



Deposited via The University of Sheffield.

White Rose Research Online URL for this paper:

<https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/192119/>

Version: Published Version

---

**Proceedings Paper:**

Terzioglu, F. and Sanliturk, K.Y. (2017) Analysis and optimization of tuned mass dampers attached to structures via an efficient method. In: iTiK, M., (ed.) Proceeding of 18th National Symposium on Theory of Machines. 18th National Symposium on Theory of Machines, 05-07 Jul 2017, Trabzon, Turkey. Turkish Machine Theory Association, pp. 82-90. ISBN: 9786058422032.

---

© 2017 The Authors. Reproduced with permission from the copyright holder.

**Reuse**

Items deposited in White Rose Research Online are protected by copyright, with all rights reserved unless indicated otherwise. They may be downloaded and/or printed for private study, or other acts as permitted by national copyright laws. The publisher or other rights holders may allow further reproduction and re-use of the full text version. This is indicated by the licence information on the White Rose Research Online record for the item.

**Takedown**

If you consider content in White Rose Research Online to be in breach of UK law, please notify us by emailing [eprints@whiterose.ac.uk](mailto:eprints@whiterose.ac.uk) including the URL of the record and the reason for the withdrawal request.

## Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin Etkin Bir Yöntemle Yapılara Eklenmesi, Analizi ve Optimizasyonu

F. Terzioğlu\*  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İstanbul

K.Y. Şanlıtürk†  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İstanbul

**Özet**—Ayarlı Kütle Sönümleyiciler(AKS) yapılarıdaki yüksek genlikli titreşimlerin kontrol edilmesi için sıkça kullanılmaktadır. Ancak, tek serbestlik dereceli sistemlerdeki durumdan farklı olarak, çok serbestlik derecesine sahip sistemlerde AKS'lerin optimizasyonu kolay değildir. Bu çalışmada, AKS eklenmiş yapıların analizinin ve AKS'lerin optimizasyonunun kolayca yapılabilmesine olanak sağlayan bir yöntem kullanılmıştır. Bu amaca yönelik olarak kullanılan yöntem, yapısal değişiklik yaklaşımına dayanmakta olup, doğal frekansları ve mod şekilleri hesaplanmış olan bir yapıya bir veya daha fazla AKS eklenmesi durumunda yapının Frekans Tepki Fonksiyonlarının çok ekonomik bir şekilde hesaplanabilmesine imkan tanımaktadır. Bu yöntemin uygulanması endüstriyel bir yapı örneği ele alınarak sunulmuş, ilgilenilen titreşim modu için AKS'li yapının analizleri ve sönüm optimizasyonuna ilave olarak, bir AKS'nin birden fazla titreşim moduna sağlayacağı sönümün optimizasyonunun nasıl yapılabileceği de bu çalışmada sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** ayarlı kütle sönümleyici, dinamik titreşim yutucu, sonlu eleman yöntemi, frekans tepki fonksiyonu, yapısal değişiklik, sönüm optimizasyonu

**Abstract**—Tuned Mass Dampers (TMD) are often used to reduce the excessive vibrations levels of multi-degree-of-freedom systems. However, in contrast to the situation for single-degree-of-freedom systems, the optimisation of TMD's for multi-degree-of-freedom systems is not an easy task. In this work, an efficient method is utilised for analyses of structures with TMDs, and for optimising these TMDs for maximum damping. The method used for this purpose is based on structural modification approach which allows very efficient calculations of Frequency Response Functions (FRFs) of a modified structure if the natural frequencies and mode shapes of the original structure are already available. The application of the method is demonstrated by considering a high-rise structure and results corresponding to analysis and optimisation of the structure with a TMD are presented. Furthermore, how to optimise damping, using a TMD, for more than one mode of vibration is also demonstrated in this study.

**Keywords:** tuned mass damper, dynamic vibration absorber, finite element method, frequency response function, structural modification, damping optimization

### I. Giriş

Yapılarda, özellikle yüksek ve narin yapılarda, dış yüklemeler (rüzgar/girdap, yağış, deprem vb.) sebebiyle meydana gelebilecek titreşimlerin azaltılması amacıyla çeşitli sönüm mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu mekanizmalar yapıda oluşan titreşimlerin durumuna ve yapının karakteristiğine uygun olarak seçilir. Yapıların rezonans civarındaki titreşimlerinin kontrol edilmesini sağlayan mekanizma olan ve bir kütle ve yaydan oluşan dinamik titreşim yutucu (DTY) Frahm tarafından keşfedilmiş ve literatüre kazandırılmıştır [1]. Bu mekanizma, direk olarak ana sistemin doğal frekanslarından birine kütle ve yay değerleri belirlenerek ayarlanır. Bu şekilde ilgili doğal frekanstaki titreşimler teorik olarak yok edilir, bunun yerine biri sistemin doğal frekansından büyük, diğeri ise küçük olmak üzere iki yeni doğal frekans ortaya çıkar. Ancak DTY eklenmesi ile ortaya çıkan yeni modların, özellikle yüksek yapılarda rüzgar yüklerinden dolayı tahrik edilmesi mümkündür. Bundan dolayı yeni oluşan modlara sönüm kazandırılması gerektiğinden kütle ve yay elemanlarına ek olarak bir de viskoz sönüm elemanı içeren sönümlü DTY veya AKS olarak adlandırılan mekanizmanın kullanımı gerekmektedir [2]. Bu mekanizma sayesinde yapının sadece orijinal modunda yutum gerçekleşmez, aynı zamanda yeni oluşan modlara da sönüm kazandırılır.

AKS'nin tasarımı ile ilgili parametrelerin (kütle, yay ve sönüm) incelenmesi ve bunların optimizasyon çalışmaları literatürde oldukça geniş yer kaplamaktadır [2-9]. Fakat, bunlar genelde ana yapının tek serbestlik dereceli ve/veya sönümsüz olduğu kabulünü yapmakta veya çok serbestlik dereceli yapıların AKS kullanımını ile sönüm optimizasyonu için tekrarlı analizlere ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden yüksek bir yapıya AKS uygulaması yapılırken, bunun optimum parametrelerinin belirlenmesinde analizlerin sayısal olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu tip analizler ile belirlenen AKS tasarımlarının, yüksek yapılara uygulanmalarına da literatürde sıkça karşılaşılmaktadır. Şanlıtürk ve Belek tarafından Mersin'de bir fabrikanın ön

