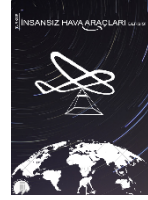




Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



İnsansız Hava Araçlarında Titreşimlerin Rolü, Verimlilik Ölçüm Teknikleri ve Performans Etkileri

Ece Kalay ^{1*}, İskender Özkul ¹

¹ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye; (ecekalay@mersin.edu.tr; iskender@mersin.edu.tr)



Sorumlu Yazar:
ecekalay@mersin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Kalay, E. & Özkul, İ. (2024). İnsansız Hava Araçlarında Titreşimlerin Rolü, Verimlilik Ölçüm Teknikleri ve Performans Etkileri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 72-80.

Geliş : 31.10.2024
Revize : 05.12.2024
Kabul : 10.12.2024
Yayınlama : 31.12.2024

Özet

İnsansız hava araçlarındaki (İHA) titreşimler, uçuş kararlılığı, sensör doğruluğu ve yapısal bütünlük üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu titreşimlerin yaygın kaynakları arasında pervane dönüşü, motor dinamikleri ve aerodinamik kuvvetler bulunmaktadır. Bu titreşimlerin giderilmesi, İHA performansının ve operasyonel dayanıklılığının artırılması için gereklidir. Bu makale, titreşim dinamiklerini anlamak ve kontrol etmek için frekans analizi, mod analizi ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi teorik ve deneysel titreşim analiz tekniklerini incelemektedir. Titreşim azaltma stratejileri, yapısal optimizasyon, uçuş kontrol sistemleri ve izolasyon sistemlerini içermektedir ve tüm bu stratejiler, stabilite ve dayanıklılığı artırmayı hedeflemektedir. Titreşim kaynakları ve etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile etkili mühendislik çözümlerinin uygulanması sayesinde, İHA'lar daha yüksek performans, uzun operasyonel ömür ve yüksek hassasiyet ile stabilite gerektiren sektörlerde genişletilmiş uygulama olanaklarına kavuşabilir. Sonuç olarak, titreşim azaltma yalnızca performans iyileştirmesi için değil, aynı zamanda İHA teknolojisinin zorlu ortamlarda güvenilir şekilde kullanılabilmesi için kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Titreşim analizi, uçuş kararlılığı, İHA tasarımı, titreşim azaltma, dron.

Role of Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles, Efficiency Measurement Techniques, and Performance Impacts

*Corresponding Author:
ecekalay@mersin.edu.tr

Research Article

Citation: Kalay, E. & Özkul, İ. (2024). Role of Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles, Efficiency Measurement Techniques, and Performance Impacts. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 72-80 (in Turkish).

Received : 31.10.2024
Revised : 05.12.2024
Accepted : 10.12.2024
Published : 31.12.2024

Abstract

Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) significantly impact flight stability, sensor accuracy, and structural integrity. Common sources of these vibrations include propeller rotation, motor dynamics, and aerodynamic forces. Mitigating these vibrations is essential for enhancing UAV performance and operational durability. This article explores theoretical and experimental vibration analysis techniques, such as frequency analysis, modal analysis, and finite element analysis (FEA), to understand and control vibration dynamics. Vibration reduction strategies encompass structural optimization, flight control systems, and isolation systems, all aimed at improving stability and durability. By accurately identifying vibration sources and effects and implementing effective engineering solutions, UAVs can achieve higher performance, extended operational life, and greater precision, enabling broader applications in industries requiring high stability. In conclusion, vibration reduction is not only crucial for performance enhancement but also for ensuring the reliable use of UAV technology in challenging environments.

Keywords: Vibration analysis, flight stability, UAV design, vibration reduction, drone.

1. Giriş

Son on yılda İHA'lara yönelik tüketici talebindeki hızlı artış, bu teknolojinin yalnızca özel bir ürün olmaktan çıkarak tarım, fotoğrafçılık, denetim ve turizm gibi birçok alanda vazgeçilmez bir araç haline gelmesini sağlamıştır. Bu artan talep, İHA teknolojisinin geniş bir yelpazede farklı ihtiyaçlara cevap verebilmesi için çeşitli modellerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu modeller arasında yüksek manevra kabiliyeti ve hız sunan yarış İHA'ları, yüksek çözünürlüklü kameralarla donatılmış profesyonel çekim dronları ve tarımda verimliliği artırmayı hedefleyen hassas uygulama araçları bulunmaktadır. İHA tasarımındaki önemli ilerlemeler, yalnızca çeşitliliği değil, aynı zamanda cihazların performansını da artırmıştır. Kullanım süresini ve enerji verimliliğini önemli ölçüde geliştiren batarya iyileştirmeleri, bu gelişmeler arasında öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, gelişmiş GPS ve görüntüleme sistemleri, daha karmaşık otonom uçuşlara olanak tanıyarak, İHA'ların keşif, haritalama ve gözetim gibi görevlerdeki yeteneklerini artırmıştır. Sensör teknolojisindeki yenilikler ve yapay zeka tabanlı uçuş algoritmaları, bu cihazların hem kullanıcı dostu olmasını hem de daha karmaşık operasyonları başarıyla gerçekleştirebilmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler, İHA'ların yalnızca bir araç olarak değil, aynı zamanda modern teknolojinin farklı sektörlerdeki uygulamalarını dönüştüren yenilikçi bir platform olarak benimsenmesine katkı sağlamıştır. (Bashi vd., 2017; Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

İHA'lar, hafif ve dayanıklı çerçeveleriyle farklı çevresel koşullarda çalışabilecek, aynı zamanda yüksek performans sağlayabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Malzeme seçimi, yapının tasarımı ve montaj işlemlerinin sırası bu süreçte kilit konulardır (Eid & Dol, 2019).

