

TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOPU İÇİN TİTREŞİM YALITIMI SİSTEMİ TASARIMI

Erinç Odabaş¹, Mehmet Çalışkan²

¹ MEZZO Stüdyo Ltd, İstanbul, Türkiye

Tel: 216 330 11 88 e-posta: erinc@mezzostudio.com

² MEZZO Stüdyo Ltd, İstanbul, Türkiye

Tel: 216 330 11 88 e-posta: prof.mehmetcaliskan@gmail.com

ÖZET

Son derece hassas cihazların titreşimli uyarılar gibi çevresel etkenlerden korunması oldukça zor bir konudur. Pasif titreşim yalıtımı sistemlerinin tasarımı, bu tip durumlar için alternatif çözüm senaryolarından bir tanesidir. Bu çalışmada; KOÇ Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına kurulması planlanan “Odaklanmış – iyon – ışını/Taramalı Elektron Mikroskopu (FIB/SEM) için bir pasif titreşim yalıtımı sistemi sunulmaktadır. Çalışmanın asıl amacı; yüzer döşeme altında viskoelastik mesnetler kullanarak döşeme yüzeyinde titreşim deplasmanı ve ivme öngörülerinin üretici firmanın belirlediği titreşim kriterlerinin altında kalmasını sağlamaktır. Kullanım kolaylığı ve ekonomik olması gibi öne çıkan özellikleri olsa da; dinamik yükler altında sergilediği doğrusal olmayan davranışları sebebiyle viskoelastik malzemelerin dinamik modellemeleri zor bir konudur. Tasarımı doğrulayıcı saha ölçümlerinden önce; yalıtım sistemi parametrelerinin belirlenmesi için sayısal analizlerle desteklenmiş bir kuramsal analiz yöntemi tercih edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim yalıtımı, viskoelastik malzemeler, teorik analiz, sayısal analiz

VIBRATION ISOLATION SYSTEM DESIGN FOR A SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

ABSTRACT

It is a challenging quest to protect highly sensitive equipment from environmental disturbances such as vibratory excitation. Passive vibration isolation system design is one of the solution alternatives to such phenomenon. Passive isolation systems are introduced for a Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscope (FIB/SEM) that are scheduled to be installed at Central Research Laboratory in KOÇ University. Main purpose of the study is to utilize viscoelastic bearings under a floating floor slab in order to maintain vibration displacements and accelerations below specified vibration criteria by the equipment manufacturer. While ease of application and cost of elastomers come forward as an advantage, non-linear behavior under dynamic loads makes it difficult to model the system. In order to determine system parameters; a theoretical model, promoted with numerical analysis results, is preferred as the design approach before in-situ measurements are performed to confirm analysis results.

Keywords: *Vibration isolation, viscoelastic materials, theoretical analysis, numerical analysis*

1. GİRİŞ

Yüksek çözünürlüklü ölçüm ve görüntüleme cihazlarının çevresel titreşim etkileşimlerinden etkin bir şekilde yalıtılması günümüzde anahtar rol oynamaktadır. Bu açık gereksinimi karşılamak için günümüzde bir çok pasif ve aktif titreşim yalıtımı yönetmi geliştirilmiştir [1, 2]. Bu çalışmada yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskopu için önerilen titreşim yalıtımı sistemi uygulamasının tasarımı ve analizine ait yöntemler ve değerlendirmeler yer almaktadır.

2. GÖRÜNTÜLEME CİHAZI TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Çalışmada yer alan görüntüleme cihazı; nano ölçekli hassas işleme için, iyon optiği ile birlikte düşük voltajlarda yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlayan, odaklı iyon ışını, (FIB) taramalı elektron mikroskobu (SEM) 'dur. Pratik büyütmesi, 0.2µm garantili bir görüntü çözünürlüğü sağlamak için yaklaşık 285.000x' tir. Elektromanyetik alan ve hava doğuşumlu sestten etkilenmemesi için getirilen sınırlamalarının yanı sıra, görüntü işleme sırasında oluşacak bozulmalardan da etkilenmemesi için zemin kaynaklı yapısal titreşimlerin belli düzeylerin altında tutulması gerekmektedir. Yapısal titreşim için getirilen sınır değerler Tablo 1' de sunulmaktadır.

Tablo 1. Görüntüleme cihazı için tanımlanmış yapısal titreşim kriterleri

Yön	Frekans limitleri		Titreşim deplasmanı/ivmesi için tanımlanmış izin verilen en yüksek değer
	Alt limit	Üst limit	
Yatay	1 Hz	15 Hz	1.0 µm p-p - deplasman
	15 Hz	20 Hz	0.2 µm p-p - deplasman
	20 Hz	40 Hz	0.3 cm/s ² - ivme
	40 Hz	110 Hz	0.8 cm/s ² - ivme
	110 Hz	200 Hz	0.3 cm/s ² - ivme
Düşey	1 Hz	4 Hz	1.0 µm p-p - deplasman
	4 Hz	20 Hz	0.8 µm p-p - deplasman
	20 Hz	40 Hz	0.5 cm/s ² - ivme
	40 Hz	200 Hz	1.2 cm/s ² - ivme

Cihazın yerleştirileceği alan, KOÇ Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarı binasının bodrum katı olarak belirlenmiştir. Kurulum öncesinde cihazın ana biriminin yerleştirileceği alan temel betonuna kadar kazılmış olup cihazın oturacağı grobeton kütlesi geri kalan temel betonundan dilatasyon yolu ile yapısal olarak kopartılmıştır. Kazı ile oluşturulan çukurun ve bodrum kat döşeme betonunun katmanları Şekil 1' de gösterilmektedir.

