

ELEKTRO-OPTİK YER GÖZLEM UYDULARINDA MİKRO TİTREŞİM İZOLASYON YAKLAŞIMI: PASİF İZOLASYON YÖNTEMLERİ

Mehmet Uçkan¹
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

Ahmet Salih Yiğit²
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Elektro-optik yer gözlem uydularında bulunan hassas faydalı yük; güneş paneli, tepki tekeri ve soğutucu üniteler gibi yardımcı ekipmanların çalışmasından kaynaklanan mikro titreşimlerden etkilenmekte ve faydalı yükün hassasiyetini düşürmektedir. Yapılan çalışmalarda mikro titreşim kaynağını azaltmak adına çeşitli tasarım ve konfigürasyon değişiklikleri ile pasif, aktif, yarı aktif ve hibrit izolasyon mekanizmalarının geliştirildiği görülmektedir. Mikro titreşimin bastırılması adına en fazla üzerinde çalışılan yöntem pasif ve aktif izolasyon mekanizmaları olup ilerleyen yıllarda da bu çalışmaların artarak devam edeceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, elektro-optik yer gözlem uydularının, operasyonel süreçlerinin idamesi sırasında kullanılan, yardımcı ekipmanlarının çalışması esnasında ortaya çıkan mekanik salınımları incelenmekte ve mikro titreşim olarak sınıflandırılan bu salınımların bastırılması amacıyla geliştirilen, yüksek kararlılık ve düşük enerji tüketimi gibi avantajları nedeniyle, pasif izolasyon sistemleri hakkındaki gelişmeler derlenmektedir.

GİRİŞ

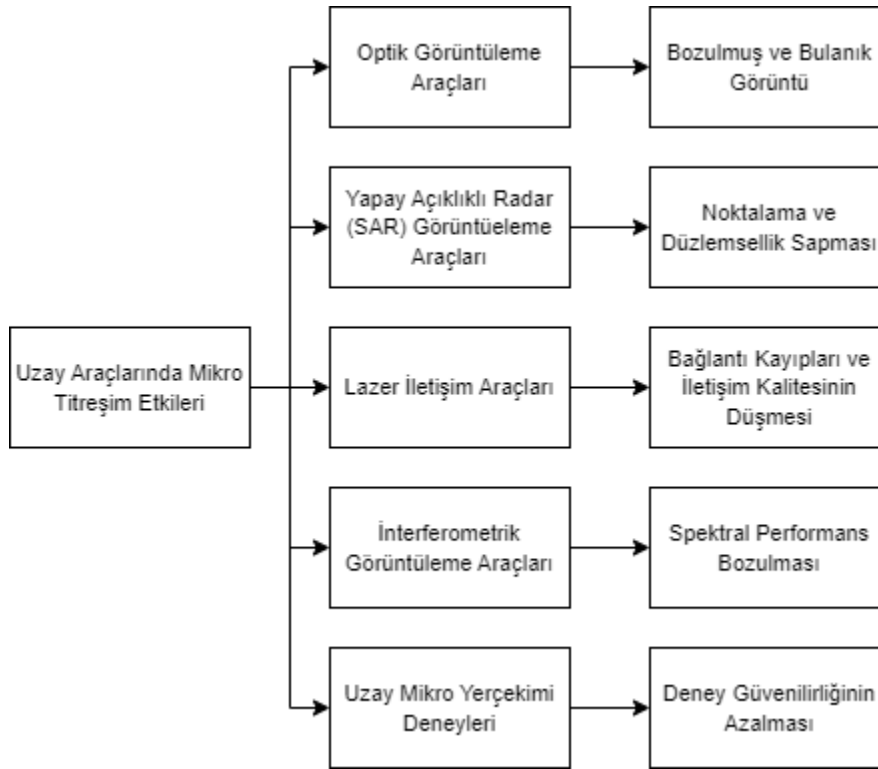
Mikro titreşimlerin, hassas görev yükünün fonksiyonel işlevselliğini engellediği, ilk uzay gözlem aracı olma özelliği ile uzaya gönderilen Hubble Uzay Teleskopunda fark edilmiştir. Teleskop için tasarlanan işaretleme kararlılığı 0,007 açısal saniye iken, teleskopun bilimsel amaçlarla kullanılması gerekliliği, tepki tekerlerinin sürekli çalışmasına, dolayısıyla bu kararlılığın 0,1 açısal saniye değerine gerilemesine neden olmuştur [Davis vd., 1986]. Araştırmalara göre yerden 600 km uzaklıktaki bir uyduda, 1 rad/s irtifa kontrol hatasının karşılığı, 3 m konumlandırma hatası olarak yansımaktadır. Benzer şekilde, optik faydalı yükteki 10 µrad hatanın eşdeğeri ise yerde 500 km konumlandırma hatası olmaktadır [Laskin ve Sirlin, 1986].

Üzerinde kenar çatlağı bulunan dikdörtgen bir plaka için titreşim ve yorulma analizi yapılan bir çalışmada, titreşimin yapısal panellerin ömrü üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir [Shih, 2002]. Bu nedenle uyduların, montaj ve entegrasyon faaliyetleri sonrasında, fırlatma ve görev anında maruz kalacakları mekanik ve ısı yükleri için birtakım testlere tabi tutularak herhangi bir yapısal ve elektriksel fonksiyon kaybı olup olmadığının teyit edilmesi gerekmektedir. [Şahin ve Atak, 2018]. Fırlatma esnasında titreşim ve akustik yüklerin optik teleskop üzerinde de etkileri olacağı için elektro-optik yer gözlem uydularında birincil aynalar bu yüklerle dayanabilecek şekilde tasarlanır. Fakat uzay görevi sırasında tepki tekeri gibi yardımcı mekanizmalardan gelen mikro titreşim, uydu yapısalına zarar vermese de hassas görüntü alma özelliğini ve uydunun lazer iletişim yöntemini kötü yönde etkilemektedir. Bu nedenle elektro-optik yer gözlem uydularının görev yükü beklentileri arttıkça işaretleme performansına negatif etkisi olan yapısal modların azaltılması için izolasyon ve sönümlenme ihtiyacı da artmaktadır [Camelo vd., 2009]. Ayrıca mikro titreşim, Yapay Açıklıklı Radar (SAR) uydularının verimli çalışmamasına ve uzay araçlarında mikro yerçekimi deneylerinin

¹ Mühendis, Doktora Öğrencisi, TUSAŞ – Uzay Sistemleri Entegrasyon ve Test Merkezi, E-posta: mehmet.uckan@tai.com.tr

² Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: asyigit@aybu.edu.tr

gerçekleştirildiği sırada deney sonuçlarında hassasiyet kaybına neden olmaktadır. Mikro titreşimin uzay araçlarındaki çeşitli etkileri, Şekil 1'de belirtilmektedir [Jiao vd., 2023].