Yapısal optimizasyon teknikleri, dört pervaneli İHA'ların tasarım sürecinde büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, modeli tasarım ve tasarım dışı alanlara ayırmayı, sonlu eleman analizi ile gerilmeleri tespit etmeyi ve daha sonra yüklerin uygulanmadığı bölgelerden malzemeyi çıkarmayı içerir. İHA'ların neredeyse tüm bileşenleri, ham malzemeler ve parçalardan monte edilmek yerine baskı yoluyla üretilir. Bu yaklaşım, özellikle 'monokok' bir şasi basıldığında son derece faydalıdır. Bu teknik, montaj için gereken süreyi kısaltmakta ve geleneksel civata ve somun montaj sisteminde görülen bağlantı hatalarını ortadan kaldırmaktadır. (Arockiadoss vd., 2024; Ren vd., 2024). Öte yandan, özellikle rüzgârlı ortamlarda aerodinamik verimlilik için tasarım yapmak son derece önemlidir. Bunun nedeni, hava akışındaki değişimlerin veya bozulmaların gövde boyunca itme

dağılımında ve sürtünmede farklılıklara yol açabilmesidir; bu da rotor açılarının değiştirilmesiyle uçuş stabilitesi ve kontrol edilebilirliğin iyileştirilebileceği anlamına gelir. Rotorların ve çevredeki ortamın nasıl etkileşime girdiğini bilmek, her durumda iyi çalışabilecek İHA'lar tasarlamak için hayati öneme sahiptir (Ahmed vd., 2022).

İHA'ların verimli kullanımı, çeşitli teknik ve mühendislik zorluklarının ele alınmasını gerektirir. Bu sorunlar arasında titreşim problemleri özellikle dikkate değerdir. Çünkü bunlar İHA'ların güvenilirliğini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Bu tür titreşimler, pervanelerin hareketi, aerodinamik kuvvetler ve motorlar ile sensörler gibi iç bileşenlerin çalışmasından kaynaklanabilir. Titreşim kaynaklarını ve titreşimlerin İHA performansı üzerindeki etkilerini incelemek, uçuş kararlılığını, yük güvenliğini ve yapılan işin genel verimliliğini optimize etmek için önemlidir (Redde vd., 2018).

İHA'lardaki titreşimlerin başlıca kaynakları rotor sistemi ve dinamiklerinden kaynaklanır. Ge vd. (2021), iki pervanelinin dönüşünün, uçak hareket halindeyken hem dikey hem de yatay olarak meydana gelen şok kuvvetlerini oluşturmada ana etken olduğunu gözlemlemişlerdir. Uçuş koşullarına bağlı olarak, bu titreşimler İHA'lar hızla ivmelenirken 14 G seviyesine kadar çıkabilmektedir. Bu, İHA yapısında yüksek mekanik gerilmelerin oluşabileceğini ortaya koymaktadır (Ge vd., 2021). Ayrıca, Chen (2023), motor titreşimlerinin bir İHA'nın stabilitesi için kritik olduğunu belirtmekte ve aşırı titreşimlerin uçuş performansını ve yapıyı olumsuz yönde etkileyeceğini vurgulamaktadır (Chen vd., 2023). Bununla birlikte, bu titreşimler yalnızca uçuş stabilitesini değil, aynı zamanda yerleşik sensörler tarafından toplanan verilerin kalitesini de azaltabilir; özellikle kameralarda titreşim, görüntü ve video kalitesinin bozulmasına neden olur (Verma & Collette, 2021). Titreşimler, İHA'ların performansını yalnızca aracın aktif uçuş sırasında ne kadar stabil olduğu bakımından etkilemekle kalmaz. Örneğin, tıbbi malzemelerin taşınması gibi durumlarda uçuş sırasında oluşan titreşimlerin hassas yükleri önemli ölçüde etkileyebileceği kanıtlanmıştır. Oakey vd. (2021), çalışması, İHA uçuşları sırasında yaşanan titreşim seviyelerinin, kara yolu ile taşımada kaydedilenlerden daha yüksek olduğunu ve bu durumun insülin gibi hassas ürünleri tehlikeye atabileceğini göstermiştir (Oakey vd., 2021).

Hassas yükler taşırken İHA titreşimlerini yönetmek çok önemlidir. Titreşim ölçümü ve analizi hem deneysel hem de teorik yöntemlerle yapılabilir. Ancak çoğu durumda deneysel yöntemler, gerçek zamanlı titreşimleri izlemek için ivmeölçerler ve

jiroskoplarla uçuş verilerinin toplanmasını içerir. Bektash ve Cour-Harbo (2020), titreşim analizinin, bir İHA'nın durumunu değerlendirmede kritik bir teşhis yöntemi olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, bu analiz tekniklerinin uçuş sırasında toplanan veriler üzerinde uygulanarak İHA'nın farklı parçalarının durumunu tespit etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Bektash & Cour-Harbo, 2020). Öte yandan, tamamen teorik yöntemler, yapının farklı uçuş ayarlarında titreşime nasıl tepki vereceğini tahmin etmek için çeşitli simülasyonların ve belirli modelleme tekniklerinin kullanılmasını içermektedir (Rahman & Robertson, 2019). Titreşimli çevre koşulları altında verimli bir şekilde çalışabilecek bir İHA tasarımı, sensör verilerinden uçuş kontrol sistemlerine kadar her katmanda titreşim etkilerini minimize eden bir hesaplama algoritması gerektirmektedir. Bu algoritma İHA üzerindeki ivmeölçerler ve jiroskoplar gibi sensörlerden alınan verilerle başlar ve bu veriler, hızlı Fourier dönüşümü (HFD) kullanılarak titreşimlerin frekans analizi için işlenir. Bu analiz, rezonans durumlarını önceden tespit ederek yapısal elemanların korunmasına olanak tanır (Zhou vd., 2018). Uçuş stabilitesini sağlamak için, rotor hızları ve açıları PID (Proportional, Integral, Derivative) veya Model Öngörülü Kontrol algoritmaları ile gerçek zamanlı olarak optimize edilir (Morales vd., 2014). İHA'nın algılama yeteneklerinin korunması için kalman filtresi veya partikül filtresi gibi veri temizleme algoritmaları kullanılarak sensör verilerindeki parazitler giderilir ve gürültü azaltılır (Kruithof & Egeland, 2021). Bu kapsamlı algoritmalar, İHA'nın hem uçuş stabilitesini hem de operasyonel verimliliğini koruyarak, zorlu çevre koşullarında dahi güvenilir ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlar. Titreşimlerin etkili yönetimi, yalnızca İHA'nın performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda görev başarısını da doğrudan etkiler.