3. UYGULAMA YERİNDE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÖN TİTREŞİM TESTLERİ

Tanımlı titreşim kriterleri göz önünde bulundurularak, cihaz yerleşiminin yapılacağı çukur içinde (MP1 – bkz. Şekil 1) ve çevresindeki döşeme betonu (MP2 – bkz. Şekil 1) üzerinde titreşim parametreleri düzeylerinin belirlenebilmesi için 21 Mayıs 2019 tarihinde Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda saha testleri yapılmıştır. Ölçümler, üretici tarafından atanan bir uzman tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapısal titreşim ölçümleri, elektro-manyetik alan ve hava doğuşumlu ses düzeyi ölçümleri ile birlikte gerçekleştirilmiş olup ölçümlerde Spicer consulting electron beams & electronic systems firmasına ait aşağıda tarif edilen ölçüm cihazları kullanılmıştır.

1. EXTECH INSTRUMENTS Sayısal ses düzeyi ölçer (kalibrasyon tarihi: 26.11.2018)
2. Wilcoxon 731A ivme ölçer (kalibrasyon tarihi: 08.08.2018, ulusal standartlar ve teknoloji enstitüsü)
3. Sensor SC24/DC+AC (kalibrasyon tarihi: 26.11.2019)
4. SC11/SI (kalibrasyon tarihi: 26.11.2018 - manyetik, titreşim, mikrofon ve yardımcı girişler)

Bodrum katından cihaz ana ünitesi için açılan çukur içinde grobeton üzerine ivmeölçer yerleştirilerek elde edilen titreşim sinyalin tipik anlık zaman geçmişinin spektral analizi gerçekleştirilmiştir. Ölçümler;

1. Test esnasında, kayda değer bir dış etkenin bulunmadığı zaman aralığında alınan titreşim sinyali (NS – normal sinyal)
 2. Cihaz için açılan çukur etrafında yürüyerek oluşturulan olumsuz dış etkenin varlığında alınan titreşim sinyali (FFS – yürüme esnasında alınan sinyal)
- toplayacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Test programı ve veri parametrelerinin ayrıntılı bir açıklaması Tablo 2’ de sunulmuştur. Frekans çözünürlüğü ve örnekleme veri noktası sayısı, cihaz için tanımlanmış titreşim kriterlerinin bant sınırlarına göre belirlenmiştir. Yapılan titreşim ölçümlerine göre test sonuçları MP1 ölçüm noktası için Tablo 3’ te sunulmuştur.

Tablo 2. Test programı ve veri parametreleri

Test noktası	Sinyal tipi	Ölçülen parametre		Frekans spektrumu parametreleri				
				Frekans limitleri		Frekans çizgisi sayısı	Çözünürlük	Nicelleştirme
MP1 & MP2	NS & FFS	deplasman	[µm p-p]	0.04Hz	20Hz	2000	0.01Hz	İnce (fine)
		ivme	[mm/s ²]	0.25Hz	200Hz	800	0.25Hz	İnce (fine)

Tablo 3. MP1 noktasında alınan ölçüm sonuçları

Yön	Frekans limitleri		İzin verilen en yüksek titreşim limit değeri	Ölçülen sinyal tipi			
	Alt limit	Üst limit		Normal sinyal (NS) (ölçülen en yüksek)	Yürümede alınan sinyal [FFS] (ölçülen en yüksek)		
Yatay (x-ekseni)	1 Hz	15 Hz	1.0 µm p-p	0.021 µm p-p	✓	0.015 µm p-p	✓
	15 Hz	20 Hz	0.2 µm p-p	0.052 µm p-p	✓	0.048 µm p-p	✓
	20 Hz	40 Hz	0.3 cm/s ²	0.464 cm/s ²	×	0.480 cm/s ²	×
	40 Hz	110 Hz	0.8 cm/s ²	0.085 cm/s ²	✓	0.072 cm/s ²	✓
	110 Hz	200 Hz	0.3 cm/s ²	0.027 cm/s ²	✓	0.064 cm/s ²	✓
Yatay (y-ekseni)	1 Hz	15 Hz	1.0 µm p-p	0.008 µm p-p	✓	0.023 µm p-p	✓
	15 Hz	20 Hz	0.2 µm p-p	0.008 µm p-p	✓	0.009 µm p-p	✓
	20 Hz	40 Hz	0.3 cm/s ²	0.287 cm/s ²	✓	0.345 cm/s ²	×
	40 Hz	110 Hz	0.8 cm/s ²	0.180 cm/s ²	✓	0.155 cm/s ²	✓
	110 Hz	200 Hz	0.3 cm/s ²	0.021 cm/s ²	✓	0.068 cm/s ²	✓
Düşey (z-ekseni)	1 Hz	4 Hz	1.0 µm p-p	0.010 µm p-p	✓	0.024 µm p-p	✓
	4 Hz	20 Hz	0.8 µm p-p	0.024 µm p-p	✓	0.016 µm p-p	✓
	20 Hz	40 Hz	0.5 cm/s ²	0.986 cm/s ²	×	0.915 cm/s ²	×
	40 Hz	200 Hz	1.2 cm/s ²	1.454 cm/s ²	×	1.282 cm/s ²	×

Ölçüm sonuçlarının tanımlı kriterlerin üzerinde çıkması sebebi ile NX5000 taramalı elektron mikroskopu için bir titreşim yalıtım sistemi geliştirilmiştir.