Şekil 1: Uzay Araçlarında Mikro Titreşim Etkileri

Günümüzde elektro-optik yer gözlem uyduları üzerinde bulunan optik faydalı yük, uydunun görev süresince çeşitli kaynaklardan gelen mikro titreşimlerden etkilenmekte ve görüntü bozuklukları ile karşı karşıya kalmaktadır [Kim, 2014]. Bu mikro titreşimler; 1 kHz frekansa kadar, düşük genlikli mekanik salınımlar olarak adlandırılmaktadır [Agletti vd., 2004]. Uyduların temel mikro titreşim değeri 0,1 Hz – 300 Hz frekans aralığındadır. Titreşimin, 300 Hz üzerinde olduğu durumlar yüksek frekanslı bozulma olarak sınıflandırılırken 0,1 Hz altındaki titreşim ise düşük frekanslı bozulma olarak sınıflandırılır [Li vd., 2021].

Yüksek çözünürlüklü bir yer gözlem uydusunun çözünürlüğü genellikle 0,5 ila 0,1 m arasındadır. KH-12 uydusu için bu değer 0,1 m iken SuperView-1 uydusunun çözünürlük değeri 0,5 m'dir. Fakat derin uzay araştırma araçları için çözünürlük gereksinimi çok daha yüksektir [Li vd., 2021].

Pozitif konum ve negatif hız geri beslemeli, piezoelektrik aktüatör kullanılarak geliştirilen aktif titreşim izolatörleri ile mikro titreşimin bastırılmasına yönelik yapılan çalışmada; aktif izolasyon sisteminin devre dışı bırakıldığı durumda optik görev yükünden alınan görüntünün bulanık olduğu, aktif izolasyon sisteminin devreye alındığı durumda ise iletilen titreşimin büyük oranda bastırılması sayesinde görüntü kalitesinin iyileştiği görülmektedir [Lee vd., 2011].

Uydularda mikro titreşim kaynakları olarak; hareketli parçalar, sıcaklık farkından kaynaklanan ekipmanlar arasındaki kayma, endüktif elektromanyetik kuvvet ve iticiler sayılabilmektedir [Ullio, 1999]. Belirtilen bu kaynaklara dair frekans aralıkları Tablo 1'de belirtilmektedir [Jiao vd., 2023]. Elektro-optik yer gözlem uydularındaki tepki tekerleri, en önemli mikro titreşim kaynağı olup uydunun hassas işaretleme kararlığı sağlayabilmesi, tepki tekerlerinin yüksek hassasiyette kontrol edilmesini gerektirmektedir [Rosenbecker, 2020]. Mars yörünge kâşifi bünyesindeki Yüksek Çözünürlüklü Görüntüleme Bilim Deneyi (HiRISE) kamerasında, işaretleme kararlılığı üzerindeki en ciddi etki, 1,25 μ rad ile, tepki tekeri balans dengesizliğinden kaynaklanmaktadır [Lee vd., 2003].

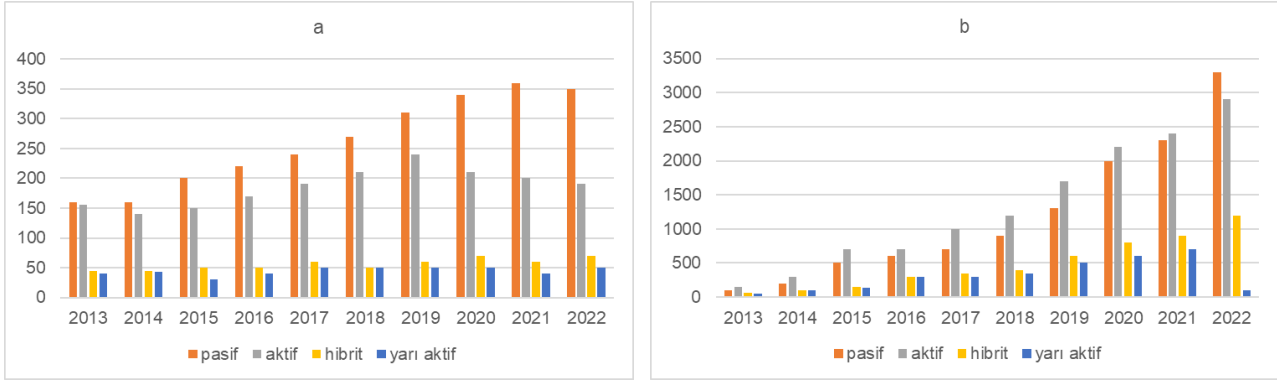
Mikro titreşim, kaynağında oluşturulduktan sonra çeşitli yapılar, bağlantı elemanları ve kırımlar aracılığıyla faydalı yüke iletilebilmektedir. Bu nedenle mikro titreşimin bastırılması için; titreşim kaynağının tasarım değişikliği, faydalı yük hassasiyetinin azaltılması, mikro titreşim iletim yolunun değiştirilmesi ya da mikro titreşim izolasyon sistemlerinin uygulanması sağlanabilir. Mikro titreşim

izolasyon sistemleri ise ya faydalı yük ile uzay aracı arasına ya da titreşim kaynağı ile uzay aracı arasına uygulanabilmektedir [Jiao vd., 2023].