Yukarıda özetlendiği üzere, İHA'larda titreşimlerin kaynağı karmaşıktır ve operasyonel verimlilikte önemli bir rol oynar. İHA'ların tasarımını ve performansını artırmak için, çeşitli titreşimleri ve bunların etkilerini anlamak önemlidir. Bu titreşimler, araştırmacılar tarafından pratik ve teorik dalga biçimleriyle gözlemlenip ölçülebilir ve bu da teknoloji ilerlemelerine ve İHA'ların daha fazla uygulama alanı bulmasına yol açar. Bu bağlamda, araştırmamızda İHA'lara özgü titreşimlerin nedenlerini ve etkilerini, İHA performansı üzerindeki etkilerini ve bu titreşimlerin deneysel ve teorik olarak nasıl ölçüldüğünü ele almayı amaçlıyoruz.

2. Titreşim Kaynakları

Titreşim sorunları, İHA'ların uçuş stabilitesi, navigasyon doğruluğu ve özellikle kamera sistemleri

üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkilere sahiptir. Uçuş sırasında meydana gelen titreşimler, İHA'ların hem fiziksel yapısında hem de elektronik bileşenlerinde gerilmelere ve arızalara neden olabilir (Ahmed vd., 2022). Özellikle yüksek frekanslı titreşimlerin kamera sistemlerindeki görüntülerde 'jello' olarak bilinen bir bozulmaya yol açtığı bilinmektedir; bu durum, yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve hassas haritalama gibi görevleri yerine getirirken performans kayıplarına neden olur. Ayrıca, uzun süreli aerobik faaliyet ve titreşimler uçakların mekanik özellikleri üzerinde etkiye sahiptir; bu da nihayetinde yorulma hasarı veya parça tahribatına yol açabilir (Cai vd., 2020). Dengede olmayan bir pervane, rotor dönerken dengesiz kuvvetler üretir ve bu da İHA'nın genel dengesi ve stabilitesini olumsuz etkiler. Sonuç olarak, İHA, havadayken sürekli küçük değişiklikler yapmak zorunda kalır, bu da kontrol sistemlerinin aşırı çalışmasına ve enerji kullanımının artmasına yol açar (Ortiz Cayón, 2012).

Motorlarda titreşime neden olabilecek çeşitli faktörler motorlardaki dengesizlik, rotor ve motorun hizalanmaması ve motor hızındaki değişikliklerden oluşmaktadır. Bu tür titreşimler özellikle yüksek hızlarda ve agresif hareketlerde belirgindir ve İHA'nın stabilitesini bozar. Ek olarak, motor titreşimleri, İHA'nın elektronik devrelerinde titreşime yol açarak sensör okumalarını bozabilir veya devre işlevsizliklerine neden olabilir (Legovich vd., 2020).

Harmonik ve rastgele titreşimler, titreşimlerin sınıflandırılabilirliği iki ana grup olarak öne çıkmaktadır. Harmonik titreşimler, belirli bir frekansta etkili olabilen periyodik olarak tekrarlayan kuvvetler tarafından üretilen titreşimlerdir. Bu titreşimlerin çoğu, motorlar ve pervaneler gibi dönen parçalardaki dengesizliklerden kaynaklanır ve bu titreşimler kontrol sistemlerini etkileyerek uçuşta dengesizliğe yol açar. Harmonik titreşimler belirli bir frekans aralığında sürekli olarak var olduklarından, tespit edilmeleri ve bastırılmaları biraz daha kolaydır. Ancak, rahatsız edici frekanslar sistemin (uçak) doğal frekanslarıyla, yani bir İHA'nın yapısal elemanı ile çakıştığında, bu durum rezonansa ve uçuş sırasında hasar ya da durmaya neden olabilir (Radkowski & Szulim, 2014). Normal titreşimler ise belirli bir frekansa sahip değildir ve bu nedenle rastgele titreşimler olarak kabul edilebilir. Bu tür titreşimler, uçuş sırasındaki çevre koşulları veya uçuş dinamik koşulları, örneğin rüzgâr esintileri veya İHA belirli bir hareket yaptığında oluşabilir. Rastgele titreşimlerin tahmin edilmesi veya kontrol edilmesi zor olduğundan, İHA'nın yükseltilmiş parçalarında çeşitli sorunlara yol açabilir (Anton & Inman, 2008).

Harmonik titreşim genellikle bir sinüs eğrisi şeklinde temsil edilir. Dış bir kuvvet tarafından

tetiklenen her tekrarlayan hareket matematiksel olarak Denklem 1'deki gibi tanımlanır (Inman, 2017).

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Burada $x(t)$ zamana bağlı olarak değişen yer değiştirmeyi temsil eder. A titreşim genliği (maksimum sapma), ω açısal frekans, t zaman ve ϕ başlangıç faz açısıdır. Başlangıç faz açısı, hareketin başlangıç anındaki konumunu ve yönünü belirler.

Doğal titreşim, bir sistemde kendi iç özellikleri nedeniyle oluşan ve başlatılması veya sürdürülmesi için herhangi bir dış kuvvet gerektirmeyen salınımı ifade eder. Bu tür titreşim, sistemin kendine özgü frekansında, yani doğal frekansında gerçekleşir. Her fiziksel sistemin bir veya daha fazla doğal frekansı vardır ve bunlar kütle ve sertlik gibi belirli sistem parametrelerine bağlıdır. Titreşimin doğal frekansı f_n Denklem 2'deki matematiksel ifade ile tanımlanır (Vreugdenhil, 1964).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Burada, f_n doğal frekansı (Hz), k sertliği (yay sabiti), m ise kütleli ifade eder. Sistem bu frekanslarda titreştiğinde, herhangi bir dış kuvvet olmadan kendi enerjisiyle salınım yapmaya devam edecektir. İHA sistemlerinde, bu genellikle çerçevenin, pervanelerin veya gövdenin doğal frekansı ile ilişkilidir.

