

Akıllı Kirişlerin Dinamik Özelliklerinin Araştırılması

Elif Nur SELÇUK¹, Ekrem GÜLSEVİNÇLER², Hatice AKMAN³, Gökçenur ÇAKMAK KEÇELİOĞLU¹,
Mustafa Reşit USAL⁴

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Isparta, Türkiye

²Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye

³Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

⁴Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 31.05.2024, Kabul / Accepted: 19.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Akıllı kirişler,
Harmonik yükleme,
Sönümleme,
Piezo sensör.
PLA.

Öz: Sağlık sektöründe, robotik sistemlerde ve endüstride kullanılan cihazların kullanım ömrü ve performansı dinamik yüklemelere maruz kaldıklarında verdikleri tepkilerle doğrudan ilişkilidir. Dinamik yüklemeler sonucunda ortaya çıkan titreşimler stabilitesi ve mekanik performansı üzerinde kritik etkilere sahiptir. Bu nedenle, dinamik yükleme altındaki titreşim davranışının analiz edilmesi, özellikle biyomekanik uygulamalar kapsamında önem taşımaktadır. Özellikle biyolojik doku simülasyonları üzerinde gerçekleştirilen titreşim analizleri, sistemlerin dinamik yanıtlarının belirlenmesi ve güvenilirliğinin artırılmasına yönelik temel bir adımdır. Polilaktik asit (PLA), hem yapay biyolojik doku üretiminde hem de üç boyutlu yazıcı filamentleri için yaygın olarak tercih edilen bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarda, motor tahriki ile harmonik yük uygulanmış kirişler üzerinde konuma göre dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Kirişler üzerinde konum olarak üç düğüm noktası belirlenmiş ve bu noktalar arasına piezo sensörler yerleştirilerek analizler yapılmıştır. PLA kutu içerisine yerleştirilen kirişli sistemin sönümlü ve sönümsüz titreşimine bağlı olarak zaman analizi, doğal frekansı, sönümleme oranı incelenmiştir. Kirişlerin üretiminde iki farklı malzeme seçilmiştir. Metal malzeme olarak geleneksel yöntem ile imal edilmiş A366/CQ siyah çelik levha (Soğuk haddelenmiş sac-DKP) ve polimer malzeme olarak PLA filament kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalarımız sonucunda, her iki sistemin kararlı olma durumu serbest uç bölgesinde tespit edilmiştir. Çelik ve PLA kiriş için bahsedilen bölgedeki sönüm oranları deneysel olarak sırasıyla 0,227 ve 0,755 bulunmuştur. Sayısal sonuçlara göre ise çelik kirişli sistemin sönüm oranları [0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76], PLA kirişli sistemin ise [1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94] olarak elde edilmiştir. Çalışma, malzeme ve sistem dinamiklerinin optimize edilmesi, titreşim kontrolü ve kararlılık artırmaya yönelik mühendislik uygulamalarına katkı sağlayabilecek bir referans niteliği taşımaktadır.

Investigation of Dynamic Characteristics of Smart Beams

Keywords

Smart beams,
Harmonic Load,
Damping,
Piezo sensor,
PLA.

Abstract: The service life and performance of devices used in the healthcare sector, robotic systems, and industry are closely associated with their response under dynamic loading conditions. Vibrations resulting from dynamic loads have a significant impact on stability and mechanical performance. Consequently, the analysis of vibration behavior under dynamic loading is of critical importance, particularly in biomechanical applications. Vibration analyses conducted on biological tissue simulations play a fundamental role in determining the dynamic responses of systems and improving their reliability. Polylactic acid (PLA) is widely utilized as a material for the production of artificial biological tissues and as a filament in 3D printing applications. In this study, experimental and numerical

investigations were carried out on beams subjected to harmonic loading via motor excitation, with dynamic analyses performed at specific positions. Three nodal points were identified on the beams, and piezoelectric sensors were placed between these points for analysis. The damped and undamped vibration responses of the beam system housed in a PLA box were analyzed in terms of time response, natural frequency, and damping ratio. Two different materials were used in beam production: A366/CQ black steel sheet (cold-rolled steel) manufactured using conventional methods as the metallic material, and PLA filament as the polymer material. Experimental and numerical results revealed that the stability of both systems was achieved at the free end region. The damping ratios in the specified region were experimentally determined as 0.227 for the steel beam and 0.755 for the PLA beam. Numerical results indicated that the damping ratios for the steel beam system were [0.93; 0.93; 0.55; 0.55; 0.76; 0.76], while those for the PLA beam system were [1; 0.98; 0.98; 0.97; 0.97; 0.94; 0.94]. This study provides a reference that can contribute to engineering applications focused on optimizing material and system dynamics, controlling vibrations, and enhancing stability.

1. Giriş

Titreşim, günlük hayatımızda çeşitli şekillerde karşımıza çıkan fiziksel bir olgudur [1]. Titreşim analizi, tıbbi cihazların tasarımında, kalite değerlendirmelerinde ve mekanik parçaların dayanım değerlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Dış ortam etkileri, makine titreşimleri, gürültü ve dinamik yüklere maruz kalan yapılarda meydana gelen mekanik titreşimler, bazı durumlarda çatlak oluşumuna ve sistemlerin rezonansa girmesine neden olabilmektedir [2]. Bir yapının titreşim ayarı ve kontrolü açısından, elektro-mekanik bağlantı faktörleri olan doğal frekans ve sönüm oranı, iki önemli belirleyici parametreyi oluşturmaktadır. Doğal frekans, bir sistemdeki serbest titreşimlerin karakteristik frekansı olarak tanımlanır ve bu, her saniyede gerçekleşen salınım sayısıdır. Sönüm ise, yapıda meydana gelen enerjiyi absorbe etme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Yapıya eklenen sönüm elemanları, dinamik yapıların ömrünü uzatmak, gürültü kirliliğini azaltmak ve yapının kompaktlığını artırmak gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır [3], [4]. Sönümleme oranı, salınımların ardışık tepe noktaları arasındaki logaritmik azalma ile tanımlanan birimsiz bir parametredir [5]. Titreşimleri azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla aktif, pasif ve hibrit titreşim kontrolü yöntemleri uygulanmaktadır. Titreşim kontrolünde genellikle piezoelektrik sensörler ve aktüatörler kullanılmaktadır [6], [7], [8]. Akıllı malzeme olan piezoelektrik malzemeler, bir enerji türünü başka bir enerji türüne dönüştürme özellikleri sayesinde çeşitli cihazlarda kullanılabilir [9]. Örneğin, biyomedikal alanda kullanılan elektrofizyolojik cihazlar, canlıların titreşimlerini elektriksel sinyallere dönüştürerek çeşitli hastalıkların teşhisinde yer almaktadır [10], [11], [12]. Titreşimi azaltmak amacıyla kullanılan bir diğer yöntem, piezo sensör ve aktüatörlerin yerleşim ve tasarımının optimizasyonudur. Poudrel ve ark. tarafından yapılan çalışmada, kemik implantının stabilitesini ölçmek için piezo sensörlerin konumlandırma optimizasyonu

yapılmış ve titreşimin en az olduğu konum belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, en fazla 50 N darbe etkisi altında beş farklı bölgeye yerleştirilen piezo sensörler kullanılarak, implantın yerleşimine uygun en ideal konum belirlenmiştir [13]. Chhabra ve ark. tarafından yapılan çalışmada ise alüminyum kiriş üzerine piezo sensör üç farklı pozisyona yerleştirilmiş ve piezo aktüatör ile tahrik edilmiştir [14]. Ghodsi ve ark. tarafından yapılan çalışmada, uçakların aktif titreşim kontrolünde piezo sensör ve aktüatör konumları ile yönü araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, konumun yapısal titreşim özelliklerinde önemli değişikliklere yol açtığı bulunmuştur [15]. Titreşim kontrolü, robotik sistemler ve esnek yapıların kontrolü gibi alanlardaki çalışmalarda, kirişler sıklıkla tercih edilmekte olup, bu yapıların dinamik analizleri detaylı bir şekilde incelenmektedir [16]. Sonsuz serbestlik derecesine sahip sürekli sistem olarak tanımlanan, bir ucu serbest, diğer ucu ankastre olan elastik kirişlere piezo sensör ve aktüatör eklendiğinde akıllı kiriş elde edilmektedir. Geleneksel malzemeler ise mikroişlemci, kontrol algoritmaları ve yapay zekâ eklentileri ile akıllı yapı davranışı sergileyebilmektedir [17].

