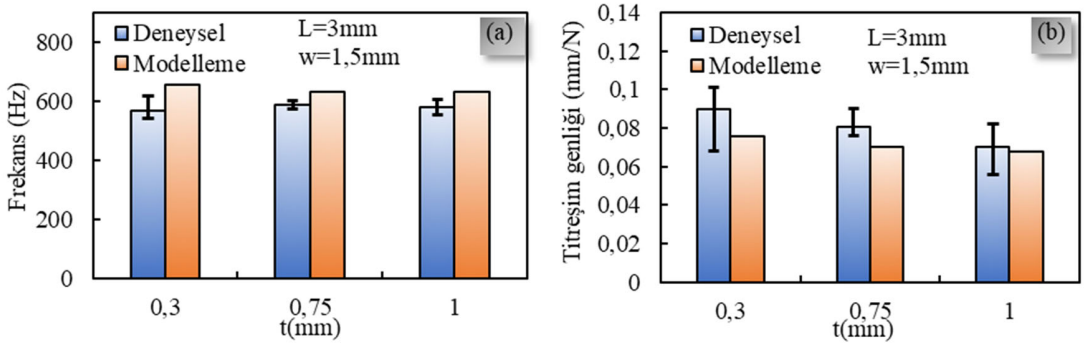
Şekil 9. a) t değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi, b) İçi boş kiriş için w değerinin sönüm oranı üzerindeki etkisi
(Effect of t value on the damping ratio, b) Effect of w on the damping ratio for a hollow beam)



Şekil 10. w değerinin titreşim genliği ve rezonans frekansı üzerindeki etkisinin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of experimental and modeling results of the effect of w value on vibration amplitude and resonance frequency)



Şekil 11. L değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi (Effect of L on resonance frequency and vibration amplitude)



Şekil 12. t değerinin rezonans frekansı ve titreşim genliği üzerindeki etkisi (The effect of t on resonance frequency and vibration amplitude)

Tablo 2. Kiriş şeklinde numunelerin kütle özellikleri (Mass properties of beam-shaped specimens)

Kiriş Şeklinde Numunelerin Kütle Özellikleri									
	Tasarım Kütle Özellikleri				Üretim Kütle Özellikleri				
Kiriş No	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Ağırlık (gr)	X (mm) (Ortalama)	Y (mm) (Ortalama)	Z (mm) (Ortalama)	Ağırlık (gr)	Ağırlık Farkı (%)
1	15	15	100	14,284	15,23	14,94	99,71	12,82	11,40
2				17,554	15,43	14,65	100,2	16,17	8,56
3				22,142	15,10	14,70	100,03	20,87	6,09
4				21,332	15,35	14,55	100,14	19,95	6,93
5				20,045	15,40	14,72	100,05	19,25	4,13
6				18,774	15,08	14,51	100,18	19,05	1,45
7				16,636	15,45	14,80	100,35	14,85	12,05
8				18,570	15,20	14,60	100,27	16,05	15,70
9				19,295	15,14	14,34	100,05	18,17	6,17
10				12,493	15,41	14,94	100,12	10,98	13,78
11				14,895	15,26	14,97	100,55	13,24	12,49
12				11,210	15,26	14,77	100,20	10,55	6,26
13				13,721	15,24	14,54	100,14	12,64	8,55
14				20,835	15,30	14,84	100,09	19,42	7,29
15				28,125	15,33	14,14	100,21	26,61	5,69