Yapısal rezonans ise, İHA'nın çerçevesi ve bileşenlerinin belirli frekanslarda titreştiği durumlarda meydana gelir. Her yapının kendi frekans seti vardır ve bu frekanslarda titreşim genliği çok daha yüksek olabilmektedir. Uçuş sırasındaki aerodinamik yüklerin veya pervaneye sahip bir motordan gelen titreşimlerin bir türevi olarak bu frekans aralıkları "doğal frekanslar" olarak adlandırılır (Mohsan vd., 2022). Titreşimlerin rezonans nedeniyle artması, yapısal arıza riskini artırır ve uçuş sırasında ciddi dengesizliklere yol açabilir. Bu sorun, daha büyük ve daha karmaşık İHA tasarımlarının kullanımıyla daha da kötüleşmekte ve bu da çeşitli İHA parçalarının ömrünü azaltmaktadır (Abdulrahman Al-Mashhadani, 2019).

Matematiksel olarak, rezonans, dış kuvvetin frekansının sistemin doğal frekansına (f_n) eşit olduğu durumlarda meydana gelir. Bu durumda, sistemin tepki genliği (A) aşağıdaki Denklem 3 ile ifade edilebilir (Craig Jr & Kurdila, 2006).

Burada, F_0 dış kuvvetin genliğini, ω_n doğal frekansın açısal frekansını ve ω_{ext} dış kuvvetin açısal frekansını ifade eder. Eğer $\omega_{ext} = \omega_n$ olursa, paydadaki pay sıfıra yaklaşır ve sonsuz genlik ortaya çıkar. Bu, rezonansın tehlikeli sonuçlarını göstermektedir (Craig Jr & Kurdila, 2006).

$$A = \frac{F_0}{m (\omega_n^2 - \omega_{ext}^2)} \quad (3)$$

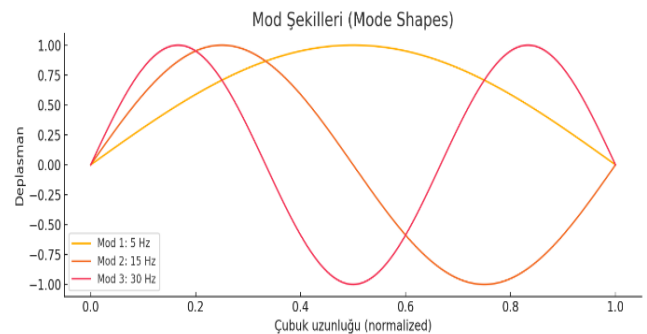
3. Yöntemler ve Uygulamalar

Farklı titreşim analiz yöntemleri hem deneysel hem de teorik yaklaşımlarla uygulanmaktadır. Öne çıkan ilk yöntem frekans analizidir. Bu teknik, İHA'ların belirli bir frekansta sürekli uçtuğu durumlarda titreşimi değerlendirmek için uygulanır. İHA'larda, motorların ve rotor kanatlarının belirli çalışma frekansları vardır ve bunlar sistemin doğal frekanslarıyla karşılaştırılmalıdır. Genellikle frekans analizi, HFD kullanılarak gerçekleştirilir. HFD, zamanla elde edilen verileri frekans verilerine dönüştürmek için kullanılır ve elde edilen titreşimlerin belirgin olduğu frekansları gösterir. Bu tür bilgiler, belirli frekansların sistemin doğal frekansları içinde yer alması durumunda rezonans nedeniyle titreşimlere yol açabileceğinden, İHA tasarımında önemlidir (Yin vd., 2021).

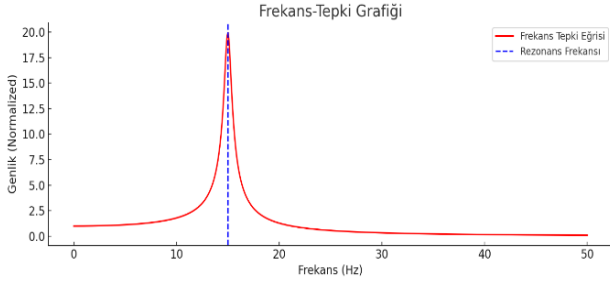
Bir diğer önemli teknik ise modal analizdir. Modal analizde, bir yapının doğal frekansı, mod şekli ve sönüm oranları belirlenir. Bu yaklaşımda, İHA'nın yapısal parçaları üzerinde titreşim testleri yapılır ve test edilen veriler, sistemin modal parametrelerini belirlemek için kullanılır.

Modal analiz, bir sistemin doğal titreşim davranışını incelemek için kullanılan temel bir yöntemdir. Bu analiz, sistemin mod şekilleri (eigenmodes) ve doğal frekansları (eigenfrequencies) üzerinden yapılır. Eigenmodes, sistemin serbest titreşim sırasında aldığı özgün şekilleri temsil ederken, eigenfrequencies, bu modlara karşılık gelen titreşim frekanslarını ifade eder (Sundararaj vd., 2021).

Şekil 1'de örnek bir sistemin ilk üç mod şekli (Mod 1, Mod 2, Mod 3) ve bu modlara karşılık gelen doğal frekanslar ($f_1=5$ Hz, $f_2=15$ Hz, $f_3=30$ Hz) görselleştirilmiştir. Mod şekilleri, sistemin uzaysal deformasyon yapısını açıklarken, her modun davranışı, genlik (deplasman) ile normalize edilmiş birim uzunluk boyunca dalga şekilleriyle temsil edilmiştir.



Şekil 1. Temsili mod şekilleri ve doğal frekanslar.



Şekil 2. Temsili frekans-tepki fonksiyonu.

Şekil 2’de ise sistemin frekans-tepki eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri, harici bir kuvvetin sistem üzerinde oluşturduğu genlik cevabını farklı frekanslar için ortaya koymaktadır. Özellikle, $f_2=15$ Hz civarında görülen yüksek genlik, sistemin rezonans durumunu ifade etmektedir. Rezonans frekansı, sistemin harici bir titreşim kaynağı tarafından uyarıldığında maksimum genlik ürettiği frekanstır. Grafik, aynı zamanda sistemdeki sönüm oranının rezonans zirvesini baskıladığı ve genliği sınırladığı bir durumda damping etkisinin varlığını da göstermektedir (Bolognini vd., 2022).

