

AYARLANMIŞ KÜTLE SÖNÜMLEYİCİLERİN BAĞLANTI RİJİTLİĞİNE DAYALI DİNAMİK PERFORMANS ANALİZİ

Ece Nur Gültekin^{1, a)}, Melin Şahin^{1, b)}, Gökhan Özgen^{2, c)}

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, ANKARA

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, ANKARA

^{a)}ece.gultekin@metu.edu.tr , ^{b)}msahin@metu.edu.tr , ^{c)}gozgen@metu.edu.tr

Ayarlanmış kütle sönümleyiciler (AKS), yapıların titreşimlerini kontrol etmek amacıyla mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin etkinliği, sönümleyicinin doğal frekansının hedeflenen frekansa tam olarak ayarlanabilmesine bağlıdır. Bu ayarın doğru şekilde yapılabilmesi ise, sönümleyicinin yapıya yeterli rijitlikte bağlanmasıyla mümkündür. Bağlantı rijitliğinin yetersiz olması, ayar frekansında sapmalara neden olarak sönümleme performansını düşürebilmektedir. Bu çalışmada, bir kiriş yapıya bağlanan AKS için iki farklı bağlantı elemanı tasarlanmıştır: daha hafif ve esnek olan ince tutucu ile daha rijit olan kalın tutucu. Bağlantı rijitliğinin dinamik davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar metoduyla (SEM) sayısal analizler gerçekleştirilmiş, ardından sarsıcı yardımıyla yapılan deneysel titreşim testleriyle sonuçlar doğrulanmıştır. Geçirgenlik (transmissibility) fonksiyonları, AKS kütlesi ve AKS – kiriş bağlantı noktasına yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, kalın tutucunun daha rijit bağlantı sağladığını ve frekans ayarının daha doğru yapılabildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, AKS sistemlerinde bağlantı rijitliğinin performans üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ayarlanmış kütle sönümleyici, titreşim sönümleme, sonlu elemanlar metodu, dinamik analiz, bağlantı rijitliği.

Tuned Mass Dampers (TMDs) are widely used in engineering applications to control structural vibrations. The effectiveness of these systems depends on precisely tuning the damper's natural frequency to the targeted frequency. Achieving accurate tuning requires the damper to be connected to the structure with sufficient rigidity. Insufficient connection stiffness can cause deviations from the target frequency, thereby reducing damping performance. In this study, two different attachment elements were designed for a TMD mounted on a beam structure: a lighter and more flexible thin attachment, and a stiffer thick attachment. To investigate the effect of connection stiffness on dynamic behavior, numerical analyses were carried out using the Finite Element Method (FEM), and the results were subsequently validated through experimental vibration tests performed with a shaker system. Transmissibility functions were obtained from accelerometers placed on the TMD mass and at the TMD–beam connection point. The findings revealed that the thick attachment provided a more rigid connection, allowing more accurate frequency tuning. These results highlight the decisive role of connection stiffness in the performance of TMD systems.

Keywords: Tuned Mass Damper, vibration damping, finite element method, dynamic analysis, connection stiffness.

1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarında meydana gelen titreşimler, hem yapısal bütünlük hem de kullanıcı konforu açısından önemli sorunlara yol açabilmektedir. Özellikle rezonansa yakın çalışma koşullarında veya dış kaynaklı zorlanmış titreşim etkisi altında çalışan sistemlerde, yapılar yüksek genlikli titreşimlere maruz kalmakta; bu da zamanla yorulma, bağlantı gevşemeleri ve sistem kararsızlıkları gibi ciddi arızalara neden olabilmektedir. Bu tür problemleri önlemek amacıyla çeşitli pasif sönümleme sistemleri geliştirilmiş ve uygulamaya alınmıştır. Ayarlanmış Kütle Sönümleyiciler (AKS), bu sistemler arasında hem etkinliği hem de tasarım esnekliği ve yapısal entegrasyona uygunluğu bakımından öne çıkan bir çözümdür.

AKS sistemleri, birincil yapının belirli bir rezonans veya zorlanmış titreşim frekansına ayarlanmış ikincil bir kütle-yay sisteminin yapıya bağlanması esasına dayanır. Sönümleyici kütle, sistem titreşim halindeyken ana yapı ile ters fazda hareket ederek mekanik enerjinin absorbe edilmesini sağlar. Böylece yapıdaki titreşim genlikleri azaltılır. AKS'nin hedeflenen frekansa hassas şekilde ayarlanabilmesi (tuning) için, sönümleyicinin yapıya yeterli rijitlikte bağlanması gerekmektedir. Bağlantı rijitliği yetersiz olduğunda, hedef frekansta sapmalar oluşmakta ve sistemin sönümleme kapasitesi düşmektedir. Bu nedenle, bağlantı elemanlarının rijitliği, yük aktarımının doğruluğu ve dinamik davranışın kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir.