Tablo 1: Uydulardaki Mikro Titreşim Kaynakları

Titreşim Kaynağı	Titreşim Frekansı
Termal Olarak İndüklenen Titreşimler	0,1 Hz' e kadar
İtki Yakıt Sıvısının Çalkalanması	0,1 – 1 Hz
Güneş Paneli Mekanizması	1 Hz
Anten Tahrik Mekanizması	1 – 10 Hz
Güneş Paneli Tahrik Mekanizması	10 Hz
Tepki Teker Mekanizması	10 – 100 Hz
Kriyojenik Soğutucu Ünitesi	100 Hz
Kontrol Moment Jiroskopu	100 – 1000 Hz
Merkezleme Aynası	1000 Hz

Genel olarak, uzay aracının mikro titreşim izolasyonu için; pasif, aktif, yarı aktif ve hibrit olmak üzere dört farklı izolasyon yöntemi sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerden pasif izolasyon yöntemi yüksek kararlılık, güvenilirlik ve performans sunması ile çalışması esnasında enerji ihtiyacı bulunmaması nedeniyle diğer yöntemlerden avantajlı konumdadır. Fakat bu yöntem, düşük frekanslarda beklenen performansı sağlayamamaktadır. Düşük frekanslarda da iyi bir izolasyon performansı sunabilen aktif izolasyon sistemi, güç tüketimi ve kontrol algoritmasına olan bağımlılığı nedeniyle beklenen güvenilirliği karşılayamamaktadır. Hibrit izolasyon sistemlerinde ise aktif ve pasif izolasyon yöntemlerinin avantajlarını birleştirmek hedeflenmiştir. Fakat sistemin karmaşık hale gelmesi, ağırlaşması ve artan maliyetler dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Son olarak yarı aktif izolasyon sistemlerinin geliştirilmesi ile ağırlık azaltma, güvenilirlik ve düşük enerji tüketimi hedeflenmekte buna karşın pasif izolasyon sistemlerindeki gibi düşük frekanslarda düşük performans gözlemlenmektedir [Liu vd., 2015].



Şekil 2: Mikro Titreşim İzolasyonu ile İlgili Çalışmalar a) Yayın Sayısı b) Atıf Sayısı

Şekil 2a ve 2b ile mikro titreşimin bastırılması üzerine yapılan çalışmalar ve atıf sayıları gösterilmektedir. Yapılan çalışmaların günümüze kadar kademeli olarak arttığı görülmekle birlikte gelecek yıllarda da artmaya devam edeceği tahmin edilmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere en çok yayın ve atıf sayısı pasif ve aktif izolasyon sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalara aittir [Yuan vd., 2023].

Sonuç olarak titreşim izolasyon sistemlerinin uygulanması mikro titreşimin bastırılması için gerekli bir uygulama olup hangi yöntemin çalışılması gerektiği avantajların ve dezavantajların gözetilmesi ile ortaya çıkacaktır.

PASİF TİTREŞİM İZOLASYON SİSTEMLERİ

Yüksek işaretleme kararlılığı gerektiren görev yüklerindeki mikro titreşimlerin bastırılmasında genellikle; basit yapıları, kompakt tasarımları ve güvenilirlikleri nedeniyle pasif izolasyon sistemleri

tercih edilmektedir [Stabile vd., 2017]. Ayrıca pasif izolasyon sistemleri düşük enerji tüketimi gibi faydalar da sağlamaktadır [Yuan vd., 2023]. Pasif titreşim izolasyon yöntemlerinden bazıları aşağıdaki gibi listelenmektedir:

- Viskoelastik Malzeme
- Akışkan Viskoz
- Parçacık Sönümlenme
- Ayarlanmış Kütle
- Metal - Kauçuk Sönümlenme
- Katlanmış Yapı
- Sanki Sıfır Sertlik (QZS)
- Yüksek Statik Düşük Dinamik (HSLD)
- Metamalzeme – Metayapı
- Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Pasif titreşim izolasyon yöntemlerini lineer ve lineer olmayan yöntemler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Tablo 2’de her iki yöntemin farkı karakterlere göre performans ve gereksinimleri görülmektedir [Yuan vd., 2023].

Tablo 2: Lineer ve Lineer Olmayan Yöntemlerin Performans ve Gereksinimleri

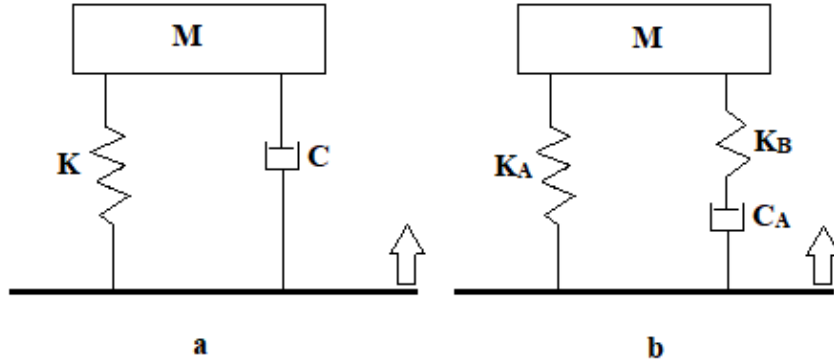
Karakteristik	Lineer	Lineer Olmayan
Doğal Frekans	Yüksek	Düşük
Tepe Değeri	Yüksek	Yüksek
Enerji Tüketimi	Yok	Yok
Sensör ve Aktüatör İhtiyacı	Yok	Yok
Uygulama	Kolay	Zor
Güvenilirlik	Yüksek	Düşük
Kararlılık	Yüksek	Düşük
Sağlamlık	Yüksek	Düşük

Lineer Pasif İzolasyon Metodu

Bu yöntem ile geliştirilen mekanizmalar, mikro titreşimlerin bastırılması için en basit yöntem olarak sınıflandırılabilir. Sistem, ilk modelleme yaklaşımı açısından lineer olmasına rağmen lineer olmayan davranış sergileyebilmektedir. Bu yöntem üzerine yapılan çalışma sayısı kısıtlı olup iki ya da üç parametrelili izolasyon sistemleri ile katlanmış yapı sönümlenme yöntemleri geliştirilmiştir [Yuan vd., 2023]. Mikro titreşim altındaki gerinimi çok düşük olduğundan dolayı viskoelastik malzemenin doğrusal olmayan davranışları ortaya çıkmamaktadır. [Shi, vd., 2014]. Bu nedenle viskoelastik malzemeler ile geliştirilen izolasyon sistemlerinin bazıları lineer pasif izolasyon metodu olarak incelenmektedir.