Modal analiz, tasarım sürecinde veya hali hazırda mevcut İHA’lar üzerinde gerçekleştirilebilir. Bu teknik, yapının zayıf noktalarını belirlemeyi mümkün kılarak, zayıf noktaları güçlendirmeye ve İHA’nın genel gücünü artırmaya yardımcı olur. Modal analizin ilk aşaması, birkaç matrisin oluşturulmasıdır; birincisi, sistemin kütlelerinin nasıl dağıldığını gösteren kütle matrisidir (M), ikincisi ise yapının ne kadar sert olduğunu tanımlayan sertlik matrisidir (K) ve sonuncusu, çoğu zaman göz ardı edilse de sistemin zaman içinde titreşim enerjisini nasıl dağıttığını tanımlayan sönüm matrisidir (C). Serbest (sönümsüz) titreşimler için hareket Denklemi 4 aşağıdaki gibi ifade edilir (Sundararaj vd., 2021).

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = 0 \quad (4)$$

Burada M kütle matrisini, C sönüm matrisini, K sertlik matrisini, X yer değiştirme vektörünü, \dot{X} hız vektörünü ve \ddot{X} ivme vektörünü temsil etmektedir. Doğal frekansları ve mod şekillerini çözmek amacıyla Eğer “C” kütle matrisinin çarpanlarını içeren bir sertlik (rijitlik) matrisine “K” dönüşüyorsa, Denklem 5 sönümsüz bir sistemi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (Sundararaj vd., 2021).

$$K \cdot X = \omega^2 \cdot M \cdot X \quad (5)$$

Denklemden özdeğer (ω^2) doğal frekansların karesidir. Bir titreşim sisteminde doğal frekanslar, sistemin dış etkiler olmadan serbestçe titreştiğinde sahip olduğu karakteristik frekanslardır. Doğal frekanslar, sistemin fiziksel özelliklerine (kütle, rijitlik, vb.) bağlıdır ve sistemin titreşim davranışını belirler.

Örneğin; küçük bir özdeğer, sistemin düşük frekansta titreştiğini gösterir. Büyük bir özdeğer ise yüksek frekansta titreşim anlamına gelir. Özvektör (X) ise, sistemin mod şekillerini ifade eder. Mod şekilleri, sistemin doğal frekanslarından birinde titreşirken aldığı deformasyon veya hareket modelleridir. Başka bir deyişle, bir mod şekli, sistemin hangi bölgelerinin ne kadar hareket edeceğini veya hangi yönde deformasyona uğrayacağını gösterir. Örneğin; basit bir çubuğun birinci modunda çubuk genel olarak yukarı veya aşağı hareket edebilir. İkinci modunda ise bir kısmı yukarı, diğer kısmı aşağı hareket edebilir (Wang, X. vd., 2019).

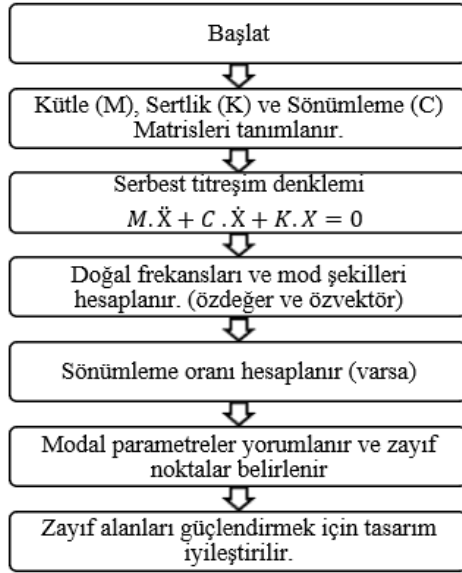
Sönümlemenin dâhil edileceği analizlerde ise Rayleigh Sönüm Modeli veya alternatif yaklaşımlar kullanılabilir. Sönüm matris C, Denklem 6’da gösterilmektedir (Meirovitch, 1980; You & Zhang, 2019).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

Sistemin sönümleme davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için uygun α ve β katsayı değerleri seçilmelidir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları artık mevcut olduğuna göre, sistemin farklı titreşim koşulları altındaki tepkisi değerlendirilebilir. Bu, yapının yüksek yer değiştirme veya stres yoğunluklarına maruz kalması muhtemel bölgelerini belirleme olanağını doğurur. Modal analizden elde edilen sonuçlar, aşırı titreşimler veya stres yoğunluklarına eğilimli alanların güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Böyle bir güçlendirme, kritik alanlarda kütle veya sertlik dağılımında değişiklikler gerektirebilir; bu da İHA tasarımının stabilitesini ve dayanıklılığını artırır (Foti vd., 2012; Fu vd., 2010).

Şekil 3, modal analiz algoritmasının nasıl başlatıldığını, öncelikle modelin kütle, sertlik ve sönümleme matrislerinin oluşturulmasıyla gösterir. Bir sonraki adım, serbest titreşim denkleminin yazılmasıdır. Daha sonra, doğal frekanslar ve mod şekilleri özdeğerleri bulunarak belirlenir. Uygun olduğu yerlerde, sönümleme oranları sönümleme matrisini kullanarak hesaplanır (Butt & Omenzetter, 2012). Bu aşamaların ardından, sonuçlar değerlendirilerek herhangi bir zararlı yapısal yetersizliğin varlığı tespit edilebilir.

Tanımlanan modal analiz algoritması, yapısal sistemlerin titreşimsel tepkisini yapılandırılmış bir şekilde nicelleştirmenin bir yolunu sunar. Bu yaklaşım, doğal frekansların, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesine odaklanarak, bu metodolojiyi dinamik yapıların tasarım kalitesini ve işlevselliğini artırmada temel bir bileşen haline getirir (Susilo vd., 2013).



Şekil 3. Modal analiz algoritmasına genel bakış.