\* terziogluf@itu.edu.tr

† sanliturk@itu.edu.tr

ısıtıcı kulesinde meydana gelen yüksek genlikli titreşimlerin azaltılması amacıyla uygulanan 2-yönlü çalışabilen AKS bunlardan biridir [10]. Bu çalışmada, kulede oluşan iki yönlü titreşim probleminin giderilmesi için tek bir AKS kütesinin iki yönde de işlevini gerçekleştirmesi amacıyla, AKS'nin optimum parametreleri yapının sonlu eleman (SE) modelinde analizler gerçekleştirilerek elde edilmiş ve bu parametreler altında AKS tasarımı gerçekleştirilerek yapıda meydana gelen problem çözüme kavuşturulmuştur. Bir başka çalışmada ise Longarini ve Zucca, İtalya'da tarihi bir bakanın AKS ile sismik cevaplarının iyileştirilmesi amacıyla, SE modelleri geliştirerek bunların üzerinde analizler yapmışlardır [11]. Oluşturdukları SE modelleri için yerel deprem spektrumlarını kullanarak yaptıkları bu analizler ile AKS'yi sönüm açısından optimize etmişlerdir. Ghorbani-Tanha vd. Tahran'da bulunan Milad Tower yapısını 57 serbestlik dereceli lineer bir kiriş olarak modellemiş ve bunun rüzgar yükleri altında analizlerini matematiksel model kullanarak gerçekleştirmişlerdir [12]. Bu çalışmada da AKS'nin rüzgar kaynaklı yapısal cevapların azaltılması konusunda oldukça başarılı olduğu ortaya konulmuştur. Yüksek yapılara AKS uygulamasına örnek teşkil eden bir başka çalışma ise Tuan ve Shang tarafından Tayvan'daki Taipei 101 Tower yapısı için yapılan AKS uygulamasıdır [13]. Bu çalışmada bu yapının optimal AKS ile rüzgar ve sismik yükler altında analizleri gerçekleştirilmiş, SE modelinde simülasyonlar yapılmış ve bu sonuçlar rüzgar tüneli testleriyle birlikte yapıdan alınan gerçek sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Uygulanan AKS'nin rüzgar yükleri karşısında olduğu kadar sismik yükler karşısında başarılı olmadığından bahsedilmiştir.

Yukarıda bahsedilen ve literatürde bulunan diğer AKS uygulamalarında, genelde yapıların özel modlarına sönüm kazandırmak amaçlanmış ve yapının birden fazla moduna sönüm kazandırmak için birden fazla AKS kullanılması söz konusu olmaktadır. Bu bildiride, ilk önce, doğal frekans ve mod şekilleri önceden hesaplanan bir sisteme bir AKS eklenmesi de dahil olmak üzere yapılan bir değişiklik sonucunda oluşan yeni sistemin Frekans Tepki Fonksiyon (FTF)'lerinin çok ekonomik olarak hesaplanabilmesine imkan tanıyan bir yöntem özetlenmiştir. Bunun ardından, bu yöntemin AKS'li bir yapıya uygulanması ve bu yapının her hangi bir modu için sönüm optimizasyonunun bu yöntem kullanılarak yapılan analizler sonucunda gerçekleştirilmesi, tipik bir fabrika bacasını temsil eden bir yapının sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra yapıya bir AKS eklenmesi ile yapının birden fazla modunun kontrolünün nasıl gerçekleştirilebileceği açıklanmış, örnek sonuçlar sunulmuştur.

## II. Teori: Yapısal Değişikliğe Uğramış bir Yapının FTF Matrisinin Hesaplanması

Bir sistem veya yapının dinamik davranışı; yapının kütle, direngenlik ve sönüm matrisleri yardımıyla elde edilen FTF matrisi ile belirlenebilir. Çoğu zaman bir yapıda gerçekleştirilmesi öngörülen bazı değişikliklerden sonra, sistemin dinamik özelliklerinde oluşacak değişikliğin belirlenmesi gerekir. Bu tip durumlarda yapı üzerinde gerçekleştirilmesi öngörülen her bir değişiklik için yapının yeniden modellenmesi ve analiz edilmesi masraflı bir yaklaşımdır. Bunun yerine, değişime uğrayan yapının FTF matrisinin, yapının orijinal halini temsil eden matematiksel modeli ve yapıda öngörülen değişiklikler kullanılarak daha kolay bir şekilde hesaplanması mümkündür. Bu yaklaşım bir matrisin değişime uğradıktan sonra tersinin alınmasına olanak sağlayan Sherman-Morrison [14] formülasyonuna dayanmakta olup, bir yapıya farklı değişiklikler yapıldıktan sonra yapının FTF matrisinin kolayca hesaplanabilmesi için Şanlıtürk [15] tarafından önerilmiştir. Ayrıca, burada tanıtılan bu yöntem lineer olmayan titreşimlerin analizi için de kullanılmaktadır [16-18]. Bu bildiride sunulan çalışmada bu yöntem yapıya AKS eklenmesi durumu için kullanılmıştır ve bütünlük açısından söz konusu teori aşağıda özetlenmiştir.

Çok serbestlik dereceli bir yapının harmonik hareketini temsil eden denklem takımı;  $[K]$ ,  $[M]$  ve  $[D]$  sırasıyla yapının direngenlik, kütle ve yapısal sönüm matrislerini,  $\{Q\}$  genelleştirilmiş koordinatların deplasman genlikleri vektörünü ve  $\{F\}$  harmonik kuvvetlerin genlikleri vektörünü ifade etmek üzere şu şekilde yazılır:

$$([K] - \omega^2[M] + i[D])\{Q\} = \{F\} \quad (1)$$

Burada dinamik direngenlik matrisi kısaltma olarak  $[Z] = [K] - \omega^2[M] + i[D]$  şeklinde yazılırsa, deplasman genlikleri aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\{Q\} = [Z]^{-1}\{F\} = [\alpha]\{F\} \quad (2)$$

Bu ifadede görülen dinamik direngenlik matrisinin tersi olan  $[\alpha]$  dinamik esneklik veya FTF matrisi olarak tanımlanır. Yukarıda bahsedildiği gibi yapının dinamik direngenlik matrisine  $[\Delta Z]$  gibi bir değişiklik yapılması durumunda,  $[Z^*] = [Z] + [\Delta Z]$  şeklinde temsil edilen yapının, yeni FTF matrisinin ( $[\alpha^*]$ ) hesaplanması için yapının yeniden modellenerek analiz edilmesine gerek yoktur; yapının yeni FTF matrisi Sherman-Morrison yaklaşımı ile daha ekonomik bir şekilde hesaplanabilir. Eğer yapının orijinal halini temsil eden FTF matrisi ( $[\alpha]$ ) mevcut ise ve yapının dinamik direngenlik matrisinde meydana gelen değişim  $[\Delta Z] = \{u\}\{v\}^T$  şeklinde ifade edilirse, yapının yeni FTF matrisi şu şekilde hesaplanabilir:

$$[\alpha^*] = [\alpha] - \frac{([\alpha]\{u\})(\{v\}^T[\alpha])}{1 + \{v\}^T[\alpha]\{u\}} \quad (3)$$