Büyük bir tepki tekeri için geliştirilen çok eksenli titreşim izolasyon sistemine, yüksek performans sağlanması için yapılan çalışmada, Şekil 3b ile belirtilen üç parametrelili bir mekanizma tasarlanmıştır. Bu mekanizmanın, Şekil 3a ile belirtilen geleneksel iki parametrelili bir yaklaşımdan önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiği belirtilmektedir. Bu yüksek performanslı, akışkan viskoz esaslı titreşim izolasyon sistemi, doğal frekanslar için maksimum sönümlenme ve yüksek frekanslar için azaltılmış sönümlenme sunmaktadır. Genel olarak izolatörün doğal frekansı ne kadar düşükse izolasyon performansı o kadar iyidir. Tasarımın en önemli parçası, doğal frekansta yüksek amplifikasyonu önleyen ve titreşimi azaltan, sönümleyicidir. Sönümleyicinin akışkan sıvısı, halka

boyunca kolayca hareket edebilir. Bu hareket enerjisi dağıtabilmektedir. Bu tasarımın, iki parametrelilik izolasyon sistemine göre farkı ise ikincil körüklerdir. İkincil körük sayesinde doğal frekans 1,5 Hz'e düşürülmektedir. Bu tasarımla maksimum titreşim izolasyonu, düşük frekansta, 60 dB seviyesine ulaşmış ve bu izolasyon mekanizması, Honeywell firmasının ticari markası olarak tescil edilerek Hubble Uzay Teleskopunda kullanılmıştır [Davis, 1994].



Şekil 3: (a) İki ve (b) Üç Parametrelilik Titreşim İzolasyon Sistemleri

Davis ve arkadaşları [Davis vd., 1996] sonraki çalışmalarında, STRV-2 uzay aracı için titreşim izolasyonu (VISS) programı kapsamında, mevcut üç parametrelilik lineer titreşim izolasyon sistemini geliştirmek adına aktif bir lineer manyetik aktüatör ile birleştirilerek hibrit izolasyon sistemi geliştirmişlerdir. Aktif bileşenin sisteme eklenmesi sayesinde geniş bant titreşim izolasyonu sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca sistemde, dinamik sertlik değerinin sistem rezonansında yeterli sönümlenme sağlayabilmesi için statik sertlik değerinin yaklaşık 9 kat daha büyük olması gerektiği belirtilmektedir. Bu sayede sistemin pasif izolasyon bileşeninde, büyük oranda sönümlenme sağlanması ve aktif bileşeni arızalansa da pasif bileşenin titreşim izolasyon görevini sürdürmesi amaçlanmaktadır. Sistemin güvenilirliği bu sayede artmaktadır. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre sistemin pasif bileşeni 10 Hz ve üzeri frekanslarda sönümlenme sağlarken aktif bileşenin devreye girmesi ile 5 Hz ve üzeri frekanslarda 20 dB değerinden daha yüksek sönümlenme sağlanmaktadır.

Bir diğer çalışmada ise geliştirilen üç parametrenin incelendiği D-Strut™ izolasyon sisteminde akışkanın hareketini de hesaba katarak dört parametrelilik bir model geliştirilmiştir. Akışkan olarak hidrolik sıvının kullanıldığı sistem lineer davranış sergilemektedir. Bu çalışmada ayrıca pnömatis akışkanın kullanıldığı bir başka konfigürasyonda, pnömatis havanın sıkıştırılabilmesi nedeniyle, lineer olmayan davranış sergileyen sistemin lineer hale dönüştürülmesi ve diğer sistemler ile karşılaştırması yapılmıştır. Üç ve dört parametrelilik hidrolik izolasyon modelinde Davis ve arkadaşları tarafından VISS programı kapsamında geliştirilen model ile aynı parametre değerleri kullanılmıştır. Benzer şekilde pnömatis modelin dinamik parametreleri de VISS modeli ile uyumluluk içerisinde. Bunlara ilave olarak sıvı nominal kütlelerinin 10 kat artırıldığı durum da kıyaslanmak üzere incelenmiştir. Sonuçlar her üç model için eş yüksek frekans değerinde benzer performans sergilemektedir. Düşük frekans değerlerinde ise yaklaşık 3 dB varyasyon farkı mevcuttur. Sıvı kütlelerinin artması durumunda ise kütle etkisine bağlı olarak rezonans tepe noktası oluşmaktadır [Wilson ve Wolk, 1997].