4. GÖRÜNTÜLEME CİHAZI İÇİN TİTREŞİM YALITIM SİSTEMİ TASARIMI

Titreşime hassas bir cihazın, dış titreşim etkenlerinden yalıtılması için günümüzde en son teknolojiye ilişkin çeşitli yöntemler ve titreşim yalıtım malzemeleri/bileşenleri bulunmaktadır. En çok kullanılan tekniklerden biri, ekipmanı pasif titreşim yalıtıcıları ile çevresinden izole etmektir. Bu yalıtım; çelik(mekanik) yaylı yalıtım elemanları, hava yayları, viskoelastik (elastomer) sönümleyiciler gibi yalıtım elemanları ile gerçekleştirilir. Genellikle yalıtım sisteminin rezonans frekansları etrafında kesin bir titreşim kontrolünün gerekli olduğu durumlarda, özel yalıtım sistemlerinden birisi olan aktif yalıtım sistemlerinin kullanılması gerekebilir.

Çelik yaylı yalıtım elemanları ve hava yayları kendi doğaları gereği; çok düşük bir sönümlenme bileşeni ile birlikte çok düşük bir doğal frekansa sahip yalıtım sistemleri oluşturabilirler. Sistemin doğal frekansı bu kadar kolay bir şekilde düşürülerek (1 Hz'e kadar), yüksek frekans içeriğine sahip dış etkenler için daha yüksek titreşim yalıtımı özellikleri elde edilebilir. Fakat yalıtım elemanının tek başına kullanılması halinde, sağlanan doğal frekans etrafında yeterli bir titreşim kontrolü sağlayamaz. Öte yandan, viskoelastik sönümleyiciler (elastomerler), yüksek sönümlenme özelliklerinden dolayı yalıtım sisteminin doğal frekansları etrafında titreşimi kontrol etmek için çok kullanışlıdır. Ancak, yay izolatörlerinin ve hava yaylarının aksine; elastomer malzemeler kullanım ve montaj kolaylıklarına karşın sistemin doğal frekansını çok düşük frekanslara düşüremezler.

Yalıtım elemanı tipinin belirlenmesindeki diğer hususlar, yalıtım sistemi ve malzemelerinin uygulama maliyeti ve kolaylığıdır. Maliyete bağlı olarak, viskoelastik sönümleyiciler diğer pasif izolasyon sistemlerine ve malzemelere kıyasla daha ekonomiktir. Bu özel durumda, titreşim probleminin doğası, yalıtım sisteminin getireceği doğal frekanslar etrafında sağlanması gereken titreşim kontrolü ve uygulamanın maliyeti göz önüne alındığında, titreşim yalıtım sisteminin tasarımında viskoelastik sönümleyiciler kullanılmıştır.

4.1. Titreşim yalıtım sistemi için kullanılan analiz yöntemi

Titreşim yalıtımı problemini çözmek ve cihazın kurulacağı zemin yüzeyindeki titreşim düzeylerini tahmin etmek için analitik yöntemler kullanılmıştır. Yalıtım sistemi modeli ile ilgili oluşturulan varsayımlar ve uygulanan analitik yöntem kapsamındaki hesaplama prosedürleri aşağıda açıklanmıştır:

1. Tasarım yönteminin ana kapsamı, belirli bir dış etken girdisi için titreşim yalıtım sisteminin tepkisini analitik/sayısal olarak hesaplayarak, zemin yüzeyindeki titreşim özelliklerini öngörmektir.
2. Zemin titreşimleri, sahada gerçekleştirilen titreşim ölçümleriyle elde edilmiştir. Titreşim sinyalleri cihazın kurulumunun yapılacağı konum için iki noktada toplanmıştır (bkz. Şekil 1). İlk ölçüm (MP1) doğrudan ekipmanın kurulacağı grobeton katmanında (kazılan çukurdaki izolasyon levhası üzerinden) gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm ise (MP2), cihazın kurulacağı çukurun etrafında, laboratuvarındaki betonarme döşeme üzerinde bir noktadan alınmıştır. Ölçülen sinyaller analitik modelin girdi verileridir.