İstenilen görev doğrultusunda hareket edebilen robotik sistemlerde, kavrama hareketi gibi esnek yapı tabanlı konumlandırma işlemlerinde genellikle motorlar kullanılmaktadır. Konumlandırma sırasında, tüm yapıların kavranması, dönme hareketleri, zayıf sönümleme ve çeşitli lineer olmayan etkiler nedeniyle karmaşık titreşimler meydana gelmektedir [18]. Sinyal jeneratörü ve motor gibi tahrik elemanlarıyla sisteme uyarı verilir ve çıkış sinyallerinin genlik değerleri genellikle osiloskop cihazı ile ölçülmektedir [19], [20]. Singh ve Nanda, çalışmalarında iki katmanlı ve kaynaklı bağlantılara sahip yapıların dinamik davranışını analiz etmişlerdir. Araştırmada, kirişlerin serbest ucu sinyal jeneratörü ile 0-500 Hz frekans aralığında uyarılarak osiloskop cihazından giriş ve çıkış sinyalleri alınmıştır. Sinyallerin genlik değerlerinden frekans analizi yapılmıştır [21]. Lin ve ark., yaptıkları çalışmada ince esnek plakaların motor

tahrikli dönüşünü servo motor kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapı, 1 Hz sinüs dalgası ile tahrik edilmiştir. İnce esnek plakaların motor tahriki ile titreşim hareketi doğrusal olmayan bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, motor tekrarlayan hareket yaptığı için periyodik titreşim oluşturmaktadır. Burada oluşan istenmeyen karmaşık titreşimlerin azaltılmasında akıllı hibrit kontrol yaklaşımı kullanılmaktadır [18].

Piezoelektrik ve viskoelastik katmanlara sahip sandviç kirişlerin sönümlenme analizi için sonlu eleman metodu kullanılmaktadır [22]. Modal analiz, bir yapının titreşim karakteristiklerini (frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri) anlamada yardımcı olarak sorun giderme, simülasyon, tahmin ve tasarım optimizasyonu gibi süreçlerde kullanılabilir. ANSYS, mühendisler için yapı, titreşim, akışkanlar dinamiği, ısı transferi ve elektromanyetik gibi farklı disiplinlerin etkileşimlerini simüle etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanan genel amaçlı bir yazılımdır. ANSYS, CAD verilerini içe aktarabilme yeteneği ile geometri oluşturulmasına imkân tanırken, aynı önışlemci aracılığıyla hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli de oluşturulabilmektedir. Yüklemeler tanımlanıp analizler yapıldıktan sonra, sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak görüntülenebilmektedir [23]. Akıllı yapılar da genellikle ANSYS programı ile simüle edilebilmektedir [24]. Khalatkar ve ark., çalışmalarında alüminyum konsol kirişe yerleştirilen motor ile yaklaşık 850 d/d dönme hızıyla yedi farklı konumda titreşim üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kirişin serbest ucu, motordan gelen yükleri karşılamaktadır. Kiriş üzerine eklenen piezo sensör ile voltaj verilerini, nümerik analiz (ANSYS programı ile) ve deneysel olarak incelemişlerdir [25]. Sonlu elemanlar analizi için SOLID 45 ve SOLID 5 olmak üzere iki tip eleman seçilmektedir. Kiriş kısmı için SOLID 45 elemanı, piezoelektrik yama için ise SOLID 5 elemanı kullanılmıştır [26]. Vinayaga ve ark., ANSYS programında kiriş üzerine sensörleri 5 farklı bölgeye yerleştirerek uygun konumu belirlemeyi amaçlamışlardır. 100 kN yük ile kirişi tahrik ederek, kurşun zirkonat titanat (PZT) ve polivinilidinden florür (PVDF) olmak üzere iki farklı sensör ile çıkış sinyallerini elde etmişlerdir [27].

Üç boyutlu (3B) baskı üretim yöntemlerinden en yaygın olan eritilmiş biriktirme modelleme (EYM), malzeme ekstrüzyonu prensibi ile çalışan bir yöntemdir. Bu yöntem ile üretilen parçalar, biyomedikal (örneğin, fantom üretimleri), havacılık ve otomotiv sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanlarda tercih edilen malzemelerin başında polilaktik asit (PLA) yer almaktadır [28]. PLA ile üretilen numunelerin en önemli avantajlarından biri hafif olmalarıdır. Ayrıca, yüksek darbe dayanımı, basınç dayanımı ve sönümlenme yetenekleri nedeniyle PLA, en çok tercih edilen malzemelerden biridir [29]. Biyomedikal alanda, insan dokusuna benzerliği

nedeniyle toraks, kaburga, kafatası kemiği gibi karmaşık yapılarda kemik fantomu üretiminde PLA kullanılmaktadır [30], [31], [32]. Bu karmaşık geometrili ve hassas yapıların eklemeli imalat (Eİ) ile üretiminde birçok avantaj bulunmasına rağmen, filament rengi, parça oryantasyonu, malzeme tabakası kalınlığı, malzeme biriktirme hızı, nozul sıcaklığı, yatak sıcaklığı, dolgu tipi ve dolgu yoğunluğu gibi birçok parametrenin numunelerin mekanik özelliklerini etkileyebileceği yönünde birçok çalışma mevcuttur [33]. Literatürde, PLA malzemesi hakkında üretim yöntemi ve parametrelerinin değiştirilmesiyle ortaya çıkan mekanik özellik farklılıkları sıklıkla incelenmiş olsa da, bu yapılara dinamik yükleme sonucu meydana gelen titreşimin analizi ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır [34]. PLA, hafifliği ve nispeten yüksek sertliği sayesinde kafes yapılar, geçici koruyucu kaplamalar, çoklu rezonatör sistemleri, enerji emilimi ve titreşim sönümlenme gibi birçok yenilikçi uygulamada hafif tasarımlar için tercih edilmektedir [35], [36], [37]. A366/CQ siyah çelik levha (Soğuk haddelenmiş sac-DKP), iyi yüzey kalitesi, mükemmel şekillendirilebilirlik ve orta seviyede mukavemeti sayesinde yapı ve inşaat bileşenleri, otomotiv endüstrisi, makine ve ekipman üretimi, mobilya ve donanım, imalat ve metal işleme ile enerji sektöründe kiriş ve taşıyıcı sistemlerde tercih edilmektedir [38], [39].

Bu makalede, harmonik yüklemeye maruz bırakılan iki farklı malzemeden üretilmiş (polimer ve metal bazlı) akıllı kirişlerin deneysel ve nümerik dinamik analizi sunulmaktadır. Konum optimizasyonu yapabilmek için kirişler üzerinde titreşim modları dikkate alınarak üç düğüm noktası belirlenmiş ve bu düğüm noktaları arasına yerleştirilen piezo sensörler ile osiloskop cihazından alınarak mekanik uyarıcı cevabı (zaman cevabı) elektriksel sinyallere dönüştürülmüştür.