Eğer yapılan değişiklikler tüm koordinatları etkiliyorsa, bu yöntem hesap yükü açısından bir avantaj sağlamaz. Ancak, çoğu zaman yapı üzerinde gerçekleştirilen değişiklikler belli başlı bazı koordinatları etkilediğinden bu yöntem oldukça etkindir. Ayrıca, bu yöntem sistemin sadece aktif olarak adlandırılan koordinatları dikkate alınarak da uygulanabildiğinden, bu yaklaşım hesap yükü açısından çok ciddi kazanımlar sunar [15]. Sistemdeki aktif koordinatlar  $a$ , diğer koordinatlar ise  $i$  indisi ile gösterilirse; deplasman genliklerinin ve FTF matrisinin ifadeleri şu şekilde düzenlenebilir:

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} \{Q_i\} \\ \{Q_a\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} [\alpha_{ii}] & [\alpha_{ia}] \\ [\alpha_{ai}] & [\alpha_{aa}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu durumda sistemdeki değişiklik vektörleri  $\{u\} = \{0\} \{u_a\}^T$ ,  $\{v\} = \{0\} \{v_a\}^T$  şeklinde ifade edilip, yapının yeni FTF matrisi aşağıdaki hali alır:

$$[\alpha^*_{aa}] = [\alpha_{aa}] - \frac{([\alpha_{aa}]\{u_a\})(\{v_a\}^T[\alpha_{aa}])}{1 + \{v_a\}^T[\alpha_{aa}]\{u_a\}} \quad (6)$$

Eğer değişiklik matrisi  $[\Delta Z] = \{u\} \{v\}^T$  şeklinde ifade edilemiyorsa, birden fazla değişiklik matrisi şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[\Delta Z] = [\Delta Z_1] + [\Delta Z_2] + \dots + [\Delta Z_p] \quad (7)$$

Bu durumda  $p$  adet değişiklik matrisi  $[\Delta Z_j] = \{u_j\} \{v_j\}^T$  halinde yazıldığı taktirde, değişime uğramış sistemin  $[\alpha^*_{aa}]$  matrisi  $p$  adımda, her bir adımda  $[\Delta Z_j]$  dikkate alınarak hesaplanır.

Bir örnek teşkil etmesi açısından, yapının 2 koordinatı arasına  $k$  yay katsayısına sahip bir yay eklendiği zaman sistemdeki değişiklik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[\Delta Z_j] = \{u_j\} \{v_j\}^T = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} k \\ -k \end{Bmatrix}^T \quad (8)$$

Yapıya kütle ve sönüm elemanı uygulanması durumunda söz konusu olan değişiklik matrisleri Referans [15]'de verilmiştir. Ancak, burada, bütünlük açısından, bu çalışmanın ana konusu olan AKS'lerin yapıya eklenmesi ile ilgili formulasyon detaylandırılarak verilmiştir.

Yapıya bir AKS eklenmesi, Şekil 1'de görüldüğü üzere yapıda ilave bir serbestlik derecesi yaratmaktadır. Ancak, yaratılan ilave  $y$  koordinatında oluşan titreşim genliği, AKS'nin yapıya bağlandığı  $q_j$  koordinatının titreşim genliği cinsinden yazılabileceğinden bu yöntem bu değişiklik türünde de geçerliliğini korumaktadır.

Yapının  $q_j$  koordinatına bir AKS eklenmesi durumunda, yapının dinamik direngenliğinde oluşacak değişim aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[\Delta Z_j] = \{u_j\} \{v_j\}^T = \{1\} \{Z_{AKS}\} \quad (9)$$

Bu denklemdeki  $Z_{AKS}$  değerini belirlemek için Şekil 1'deki AKS kütesinin hareket denklemi yazılır:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = c\dot{q}_j(t) + kq_j(t) \quad (10)$$

Bu denklem harmonik çözüm kabulü ile ( $q_j(t) = Q_j e^{i\omega t}$  ve  $y(t) = Y e^{i\omega t}$ ) düzenlenerek, genlikler birbirinin cinsinden yazılabilir:

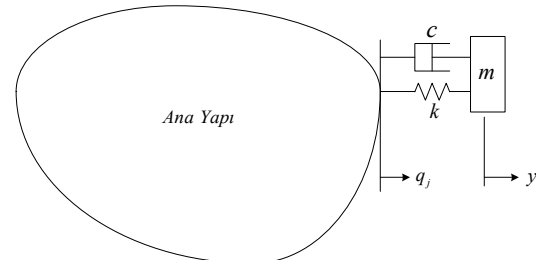
$$Y = \frac{(i\omega + k)}{(-m\omega^2 + i\omega + k)} Q_j \quad (11)$$

Buradan yapının ek kütleye uyguladığı kuvvet aşağıdaki gibi belirlenir:

$$F_T = \frac{(i\omega + k)(-\omega^2 m)}{(-m\omega^2 + i\omega + k)} Q_j \quad (12)$$

Bu denklemdeki  $Q_j$  genliğinin katsayısı  $[\Delta Z_j]$  ifadesinin kendisidir:

$$Z_{AKS} = \frac{(-\omega^2 m k - i\omega^3 m c)}{(k - \omega^2 m + i\omega c)} \quad (13)$$

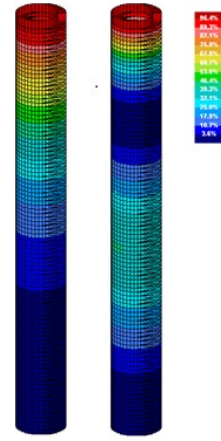
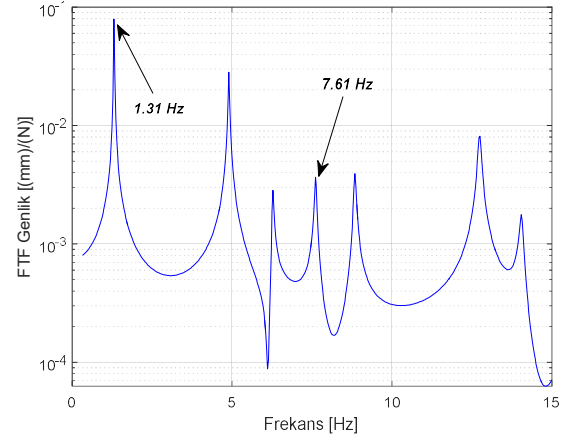
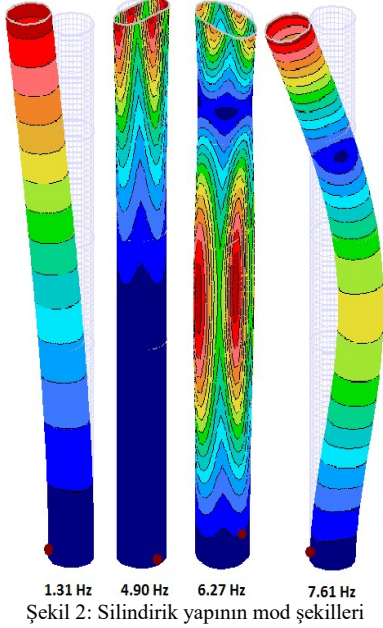