3. Titreşim yalıtım probleminin çözümü, bir kütle yay sistemi oluşturarak ana kütleli (ekipman ve altında kalacak olan yüzer döşeme betonu) etrafındaki yapı elemanlarından (cihaz ve yüzer döşeme betonunun yerleştirileceği çukuru saran zemin katmanları) viskoelastik sönümleyiciler vasıtasıyla ayırmak şeklinde olacaktır.
4. Viskoelastik malzemelerin dinamik direngenlik değerleri bir çok fiziksel parametreyle (uyarı frekansı, sıcaklık, form faktörü, malzeme üzerine uygulanan statik/dinamik sıkışma veya çekme kuvveti) doğrusal olmayan bir ilişki içinde değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple mesnetlerin yük altındaki fiziksel davranışı, güvenilir uluslararası bir üreticinin malzeme üzerinde gerçekleştirdiği yük testlerinden elde edilen sayısal sonuçlara dayanarak oluşturulmuştur.
5. Analitik modelin şematik gösterimi, Şekil 2' de (x-z kesit düzlem görüntüsü) sunulmuştur.
 - a. Titreşim yalıtım sistemi, yalıtım elemanları üzerinde yüzen kütleli (cihaz + yüzer döşeme betonu) toplanmış parametrelili modeli olarak tasarlanmıştır [3].
 - b. Titreşim özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmek için, 3 doğrusal yer değiştirme eksenini (x_1, x_2, x_3) ve toplam kütleli merkezi (CofM) etrafında 3 dönme ekseninden ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) oluşan 6 serbestlik dereceli bir yalıtım sistemi modeli oluşturulmuştur.
 - c. Analitik model, girdi olarak ölçüm sonuçlarının dikkate alınmasıyla yüzer döşeme betonu yüzeyindeki titreşim düzeylerini öngörebilmek için gerekli transfer fonksiyonlarını oluşturmaktadır. Yüzer döşeme betonu hem altına yerleştirilecek mesnetler ile grobeton ile temas halinde iken hem de yan yüzeylerine yerleştirilebilecek yalıtım elemanları ile bodrum kat döşemesi ile etkileşim halinde olabilir. Bu sebeple yüzer döşeme üzerinde öngörülecek frekans cevabı, bu iki farklı zeminden alınacak titreşim sinyalleri ile zeminler ve yüzer döşeme arasında oluşturulacak transfer fonksiyonlarının çarpımına eşit olacaktır. Burada doğrusal sistem varsayımı yapılarak her iki zemine gelen titreşim sinyallerinin yüzer döşeme üzerinde sebep olacağı frekans cevapları süperpozisyon ile toplanarak sonuç frekans cevabı elde edilmiştir [4]. Beton yüzeyinde öngörülecek olan titreşim parametreleri ile girdi olarak kullanılacak olan ölçüm sinyalleri arasındaki ilişki aşağıda sunulmuştur.

$$Z_i(f, z) = \sum_{k=1}^3 \{H^i_k(f, x, y^1, z) * y^1_k + H^i_k(f, x, y^2, z) * y^2_k\} \quad (1)$$

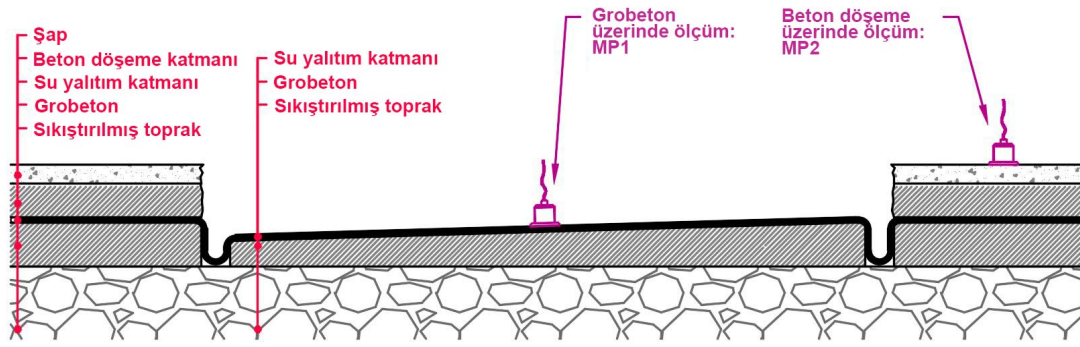
$Z_i(f, z)$: Yüzer döşeme betonu üzerinde elde edilecek olan (i) eksenli yönünde analitik model sonucu. $i = 1$ (x-ekseni), $i = 2$ (y-ekseni), $i = 3$ (z-ekseni)

$H^i_k(f, x, y^1, z)$: Yüzer döşeme betonu üzerinde i yönünde elde edilen analitik model sonucu ile y^1 girdi verisinin k yönündeki bileşenin arasındaki ilişkiyi temsil eden transfer fonksiyonu. $i, k = 1$ (x-ekseni), $i, k = 2$ (y-ekseni), $i, k = 3$ (z-ekseni)

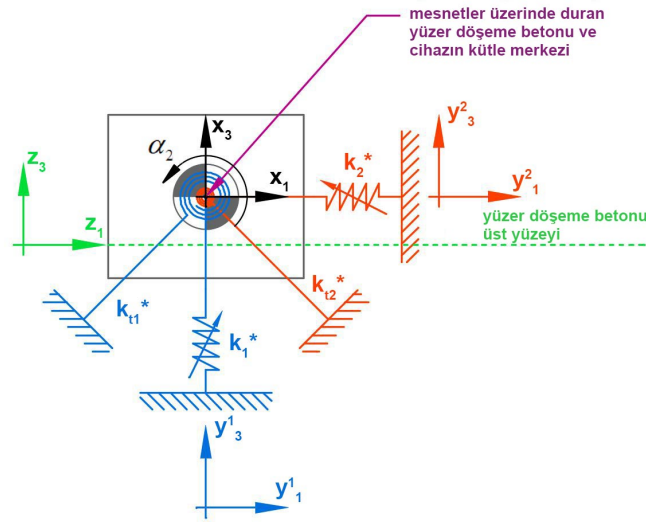
$H^i_k(f, x, y^2, z)$: Yüzer döşeme betonu üzerinde i yönünde elde edilen analitik model sonucu ile y^2 girdi verisinin k yönündeki bileşenin arasındaki ilişkiyi temsil eden transfer fonksiyonu. $i, k = 1$ (x-ekseni), $i, k = 2$ (y-ekseni), $i, k = 3$ (z-ekseni)

y^1_k : grobeton üzerinde ölçülen titreşim sinyalinin k yönündeki bileşeni. $k = 1$ (x-ekseni), $k = 2$ (y-ekseni), $k = 3$ (z-ekseni)

y^2_k : cihazın yerleştirileceği çukur çevresinde döşeme betonu üzerinde ölçülen titreşim sinyalinin k yönündeki bileşeni $k = 1$ (x-ekseni), $k = 2$ (y-ekseni), $k = 3$ (z-ekseni)