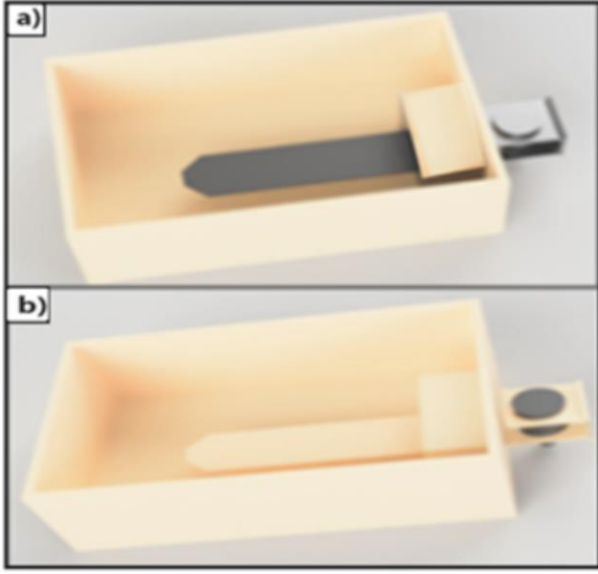
Kirişler üzerinden alınan verilerin doğal frekansı, sönümlenme oranı Python yazılımı ile bulunmuştur. Sistemin nümerik analizi için ANSYS programı kullanılmış, harmonik analiz ile frekans tepkileri elde edilmiştir. Frekans cevabından Bode diyagramı Python yazılımı ile çıkarılmış, bu diyagramdan transfer fonksiyonu elde edilerek sönüm oranları hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sistemin modellenmesi

Sistemi modellerken, bir ucu serbest, bir ucu ankastre olan kirişlerin yerleştirilmesi için 190x130x60 mm boyutlarında kutu şeklinde bir yapı tasarlanmıştır. Motor kuvveti kutunun dışından uygulandığından, kiriş **yarı ankastre** özellik göstermektedir. Kirişlerin boyutları 180x30x1.5 mm olup, motorun ve ankastre kirişin yerleştirildiği toplam uzunluk 70 mm'dir. Şekil 1'de, Fusion 360 öğrenci versiyonunda çizilip

modellenen çelik ve PLA kirişlerin CAD modeli gösterilmektedir.

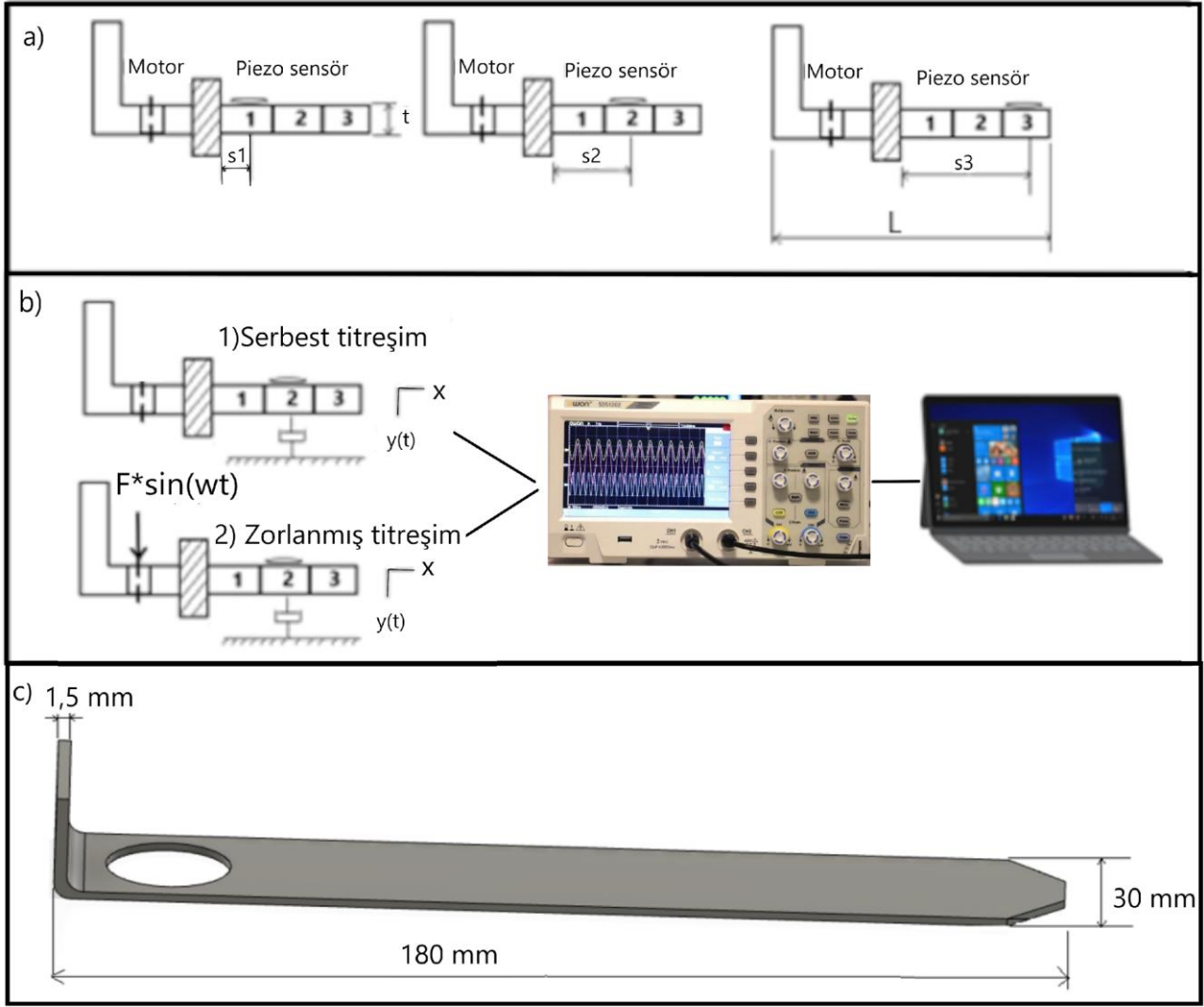


Şekil 1. a) Çelik ve **b)** PLA kiriş sistemlerinin dinamik analizi için Fusion 360 programında modellenmesi

Şekil 2’de, sistemin serbest cisim diyagramı ve tüm sistem için gerçekleştirilen işlemler görsel olarak sunulmaktadır. Sönümleyici olarak termojel malzemeden yapılmış kalıp kullanılmış ve bu kalıp kirişin tamamını kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Kiriş üzerindeki titreşim modlarına bağlı olarak, sönümleyicinin konumlandırılması, titreşim enerjisinin en etkili şekilde sönümlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Kirişin doğal titreşim modlarında en yüksek genliğe ulaşan bölgeler, genellikle orta ve uç noktalardır. Bu nedenle, termojel malzemenin tüm kiriş boyunca yerleştirilmesi, sistemin bütününe entegre edilerek kirişin dinamik davranışını etkileyen bir unsur olarak ele alınmıştır. Yarı ankastre mesnetten itibaren sistem, üç düğüm

noktasına ayrılmış ve bu düğüm noktaları arasına yerleştirilen piezo sensörler, ayrı ayrı osiloskopa bağlanarak veriler termojel malzemenin varlığı (sönümlü) ve yokluğu (sönümsüz) koşullarında elde edilmiştir. Bu çalışmada, "sönümlü" ve "sönümsüz" terimleri, sistemin termojel malzemenin etkisi altında ve etkisi dışında gösterdiği davranışları tanımlamak için kullanılmıştır. PLA kutunun sönümleme davranışı, tüm sistemin sönümleme oranı hesaplamalarına dahil edilmiş ve bu etkinin dikkate alındığı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, sistem üzerinde **serbest ve zorlanmış titreşim analizi** gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 100 d/d hızında çalışan bir motor tahriki kullanılarak ve motor tahriki devre dışı bırakılarak iki farklı durum incelenmiştir. Motor tahriki, sistemde zorlanmış titreşimlerin oluşturulmasını sağlarken, tahrikin devre dışı bırakıldığı durumda serbest titreşim davranışları gözlemlenmiştir. Bu yöntem, sistemin dinamik özelliklerini hem harici bir tahrik altında hem de doğal frekanslar çerçevesinde detaylı bir şekilde incelemek için uygulanmıştır.