Şekil 1: Bir yapıya AKS bağlanması durumu

### III. Yüksek Bir Yapıya Eklenen Bir AKS'nin Analizi ve Optimizasyonu

Bu bölümde, bir önceki bölümde özetlenen teorik yaklaşımın yüksek bir yapıya uygulanması ve bu yapıya eklenen bir AKS'nin optimum parametrelerinin nasıl belirlenebileceği açıklanmıştır. Burada AKS uygulaması için örnek olarak kullanılan yapı 50 metre yüksekliğinde ve 3 metre çapında değişken cidar kalınlığına sahip (20 mm ve 15 mm) bir fabrika bacasını temsil etmektedir. Ancak, teori bölümünde açıklanan yöntemin uygulanabilmesi için yapının ne olduğunun bir önemi olmadığını da burada belirtmekte fayda vardır. Bir fabrika bacasını temsil eden silindirik yapının geometrik modeli ICATS (Imperial College Testing Analysis and Software) [19] kullanılarak, sonlu elemanlar modeli ise FINES (Finite Element for Structures) [20] kullanılarak oluşturulmuştur. Yapıdaki mevcut yapısal sönüm oranı %0.8 kabul edilmiştir [21]. Bu yapı için FINES ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapının doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiş ve ilk 4

mod şekli Şekil 2’de gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında yapılan analizlerin genelinde ICATS ve FINES kullanılmıştır [19-20].



Yüksek yapıların rüzgar yüklerine karşı direncini artırmak için bu yapılara sıkça AKS uygulanmaktadır ve bu yapılardaki kritik titreşim modları genelde eğilme modlarıdır. Dolayısı ile, bu çalışmada AKS uygulaması yapının ilk iki eğilme moduna yapılmıştır. Yapıdaki mevcut veya AKS uygulaması sonrasındaki sönüm miktarını belirlemek için yapının bir FTF fonksiyonunun analiz edilmesi yeterlidir. Bu amaçla AKS’nin olmadığı durum için, yapının en üst kısmına ait noktasal bir FTF hesaplanmış ve Şekil 3’te gösterilmiştir. Yapıya bağlanan AKS’lerin incelenmesinde, bu FTF’den hareketle bir önceki başlıkta bahsedilen yöntem kullanılarak hesaplanan yeni FTF’lerden faydalanılmıştır.

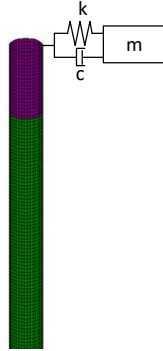
AKS uygulamalarında, özellikle birden fazla titreşim modu söz konusu olduğunda, yapının hangi konumuna AKS uygulanacağı yanıtlanması gereken önemli bir sorudur. Bu amaca yönelik olarak, Referans [22]’de önerilen ve yapının her bir koordinatında birden fazla mod şeklini dikkate alarak hesaplanan deplasman cinsinden ortalama titreşim seviyesi göstergesi fonksiyonu, ADDOFD (Average Driving DOF Displacement) kullanılmıştır:

$$ADDOFD(j) = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{jr}^2}{\omega_r^2} \quad (14)$$

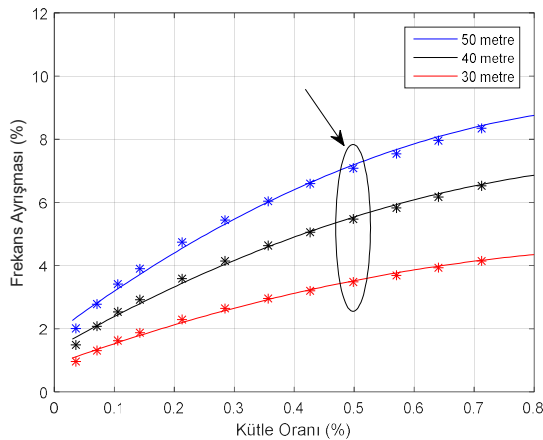
Bu yaklaşımdan faydalanılarak ayrı ayrı her iki eğilme modu için de AKS’nin uygun bağlantı konumu analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4’te sırasıyla verilmiştir. Beklendiği üzere, her iki mod için de en etkin AKS uygulama konumu yapının en üst bölgeleri olarak belirlenmiştir.

Şekil 5’te şematik olarak gösterilen AKS ile yüksek yapılara sönüm kazandırılması için yapıya kütle eklenmesi söz konusu olduğundan, yapıya ilave statik yük bindirme açısından bu yöntemin dezavantajı mevcuttur. Ayrıca, AKS’nin ayarlanacağı frekans kütle ve yay katsayısı ile ilişkili olduğundan, kütlenin belirlenmesi doğrudan yay katsayısının da belirlenmesi anlamına gelmektedir. Bu sebepler doğrultusunda, bir yapıya AKS ile sönüm kazandırılması amaçlanıyorsa, ‘ilk olarak belirlenmesi gereken parametre AKS kütlesidir’ çıkarımı yapılabilir. AKS kütlesi, yapıya eklenen AKS ile ortaya çıkan yeni iki doğal frekansın yapının AKS bağlanmadan önceki doğal frekansından ne kadar uzaklaşacağı (frekans ayrışması) konusunda en önemli etkidir. Bu frekans ayrışması yetersiz olduğunda AKS ile amaçlanan hedeflere ulaşılamamaktadır. Gereğinden fazla AKS kütlesi kullanılması durumunda ise yapıya gereksiz statik yük uygulanmış olacaktır. Bundan dolayı AKS kütlesi, yeterli bir frekans ayrışması yaratması kaydıyla belirlenir. Bu durum gözönünde bulundurularak ilgilenilen yapının iki eğilme modu için de uygun AKS kütlesi, frekans ayrışma miktarının kütle oranının (AKS

kütlesinin yapının kütlesine oranı) fonksiyonu olarak analiz edilmesi ile belirlenmiştir. Bu analizlerde AKS'nin yapıya uygulanma konumunun etkisi de incelenmiş ve sonuçlar birinci ve ikinci eğilme modları için, sırasıyla, Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere, iki mod için de AKS kütlesinin artmasıyla frekans ayrışmasındaki artış hızı yavaşlamaktadır. Bu çalışmada yaklaşık %6 ile %8 aralığında bir frekans ayrışması yeterli kabul edilmiş, her iki mod için de %0.5 kütle oranı uygun bulunmuştur. Ayrıca frekans ayrışmasının bölgelere göre analizine bakılırsa, yapının en üst kısmının her iki eğilme modu için de en iyi frekans ayrışması sağladığı görülmektedir. İlk mod için frekans ayrışması yapının aşağı bölgelerine indikçe azalmakta, ikinci mod için ise 20 metre yükseklikten AKS bağlantısı en üstten bağlantıya frekans ayrışması bakımından en yakın bölgedir. Bu sonuçlar, Şekil 4'te elde edilen iki mod için de en iyi AKS bölgeleri sonuçlarını frekans ayrışması bakımından da desteklemektedir.