CARTOSAT-2 uydusunun tasarım kriterlerini esas alarak, tepki tekerinden gelen mikro titreşimleri bastırmayı amaçlayan çalışmada, araştırmacılar, dört tek katlı ortogonal kirişten oluşan katlanmış yapıyı nümerik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Katlanmış yapının yatay kirişleri dikey kirişlerine göre daha kalın ve daha serttir. Dairesel olarak 90° açı ile yerleştirilmiş dört kirişin bir ucu mikro titreşim kaynağına diğer ucu doğal frekansı 200 Hz'den büyük olan bir zemine bağlanmıştır. Katlanmış yapı kıvrımların titreşim iletimi üzerindeki etkisini görmek ve titreşim izolatörünün tasarımını hassas bir şekilde yapabilmek için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonrası belirlenen tasarıma göre katlanmış yapıya ait kirişler üretilmiş ve tepki tekerinin farklı hızlarda çalıştırılması ile izolatörlü ve izolatörsüz sistem, zeminden alınan kuvvet, moment ve ivme ölçümleri ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tepki tekerinin farklı hızlarda çalışması ile farklı frekans seviyelerine ait titreşim değerleri alınarak tepe değerleri bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre, F_x kuvvet bileşeni için en yüksek bozulma, 1.73×10^{-4} N²/Hz değeri ile 1800 rpm ve 30 Hz frekansta görülmüştür. İzolatör uygulandıktan sonra bu sonuç 8.13×10^{-6} N²/Hz değerine

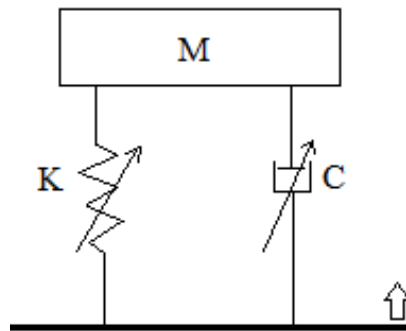
gerilemiştir. Benzer durum tüm eksenlerdeki kuvvet, moment ve ivme değerleri için de görülmüştür. Sonuç olarak, bu tür bir çalışmanın mikro titreşim azaltma yeteneğine sahip olduğu ve yalnızca tepki tekeri düzeneği için değil, aynı zamanda uzay araçlarındaki diğer mikro titreşim kaynakları için de uygulanabilir olduğu belirtilmektedir [Kamesh vd., 2010].

Oh ve arkadaşları [Oh vd., 2012] uydu soğutucu mekanizmasından gelen mikro titreşimleri ve fırlatma anındaki titreşimleri izole etmek adına yaptıkları çalışmada pasif izolasyon yöntemini önermiş ve birtakım testler ile doğrulamıştır. Mikro titreşim yalıtımı elde etmek için tasarlanan sistem, helezon yaylardan ve yüksek sönümlmeli plastik malzemeden yapılmış bir mekanik sınırlayıcıdan oluşur. Plastik malzeme, fırlatma ortamında kompresörün yanal yön hareketinde, kompresör transfer hattını izin verilen sapma aralığı içinde korumak adına uzay tarihçesine sahiptir. Mekanik mil de aynı plastik malzeme ile kaplanmıştır. Bu çalışmada, izolasyon sistemi tasarımının fırlatma şartlarına göre doğrulanması adına titreşim ve şok testleri yapılmıştır. Yapılan testlerde en yüksek ivmelenmenin 30 Hz altında gerçekleştiği ve plastik malzemenin yüksek frekanslardaki ivmelenmeyi güçlü bir şekilde sönümlendiği, ayrıca iletim hattında görülen deplasmanın, ± 3 mm tolerans içerisinde kalarak, 2 mm ile sınırlı olduğu görülmüştür. Şok testlerinde ise kompresöre iletilen şok seviyesinin, izolasyon sisteminin etkinliği sayesinde büyük ölçüde azaltıldığı, birinci ve ikinci modların kompresörün çalışma frekansından düşük olduğu ve gözle yapılan kontrollerde herhangi bir deformasyon olmadığı saptanmıştır. Söz konusu izolasyon sisteminin performans testleri, kompresörün bozulma düzeyini belirleyebilmek adına; rijit, 0 g ve 1 g olmak üzere üç farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Rijit bağlantı koşulu altında, 36 Hz frekans seviyesinde en yüksek genlik 1,46 N ile y-ekseninde görülürken 0 g koşullarında genlik 0,3 N olarak kaydedilmiştir. Diğer eksenlerdeki bozulmanın, y-eksenine göre çok küçük kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak 0 g koşulu altında gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, rijit bağlantılı kompresörle kıyaslandığında bozulma seviyesinin 4,42 kat azaldığı belirtilmektedir.

Henüz uzay aracındaki mikro titreşim izolasyonu alanında viskoelastik malzeme kullanımı için sınırlı sayıda araştırma yayınlanmıştır. Viskoelastik izolasyon malzemesi tasarlanarak kontrol moment jiroskopundaki mikro titreşimleri azaltmayı hedefleyen çalışmada tekli gimbal kontrol moment jiroskopunun mikro titreşim karakteristiği çıkarılarak uygun bir izolatör modellenmiş ve parametre optimizasyonu ile bu model geliştirilerek 40 Hz üzerindeki frekans bozukluklarının altı serbestlik derecesinde izole edilebildiği gösterilmiştir. İzolatör tasarımına sönümlenmenin eklenmesi ile izolasyon performansının önemli ölçüde artırılabilirliği belirtilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasında hassasiyet analizi yapılarak parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece optimizasyonun tüm serbestlik derecelerinde en az %32,41 oranında iyileştirme sağladığı görülmüştür. Bu çalışmanın tepki tekerine de uygulanabileceği aktarılmaktadır [Shi, vd., 2014].

Lineer Olmayan Pasif İzolasyon Metodu

İzolasyon sistemlerindeki lineer olmayan sönüm ve sifıra yakın direnç gibi lineer olmayan davranış sergileyen elemanlar, mükemmel izolasyon performansı ve kararlılık özelliklerine sahip olduğu gibi geniş bir frekans aralığındaki titreşim izolasyonu için uygundur [Liu vd., 2014]. Lineer olmayan pasif izolasyon mekanizması, Şekil 4 ile şematik olarak belirtilmiştir.



Şekil 4: Lineer Olmayan Titreşim İzolasyon Sistemi

Geleneksel olarak sönümlemedeki artış, rezonanstaki tepkiyi azaltabilir. Ancak bu durum, genellikle, yüksek frekanslarda izolasyonun bozulmasına neden olur. Bu problemin üstesinden

gelmek için bazı optimizasyon yöntemleri önerilmiştir. Öte yandan, titreşim izolasyon sisteminin performansını arttırmak adına lineer olmayan sistemlerin kullanılmasının da düşünülmesi gerektiği, araştırmacıların dikkatini çekmiştir [Jing vd., 2009].