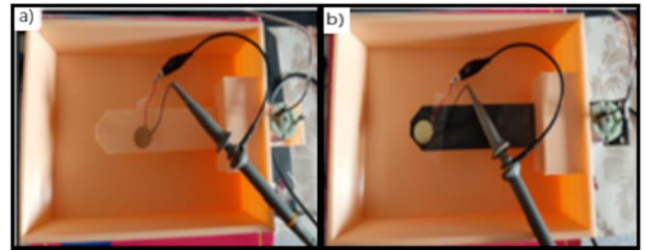
Kirişin serbest titreşim modlarına bağlı olarak üç düğüm noktası belirlenmiştir. Düğüm noktalarının konumu ve sayısı, kirişin mod şekilleriyle doğrudan ilişkilidir. Düğüm noktalarını tespit etmek için kirişin ikinci modundan başlayarak daha yüksek modlarındaki titreşim şekilleri analiz edilmelidir [40]. Genellikle birinci mod düğüm noktası içermezken, daha yüksek modlarda düğüm noktalarının sayısı artmakta ve konumları daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, düğüm noktalarının eksiksiz bir şekilde tanımlanabilmesi için birden fazla titreşim modunun analiz edilmesi gerekmektedir [41], [42]. Literatürde yapılan çalışmalar ve taramalar göz önünde bulundurularak üç düğüm noktası tercih edilmiştir ve 1.bölge, 2.bölge, 3.bölge olarak adlandırılmıştır. Mesnete olan uzaklıkları s1, s2, s3, L sırasıyla 10, 46, 83, 180 mm, t kalınlığı ise 1.5 mm’dir.



Şekil 2. a) Piezo sensörlerin üç düğüm noktası arasına yerleşimi **b)** Sistemin serbest cisim diyagramı ve verilerin osiloskopa alınıp bilgisayara aktarılması **c)** Kirişin boyutlandırılması

2.2. Üretim parametreleri

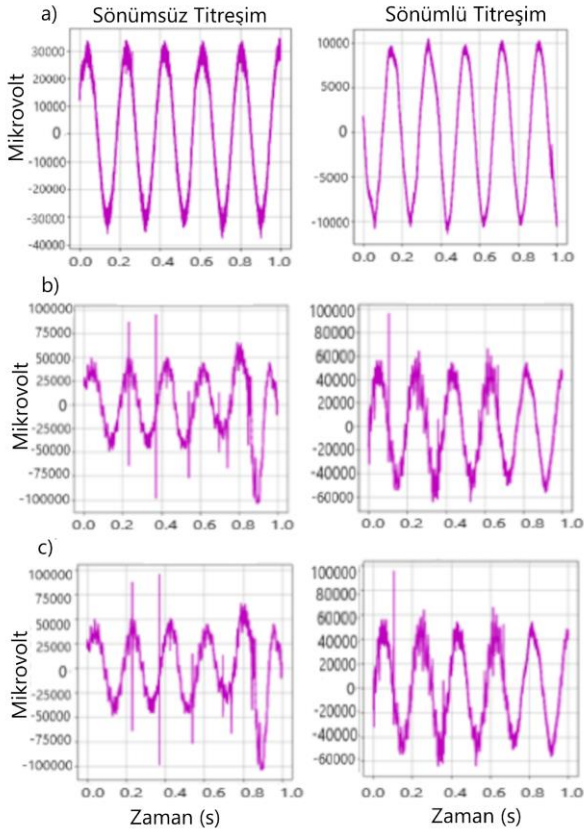
Tasarlanan model .stl formatına aktarılıp, Ultimaker CURA programında dilimlenmiş ve dilimlenen model GCODE dosyasına aktarılmıştır. Model, yazdırma sıcaklığı 210 °C ve tabla sıcaklığı 60 °C olarak 100 mm/s hızda Creality CR-10 Smart EYM yazıcı ile yazdırılmıştır. Akıllı kirişin oluşturulması için 15 mm çapında PZT malzemeden yapılmış piezo sensörler kullanılmıştır. Çalışma voltajı 2-5 V DC, toplam uzunluğu 37 mm olan titreşim motoru ile sistem tahrik edilmiştir. Bu çalışmada, motora 1,67 Hz (100 d/d) titreşim verilerek (Şekil 3) sistemin cevabı piezo sensör ile osiloskop cihazından Excel programına aktarılmış ve veriler alınmıştır.



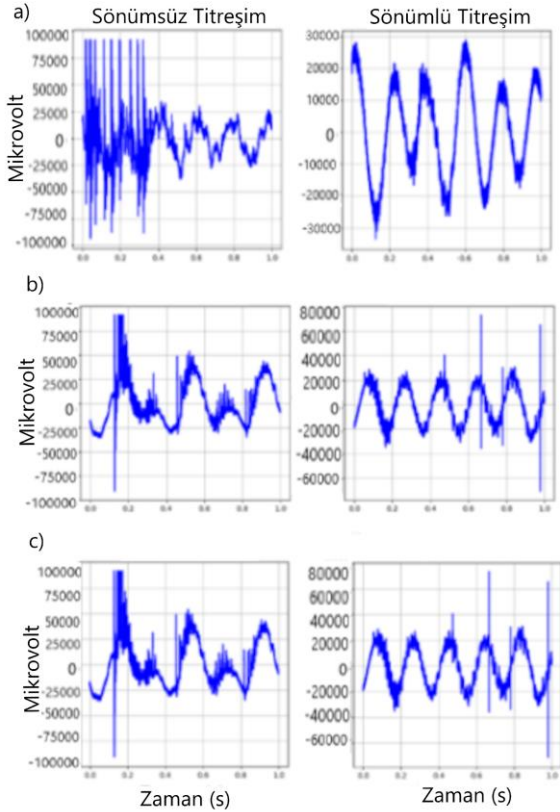
Şekil 3. a) PLA ve **b)** Çelik kiriş deneyleri

3. Bulgular

Sistemin sönümlü ve sönümsüz titreşim cevapları piezo sensörlerin yerleştirildikleri bölgeden ayrı ayrı veriler alınmıştır. Alınan veriler Python yazılımı ile çelik (Şekil 4) ve PLA (Şekil 5) kirişlerin zaman analizleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Çelik kiriş **a)** 1.bölge **b)** 2.bölge **c)** 3.bölge için sönümlü ve sönümsüz titreşim cevabına bağlı zaman analizleri.



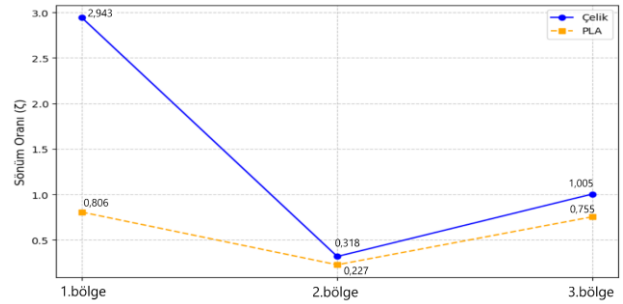
Şekil 5. PLA kiriş **a)** 1.bölge **b)** 2.bölge **c)** 3.bölge için sönümlü ve sönümsüz titreşim cevabına bağlı zaman analizleri

Kirişlerin sabit ve hareketli yükler altındaki serbest ve zorlanmış enine titreşimleri, mühendislik uygulamalarının birçok alanında önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, zorlanmış titreşim analizi kapsamında tahrik kuvveti, 1,67 Hz frekansında çalışan bir motor aracılığıyla uygulanmıştır. Motor, kiriş üzerinde doğrudan bir dönme hareketi veya titreşim üretebilecek periyodik bir kuvvet sağlamaktadır. Motorun çalışma sırasında ortaya çıkan dengesizlikleri, kiriş üzerinde periyodik bir kuvvet etkisi olarak kendini göstermiştir. Dengesiz kütlelerin neden olduğu kuvvet vektörü denklem 1 ile gösterilmiştir [43].

$$F = mR\omega^2 \quad (1)$$

Bu denklemdeki m dengesiz kütle, R geometrik merkezden dengesiz kütleye kadar olan yarıçap ve ω ise açısal hızdır. Bu durum, sistemin dinamik özelliklerini anlamak için zorlanmış titreşim koşullarının detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır.