Tablo 2'de, tasarlanan ve üretilen kiriş numuneleri arasındaki boyutsal ve kütlesel farklılıklar detaylı olarak sunulmuştur. Elde edilen veriler, özellikle düşük cidar kalınlığına ve karmaşık iç geometrilere sahip numunelerde tasarım ile üretim arasında anlamlı sapmalar oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bazı numunelerde ağırlık farkının %10'un üzerinde (Tablo 2'de renklendirilmiştir.) olması, üretim sürecinde karşılaşılan ekstrüzyon dengesizlikleri, filamentin homojen olmaması, nozul tıkanmaları ya da filament çapındaki değişkenlikler gibi nedenlerle açıklanabilir. FDM yöntemi ile yapılan üretimlerde, katmanlar arası yapışma kalitesinin düşmesi, özellikle ince cidarlı yapılarda rijitliğin azalmasına ve dolayısıyla hem ağırlıkta hem de titreşim karakteristiklerinde sapmalara neden olmaktadır. Bu üretim kaynaklı farklılıklar yalnızca kütle değerlerini değil, aynı zamanda numunelerin dinamik performansını da doğrudan etkilemektedir.

Bu bağlamda gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri, tasarımda varsayılan ideal geometrilere dayandığı için, deneysel sonuçlardan belirli ölçüde sapma göstermektedir. Özellikle düşük cidar kalınlığına sahip numunelerde modelleme ile deneysel veriler arasındaki farkın belirginleştiği, bu farkın hem rezonans frekansında hem de titreşim genliğinde hissedildiği gözlemlenmiştir. Örneğin, w=0,75 mm olan numunede deneysel ve nümerik modelleme arasındaki genlik farkının %20'ye kadar ulaşması, üretim esnasında meydana gelen geometrik bozulmaların titreşim davranışını önemli şekilde etkilediğini göstermektedir. Buna karşın daha kalın cidarlı numunelerde (örneğin w=1,5 mm) bu fark %4 seviyelerine kadar düşmektedir. Bu durum, üretimden kaynaklı sapmaların özellikle daha hassas geometrilerde etkisinin daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla sonlu elemanlar analizlerinin üretim gerçekliğiyle uyumlu sonuçlar verebilmesi için üretim sonrası ölçümlerle kalibrasyon yapılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

4. İleriye Yönelik Çalışma Önerileri (Recommendations for Future Work)

Bu çalışmada kullanılan FDM yöntemi ve PLA malzemesi, özellikle düşük maliyetli ve çevresel etkisi düşük çözümler sunması nedeniyle endüstriyel prototipleme ve hafif yapısal uygulamalar için uygun bir üretim altyapısı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, bu tür yapısal tasarımların tüketici elektroniği, ev tipi makineler, otomotiv iç donanımı, hafif taşıyıcı sistemler ve pasif titreşim izolatörleri gibi alanlarda, titreşim kontrolü ve hafiflik gerektiren uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle, çalışma sektörel düzeyde pratik ve ekonomik çözümlere dönüştürülebilecek önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ayrıca gelecek çalışmalarda farklı polimer malzemelerin (örneğin ABS, PETG, kompozit filamentler) mekanik ve dinamik performanslarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi gerçekleştirilebilir. Farklı dolgu desenleri ve yönelimlerinin etkisi ile yapay zekâ tabanlı geometri optimizasyonlarının birleştirilmesi, çok amaçlı tasarımlar açısından önem arz etmektedir. Sadece serbest titreşim değil, harmonik yükleme gibi zorlanmış durumların analizi ve elde edilen yapısal tasarımların endüstriyel uygulamalarda prototiplenerek saha performanslarının test edilmesi de araştırmanın doğal bir devamı olarak değerlendirilmektedir. Eklemeli imalatta yaygın olarak karşılaşılan anizotropi, katmanlar arası yapışma kalitesi ve yönelime bağlı mekanik farklılıklar, titreşim davranışı üzerinde etkili olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında bu etkiler modellenmemiş ve sayısal analizler ideal izotrop geometri varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, üretim yönünün farklı eksenlerde değiştirilerek (örneğin Z ve X yönlerinde) aynı geometrilerin titreşim performansı üzerindeki etkisinin sistematik olarak analiz edilmesi; ayrıca, bu yönelime bağlı olarak elastik modül, sönüm oranı ve rezonans frekansındaki değişimlerin hem deneysel hem de nümerik olarak karşılaştırılması önerilir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, FDM yöntemi ile üretilen polimer bal peteği yapılarının titreşim sönümleme performansı, farklı geometrik parametrelerin etkisiyle deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. İç dolgu yapısı, hücre kenar uzunluğu, cidar kalınlığı ve doluluk oranı gibi parametreler sistematik biçimde değiştirilmiş; elde edilen numuneler üzerinde çekiç-darbe testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar sonlu elemanlar analiziyle desteklenmiştir. Ayrıca, üretimden kaynaklanan boyutsal sapmaların titreşim performansı üzerindeki etkisi detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