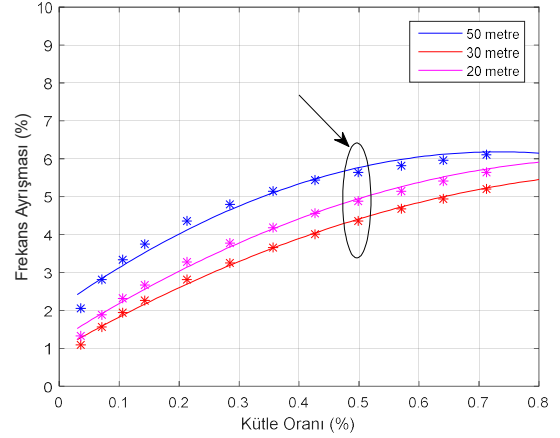


Şekil 5: Yüksek silindirik yapıya AKS bağlantısının şematik gösterimi



Şekil 6: Birinci eğilme modu için frekans ayrışmasının kütle oranı ile değişimi

Bu sonuçlara dayanarak, 70 ton olan yapı için seçilen AKS'nin kütlesi her iki mod için de yaklaşık olarak 350 kg olmaktadır. Yay katsayıları ise, kütle bilindiğine göre, iki mod için de sırasıyla yaklaşık olarak 23700 N/m ve 800200 N/m olarak belirlenir.

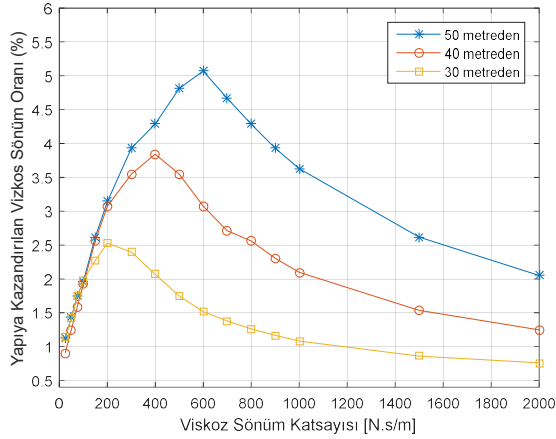


Şekil 7: İkinci eğilme modu için frekans ayrışmasının kütle oranı ile değişimi

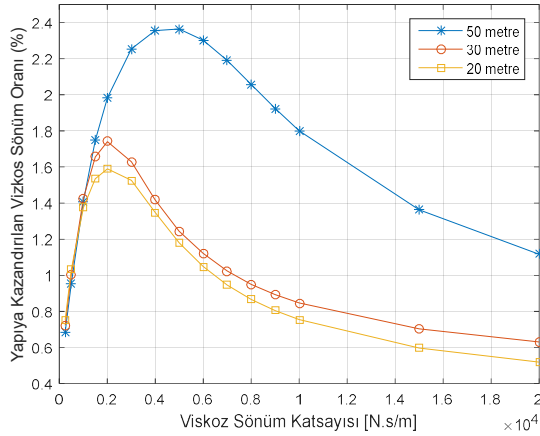
Uygun frekans ayrışması için gerekli AKS kütlesi, ilk iki eğilme modu için de belirlendikten sonra incelenmesi gereken bir diğer parametre ise AKS'nin viskoz sönüm katsayısıdır. AKS'de hiç sönüm bulunmaması halinde hiç enerji sönümlenmeyeceğinden, AKS eklendiğinde ortaya çıkan yeni titreşim modlarında herhangi bir zorlama meydana gelmesi durumunda yapıda yine yüksek genlikli titreşimler meydana gelecektir. Diğer taraftan, AKS'ye viskoz sönüm katsayısı çok yüksek bir eleman bağlanması halinde ise AKS ile yapı neredeyse birlikte hareket edecek ve bundan dolayı aralarında kayda değer bir izafi hareket oluşmayacağından yine arzu edilen miktarda enerji yutumu sağlanmayacaktır. Dolayısı ile, AKS'nin yapıya kazandırabileceği optimum sönüm miktarına karşılık gelen viskoz sönüm katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yapının her iki modu için de ayrı ayrı sönüm analizleri gerçekleştirilmiş ve bu sonuçlar Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. Yapılan bu analizler, yapının en üst konumundan elde edilen FTF'lerden modal sönüm miktarının belirlenmesi ile yapılmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9'da yapıya AKS eklendikten sonra ortaya çıkan yeni modlar dahil olmak üzere, yapının ilgili moduna kazandırılan viskoz sönüm oranları verilmiştir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere yapının ilgili moduna kazandırılan sönüm oranı, AKS'nin viskoz sönüm katsayısının bir yere kadar artmasıyla artmakta fakat belli bir viskoz sönüm katsayısından sonra ise azalmaya başlamaktadır. Yapının ilgili moduna kazandırılan viskoz sönüm oranının maksimum değerine ulaştığı AKS'nin viskoz sönüm katsayısı, ilgili mod için optimum viskoz sönüm katsayısını temsil etmektedir.

Şekil 8 ve Şekil 9'da, yapının farklı konumlarına AKS eklenmesi durumunda elde edilen sonuçlar da sunulmuştur. Görüldüğü üzere, yapıya kazandırılabilen sönüm miktarının, AKS'nin bağlandığı yüksekliğin artmasıyla her iki mod için de trend olarak genelde arttığı söylenebilir. Birinci eğilme modu için bulunan viskoz sönüm katsayıları ikinci eğilme moduna göre daha düşük

değerlerde kalmaktadır. Birinci eğilme modu için optimum viskoz sönüm katsayısı 50 metreden bağlantı için 600 Ns/m iken, ikinci eğilme modu için optimum viskoz sönüm katsayısı aynı konumdan bağlantıda yaklaşık 4500 Ns/m civarındadır. Belirlenen bu optimum viskoz sönüm katsayılarında yapının ilgili moduna kazandırılan viskoz sönüm oranı; birinci eğilme modu için %4.5, ikinci eğilme modu için ise %2 civarındadır. Bu bildiride sunulan tüm sönüm analizi grafiklerinde yapıya kazandırılan viskoz sönüm oranlarının, AKS'siz yapının sahip olduğu varsayılan %0.4 viskoz sönüm oranını da kapsadığı unutulmamalıdır.