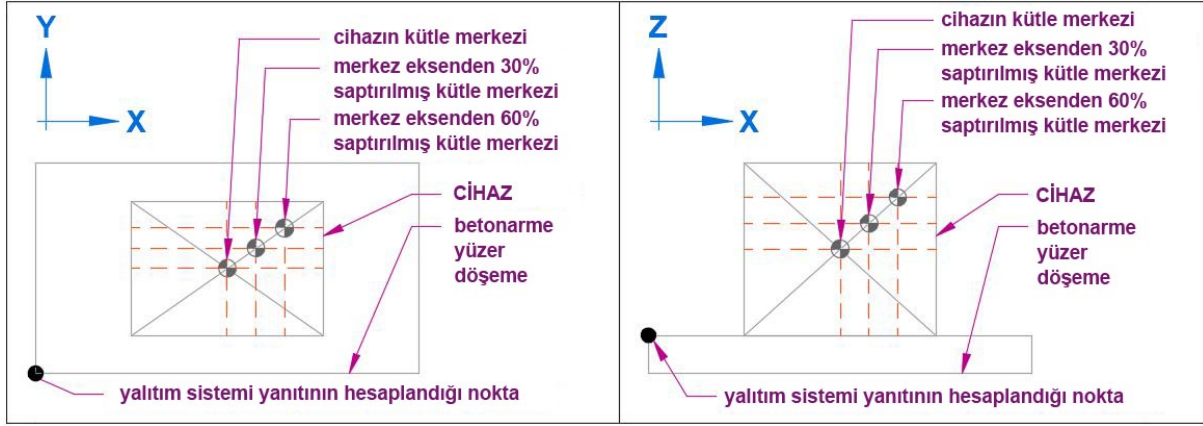
Şekil 1. Cihaz ve yüzer döşemenin oturacağı çukur ve titreşim sinyali ölçüm noktalarının şematik gösterimi



Şekil 2. Titreşim yalıtım sisteminin şematik gösterimi ($x_1 - x_3$ kesit düzlemi)

- x_i : Yalıtım sistemin kütle merkezinin koordinat eksenleri. $i = 1$ (x-ekseni), $i = 2$ (y-ekseni), $i = 3$ (z-ekseni)
- y^1_i : Yüzer döşeme betonu altında yer alan grobetonun titreşim hareketinin koordinat eksenleri. $i = 1$ (x-ekseni), $i = 2$ (y-ekseni), $i = 3$ (z-ekseni)
- y^2_i : Cihazın yerleşeceği yüzer döşeme betonu çevresinde kalan bodrum kat betonarme döşemesinin titreşim hareketinin koordinat eksenleri $i = 1$ (x-ekseni), $i = 2$ (y-ekseni), $i = 3$ (z-ekseni)
- z_i : Yüzer döşeme yüzeyi titreşim hareketinin koordinat eksenleri. $i = 1$ (x-ekseni), $i = 2$ (y-ekseni), $i = 3$ (z-ekseni)
- α_i : Yalıtım sisteminin kütle merkezinin dönme hareketi koordinat eksenleri. $i = 1$ (x-ekseni etrafında), $i = 2$ (y-ekseni etrafında), $i = 3$ (z-ekseni etrafında)
- k^*_i : i numaralı zemine bağlı viskoelastik sönümleyicilerin karmaşık direngenliği. $i = 1$ (grobetona bağlı sönümleyiciler için), $i = 2$ (yüzer döşeme ile bodrum kat döşeme betonu arasında kalan sönümleyiciler için)
- k_{ti}^* : i numaralı zemine bağlı viskoelastik sönümleyicilerin dönme hareketi karmaşık direngenliği. $i = 1$ (grobetona bağlı sönümleyiciler için), $i = 2$ (yüzer döşeme ile bodrum kat döşeme betonu arasında kalan sönümleyiciler için)