Bahsedilmeye değer bir diğer yöntem de SEA yöntemidir. Bu yöntem, bir İHA'nın yapısal parçalarının performansını tahmin etmeye yardımcı olur. SEA uygulanan yüklerin yapıya olan etkilerini ve bunların ilişkili deformasyonlarını değerlendirir. Farklı malzeme ve tasarımların etkilerini modelledikten sonra, bir İHA'nın hangi parçalarının daha fazla titreşim yarattığını ve bu titreşimleri nasıl oluşturduğunu belirlemek kolaylaşır. SEA, tasarım aşamasında sadece yapısal iyileştirmelerle sınırlı değildir; aynı zamanda tamamlanmış yapıların iyileştirilmesi için de kullanılmaktadır (Hafizi vd., 2017). Yazılım analiz tekniklerinin yanı sıra, titreşim ölçüm teknikleri de titreşim analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tekniklerin çoğu, genellikle ivmeölçerler, jiroskoplar ve lazer doppler hız ölçerleri gibi sensörlerin kullanımıyla gerçekleştirilir. Bir İHA'nın yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler, sistemdeki mevcut titreşimleri algılar ve zaman içindeki ivme değişimlerini kaydeder. Bu bilgiler, frekans bileşenlerini ayırmak için analiz yazılımları tarafından işlenebilmektedir. Jiroskoplar ise, açısal hızların oranını ölçmek için kullanılır ve İHA'nın eksen üzerindeki hareketlerine ilişkin bilgi sağlar. Lazer Doppler hızölçerlerinde ise, titreşim hızı genellikle İHA'nın yüzeyine yansıtılan lazer ışığı kullanılarak ölçülür. Bu teknik oldukça hassas sonuçlar verir (Cruz & Miranda, 2017).

Dinamik tepki analizi ise, İHA'ların çeşitli dinamik yük etkilerini de dikkate almaktadır. İHA'ların farklı uçuş senaryolarına verdiği tepkiyi açıklayıcı bir şekilde ortaya koyar. Örneğin, İHA'ların çalışması veya durdurulması sırasında uygulanan dinamik yükler veya havanın hareketi, İHA'ların titreşim seviyesini değerlendirmek için kullanılır. Bu şekilde, dinamik tepki analizi, İHA tasarımında güvenlik ve

dayanıklılık açısından kritik bilgiler sunar (Kim vd., 2023).

Sonuç olarak, veri analitiği ve makine öğrenimi gibi çağdaş teknikler, İHA'ların titreşim teşhisi konusunda daha fazla önem kazanmaktadır. Makine öğrenimi modelleri, sensörler aracılığıyla elde edilen verilerin analizinde kullanılabilir ve olağandışı titreşim seviyelerini tanımlayıp tahmin etmek için uygulanabilir. Bu strateji, uçuş sırasında titreşimlerin gerçek zamanlı takibi ve olası arızaların zamanında tespiti açısından önemli faydalar sağlamaktadır.

4. İHA'larda Titreşim Önleme ve Azaltma Stratejileri

Rezonans etkilerini azaltmak ve İHA yapılarının korunmasını sağlamak için tasarım ve operasyonel stratejileri bir arada içeren bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu çok boyutlu yaklaşım, titreşimlerin İHA'ların performansı ve dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek için gereklidir. İHA'ların güvenli şekilde çalışmasını sağlamak için en temel önlemlerden biri, pervane ve motorların dengeli bir şekilde çalışmasıdır. Bu nedenle, uçuş güvenliği açısından kritik olan bu bileşenlerin kalibrasyonu bozulduğunda, titreşim kaynaklı dengesiz kuvvetleri önlemek amacıyla hava çerçevelerinin düzenli bakım ve ayarları yapılmalıdır. Bu tür önlemler, İHA'nın yapısal bileşenlerinde aşırı stres oluşmasını ve bunun sonucunda arızaların meydana gelmesini zorlaştıracaktır (Shin vd., 2021). İHA modeline uygun şekilde tasarlanmış motorlar ve yüksek kaliteli pervanelerden oluşan dengeli itme sistemleri, titreşimleri ve bu titreşimlerin rezonans etkisiyle çerçeveye ve diğer parçalara verebileceği zararları en aza indirir (Chen vd., 2023). Titreşim yayılma sorununu çözmenin bir diğer geçerli yolu, kameralar ve sensörler gibi hassas ekipmanlar için titreşim sönümlenme montajlarının uygulanmasıdır. Ayrıca, yapının hayati parçalarına iletilen fazla enerjiyi dağıtmaya yardımcı olan karbon fiber kompozitler gibi yüksek sönümlenme malzemelerinin seçimi de önemlidir (Perez vd., 2022; Verma vd., 2018). Maliyet açısından etkili olduğu kadar güvenilir olan pasif sönümlenme teknikleri, geniş bir İHA uygulama yelpazesinde kullanılabilir. Bu malzemelerin ve montajların İHA'lara monte edilmesi, cihazın genel stabilitesini artıracak ve hassas ekipmanların olumsuz koşullarda bile işlevsel kalmasını sağlayacaktır (Verma & Collette, 2021).

Aktif titreşim izolasyon sistemleri, özellikle zor koşullarda uçan gelişmiş İHA'lar için titreşimi kontrol etmenin yenilikçi bir yoludur. Çünkü bu tür sistemler, titreşimlerdeki değişiklikleri hızlı bir şekilde ölçen sensörlerden oluşur ve bu tür titreşimler, gerçek

zamanlı olarak engellenerek İHA'ların stabilitesini artırır ve ömrünü uzatır (Verma vd., 2020). Bu sistemlerin yüksek maliyetlerinin operasyonel maliyetleri artırabileceği doğru olsa da, özellikle gözetleme veya tıbbi malzeme teslimatı gibi kritik görevlerde İHA'ların hassas ekipmanlarını koruma yetenekleri paha biçilmezdir (Hii vd., 2019). Bu tür sistemlerin entegrasyonu, İHA'ların operasyonel yeteneklerini önemli ölçüde artırabilir ve onları çeşitli uygulamalarda daha güvenilir hale getirebilir.

Rezonans, İHA bileşenlerinin doğal frekanslarını değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu tür örtüşmeleri önlemek için mühendisler, bir model bileşeninin kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davranacağını tahmin etmek için SEA gibi simülasyon araçlarını kullanabilir, böylece tasarımı değiştirmek mümkün hale gelir ve dış kuvvetlerle rezonansa girmesi önlenir (Chen vd., 2023). Yüksek titreşim veya stres yaşayan zayıf bağlantıların veya kritik alanların güçlendirilmesi, İHA'ların yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde artırabilir (Wang vd., 2023). Bu proaktif yaklaşım, İHA'ların ömrünü uzatmanın yanı sıra, operasyonel ortamlarının zorluklarına karşı dayanıklı olmalarını da sağlar.