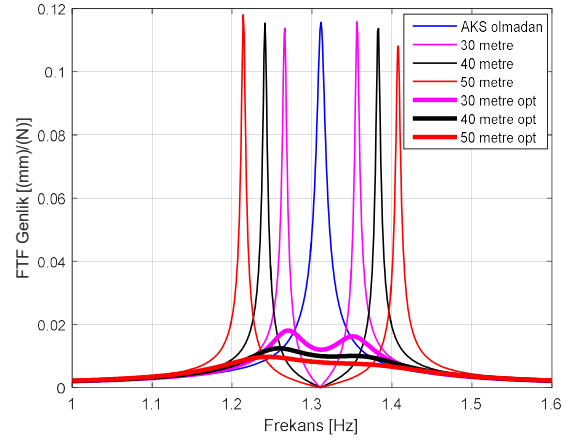
Şekil 8: AKS ile birinci eğilme moduna kazandırılan sönüm miktarı



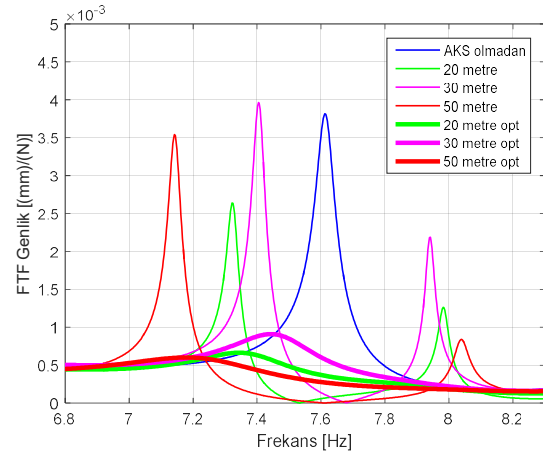
Şekil 9: AKS ile ikinci eğilme moduna kazandırılan sönüm miktarı

Her iki eğilme modu için de ayrı ayrı belirlenen optimum AKS eklenmesi sonucu ilk iki eğilme mod civarındaki FTF grafikleri Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Verilen bu grafiklerde, analiz edilen moda ayarlanan AKS'nin bağlandığı her bölge için FTF'ler sunulmuştur. Bu grafiklerde aynı renkli olan çizgilerden ince olanı o konuma bağlanan sönümsüz AKS'yi, kalın olanı ise aynı konuma bağlanmış olan AKS'nin optimum viskoz sönüm katsayısına sahip halini temsil etmektedir. Yapının ilgili modlarına kazandırılan sönüm oranlarının

analizinde elde edilen sonuçlar burada da benzer olarak görünmektedir.



Şekil 10: Birinci eğilme modu civarındaki FTF grafikleri



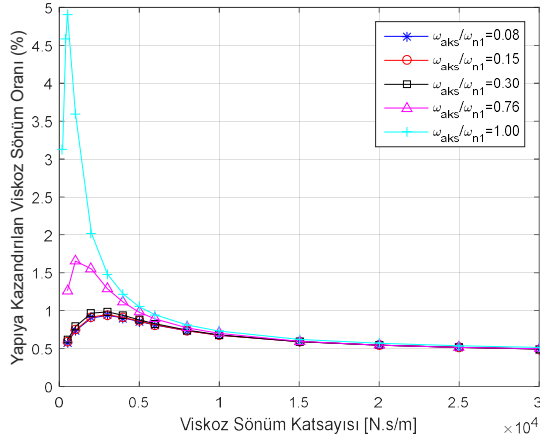
Şekil 11: İkinci eğilme modu civarındaki FTF grafikleri

#### IV. Bir AKS İle Birden Fazla Titreşim Moduna Sönüm Sağlanması

AKS, genel olarak yapının bir doğal frekansına ayarlanan ve AKS'nin sönümlü olup olmamasına bağlı olarak titreşim yutum ve/veya söz konusu moda sönüm sağlamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmanın bu başlığı altında, yapıya uygulanan bir AKS ile birden fazla titreşim moduna sönüm sağlanması ve optimizasyonu ele alınmıştır. Aşağıda sunulan sonuçlar, optimize edilmesi durumunda, bir AKS'nin birden fazla titreşim moduna sönüm sağlayabileceğini göstermektedir. Yapının ilk doğal frekansından daha düşük bir frekansa ayarlanan bir AKS, yapıya bu frekansa yakın frekanslarda bir dış zorlama gelmesi halinde yüksek genlikli titreşim hareketi yapacaktır. Fakat, yapının AKS'nin ayarlandığı bu frekansta doğal frekansı olmadığından, yapı yüksek genlikli bir titreşim sergilemeyecektir. Yapının doğal frekanslarında gelen bir dış zorlamada ise yapı yüksek

genlikli titreşim sergileyecek, fakat AKS daha düşük bir frekansa ayarlandığı için AKS kütlesi yapı titreşimlerinin kendisine az aktarıldığı titreşim izolasyonu yapılmış bir sistem gibi davranacak, dolayısı ile AKS kütlesinin titreşimleri yapının titreşimlerinden oldukça az olacaktır. Ancak, bu durumların ikisinde de AKS kütlesi ile yapı arasında önemli miktarda izafi hareket oluşacak, bu izafi hareket sayesinde AKS kütlesi ile yapı arasına bağlanmış olan sönüm elemanı iş yaparak yapıya sönüm sağlayacaktır. Bundan dolayı, AKS'nin yapının doğal frekanslarından daha düşük bir frekansa veya yapının ilk doğal frekansına ayarlanması ile de yapının birden fazla titreşim moduna sönüm kazandırılması mümkündür.

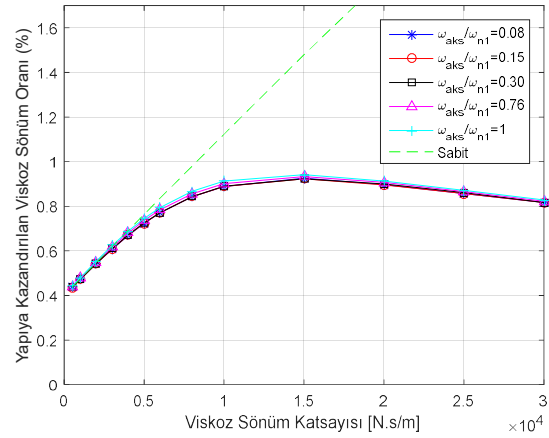
Bu bağlamda Şekil 12 ve Şekil 13'te yapının ilk iki eğilme moduna kazandırılan sönüm oranlarının viskoz sönüm katsayısı ile değişimi, bir önceki başlıkta belirlenen 350 kg kütleli bir AKS'nin yapının ilk doğal frekansına veya daha düşük bir frekansa ayarlanarak yapının en üst bölgesinden bağlanması durumlarında gösterilmiştir. Ayrıca bu şekilde yapının ikinci eğilme moduna kazandırılan viskoz sönüm oranları, Şekil 14'te gösterildiği gibi, yapının en üst konumu ile uzayda sabit bir nokta arasına yay ve sönüm elemanı bağlanması hali ile de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı; 'yapıya bağlanan AKS'nin ayarlandığı frekansların düşük olması durumunda, yapı yüksek frekanslarda titreşim hareketi yaparken AKS kütlesinin sanki uzayda sabit bir noktaymış gibi davranması' varsayımının ne kadar kabul edilebilir bir yaklaşım olduğunun tespit edilmesidir.