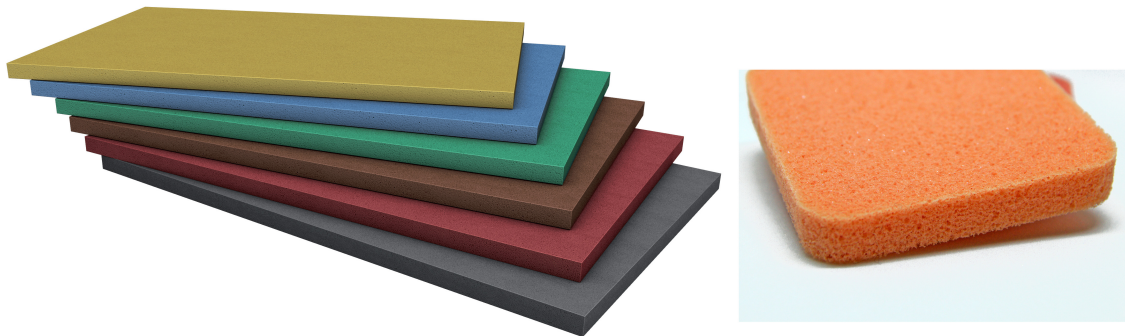
6. Analitik tasarım yöntemi toplanmış parametrelili model olarak oluşturulduğundan, cihaz ve cihazın altında kalan yüzer döşeme betonunun yük altındaki elastik deformasyonu göz ardı edilmiştir. Bununla birlikte, yüzer döşeme betonunun elastik deformasyonunun, oluşturulan toplanmış parametrelili model dinamiklerine olan etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile kontrol edilmiştir.
7. İlk analiz, cihazın kütle merkezi ile yüzer döşeme kütle merkezinin z eksenini doğrultusunda hizalı olduğu varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Fakat cihazın kütle merkezi tam olarak tayin edilemediğinden ötürü cihaz kütle merkezinin merkez eksenden farklı miktarlarda sapması (bkz. Şekil 3) göz önünde bulundurularak ikinci bir analiz daha gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Cihaz kütle merkezinin farklı noktalarda olabileceği öngörüsü ile hazırlanan kütle merkezinin merkez eksenden sapmasının şematik gösterimi

4.2. Viskoelastik sönümleyici özellikleri

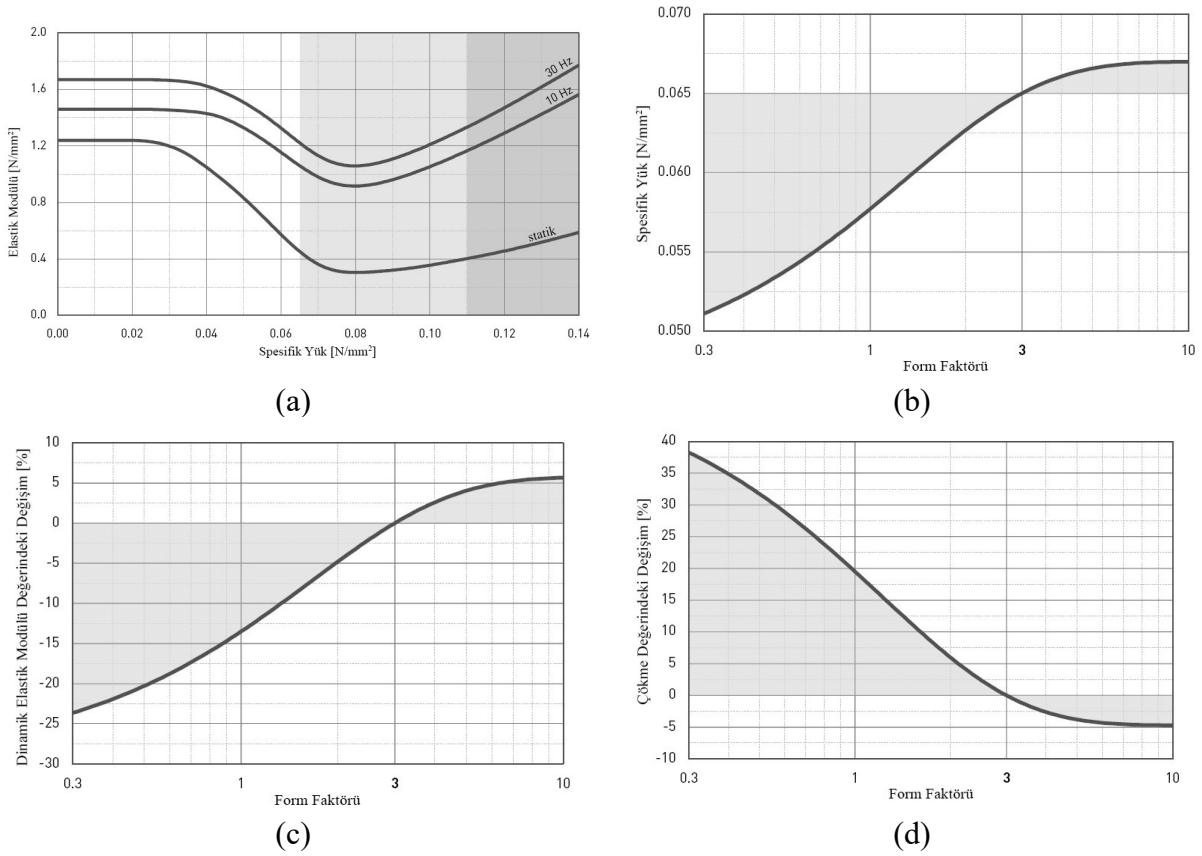
Analizde kullanılan karışık hücresel polieter ürethan bazlı viskoelastik sönümleyiciler şilte halinde üretilmekte olup, optimizasyon sonucunda elde edilen sönümleyici geometrisine (bkz. Tablo 4) göre su jeti ile kesilerek elde edilmiştir (bkz Şekil 4). Şekil 5' te grafiksel gösterimi verilen; basma yüküne ek olarak kesme yükü altında da malzemenin dinamik/statik elastik modüllerinin değişiminin, form faktörüne bağlı malzemenin taşıma kapasitesi, elastik modülü ve çökme değerlerindeki değişimi değerlerinin sayısal verileri üretici firma tarafından temin edilmiştir.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan sönümleyici şilte örneği

Tarafımıza sağlanan sayısal verilerden yola çıkılarak, yukarıda özetlenen tasarım yöntemi doğrultusunda yüzer döşeme altında kullanılacak olan sönümleyici mesnet modellerinin form faktörü ve taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu bilgiler göz önünde bulundurularak sistemin doğal frekansını olabildiğince düşürebilmek için bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda belirlenen mesnet geometrisi ve form faktörüne göre dinamik elastik modülü değerleri elde edilmiştir.