Herhangi bir makinenin ya da sistemin titreşiminin kontrol edilmesi ve titreşim ayarlarının yapılabilmesi için doğal frekans ve sönümlendirme oranlarını hesaplamak ya da kullanmak önemlidir [44]. Deneysel verilerden elde edilen sönümlü ve sönümsüz veriler Python yazılımı ile logaritmik artış oranı yöntemine göre sönüm oranları hesaplanmıştır (Şekil 6).



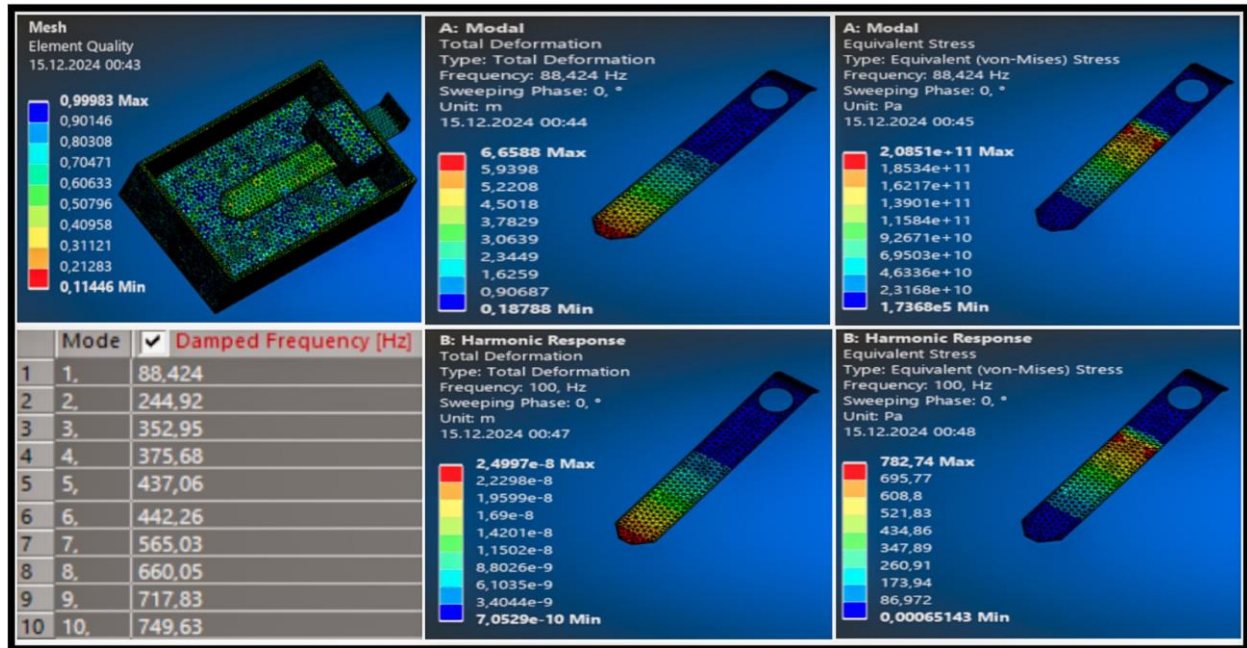
Şekil 6. Çelik ve PLA kirişlerin bölgelere göre deneysel sönüm oranları

Deneysel çalışmalardan sonra sistemin nümerik analizini yapmak için Fusion 360 programında oluşturulan sistem ANSYS programına aktarılmıştır. Projede ANSYS 15 öğrenci versiyonu kullanılmıştır. PLA ve çelik kirişin ayrı ayrı modal ve harmonik analizi yapılmıştır. Çelik kirişin elastisite modülü 208,2 GPa ve poisson oranı ise 0,30'dur [45]. PLA malzemenin elastisite modülü üretim parametrelerine, iç yapının doluluk oranına bağlı olarak değişim göstermektedir. Ticari olarak üretilen PLA'nın elastisite modülü genellikle 3200 MPa, poisson oranı ise 0,36'dır [46]. Piezo sensörün yoğunluğu 4500 kg/m³, elastik uyumluluk matrisi 13,90E10; 7,78E10; 7,43E10'dur [47]. Deneysel çalışmalar sonucunda çelik ve PLA kirişten oluşan her iki sistemin **deneysel olarak** ikinci bölgede kararlı olduğu belirlenmiş ve nümerik analizler bu bölgede

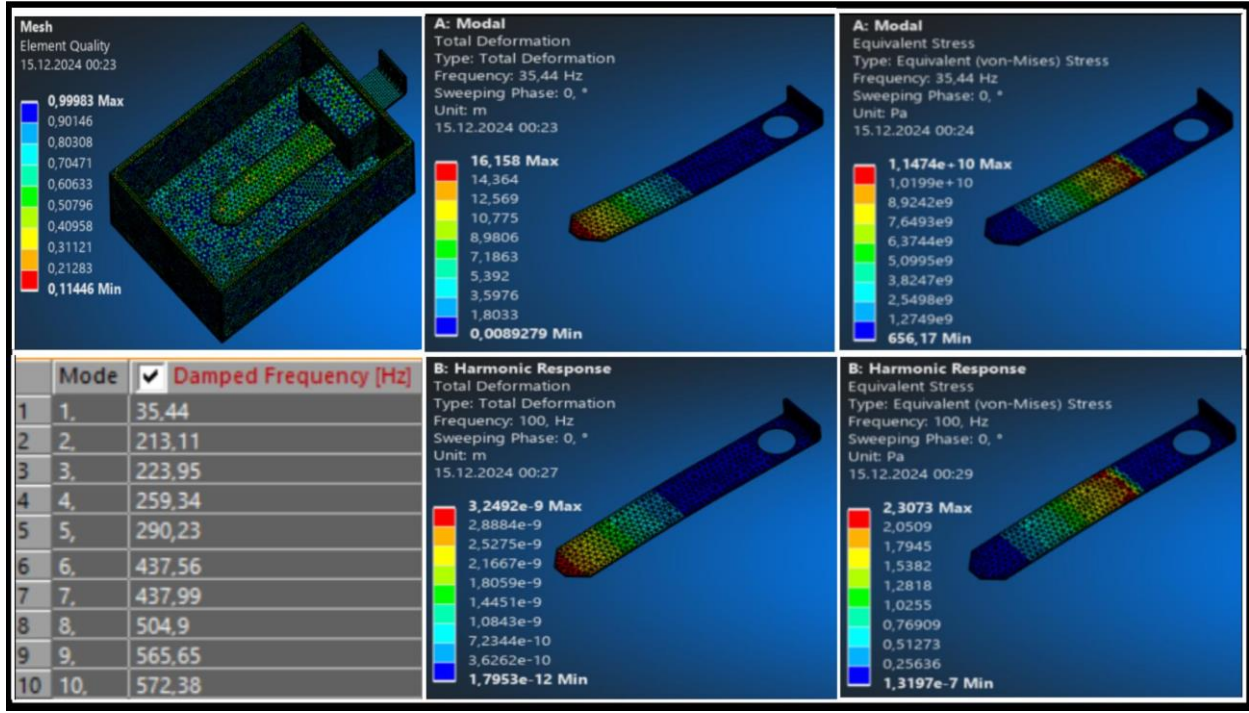
gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen modal analiz sonuçları, çelik için Şekil 7'de, PLA için ise Şekil 8'de sunulmuştur. ANSYS yazılımına aktarılan model üzerinde öncelikle meshleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Meshleme sırasında "element quality" kriteri kullanılmış ve eleman sırası olarak "quadratic" tercih edilmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan geometri 6126 düğüm ve 2831 elemandan oluşmaktadır. Modal analizde, sınır koşulları tanımlanırken mesnet konumları modele uygun şekilde belirlenmiştir.