Safarabadi ve arkadaşları [Safarabadi vd., 2019] yaptıkları çalışmada farklı kaynaklarından gelen mikro titreşim etkilerinin elektro-optik yer gözlem uydusunun görüntü kalitesini etkilememesi adına kameranın yalıtılmasını amaçlamış ve tamamen viskoz, tamamen elastik davranışın karışımını sergileyen viskoelastik sönüm elemanı geliştirilmiştir. Viskoelastik malzemelerin doğası gereği frekansa bağlı olarak özellikleri değişmektedir. Çalışmada uydunun katı model tasarımı üzerinde 4 adet RW90 modeli tepki tekeri yerleştirilmiştir. Tepki tekerinin 3000 rpm çalışma hızında oluşan kuvvetler 0,05 N değerinin altında kalırken baskın titreşim frekanslarının 65 Hz ve 80 Hz olduğu belirtilmektedir. Titreşim izolasyon yöntemi olarak kamera bileşeni altına, lineer olmayan davranış sergileyen, Sorbothane titreşim izolasyon pedi kullanılmıştır. İzolasyon yöntemi olarak kamera altını kaplayacak şekilde yalıtım ile sadece dört köşe noktasından yalıtım şeklinde iki farklı yöntem belirlenmiştir. Sistemin izolasyonlu ve izolasyonsuz davranışı ABAQUS yazılımı ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda dört köşeden uygulanan yöntemin daha iyi sonuç verdiği, Sorbothane izolasyon pedlerinin, diğer elastomere göre daha yüksek performansa sahip olmasına rağmen düşük frekanslarda sönümlenme özelliklerinin zayıf olduğu ve izolasyon uygulanan sistemin izolasyon uygulanmayan sisteme göre, titreşimi x, y ve z eksenlerinde, sırasıyla; %98, %99,2 ve %99,5 oranında mükemmel bir şekilde azaltmayı başardığı kaydedilmiştir.

Hassas cihazların izolasyonunda kullanılan bir yöntem olarak hava yastıklarının incelendiği çalışmada ise araştırmacılar teorik bilginin simülasyon ile doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir. Kapalı bir hacim olarak tasarlanan elastik membran özellikli izolasyon sistemi hassas görev yükünü titreşimlerden izole etmeyi amaçlamaktadır. Sistemin performans kriteri olarak sertlik değerine yoğunlaşılan çalışmada, kapalı hacim, hava basıncı, elastik membranın mekanik özellikleri, tasarım kısıtları gibi parametrelerin sistemin sertlik değerine etkileri incelenmektedir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre membran içindeki hava basıncı arttıkça elastik membranın sertlik değeri artmaktadır. Bununla birlikte membran tasarımında yapılacak iyileştirmeler, malzeme sertliğinin azaltılması için daha elverişlidir [Zhao vd., 2020].

Bir diğer yöntem ise metamateryaller kullanılarak geliştirilen pasif izolasyon sistemleridir. Metamateryaller, 2001 yılında DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) tarafından öne sürülen, doğada veya metamateryali oluşturan malzemelerde gözlenemeyen olağanüstü malzeme özellikleri sunan kompozit bir yapıdır [Sun vd., 2010].

Bugüne kadar, özellikle mikro titreşimin bastırılması adına titreşim izolatörü geliştirilmesi için metamateryallerin kullanımına ilişkin az sayıda literatür çalışması bulunmasına rağmen, gelecekte mikro titreşim izolasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılacağına inanılmaktadır [Yuan vd., 2023].

Elastik eleman olarak negatif Poisson oranına sahip ve sönümlenme elemanı olarak viskoelastik malzemeler içeren bir yapı tasarımına dayanan çalışmada, mikro düzeydeki rezonans genliğini etkili bir şekilde bastırabilen, yüksek frekanslarda titreşim izolasyon etkisini koruyabilen ve frekans bağımlı sönümlenme özelliklerine sahip pasif titreşim izolatörünün geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda düşük negatif Poisson oranına sahip elastik bir metamateryal yapısına dayanan hacim içerisine viskoelastik sönümlenme malzemeleri doldurulmuş ve frekans bağımlı sönümlenme özelliklerine sahip yeni bir titreşim izolatörü önerilmiştir. Yapılan çalışmada enerji dağılımı, statik ve dinamik özellikler hem sonlu elemanlar simülasyonu hem de deneysel testlerle analiz edilmiştir. Sonuç olarak, metayapının içine doldurulan viskoelastik malzemenin, titreşim süreci boyunca yanal yönde artan sıkıştırma ve gerilime sahip olması sayesinde viskoelastik kauçuğun enerjisi daha etkili bir şekilde dağıtması sağlanmış ve titreşim izolatörünün genel sönümlenme özellikleri iyileştirilmiştir [Wu vd., 2022].

Pasif titreşim izolasyon yöntemlerinden bir başka yaklaşım fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılarak geliştirilen sistemlerdir. Bu malzemeler, homojen olmayan mikro yapıdan kaynaklanan malzeme özelliklerinde sürekli bir değişiklik gösterir. Bu özelliklerinden dolayı, son yıllarda havacılık, biyomalzemeler ve mühendislik de dahil olmak üzere birçok alandaki

araştırmalar arasına girmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, malzeme özelliklerinin konumla sürekli değişmesine imkân sağlamaktadır [Bohidar vd., 2014]. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin titreşim kontrolüne ilişkin araştırmalar, malzemenin yaygın olarak uygulanmasıyla yoğun ilgi görmüştür [Li vd., 2019].