Üretici firmadan sadece statik ve 10Hz ile 30Hz frekanslarında uygulanan dinamik yük altında mesnet üzerindeki toplam yüke göre elastik modülü değerleri sağlanabilmiştir. Elastik modülü değerlerinin geniş bir frekans aralığında uygulanan dinamik yük altındaki değişimini gösteren veriler mevcut olmadığı için analizlerde mesnetlerin 10Hz frekansında uygulanan dinamik yük altındaki elastik modülü değerleri temel alınmıştır.



Şekil 5. Viskoelastik sönümleyicinin karakteristik eğrileri, (a): statik ve dinamik sıkışma yükü altında malzemenin elastik modülü eğrisi; (b): Mesnetin form faktörüne göre taşıma kapasitesi; (c): Mesnetin form faktörüne göre dinamik elastik modülündeki değişim; (d): Mesnetin form faktörüne göre sıkışma yükü altındaki çökme değerindeki değişim

4.3. Titreşim yalıtım sisteminin analiz sonuçları

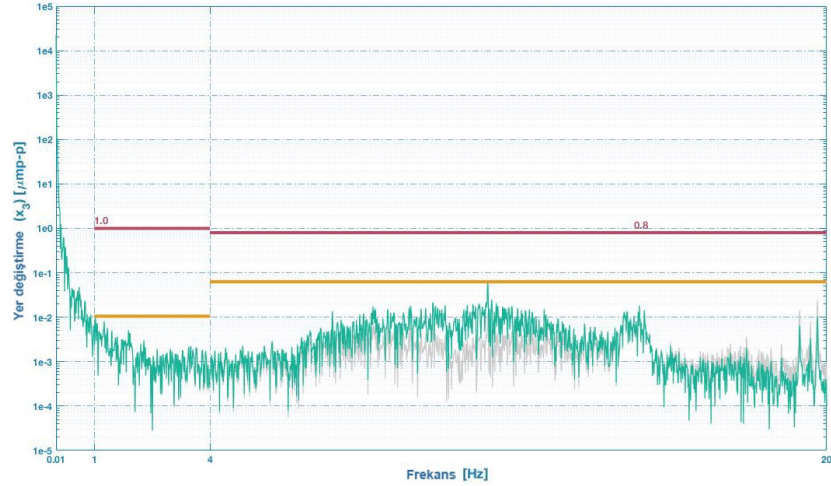
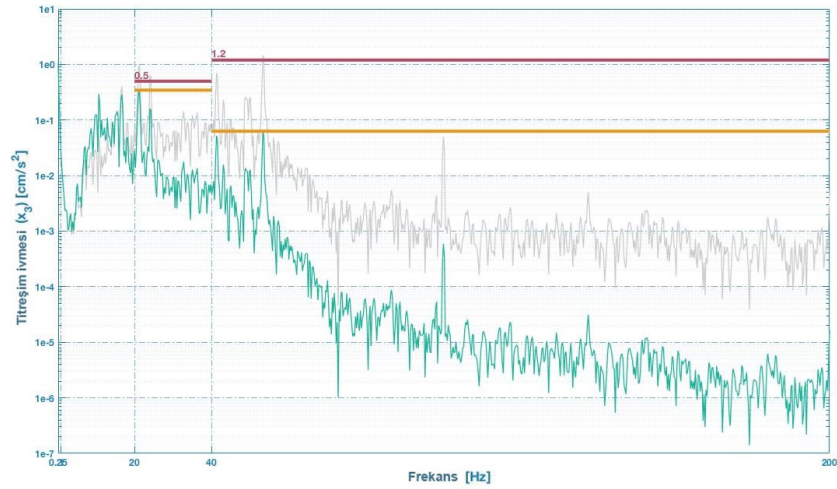
Yukarıda sunulan önkabuller ve tasarım yöntemleri doğrultusunda oluşturulan analitik modelinde kullanılan tüm parametreler Tablo 4’ te sunulmuştur. Bu parametreler doğrultusunda analitik model sonuçları Tablo 5 ve Şekil 6 ve 7’ de gösterilmektedir.