Harmonik analizde kirişe etki eden kuvveti bulabilmek için titreşim motoru kataloğundan

motorun tork değeri 0,022 Nm olarak tespit edilmiştir. Her iki kiriş için tork değeri, kiriş uzunlukları, elastise modülleri kullanılarak eğilme momenti hesaplanmış ve çelik ve PLA kirişlere etki eden kuvvetler sırasıyla 0,00248 N; 16,83 N olarak hesaplanmıştır. Motora verilen 100 d/d'lık hız 1,67 Hz olarak sisteme etki etmektedir. Bu yüzden zorlanmış titreşim için harmonik analizde açısal frekans 1,67 Hz olarak girilmiştir. Sınır şartları ve kuvvet değerleri ile harmonik analizde frekans cevabı elde edilmiştir. Munde vd. tarafından gerçekleştirilen araştırmada, PLA malzemesine ait doğal frekans değerleri birinci mod için 18,91 Hz, ikinci mod için 148,32 Hz ve üçüncü mod için 234,38 Hz olarak rapor edilmiştir [48].



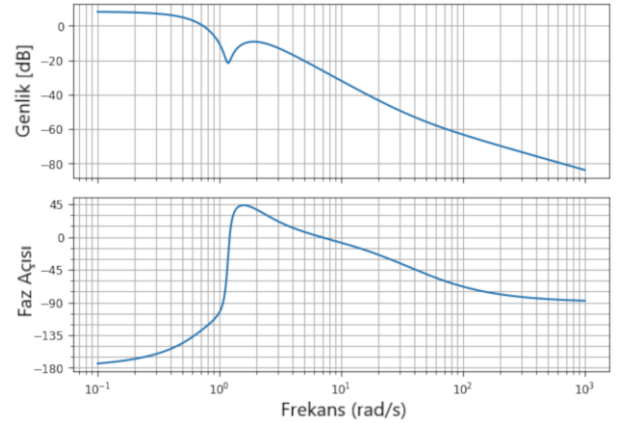
Şekil 7. Çelik kirişin ANSYS analiz sonuçları



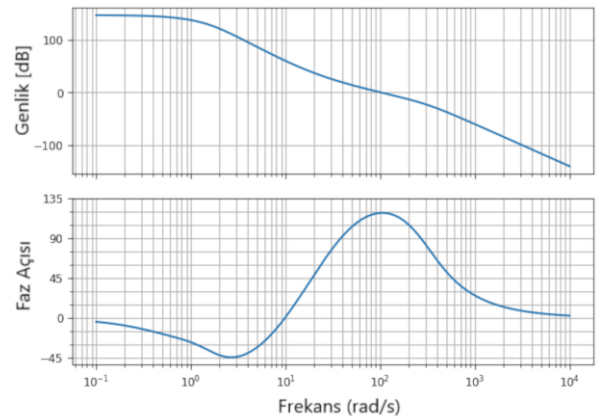
Şekil 8. PLA kiriş ANSYS analiz sonuçları

Cesnik vd. tarafından yapılan başka bir çalışmada ise PLA üretimindeki doluluk oranına bağlı parametrelere göre doğal frekansın değiştiği ve yaklaşık 250-650 Hz arasında olduğu tespit edilmiştir [49]. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, çelik kirişin birinci moduna ait doğal frekans 88,424 Hz, ikinci moduna ait doğal frekans 244,92 Hz ve üçüncü moduna ait doğal frekans 352,95 Hz olarak tespit edilmiştir. PLA kirişin birinci moduna ait doğal frekans 35,44 Hz, ikinci moduna ait doğal frekans 213,11 Hz ve üçüncü moduna ait doğal frekans 223,95 Hz olarak tespit edilmiş olup, elde edilen sonuçlar literatürdeki bulgularla uyum göstermektedir.

Frekans cevabından Bode diyagramları çıkarılarak sistemin transfer fonksiyonu, sönüm oranı, kazancı, kesim frekansları, kararlı olup olmaması bulunabilmektedir [50], [51]. Bir sistemin giriş fonksiyonunun çıkış fonksiyonuna oranı olarak tanımlanan transfer fonksiyonu, sistemin frekans tepkisini vermektedir. Bu frekans tepkisini görselleştirmek için kullanılan grafiksel diyagrama ise Bode diyagramları denilmektedir [52]. Çalışmada, ANSYS programından elde edilen frekans cevabı sonuçları kullanılarak Python yazılımında çelik kirişli sistemin Bode diyagramları çizilmiş (Şekil 9) ve bu diyagramlar üzerinden transfer fonksiyonları elde edilmiştir.



Şekil 9. a) Çelik kirişin frekans tepkisinden elde edilen bode diyagramı



Şekil 10. PLA kirişin frekans tepkisinden elde edilen bode diyagramı

Çelik ve PLA kirişlere ait transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmiştir. Denklem 2'de görüldüğü üzere, çelik kirişli sistemin

transfer fonksiyonunun paydası 6. dereceden bir polinomdur; bu nedenle sistem, 6. dereceden bir dinamik sistemi temsil etmektedir. Benzer şekilde, PLA kirişli sistem ise 7. dereceden bir dinamik sistem olarak tanımlanmıştır.

$$TF_{\text{çelik}} = \frac{4,8e7s^5 - 1,82e9s^4 - 8,604e8s^3 - 1,361e9s^2 - 7,918e8s + 1,705e9}{7,56e8s^6 + 1,277e9s^5 + 8,633e8s^4 - 1,773e9s^3 + 8,072e8s^2 + 9,983e8s - 6,632e8} \quad (2)$$

$$TF_{PLA} = \frac{6,048e12s^7 + 3,629e14s^6 + 6,653e15s^5 + 3,629e16s^4 + 2,94e6s^3 + 6,09e8s^2 + 3,70e8s - 8,297e8s^3 - 1,892e9s^2 + 1,659e9s + 1,705e9}{6000s^7 + 2,94e6s^6 + 6,09e8s^5 + 3,70e8s^4 - 8,297e8s^3 - 1,892e9s^2 + 1,659e9s + 1,705e9} \quad (3)$$

Transfer fonksiyonundan sistemin kutupları ve sönüm oranları her iki kirişli sistem için de bulunmuştur. Çelik kirişli sisteme ait kutup matrisi $[-1,239 \pm 1,331j; -0,744; 0,539 \pm 0,575j; 0,552]$ 'dir. Kutupların kompleks düzlemdeki konumları sistemin kararlılığı ve dinamik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Gerçek kısmı negatif olan kutuplar kararlı dinamikleri işaret ederken, pozitif gerçek kısmı olan kutuplar kararsız dinamikleri göstermektedir. Büyük negatif gerçek kısmı olan kutuplar sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldiğini göstermektedir. Bununla birlikte, pozitif gerçek kısımlar veya düşük negatif değerler, sistemin kararlılık sınırına yakın olabileceğini ifade edebilir. Sistemlerin sayısal sönüm oranları da **frekans düzleminde modal analiz yöntemi** ile hesaplanmıştır. Sönüm oranları, sistemin dışarıdan gelen titreşimleri ne kadar hızlı sönümlendiğini belirleyen kritik bir parametredir. Çelik kirişli sistem için hesaplanan sönüm oranları $[0,681; 0,681; -0,683; -0,683]$ 'tür. PLA kiriş için bulunan kutup matrisi ise $[-244,692 \pm 203,287j; 1,188 \pm 0,486j; -1,163 \pm 1,099j; -0,666]$ 'dir. Sönüm oranları ise $[0,769; 0,769; -0,926; -0,926; 0,727; 0,727]$ 'dir. Pozitif sönüm oranları sistemin **sayısal kararlı** modlarını işaret ederken, negatif sönüm oranları bazı modların kararsız olabileceğine işaret etmektedir. Özellikle negatif sönüm oranlarının bulunması, sistemin bu modlarda dışsal kuvvetlere karşı **sayısal kararsız davranış** sergileyebileceğini göstermektedir.