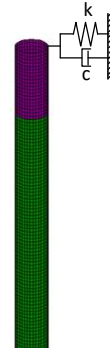
Şekil 12: AKS'nin ilk doğal frekansa veya daha düşük bir frekansa ayarlanması halinde birinci eğilme moduna kazandırılan viskoz sönüm oranları

Birinci eğilme modu için elde edilen sonuçlara bakılacak olursa, AKS'nin ayarlandığı frekansın bu modun frekansına yaklaşması durumunda yapının bu moduna kazandırılan viskoz sönüm oranının, beklendiği gibi, artması söz konusudur. Diğer taraftan, AKS'nin yapının ilk doğal frekansına veya daha düşük bir frekansa ayarlanması, AKS'nin yapının ikinci eğilme moduna kazandırdığı sönüm miktarında kayda değer bir farklılık yaratmamaktadır. Şunu da eklemek gerekir ki, eğer

sadece bir adet AKS kullanarak yapının ikinci eğilme moduna da olabildiğince yüksek oranda sönüm kazandırılmak isteniyorsa, yapının sadece birinci eğilme modu için optimize edilmiş bir AKS kullanmak uygun bir seçenek değildir. Bu çıkarım, sunulan sonuçlardan da açıkça görülmektedir. Yapının birinci eğilme moduna ayarlanan AKS, optimum viskoz sönüm katsayısında, yapının birinci eğilme moduna yaklaşık %4.5 civarında viskoz sönüm oranı kazandırmaktayken, yapının ikinci eğilme moduna yaklaşık %0.05 civarında ilave viskoz sönüm oranı kazandırmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilen sönüm analizi grafikleri, AKS'siz yapının sahip olduğu varsayılan %0.4 viskoz sönüm oranını da kapsamaktadır.



Şekil 13: Düşük frekanslara AKS bağlanması halinde ikinci eğilme moduna kazandırılan viskoz sönüm oranları

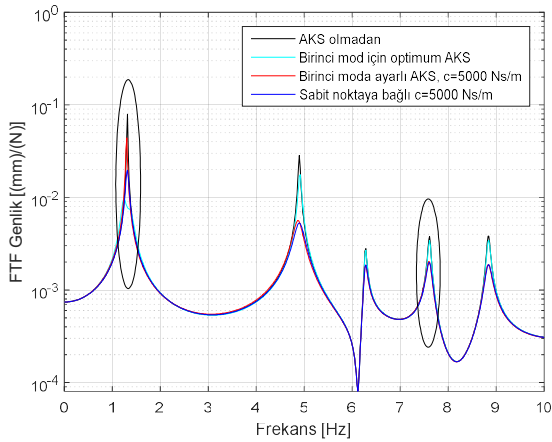


Şekil 14: Yapının en üst konumundan uzayda sabit bir noktaya yay ve sönüm ile bağlanması durumunun şematik gösterimi

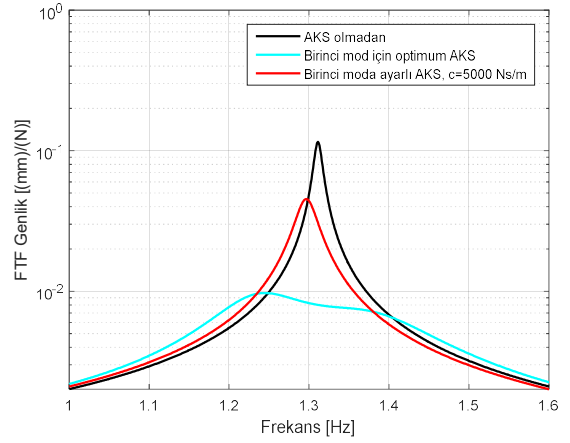
Eğer yapının ikinci eğilme moduna daha fazla sönüm kazandırılmak istenirse, yapının birinci eğilme mod frekansına da dahil olmak üzere herhangi bir düşük frekansta AKS bağlantısı yapıldığında seçilmesi gereken viskoz sönüm katsayısı ihtiyaç durumuna göre bir optimizasyon yaklaşımı ile belirlenmelidir.

Yukarıda bahsedilen duruma örnek teşkil etmesi açısından; birinci eğilme modu için toplamda en az %1 viskoz sönüm oranı elde edilmesi kaydıyla, ikinci eğilme

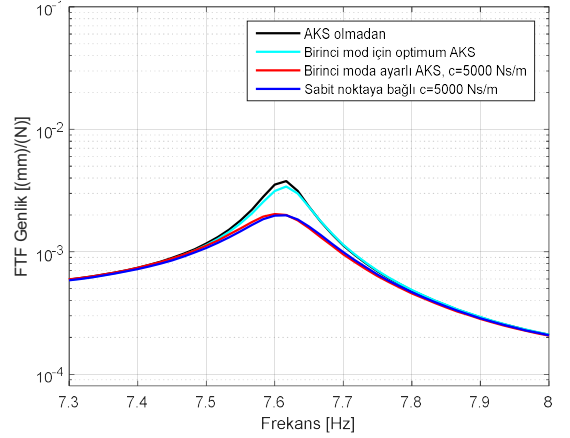
moduna da önemli miktarda sönüm kazandıran bir AKS seçilmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 15'te, yapının en üst konumuna ait FTF grafikleri sunulmuş ve burada yapının ilk iki eğilme modu işaretlenmiştir. Bu iki eğilme moduna yaklaştırılmış haldeki FTF grafikleri ise Şekil 16 ve Şekil 17'de sırasıyla gösterilmiştir. Bu grafiklerde; AKS'siz, birinci eğilme moduna ayarlı optimum AKS ve birinci eğilme moduna ayarlanan fakat optimum olmayan (viskoz sönüm katsayısı 5000 Ns/m olan) AKS durumlarında FTF'ler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 16'da görüldüğü gibi, seçilen AKS birinci eğilme modundaki titreşim genliklerini AKS'siz duruma göre önemli miktarda düşürmesine rağmen, birinci mod için optimum durumdakinden uzaktır. Şekil 17'de ikinci eğilme modu için sunulan FTF'de ise, frekansı yapının birinci eğilme moduna ayarlanan optimum AKS, AKS'siz duruma göre kayda değer bir değişiklik meydana getirmezken, seçilen AKS, AKS'siz duruma göre dinamik cevabı yaklaşık %50 oranında azaltmaktadır. Ayrıca, daha önceden de belirtildiği gibi, birinci titreşim moduna ayarlanmış bir AKS kütlesi, yüksek frekanslı modlar için uzayda hareketsiz bir nokta gibi davranabilmektedir. Bu durum Şekil 17 ve Şekil 18'de açıkça görülmektedir; AKS'nin ayarlandığı frekanstan çok daha yüksek frekanslı titreşim modlarının analizi için AKS'nin bağlandığı konum ile uzayda sabit bir nokta arasına yay ve sönüm elemanı eklenmesi ile elde edilen sonuçlar, söz konusu varsayım yapılmaksızın elde edilen sonuçlar ile neredeyse aynıdır. Ancak, bu varsayıma dayalı bir analizin geçerli olabilmesi için yapının ilgili doğal frekansının, AKS'nin frekansından en azından birkaç kat büyük olması gerektiği unutulmamalıdır.