Tablo 4. Analitik model parametreleri

YÜZER DÖŞEME PARAMETRELERİ					
Döşeme malzemesi	Çelik hasır ile güçlendirilmiş beton				
Döşeme betonu taşıyıcı kaidesi	Aluminyum				
	Genişlik (x-ekseni) [mm]	Uzunluk (y-ekseni) [mm]	Yüksekli k (z-ekseni) [mm]	Kalınlık [mm]	Özkütle [kg/m ³]
Döşeme betonu boyutları	2100	2460	142.8	-	~2400
Cihaz altında yükseltilmiş kaide boyutları	1492	1833	100	-	~2400
Döşeme betonu taşıyıcı kaidesinin boyutları	2120	2480	152.8	10*	~2300
SÖNÜMLEYİCİ ÖZELLİKLERİ					
Sönümleyici malzemesi	Elastomer				
Malzeme bileşeni	Karışık hücresel Polieter üretan				
Mesnet form faktörü	1.05				
Statik yük kapasitesi	0.058 [N/mm ²] q=1.05 form faktörü için				
Dinamik yük kapasitesi	0.098 [N/mm ²] q=1.05 form faktörü için				
Mekanik kayıp faktörü	0.18 (22oC oda sıcaklığında, statik yük kapasitesinde)				
Toplam mesnet sayısı	16				
Yalıtım elemanı ızgara sisteminde x eksenini doğrultusunda sönümleyici sayısı	4				
Yalıtım elemanı ızgara sisteminde y eksenini doğrultusunda sönümleyici sayısı	4				
Mesnetler arası mesafe (x-ekseni)	630mm				
Mesnetler arası mesafe (y-ekseni)	750mm				
x-ekseni yönünde doğal frekans	6.5 Hz (cihaz kütlesi hariç)				
y-ekseni yönünde doğal frekans	6.5 Hz (cihaz kütlesi hariç)				
z-ekseni yönünde doğal frekans	14.8 Hz (cihaz kütlesi hariç)				
	Genişlik (x-ekseni) [mm]	Uzunluk (y-ekseni) [mm]	Yüksekli k (z-ekseni) [mm]	Kalınlık [mm]	Özkütle [kg/m ³]
Mesnet boyutları	210	210	-	2x25	-

Tablo 5. Analitik model sonuçları

Yön	Frekans [Hz]		İzin verilen en yüksek titreşim ivmesi değeri [cm/s ²]	Yalıtım sistemi yanıtı sonuçları [cm/s ²]			
	Alt limit	Üst limit		Cihaz + CofM eksen yüzey döşeme betonu kütlesi	CofM eksen sapması 30%	CofM eksen sapması 60%	Azaltılmış kayıp faktörü 20%
Yatay (x-ekseni)	20	40	0.3	0.030	0.091	0.099	0.099
	40	110	0.8	0.000	0.005	0.008	0.008
	110	200	0.3	0.000	0.000	0.000	0.000
Yatay (y-ekseni)	20	40	0.3	0.019	0.033	0.029	0.028
	40	110	0.8	0.001	0.002	0.002	0.002
	110	200	0.3	0.000	0.000	0.000	0.000
Düşey (z-ekseni)	20	40	0.5	0.301	0.346	0.394	0.392
	40	200	1.2	0.056	0.061	0.067	0.067

**Şekil 6.** Analitik model sonucu titreşim yer değiştirmesi frekans spektrumu – z eksen**Şekil 7.** Analitik model sonucu titreşim ivmesi frekans spektrumu – z eksen

- : ölçülen titreşim sinyali
— : cihaz yerleşimi sonrasında yüzer döşeme betonunda öngörülen titreşim ivmesi
— : izin verilen en yüksek titreşim ivmesi
— : analiz sonucunda kriterin tanımlandığı frekans bandlarında öngörülen en yüksek titreşim ivmesi

5. TEŞEKKÜRLER

Bildiri yazarları; bu çalışmada yardımlarını gördükleri Koç Üniversitesi, Merkezi Araştırma Altyapıları Yöneticisi Sn. Doç.Dr. Burak Birkan' a ve Koç Üniversitesi İnşaat Direktörlüğü Bölümüne, İnşaat Direktörü Sn. Mualla Kayaçetin ve proje koordinatörü Sn. Cantürk Kulaçoğlu'na teşekkür eder. Elastomer özelliklerinin edinilmesi konusundaki yardımları için Sn. Buğra Yazgı ve DAMTEC'e şükranlarını bildirirler.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, hassas bir görüntüleme cihazının dış titreşimsel etkenlerden etkilenmemesi için gerekli olan titreşim yalıtım sisteminin tasarımı ve analizleri sunulmuştur. Elde edilen öngörüler ışığında, yüzer döşeme yüzeyinde oluşacak yapısal titreşimin tanımlı cihaz kriterlerinin altında kaldığı görülmüştür.

Cihaz kütle merkezinin geometrik olarak tayin edilememesi, titreşim yalıtım sisteminin frekans cevabında bir belirsizliğe yol açmaktadır. Bunu gidermek için önerilen 2 farklı kütle merkezi noktası için elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında da öngörülen titreşim yer değiştirmesi ve ivmesi değerlerinin kriterlerin altında kaldığı öngörülmüştür.

7. KAYNAKLAR

- [1] Schmid, M., Varga, P., Analysis of Vibration-isolating Systems for Scanning Tunneling Microscopes, Ultramicroscopy 42 – 44, North-Holland, pp. 1610-1615, 1992
- [2] Rivin, E., Vibration Isolation of Precision Equipment, Elsevier Science Inc. Precision Engineering No.17, NewYork, pp. 41-56, 1995
- [3] Harris, C, M., Piersol, A., G., Shock and Vibration Handbook, fifth edition, McGRAW-HILL, pp. 60-86, 2002
- [4] Bendat, J., S., Piersol, A., G., Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, Wiley & Sons, USA, pp. 288-206, 1980