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

İzolasyon sistemlerine olan ihtiyaç, daha yüksek işaretleme kararlılığı gereksinimiyle giderek artmaktadır. Pasif izolasyon sistemi teorik olarak yaklaşık -40 dB/dec değerine ulaşabilmektedir [Jiao vd., 2023]. Lineer olmayan pasif izolasyon yöntemleri; avantajlı izolasyon performansları, yüksek güvenilirlikleri ve harici enerji girişinin olmaması nedeniyle büyük bir potansiyele sahip olabilirler. Ancak bazı lineer olmayan pasif izolatörler, kararsızlık ve yüksek lineer olmayan davranışları sebebiyle, izolasyon performansını düşürebilmektedir. Bu nedenle tasarım ve analiz süreçleri zordur. Ayrıca geliştirilen yöntemlerin birçoğu tek eksenli titreşim izolasyonu üzerine çalışmaktadır. Fakat titreşimin 6 serbestlik dereceli olduğu göz önüne alınarak çok yönlü pasif izolasyon sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir [Yuan vd., 2023]. Son olarak geliştirilen izolasyon sistemlerinden az bir kısmı uzay kalifiye uygulamadır. Bu nedenle üzerinde çalışılan modellerin uzay şartlarına uyumu analize edilerek değerlendirilmelidir [Jiao vd., 2023].

Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre bazı pasif titreşim izolasyon sistemlerine ait performans göstergeleri Tablo 3'de belirtilmektedir.

Tablo 3: Bazı Pasif Titreşim İzolasyon Sistemlerine ait Performans Göstergeleri

Pasif İzolasyon Sistemleri	Performans
Akışkan Viskoz Sönümlenme	75% oranında titreşim zayıflatma [Meng vd., 2018]
Akışkan Viskoz Sönümlenme	48% oranında titreşim zayıflatma [Qin vd., 2020]
Akışkan Viskoz Sönümlenme	- 60 dB [Davis, 1994]
Katlanmış Yapı	- 13 dB [Kamesh vd., 2010]
Viskoelastik Malzeme Sönümlenme	69.0% oranında titreşim zayıflatma [Chen vd., 2020]
Viskoelastik Malzeme Sönümlenme	- 80 dB [Kawak, 2017]
Viskoelastik Malzeme Sönümlenme	%32,41 oranında titreşim zayıflatma [Shi, vd., 2014]
Viskoelastik Malzeme Sönümlenme	x, y ve z eksenlerinde sırasıyla %98, %99,2 ve %99,5 oranında titreşim zayıflatma [Safarabadi vd., 2019].
Parçacık Sönümlenme	98.8% oranında titreşim tepe noktası zayıflatma [Kevelaer, 2016]
Metamalzeme	Sönüm oranı 0,5 olduğu zaman 26% oranında titreşim zayıflatma [Syam et al., 2018]

SONUÇ

Gelişen teknoloji ihtiyaçları, uydu misyonlarını daha da artırmaktadır. Bu kapsamda gerek bilimsel gerek askeri ve sivil gözlem amaçları doğrultusunda görev yükü kazandırılan uzay araçlarında, optik kararlılık gereksinimleri, çeşitli kaynaklardan gelen mikro titreşim etkilerinin azaltılmasını veya bastırılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapılan izolasyon çalışmaları ile elektro-optik yer gözlem uydularının işaretleme kararlılığının iyileştirilmesi sayesinde, uydunun performansı da artmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, yüksek güvenilirlik ve düşük enerji tüketimi gibi faydaları sayesinde, araştırma sahası geniş olan pasif titreşim izolasyon sistemlerine olan ilgi, gün geçtikçe artmaktadır. Mikro titreşimin bastırılmasına yönelik çalışmalarda birden fazla parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışılan yöntem üzerindeki avantaj ve dezavantajları analiz ederek uygun bir izolasyon mekanizmasının geliştirilmesi hedeflenmelidir. Mikro titreşim izolasyonu üzerine çok sayıda çalışmanın başarılı bir şekilde yürütülmesine rağmen daha verimli bir mikro titreşim izolasyonu sağlamak için; izolasyon performansı, harici enerji girişi, sistemin kararlılığı ve ağırlığı gibi özelliklerinin kapsamlı bir şekilde ele alınarak iyileştirilmesi ve genişletilmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- Agletti, G., Langley, R., Gabriel, S., 2004. *Model building and verification for active control of microvibrations with probabilistic assessment of the effects of uncertainties*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part C-J. Eng. Mech. Eng. Sci, Vol. 218(4), s.389–399
- Bohidar, S. K., Sharma, R., Mishra, P. R., 2014. *Functionally Graded Materials: A Critical Review*. International Journal of Research (IJR), Vol.1, s. 289-301
- Camelo, V., Bronowicki, A., Simonian, S., Hejal, R., Brennan, S., 2009. *Damping and Isolation Concepts for Vibration Suppression and Pointing Performance*. 50th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 4-7 Mayıs 2009, Palm Spring, California, A.B.D.
- Chen, S., Xuan, M., Xin, J., Liu, Y., Gu, S., Li, J., Zhang, L., 2020. *Design and Experiment of Dual Micro-Vibration Isolation System for Optical Satellite Flywheel*. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 179, s. 105592
- Davis, L. P., Wilson, J. F., Jewel R. E., Rodon, J. J., 1986. *Hubble Space Telescope Reaction Wheel Assembly Vibration Isolation System*. Damping 1986 Proceeding, Vol.1, s. BA-1
- Davis, L. P., 1994. *Advanced 1.5 Hz Passive Viscous Isolation System*. 35th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Güney Carolina, Nisan
- Davis, T., Davis, L.P., Sullivan, J. M., Hoffman, T., Das, A., 1996. *High Performance Passive Viscous Isolator Element for Active/Passive (Hybrid) Isolation*. Smart Structures and Materials 1996: Passive Damping and Isolation, Vol.2720, s. 281-292
- Jiao, X., Zhang, J., Li, W., Wang, Y., Ma, W., Zhao, Y., 2023. *Advances in Spacecraft Micro-Vibration Suppression Methods*. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 138, s. 100898
- Jing, X. J., Lang, Z. Q., 2009. *Frequency Domain Analysis of a Dimensionless Cubic Nonlinear Damping System Subject to Harmonic Input*. Nonlinear Dyn., Vol. 58, s. 469-485
- Kamesh, D., Pandiyan, R., Ghosal, A., 2010. *Passive Vibration Isolation of Reaction Wheel Disturbances Using a Low Frequency Flexible Space Platform*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, s.1310-1330
- Kawak, B. J., 2017. *Development of a Low-Cost, Low Micro-Vibration CMG for Small Agile Satellite Applications*. Acta Astronautica, Vol. 131, s. 113-122
- Kevelaer, v. N., 2016. *Development of a Particle Damping Solution for PC-Boards in CubeSats*. Naval Postgraduate School
- Kim, D. K., 2014. *Micro-Vibration Model and Parameter Estimation Method of a Reaction Wheel Assembly*. Journal of Sound and Vibration, Vol.333, s.4214-4231
- Laskin, R. A., Sirlin, S.W., 1986. *Future Payload Isolation and Pointing System Technology*. J. Guidance, Vol.9, No.4, s. 469-477
- Lee, S.W., Skulsky, E.D., Chapel, J., Cwynar, D., Gehling, R., 2003. *Mars Reconnaissance Orbiter Design Approach for High-Resolution Surface Imaging*. In: Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference, 5 9 February, Breckenridge, CO, s. 509-528
- Lee, D. O., Kang, H. Y., Han, J. H., 2011. *Active Vibration Isolation Demonstration System Using the Piezoelectric Unimorph with Mechanically Pre-stressed Substrate*. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, Vol. 22, s. 1399-1409
- Li, J., Xue, Y., Li, F., Narita, Y., 2019. *Active Vibration Control of Functionally Graded Piezoelectric Material Plate*. Composite Structures, Vol. 207, s. 509-518
- Li, L., Wang, L., Yuan, L., Zheng, R., Wu, Y., Sui, J., Zhong, J., 2021. *Micro-Vibration Suppression Methods and Key Technologies for High-Precision Space Optical Instruments*. Acta Astronautica, Vol. 180, s. 417-428
- Liu, C., Jing, X., Daley, S., Li, F., 2014. *Recent Advances in Micro-Vibration Isolation*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 56-57, s. 55-80
- Meng, G., Dong, Y. H., Zhou, X. B., Shen, J. F., Liu, X. T., 2019. *Research on Micro-Vibration Control and Testing of FY-4 Meteorological Satellite*. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, Vol. 49, s. 024508
- Oh, H. U., Lee, K. J., Jo, M. S., 2012. *A Passive Launch and On-Orbit Vibration Isolation System for the Spaceborne Cryocooler*. Aerospace Science and Technology, Vol. 28, s.324-331