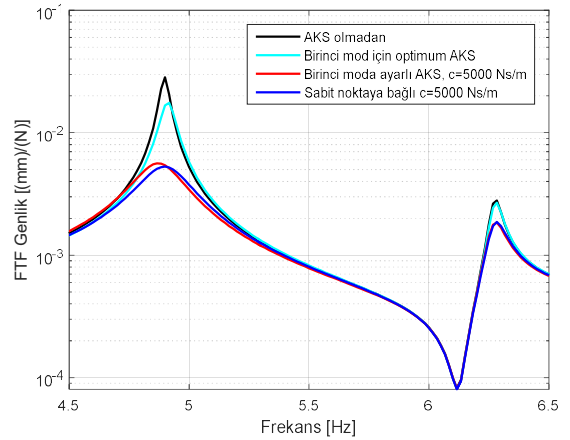
Şekil 15: Birinci moda ayarlanan optimum AKS ile birinci moda ayarlanan optimum olmayan AKS'nin FTF'lerinin karşılaştırılması



Şekil 16: Birinci eğilme moduna yaklaştırılmış halde FTF'ler



Şekil 17: İkinci eğilme moduna yaklaştırılmış halde FTF'ler



Şekil 18: İkinci ve üçüncü moda yaklaştırılmış FTF'ler

## V.Genel Değerlendirme

Bu çalışmada bir veya daha fazla sayıda AKS eklenmiş çok serbestlik dereceli yapıların analizinin ve AKS'lerin optimizasyonunun kolayca yapılabilmesine olanak sağlayan bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem, yapısal değişiklik yaklaşımına dayanmakta olup, eğer yapının orijinal halindeki FTF matrisi biliniyor ise değişiklik yapılan yapının FTF matrisinin kolayca hesaplanmasına imkan tanımaktadır. Bu yöntem yardımıyla yüksek, sönümlü bir yapıya AKS eklenmesi durumu incelenmiş, elde edilen FTF'lerden yola çıkılarak AKS'nin yapının herhangi bir modunda optimum parametrelerinin nasıl belirlenmesi gerektiği SE modeli üzerinde yapılan analizler ile sistematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca, AKS'nin bir yapının ilk moduna veya bu mod frekansından daha düşük bir frekansa ayarlanması durumunda yapının daha yüksek modlarına da nasıl sönüm kazandırılabileceğinin analizleri de yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yöntem ile, yapıya bir AKS eklenerek birden fazla moda sönüm kazandırma durumunu kolayca analiz ve optimize etmek mümkündür.

## Kaynakça

- [1] Frahm, H., "Device for damping vibrations of bodies". Hamburg Patent US 989958, 18 April 1911.
- [2] Den Hartog, J.P., "Mechanical Vibrations", Dover Publications, New York, 1985.
- [3] Rana, R. and Soong T.T., "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, vol. 20, no. 3, pp. 193-204, 1998.
- [4] Lee, C.L., Chen, Y.T., Chung, L.L. and Wang, Y.P., "Optimal design theories and applications of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 43-53, 2006.
- [5] C. Chang, "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control", *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 454-463, 1999.
- [6] Greco, R. and Marano, G.C., "Optimum design of Tuned Mass Dampers by displacement and energy perspectives", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 49, pp. 243-253, 2013.
- [7] Bakre, S.V. and Jangid, R.S., "Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system", *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 14, pp. 448-470, 2007.
- [8] Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O., "Optimum absorber parameters for simple systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 8, pp. 197-217, 1980.
- [9] Kim, Y.M., You, K.P. and You, J.Y., "Passive control of along-wind response of tall building", *Journal of Central South University of Technology*, vol. 21, pp. 4002-4006, 2014.
- [10] Sanliturk, K.Y. and Belek, T., "Design and implementation of a 2-dimensional vibration absorber on a pre-heater tower at a cement factory", *Proceedings of the 8th International Congress on Sound and Vibration*, Hong Kong, 2001.
- [11] Longarini, N. and Zucca, M., "A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper", *Engineering Structures*, vol. 79, pp. 290-296, 2014.
- [12] Ghorbani-Tanha, A.K., Noorzad, A. and Rahimian, M., "Mitigation of wind-induced motion of Milad Tower by tuned mass damper", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 18, pp. 371-385, 2009.
- [13] Tuan, A.Y. and Shang, G.Q., "Vibration control in a 101-storey building using a tuned mass damper", *Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 141-156, 2014.
- [14] Shermann, J. and Morrison, J.W., "Adjustment of an inverse matrix corresponding to changes in the elements of a given column or a given row of the original matrix", *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 20, p. 621, 1949.
- [15] Sanliturk, K.Y., "An efficient method for linear and nonlinear structural modifications", *Proceedings of ESDA2002 : 6th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, 2002.
- [16] Sanliturk, K.Y., Ewins, D.J., Elliot R. and Green J.S., "Friction damper optimization: simulation of rainbow tests", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 123, pp. 930-939, 2001.
- [17] Petrov, E., Sanliturk, K.Y. and Ewins, D.J., "A new method for dynamic analysis of mistuned bladed discs based on exact relationship between tuned and mistuned systems", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 124, pp. 586-597, 2002.
- [18] Sanliturk, K.Y., Ewins, D.J. and Stanbridge A.B., "Underplatform dampers for turbine blades: theoretical modelling, analysis, and comparison with experimental data", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 123, pp. 919-929, 2001.
- [19] ICATS: Imperial college testing analysis and software, Imperial College, Dynamic Section, London, 2009.
- [20] FINES: Finite element for structures, Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Department, Istanbul, 2012.
- [21] EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, 2005.
- [22] Imamovic, N. and Ewins, D.J., "Optimization of excitation dof selection for modal tests", *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, Orlando, 1997.