- Cidar kalınlığı arttıkça titreşim genliğinde belirgin azalma gözlenmiştir, ancak rezonans frekansı ise artış eğilimi göstermiştir. Bu durum, yapı rijitliğinin artmasıyla sönümleme etkisinin güçlendiğini göstermektedir.

- Bal peteği hücre kenar uzunluğunun küçülmesi, yapıda daha fazla hücre oluşmasına ve dolayısıyla rijitliğin artmasına neden olmuş, bu da genlik değerlerinde azalmaya yol açmıştır. Ancak frekans üzerindeki etkiler sınırlı kalmıştır.
- Bal peteği cidar kalınlığı, genlik üzerinde doğrudan etkili olmamakla birlikte, bazı ince cidarlı yapıların daha etkin sönümleme sağladığı görülmüştür. Bu da hafif ama etkili yapıların üretilebileceğini göstermektedir.
- Sönüm oranı açısından, düşük cidar kalınlığına sahip yapıların %100 dolu kirişlerden daha yüksek sönüm oranı sunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, minimum L ve t değerlerine sahip bal peteği geometrilerinin sönümleme açısından avantaj sağladığı tespit edilmiştir.
- Sonlu elemanlar analizi, deneysel verilerle büyük ölçüde uyumlu sonuçlar vermiş; ancak özellikle ince cidarlı numunelerde üretimden kaynaklı hataların modelleme ile deneysel sonuçlar arasında belirgin farklar yarattığı gözlemlenmiştir.
- Üretim kaynaklı sapmalar, özellikle düşük doluluk oranına ve karmaşık geometrilere sahip numunelerde daha belirgin olup, titreşim genliği ve rezonans frekansını doğrudan etkilemiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Destek Programı-2232 [hibe numarası 121C068] tarafından verilen hibelerle desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Sheydaeian E., Additive manufacturing: A review of materials and applications, Materials Today: Proceedings, 4 (2), 1-10, 2017.
2. Gibson L.J., Ashby M.F., Cellular Solids: Structure and Properties, Cambridge University Press, 1997.
3. Almesmari A., Baghous N., Ejeh C.J., Barsoum I., Abu Al-Rub R.K., Review of additively manufactured polymeric metamaterials: Design, fabrication, testing and modeling, Polymers, 15, 3858, 2023.
4. Wang Z., Xu M., Du J., Jin Y., Experimental and numerical investigation of polymer-based 3D-printed lattice structures with largely tunable mechanical properties based on triply periodic minimal surface, Polymers, 16, 711, 2024.
5. Kaveloğlu S., Temiz Ş., Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (1), 139-150, 2023.
6. Ergene B., Yalçın B., Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM), Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (1), 201-218, 2022.
7. Hussain M., Khan S.M., Shafiq M., Abbas N., A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications, Giant, 18, 100261, 2024.
8. Alami A.H., Olabi A.G., Alashkar A., Alasad S., Aljaghoub H., Rezk H., Abdelkareem M.A., Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals, Ain Shams Engineering Journal, 14 (11), 102516, 2023.
9. Desole M.P., Gisario A., Barletta M., Energy absorption of PLA-based metamaterials manufactured by material extrusion: Dynamic loads and shape recovery, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 132, 1697-1722, 2024.
10. Cakan G.B., Ensarioglu C., Küçükakarsu V., Tekin İ., Çakır M.C., Experimental and numerical investigation of in-plane and out-of-plane impact behaviour of auxetic honeycomb boxes produced by material extrusion, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (3), 1657-1668, 2021.
11. Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H., Sapuan S.M., Asim M., Saba N., Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review, Polymer Composites, 40, 446-463, 2019.
12. Subramaniyan M.K., Veeman D., Kennedy S.G.J., Panda B., Yang C., Mechanical performance and microscopic characterization of additively manufactured functionally graded material (WPC/Ceramic-PLA) via fused deposition modelling, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 238 (6), 2642-2651, 2023.
13. Guo Z., Hu G., Jiang J., Yu L., Li X., Liang J., Theoretical and experimental study of the vibration dynamics of a 3D-printed sandwich beam with an hourglass lattice truss core, Frontiers in Mechanical Engineering, 7, 651998, 2021.
14. Wang H., Zhang X., Li Z., Lu G., Energy absorption and vibration mitigation of additively manufactured lattice structures under dynamic loading, International Journal of Mechanical Sciences, 190, 106013, 2021.
15. Zhang X., Zhu F., Wang Y., Vibration characteristics of metallic honeycomb structures under dynamic loading, Composite Structures, 194, 356-366, 2018.
16. Rajesh S., Kumar A., Singh R.K., Dynamic analysis of polymer-based honeycomb sandwich structures, Materials Today: Proceedings, 27, 2041-2046, 2020.
17. Cojocaru V., Frunzaverde D., Miclosina C.-O., On the behavior of honeycomb, grid and triangular PLA structures under symmetric and asymmetric bending, Micromachines, 14 (1), 120, 2023.
18. Aslantas K., Ozkaya E., Ahmed W., Vibration analysis of 3D printed PLA beam with honeycomb cell structure for renewable energy applications and sustainable solutions, Materials Research Proceedings, 43, 164-171, 2024.
19. Gunaydin K., Gülcan O., Tamer A., Application of homogenization method in free vibration of multi-material auxetic metamaterials, Vibration, 8 (1), 2, 2025.
20. eSUN, PLA-Pro filament product page, https://www.esun3d.com/pla-pro-product/ (Erişim tarihi: 09 Haziran 2025).
21. Liu H., Chen S., Xu J., Dynamic behavior and damping characteristics of SLA-fabricated honeycomb structures under harmonic loading, Polymer Testing, 108, 107510, 2022.
22. Buj-Corral I., Bagheri A., Sivatte-Adroer M., Effect of printing parameters on dimensional error, surface roughness and porosity of FFF printed parts with grid structure, Polymers, 13, 1213, 2021.
23. Ansys, Ansys Workbench 2020R2 User's Manual, 2020.
24. Zhang C., Qiao H., Yang L., Ouyang W., He T., Liu B., Chen X., Wang N., Yan C., Vibration characteristics of additive manufactured IWP-type TPMS lattice structures, Composite Structures, 327, 117642, 2024.
25. Görgülüarslan R.M., Güngör O.U., Eklemeli imalat ile üretilen latis yapılardaki geometrik değişimlerin konuma bağlı istatistiksel modellenmesi, MATİM, 19 (1), 41-52, 2021.
26. Ramkumar G., Gnanaprakasam A., Thirumarimurugan M., Investigation of damping characteristics on PLA and PVC cantilever structures with magnetorheological fluid core, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 11, 165-173, 2023.
27. Zahid F.B., Ong Z.C., Khoo S.Y., A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42, 398, 2020.
28. Chen C., Zhuo X., Hui L., et al., Analysis of vibrational characteristics of all-composite honeycomb core sandwich panels: Theoretical and experimental study, Meccanica, 59, 1481-1498, 2024.
29. Öteyaka M.Ö., Çakır F.H., Sofuoğlu M.A., Effect of infill pattern and ratio on the flexural and vibration damping characteristics of FDM printed PLA specimens, Materials Today Communications, 33, 104912, 2022.