- Qin, C., Xu, Z., Xia, M., He, S., Zhang, J., 2020. *Design and Optimization of the Micro-Vibration Isolation System for Large Space Telescope*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 482, s. 115461
- Rosenbecker, L., 2020. *Vibration Attenuation for Satellite Reaction Wheels through the use of Field-Oriented Control*. MSc Thesis, TFRT-6119, ISSN 0280-5316, s. 1-73
- Safarabadi, M., Izi, H., Haghshenas, J., Kellardeh, H. K., 2020. *Design of Micro-Vibration Isolation System for a Remote-Sensing Satellite Payload Using Viscoelastic Materials*. Engineering Solid Mechanics, Vol.8, s.69-76
- Shekhar, N, C., Hatwal, H., Mallik, A, K., 1998. *Response of Non-Linear Dissipative Shock Isolators*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 214(4), s. 589-603
- Shi, S., Li, D., Luo, Q., 2014. *Design and dynamic analysis of micro-vibration isolator for Single Gimbal Control Moment Gyro*. Procedia Engineering 99 s. 551 – 559
- Shih, Y., Wu, G., 2002. *Effect of vibration on fatigue crack growth of an edge crack for a rectangular plate*. Int. J. Fatigue, 24(5), s. 557–566
- Stabile, A., Aglietti, G, S., Richardson, G., Smet, G., 2017. *A 2-Collinear-Dof Strut with Embedded Negative-Resistance Electromagnetic Shunt Dampers for Spacecraft Micro-Vibration*. Smart Mater. Struct., Vol. 26, s. 1-11
- Sun, H., Du, X., Pai, P., 2010. *Theory Of Metamaterial Beams for Broadband Vibration Absorption*. J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 21, s. 1085–1101
- Syam, P. W., Jianwei, W., Zhao, B., Maskery, I., Elmaidh, W., Leach, R., 2018. *Design and Analysis of Strut-Based Lattice Structures for Vibration Isolation*. Precision Engineering, Vol. 52, s. 494-506
- Şahin, M., Atak, A., 2018. *Uzay Araçları ve Uydularda Titreşim Testleri ve Test Süreçleri*. VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, UHUK-2018-135, s.1-11
- Ullio, R., Marta, F., 1999. *Artemis micro-vibration environment prediction*, Proc. Eur. Conf. Spacecraft Struct. Mater. Mech. Test, Vol. 428, s.489–495
- Wilson, G. W., Wolke, P.J., 1997. *Performance Prediction of D-Strut Isolation Systems*. SPIE, Vol. 3045, s.236-250
- Wu, Z., Li, H., Kong, X., Deng, Z., 2022. *A Novel Design of Vibration Isolator with High and Frequency Dependent Damping Characteristics Based on A Large Negative Poisson's Ratio (LNPR) Structure*. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.186, s.109818
- Yuan, Z., Zhang, Z., Zeng, L., Li, X., 2023. *Microvibration Isolation in Sensitive Payloads: Methodology and Design*. Nonlinear Dyn., Vol.111, s. 19563-19611
- Zhao, Y., Cui, J., Bian, X., Zou, L., Liang, S., Wang, L., 2020. *Study on Performance of an Air Spring Isolator for Large-Scale Precision Optical Micro-Vibration Isolation*. ICITEE 2020, December 03–05 2020, Changde City, Hunan, China