Sistemlerin kararlılığını sağlamak veya artırmak için kullanılan yöntemler, sistemin fiziksel yapısına (mekanik, elektriksel, termal vb.) ve çalışma ortamına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak, kararlılığı artırmaya yönelik yöntemler arasında aktif ve pasif sönümleme teknikleri, kütle damperlerinin sisteme entegre edilmesi, kirişlerin boyut, kesit ve malzeme özelliklerinin optimize edilmesi, ileri besleme ve geri bildirim kontrol sistemlerinin uygulanması yer almaktadır [53]. Bunun yanı sıra, amortisör ve damper elemanlarının kullanımı, titreşim izolasyonu için bağlantı ve sabitleme noktalarının iyileştirilmesi, sistemin doğal frekanslarının rezonans bölgelerinden uzaklaştırılması ve enerji dağıtım yollarının optimize edilmesi gibi uygulamalar da yaygın olarak tercih edilmektedir [54]. Ayrıca, modal analiz, sayısal simülasyonlar ve deneysel doğrulama süreçleriyle

sistem dinamiklerinin ayrıntılı şekilde incelenmesi, kararlılık artırma stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde seçimi ve uygulanması, sistem performansını artırmak ve uzun vadeli işlevselliği sağlamak için kritik öneme sahiptir [55].

Yapılan bu çalışmada, her iki sistemi **sayısal kararlı** hale getirmek için sisteme geri bildirim kontrol sistemi (PID) Python yazılımı ile uygulanmıştır. Çelik kirişli sistem için geri besleme kazanç matrisi $K = [16,37; 149,35; 741,84; 2262,74; 4121,42; 3618,93]$ olarak bulunmuştur. Bu sistemin sönüm oranları ise $[0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76]$ olarak hesaplanmıştır. Literatür taramasında PLA kirişin sönümleme oranı tarama açısı ve doldurma oranına göre değişmekte olup, genellikle 0,2-1 arasındadır [56], [57]. PLA kirişli sistem için ise geri besleme kazanç matrisi $K = [-473; -101378; -61270; 139403; 316889; -255304; -283773]$ olarak belirlenmiştir. Geri beslemeli PLA kirişli sistem için sönüm oranları ise $[1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94]$ olarak bulunmuştur ve literatürle uyumludur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, çelik ve PLA kirişlerden oluşan sistemlerin dinamik kararlılık analizi deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. İkinci bölgede her iki sistemin kararlı olduğu deneysel olarak belirlenmiş ve sayısal analizler bu bölgede gerçekleştirilmiştir. Çelik kirişli sistemin transfer fonksiyonu 6. dereceden bir dinamik sistem, PLA kirişli sisteminki ise 7. dereceden bir dinamik sistem olarak tanımlanmıştır. Transfer fonksiyonlarından elde edilen kutup matrisleri ve sönüm oranları, her iki sistemin dinamik özelliklerini ve kararlılığını belirlemiştir.

Çelik kirişli sistemde, negatif gerçek kısmı büyük olan kutuplar, sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale geldiğini göstermiştir. PLA kirişli sistemde ise bazı modların negatif sönüm oranlarına sahip olması, bu modlarda kararsız dinamikler sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Her iki sistemin kararlılığını artırmak için geri bildirim kontrol yöntemi uygulanmış ve PID kontrol algoritması ile geri besleme kazanç matrisleri hesaplanmıştır. Bu yöntemle çelik kirişli sistemin sönüm oranları $[0,93; 0,93; 0,55; 0,55; 0,76; 0,76]$, PLA kirişli sistemin ise $[1; 0,98; 0,98; 0,97; 0,97; 0,94; 0,94]$ olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar, geri bildirim kontrolünün sistemlerin dinamik kararlılığını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ve her iki sistemin titreşimlerini kontrol altına alabildiğini göstermiştir. Çalışma, malzeme ve sistem dinamiklerinin optimize edilmesi, titreşim kontrolü ve kararlılık artırmaya yönelik mühendislik uygulamalarına katkı sağlayabilecek bir referans niteliği taşımaktadır. Geri bildirim kontrol yöntemlerinin farklı yapı ve malzemelere sahip

sistemlerde uygulanabilirliği, gelecekteki çalışmalar için geniş bir araştırma alanı sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, FDK-2022-8789 proje numarası ile Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] M. P. (Michael P. Norton and D. G. (Denis G.) Karczub, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge University Press, 2003.
- [2] "S. Graham Kelly - Fundamentals of Mechanical Vibration-McGraw-Hill Science_Engineering_Math(2000)".
- [3] S. Saedi, E. Acar, H. Raji, S. E. Saghaian, and M. Mirsayar, "Energy damping in shape memory alloys: A review," Sep. 15, 2023, *Elsevier Ltd*.
- [4] M. N. Bajad, "Analytical approach for damping model," Jan. 01, 2023, *Institute for Ionics*.
- [5] M. Al Rifaie, H. Abdulhadi, and A. Mian, "Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review," Mar. 01, 2022, *SAGE Publications Inc*.
- [6] A. Raza, R. Rimašauskienė, V. Jūrėnas, and S. Mahato, "Experimental investigation of vibration amplitude control in additive manufactured PLA and PLA composite structures with MFC actuator," *Eng Struct*, vol. 294, Nov. 2023.
- [7] G. Song, P. Z. Qiao, and W. K. Binienda, "Active vibration damping of a composite beam using smart sensors and actuators," in *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2001.
- [8] P. A. Jadhav and K. M. Bajoria, "Free and forced vibration control of piezoelectric FGM plate subjected to electro-mechanical loading," *Smart Mater Struct*, vol. 22, no. 6, Jun. 2013.
- [9] U. Shukla and K. Garg, "Journey of smart material from composite to shape memory alloy (SMA), characterization and their applications-A review," Jan. 01, 2023, *KeAi Communications Co*.
- [10] M. Al-Ayyad, H. A. Owida, R. De Fazio, B. Al-Naami, and P. Visconti, "Electromyography Monitoring Systems in Rehabilitation: A Review of Clinical Applications, Wearable Devices and Signal Acquisition Methodologies," Apr. 01, 2023, *MDPI*.
- [11] A. H. Umar, M. A. Othman, F. K. C. Harun, and Y. Yusof, "Dielectrics for Non-Contact ECG Bioelectrodes: A Review," Sep. 01, 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*.
- [12] B. Li, T. Cheng, and Z. Guo, "A review of EEG acquisition, processing and application," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, May 2021.
- [13] A. S. Poudrel, V. H. Nguyen, G. Haiat, and G. Rosi, "Optimization of a smart beam for monitoring a connected inaccessible mechanical system: Application to bone-implant coupling," *Mech Syst Signal Process*, vol. 192, Jun. 2023.
- [14] D. Chhabra, P. Chandna, and G. Bhushan, "Design and Analysis of Smart Structures for Active Vibration Control using Piezo-Crystals," 2011.
- [15] M. Ghodsi, M. Mohammadzahari, P. Soltani, and H. Ziaifar, "A new active anti-vibration system using a magnetostrictive bimetal actuator," *J Magn Magn Mater*, vol. 557, Sep. 2022.
- [16] S. Zhang, Y. He, L. Fan, and X. Chen, "Active vibration control of smart beam by μ -synthesis technology: modeling via finite element method based on FSDT," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022.
- [17] N. Jain, S. Nandu Ovhal, V. Patil, and K. Nani Kartik, "Smart materials – A state-of-the-art-review," *Mater Today Proc*, 2023.
- [18] C. Y. Lin and H. W. Jheng, "Active vibration suppression of a motor-driven piezoelectric smart structure using adaptive fuzzy sliding mode control and repetitive control," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 3, 2017.
- [19] G. Roy, B. Panigrahi, and G. Pohit, "Identification of crack by vibration analysis and restoration of dynamic response in beams using PZT sensor/actuator," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 38, no. 2, pp. 211–232, 2023.
- [20] B. Zhang, H. Li, S. Zhou, J. Liang, J. Gao, and D. Yurchenko, "Modeling and analysis of a three-degree-of-freedom piezoelectric vibration energy harvester for broadening bandwidth," *Mech Syst Signal Process*, vol. 176, Aug. 2022.
- [21] B. Singh and B. K. Nanda, "Dynamic analysis of damping in layered and welded beams," *Eng Struct*, vol. 48, pp. 10–20, Mar. 2013.
- [22] H. Boudaoud, E. M. Daya, S. Belouettar, L. Duigou, and M. Potier-Ferry, "Damping analysis of beams submitted to passive and active control," *Eng Struct*, vol. 31, no. 2, pp. 322–331, Feb. 2009.
- [23] "Ansys," 2024.
- [24] H. Karagülle, L. Malgaca, and H. F. Öktem, "Analysis of active vibration control in smart structures by ANSYS," *Smart Mater Struct*, vol. 13, no. 4, pp. 661–667, Aug. 2004.
- [25] A. Khalatkar, V. K. Gupta, and A. Agrawal, "Analytical, FEA, and Experimental Comparisons of Piezoelectric Energy Harvesting Using Engine