Gelişmiş sensörlerle donatılmış uçuş kontrol sistemleri, İHA'ların çevre değiştikçe pozisyon değiştirmesine olanak tanır ve gerçek zamanlı olarak titreşimleri azaltır. Ayrıca, rüzgâr hızı veya yükseklik gibi uçuşla ilgili belirli parametreleri değiştirebilir, bu da İHA'ların farklı koşullar altında stabilitesini sağlamak için gereklidir. Dış etkilere uyum sağlama yeteneği, hassas uçak içi ekipmanların ömrünü uzatmak için hayati önem taşır ve İHA'ların belirlenen görevlerinde işlevsel ve etkili kalmasını sağlar (Verma vd., 2020).

Rutin kontroller ve kalibrasyonlar, titreşime yol açabilecek aşınmanın birikimini önlemek için gereklidir. Bakım düzeni, gevşek bağlantıların kontrol edilmesi, hasarlı bileşenlerin değiştirilmesi ve verimliliği sürdürmek için sensörlerin gerektiği şekilde ayarlanmasını içermelidir (Rasid vd., 2019). Bu tür bir bakım dikkatinin gösterilmesi, aşırı titreşimlere veya hatta rezonans etkilerine neden olabilecek bileşenlerin beklenmedik arızalarını en aza indirir ve böylece İHA'ların işlevselliğini korur.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, İHA'larda titreşimlerin kaynakları, analiz yöntemleri ve kontrol stratejileri incelenmiş, literatürdeki bulgularla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İHA'larda titreşimlerin temel kaynakları arasında pervane dengesizliği, motor titreşimleri ve yapısal rezonans öne çıkmaktadır. Bu faktörlerin uçuş stabilitesi, sensör doğruluğu ve

yapısal bütünlük üzerindeki olumsuz etkileri, performans kayıplarına ve hassas görevlerde başarısızlığa yol açabilmektedir. Araştırmamızda frekans analizi ve modal analiz gibi yöntemlerin, titreşimlerin kaynağını belirlemede ve yapısal zayıflıkları tespit etmede etkili araçlar olduğu vurgulanmıştır. Hızlı Fourier dönüşümü ve sonlu elemanlar analizi, doğal frekansların ve kritik titreşim noktalarının tespitinde önemli rol oynamaktadır. Bu yöntemlerle elde edilen bulgular, titreşim kontrolü ve yapısal iyileştirme çalışmalarına yol gösterici olmaktadır. Pratik uygulamalar açısından, pervane ve motor balansının doğru yapılması ile yüksek kaliteli malzeme seçimi, titreşimlerin azaltılmasında kritik öneme sahiptir. Özellikle karbon fiber kompozitler gibi yüksek sönümleme kapasiteli malzemelerin kullanımı, İHA'ların yapısal bütünlüğünü artırarak performanslarını iyileştirmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı titreşim izleme ve aktif izolasyon sistemlerinin, hassas görevlerde İHA'ların stabilitesini artırdığı görülmüştür. Sonuç olarak, titreşimlerin kaynağının doğru belirlenmesi ve uygun mühendislik çözümlerinin uygulanması, İHA'ların performansında önemli iyileştirmeler sağlayabilmektedir. Bu alandaki çalışmalar hem teorik hem de pratik açıdan İHA teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmakta, özellikle hassas sensörler ve yük taşıma görevlerinde güvenilirliği artırmaktadır. Gelecekteki araştırmaların, titreşim kontrolüne yönelik yenilikçi malzeme ve teknolojilere odaklanmasının, İHA'ların farklı uygulama alanlarındaki etkinliğini daha da artıracığı öngörülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Abdulrahman Al-Mashhadani, M. (2019). Random vibrations in unmanned aerial vehicles, mathematical analysis and control methodology based on expectation and probability. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38(1), 143-153.