- Vibrations," *Smart Materials Research*, vol. 2014, pp. 1–8, Apr. 2014.
- [26] "Free vibration analysis of smart composite beam".
- [27] K. K. Vinayaga, A. Vasanthanathan, and P. Nagaraj, "Finite element modeling of smart piezoelectric beam using ANSYS®," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, pp. 7078–7085.
- [28] F. He, H. Ning, and M. Khan, "Effect of 3D Printing Process Parameters on Damping Characteristic of Cantilever Beams Fabricated Using Material Extrusion," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023.
- [29] Y. S. Kushwaha, N. S. Hemanth, N. D. Badgayan, and S. K. Sahu, "Free vibration analysis of PLA based auxetic metamaterial structural composite using finite element analysis," *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 1063–1067, Jan. 2022.
- [30] E. N. Selçuk and M. Reşit, "BİYOMEKATRONİK BİR YAPI ELEMANI OLARAK KAFATASI FANTOMUNUN MÜHENDİSLİKTE KULLANIMI."
- [31] Y. H. Yu, T. Y. Yen, S. K. Hung, S. H. Chen, and K. Y. Wang, "A 3D-printed phantom for stereotactic body radiation therapy simulation," *Biomed Phys Eng Express*, vol. 10, no. 2, Mar. 2024.
- [32] G. B. Tseghai, B. Malengier, K. A. Fante, and L. Van Langenhove, "A long-lasting textile-based anatomically realistic head phantom for validation of eeg electrodes," *Sensors*, vol. 21, no. 14, Jul. 2021.
- [33] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polym Test*, vol. 69, pp. 157–166, Aug. 2018.
- [34] M. Trujillo, M. Curtin, M. Ley, B. E. Saunders, G. Throneberry, and A. Abdelkefi, "Influence of filament angle orientation on the dynamic characteristics of additively-manufactured beams," *Structures*, vol. 50, pp. 418–429, Apr. 2023.
- [35] S. Z. Gebrehiwot, L. Espinosa Leal, J. N. Eickhoff, and L. Rechenberg, "The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 6, no. 1, pp. 71–81, 2021.
- [36] M. Sethi, A. Banerjee, and B. Manna, "Vibration transmission through a cantilever beam in mass impacting metamaterial: An analytical investigation and experimentation," *Mech Syst Signal Process*, vol. 220, no. March, p. 111669, 2024.
- [37] S. R. Patro, A. Banerjee, and G. V. Ramana, "Vibration attenuation characteristics of finite locally resonant meta beam: Theory and experiments," *Eng Struct*, vol. 278, no. December 2022, p. 115506, 2023.
- [38] A. H. Orta, I. Kayabasi, and M. G. Senol, "Prediction of mechanical properties of cold rolled and continuous annealed steel grades via analytical model integrated neural networks," *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 47, no. 6, pp. 596–605, 2020.
- [39] G. N. Eremin, V. I. Parakhin, A. N. Shibanova, and A. E. Cheglov, "Prospects of Production and Application of Cold-Rolled Electrical Steel for Magnetic Cores of Rotary Electric Machines," *Steel in Translation*, vol. 51, no. 4, pp. 286–290, 2021.
- [40] S. M. Kusagur, G. Arunkumar, and T. C. Manjunath, "Modelling of smart intelligent materials with PZT & PVDF sensors/actuators to control the active vibrations of flexible aluminum mechanical cantilever beams using proportional integral derivative (PID) techniques," *Mater Today Proc*, vol. 37, no. Part 2, pp. 2075–2082, 2020.
- [41] P. Ghannadi, S. S. Kourehli, M. Noori, and W. A. Altabay, "Efficiency of grey wolf optimization algorithm for damage detection of skeletal structures via expanded mode shapes," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, no. 13, pp. 2850–2865, 2020.
- [42] A. Ebrahimi-Tirtashi, S. Mohajerin, M. R. Zakerzadeh, and M. A. Nojoomian, "Vibration control of a piezoelectric cantilever smart beam by $\mathcal{L}_1$ adaptive control system," *Systems Science and Control Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 542–555, 2021.
- [43] L. P. Ponci, G. Creci, and J. C. Menezes, "Simplified procedure for vibration analysis and dynamic balancing in mechanical systems with beats frequency," *Measurement (Lond)*, vol. 174, no. October 2020, 2021.
- [44] M. Al Rifaie, H. Abdulhadi, and A. Mian, "Advances in mechanical metamaterials for vibration isolation: A review," Mar. 01, 2022, SAGE Publications Inc.
- [45] S. Takaki, T. MasuMura, and T. TsuchiyaMa, "Young's modulus of single crystalline iron and elastic stiffness," *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 106, no. 9, pp. 679–682, Sep. 2020.
- [46] A. Bagheri, I. Buj-Corral, M. Ferrer, M. M. Pastor, and F. Roure, "Determination of the elasticity modulus of 3D printed octet-truss structures for use in porous prosthesis implants," *Materials*, vol. 11, no. 12, Nov. 2018.
- [47] F. Li and G. Li, "Application of ANSYS APDL in the Design of Piezoelectric Transducer," 2015.

- [48] Y. Munde, A. S. Shinde, I. Siva, and P. Anearo, "Assessment of physical and vibration damping characteristics of sisal/PLA biodegradable composite," *Materials Physics and Mechanics*, vol. 51, no. 7, pp. 107–116, 2023.
- [49] M. Česnik, J. Slavič, and M. Boltežar, "Accelerated vibration-fatigue characterization for 3D-printed structures: Application to fused-filament-fabricated PLA samples," *Int J Fatigue*, vol. 171, 2023.
- [50] F. Golnaraghi and B. C. Kuo, "Ninth Edition."
- [51] Mehmet Önder EFE, *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Seçkin yayıncılık. 2024.
- [52] A. Atangana and A. Akgül, "Can transfer function and Bode diagram be obtained from Sumudu transform," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 1971–1984, Aug. 2020.
- [53] J. R. B. Jan Machowski, Zbigniew Lubosny, Janusz W. Bialek, *Power System Dynamics*. 2020. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=9X_PDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Methods+used+to+ensure+or+increase+the+stability+of+systems&ots=zP8ZJ0NTuA&sig=3wtzc2WwEK0DYEXeMS8IEuRBDnY&redir_esc=y#v=onepage&q=Methods+used+to+ensure+or+increase+the+stability
- [54] G. H. Yoon, H. Choi, and H. So, "Development and optimization of a resonance-based mechanical dynamic absorber structure for multiple frequencies," *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, vol. 40, no. 2, pp. 880–897, 2021.
- [55] J.-S. Wu, *Analytical and Numerical Methods for Vibration Analyses*. 2013. [Online]. Available: https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=rSlwAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT7&dq=system+dynamics+numerical+analysis+for+vibration,&ots=Iz1gEjuQF0&sig=sGWksuYLDijUMFmH3Bg4WcIKHVY&redir_esc=y#v=onepage&q=system+dynamics+numerical+analysis+for+vibration%2C&f=false
- [56] G. Krivic and J. Slavič, "Simultaneous non-contact identification of the elastic modulus, damping and coefficient of thermal expansion in 3D-printed structures," *Polym Test*, vol. 125, 2023,
- [57] F. Medel, J. Abad, and V. Esteban, "Stiffness and damping behavior of 3D printed specimens," *Polym Test*, vol. 109, no. February, p. 107529, 2022.