- Ahmed, F., Mohanta, J., Keshari, A., & Yadav, P. S. (2022). Recent advances in unmanned aerial vehicles: a review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7963-7984.
- Anton, S. R., & Inman, D. J. (2008). *Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles*. Paper presented at the Active and passive smart structures and integrated systems 2008.
- Arockiadoss, A. S., Novah, R. N., Sajal, K., Pratap, S. S., Premachandra, C., & Schilberg, D. (2024). *Optimization of Monocoque Drone Frame Using Generative Design*. Paper presented at the 2024 International Conference on Image Processing and Robotics (ICIPRoB).
- Bashi, O. I. D., Hasan, W., Azis, N., Shafie, S., & Wagatsuma, H. (2017). Unmanned aerial vehicle quadcopter: A review. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 14(12), 5663-5675.
- Bekdash, O., & la Cour-Harbo, A. (2020). *Vibration analysis for anomaly detection in unmanned aircraft*. Paper presented at the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2020.
- Bolognini, M., Izzo, G., Marchisotti, D., Fagiano, L., Limongelli, M. P., & Zappa, E. (2022). Vision-based modal analysis of built environment structures with multiple drones. *Automation in Construction*, 143, 104550.
- Butt, F., & Omenzetter, P. (2012). Evaluation of Seismic Response Trends from Long-Term Monitoring of Two Instrumented RC Buildings Including Soil-Structure Interaction. *Advances in Civil engineering*, 2012(1), 595238.
- Cai, Y., Lam, E., Howlett, T., & Cai, A. (2020). *Spatiotemporal analysis of "jello effect" in drone videos*. Paper presented at the Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Robots and Unmanned Systems, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10.
- Chen, K., Meng, W., Wang, J., Liu, K., & Lu, Z. (2023). An investigation on the structural vibrations of multi-rotor passenger drones. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 15, 17568293231199097.
- Craig Jr, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of structural dynamics*: John Wiley & Sons.
- Cruz, C., & Miranda, E. (2017). Evaluation of damping ratios for the seismic analysis of tall buildings. *Journal of structural engineering*, 143(1), 04016144.
- Eid, S. E., & Dol, S. S. (2019). *Design and development of lightweight-high endurance unmanned aerial vehicle for offshore search and rescue operation*. Paper presented at the 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET).
- Foti, D., Ivorra, S., & Sabbà, M. F. (2012). Dynamic investigation of an ancient masonry bell tower with operational modal analysis: A non-destructive experimental technique to obtain the dynamic characteristics of a structure.
- Fu, H., Liu, P., Zhang, Q., & Wang, Y. (2010). *Vibration modal analysis of the active magnetic bearing system based on finite element*. Paper presented at the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- Ge, C., Dunno, K., Singh, M. A., Yuan, L., & Lu, L.-X. (2021). Development of a drone's vibration, shock, and atmospheric profiles. *Applied Sciences*, 11(11), 5176.
- Hafizi, Z., Aizzuddin, A., Halim, N., & Jamaludin, M. (2017). *Modal properties investigation of car body-in-white with attached windscreen and rear screen*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace sciences*, 91, 99-131.
- Hii, M. S. Y., Courtney, P., & Royall, P. G. (2019). An evaluation of the delivery of medicines using drones. *Drones*, 3(3), 52.
- Inman, D. J. (2017). *Vibration with control*: John Wiley & Sons.
- Kim, I.-H., Jung, H.-J., Yoon, S., & Park, J. W. (2023). Dynamic Response Measurement and Cable Tension Estimation Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 15(16), 4000.
- Kruithof, K. H., & Egeland, M. (2021). *State estimator using hybrid kalman and particle filter for indoor uav navigation*. University of Agder.
- Legovich, Y., Maximov, Y., & Maximov, D. (2020). *Quadcopter vibration damping*. Paper presented at the 2020 13th International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD).
- Meirovitch, L. (1980). *Computational methods in structural dynamics* (Vol. 5): Springer Science & Business Media.
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147.
- Morales, R. M., Turner, M. C., Court, P., Hilditch, R., & Postlethwaite, I. (2014). Force control of semi-active valve lag dampers for vibration reduction in helicopters. *IET Control Theory & Applications*, 8(6), 409-419.
- Oakey, A., Waters, T., Zhu, W., Royall, P. G., Cherrett, T., Courtney, P., . . . Jelev, N. (2021). Quantifying the effects of vibration on medicines in transit caused by fixed-wing and multi-copter drones. *Drones*, 5(1), 22.
- Ortiz Cayón, R. J. (2012). Online video stabilization for UAV. Motion estimation and compensation for unnamed aerial vehicles.
- Perez, M., Billon, K., Gerges, T., Capsal, J.-F., Cabrera, M., Chesné, S., & Jean-Mistral, C. (2022). Vibration energy harvesting on a drone quadcopter based on piezoelectric structures. *Mechanics & Industry*, 23, 20.

- Radkowski, S., & Szulim, P. (2014). *Analysis of vibration of rotors in unmanned aircraft*. Paper presented at the 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- Rahman, S., & Robertson, D. A. (2019). In-flight RCS measurements of drones and birds at K-band and W-band. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 13(2), 300-309.
- Rasid, S. M. R., Mizuno, T., Ishino, Y., Takasaki, M., Hara, M., & Yamaguchi, D. (2019). Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer. *Journal of Sound and Vibration*, 438, 175-190.
- Redde, G., Kulkarni, P., Patil, P., Khedkar, D., & Chopade, J. (2018). Vibration analysis on frame and propeller of drone. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 7(5), 1-10.
- Ren, Y., Zhu, F., Sui, S., Yi, Z., & Chen, K. (2024). Enhancing Quadrotor Control Robustness with Multi-Proportional-Integral-Derivative Self-Attention-Guided Deep Reinforcement Learning. *Drones*, 8(7), 315.
- Shin, Y.-H., Kim, D., Son, S., Ham, J.-W., & Oh, K.-Y. (2021). Vibration isolation of a surveillance system equipped in a drone with mode decoupling. *Applied Sciences*, 11(4), 1961.
- Sundararaj, S., Dharsan, K., Ganeshraman, J., & Rajarajeswari, D. (2021). Structural and modal analysis of hybrid low altitude self-sustainable surveillance drone technology frame. *Materials Today: Proceedings*, 37, 409-418.
- Susilo, A. W., Achmad, W., Sri, N., & David, S. (2013). The effect of geometric structure on stiffness and damping factor of wood applicable to machine tool structure. *International Journal of Science and Engineering*, 4(2), 57-60.
- Verma, & Collette. (2021). *Active vibration isolation system for drone cameras*. Paper presented at the Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems: ICOVP 2019.
- Verma, Lafarga, V., Baron, M., & Collette, C. (2020). Active stabilization of unmanned aerial vehicle imaging platform. *Journal of Vibration and Control*, 26(19-20), 1791-1803.
- Verma, Pradhan, N. K., Nehra, R., & Prateek. (2018). *Challenge and advantage of materials in design and fabrication of composite UAV*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Verma, M., & Collette, C. (2021). Active Vibration Isolation System for Drone Cameras. En: Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems. Lecture in Mechanical Engineering: Springer, Singapore.
- Vreugdenhil, C. B. (1964). Natural frequencies of free vertical ship vibrations. *International Shipbuilding Progress*, 11(122), 458-480.
- Wang, Lu, Q., Zhang, K., & Shao, L. (2023). Design of micro-vibration suppression platform based on piezo-stack array intelligent structure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(4), 799-810.
- Wang, X., Fan, W., Li, X., & Wang, L. (2019). Weak degradation characteristics analysis of UAV motors based on laplacian eigenmaps and variational mode decomposition. *Sensors*, 19(3), 524.
- Yin, Q., Zhao, J., Liu, Y., & Zhang, Y. (2021). The approximate calculation of the natural frequencies of a Stockbridge type vibration damper and analysis of natural frequencies' sensitivity to the structural parameters. *Mechanical Sciences*, 12(2), 863-873.
- You, C., & Zhang, R. (2019). 3D trajectory optimization in Rician fading for UAV-enabled data harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6), 3192-3207.
- Zhou, Y., Chang, S.-H., Wu, S., Cai, X. Y., Tang, L., & Xu, Z. (2018). FFT-APEn analysis for the vibration signal of a rotating motor. *International Journal of Acoustics & Vibration*, 23(2), 203-207.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>