Bu bağlamda, bu çalışmada giriş tipi bir yapıya entegre edilen AKS'lerin bağlantı karakteristikleri incelenmiştir. Sönümleyiciler, özel olarak tasarlanmış iki farklı tutucu sistemi aracılığıyla yapıya bağlanmıştır. Tasarımlardan ilki, daha hafif ve esnek olan ince tutuculardan; diğeri ise daha rijit yapıları kalın tutuculardan oluşmaktadır. Her iki bağlantı tasarımının sistemin dinamik yanıtı üzerindeki etkileri, sonlu elemanlar metoduyla yapılan sayısal analizler ve sarsıcı ile gerçekleştirilen deneysel testlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle, bağlantı elemanlarının yapısal deformasyona karşı dayanımı sonlu elemanlar metoduyla analiz edilmiş, ardından oluşturulan modeller üzerinde frekans tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı bağlantı koşulları tanımlanarak toplam dört farklı model senaryosu değerlendirilmiştir. Ek olarak, oluşturulan yapısal sistem sarsıcı yardımıyla deneysel olarak uyarılmış ve elde edilen dinamik tepki verileri sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, ayarlanmış kütle sönümleyicilerin bağlantı rijitliğinin, hedeflenen tuning frekansına hassas bir şekilde ulaşma üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymak ve bu doğrultuda bağlantı tasarımının sistem performansı açısından önemine dikkat çekmektir. Elde edilen bulgular, sadece bu özel uygulama için değil, genel anlamda titreşim kontrol sistemlerinde bağlantı elemanlarının doğru tasarımının sistem başarımı için kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Makine ve inşaat mühendisliği alanlarında, titreşimler özellikle dinamik yüklere maruz kalan yapı ve sistemler açısından önemli bir problemdir. Bu titreşimleri azaltmak amacıyla sıklıkla AKS'ler kullanılmaktadır. AKS'ler, salınım yapan sistemlerden gelen enerjiyi emerek ve dağıtarak aşırı titreşimleri minimize eder.

AKS sisteminin temeli, Hermann Frahm'ın 1909 tarihli patentinde [1] ortaya konmuştur. Frahm oldukça basit ama devrim niteliğinde bir fikir öne sürmüştür: titreşim yapan bir yapıya serbestçe hareket edebilen bir kütle bağlanarak, bu kütle yapının titreşimlerini sönümleyebilir. Sönümleyici, yapının doğal frekansına uygun şekilde ayarlandığında, bu kütle yapıdan gelen titreşim enerjisini sönümleyerek genliğin azalmasını sağlar.

AKS'lere ilişkin matematiksel model, Den Hartog tarafından 1947 yılında yayımlanan "Mechanical Vibrations" adlı kitabında [2] ayrıntılı şekilde ortaya konmuştur. Hartog, hem sönümlü hem de sönümsüz sistemler için optimal AKS ayarı sağlayan formüller geliştirmiştir. Bu yaklaşım, birincil sistemin

rezonans frekansında enerji emilimini sağlayan ikincil bir salıncı (AKS) bağlanması fikrine dayanmaktadır.

AKS sistemleri köprülerden yüksek binalara, makine takımlarından rüzgar türbinlerine kadar pek çok sistemde titreşim azaltma amacıyla kullanılmaktadır [3] [4]. Ancak bu sönümleyicilerin başarısı, yalnızca doğru frekans ayarına değil, aynı zamanda yapıya olan bağlantı özelliklerine de bağlıdır.

Bir titreşim kontrol sisteminin etkinliğini belirleyen temel unsurlardan biri, sönümleyicinin yapıya nasıl bağlandığıdır. Bağlantı elemanlarının rijitliği, titreşim enerjisinin yapıya ne kadar etkin aktarılabilirliğini doğrudan etkiler [5]. Yetersiz rijitlik, sistemin dinamik karakteristiğinde sapmalara ve sönümleme kapasitesinde azalmaya neden olabilir [6]. Cıvatalı bağlantılar, sık rastlanan bir çözüm olmakla birlikte; ön yükleme, temas yüzeyi ve cıvata geometrisi gibi parametrelerin etkisiyle karmaşık bir dinamik tepki sergiler [7]. Yapılan çalışmalar [8] bağlantı rijitliğinin frekans tepkisi üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), karmaşık yapıların statik ve dinamik analizinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir sayısal araçtır. Temas yüzeyleri, ön yüklemeler ve mikro kaymalar gibi parametrelerin SEM ile modellenmesi, fiziksel deneyler yapılmadan önce doğru sonuçlar alınmasını sağlar [9]. Farklı tutucu tasarımlarının (örneğin kalınlık değişimi) yapısal davranışa etkisi bu yöntemle etkin biçimde değerlendirilebilir.

Sayısal modellerin doğruluğunu değerlendirmek ve gerçek sistem davranışını gözlemlemek için deneysel modal analiz vazgeçilmezdir. Doğal frekanslar, sönümleme oranları ve mod şekilleri gibi dinamik parametreler deneysel olarak belirlenebilir [10]. Sarsıcı ya da darbe çekici kullanılarak elde edilen frekans tepki fonksiyonları (FRF), sistemdeki bağlantı rijitliği farklılıklarını açık şekilde yansıtır. Bu veriler, SEM modellerinin kalibrasyonu için temel teşkil eder.

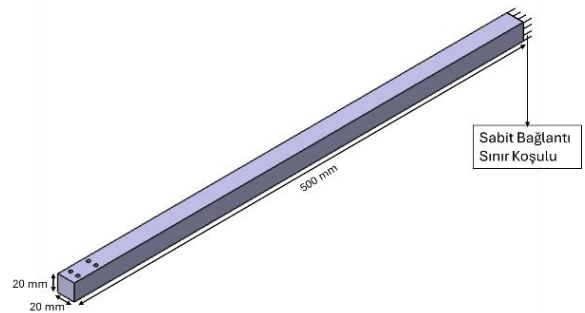
Literatürde AKS sistemlerinin tasarımı ve genel titreşim kontrol performansına dair pek çok çalışma bulunmasına rağmen, bağlantı

arayüzlerinin rijitlik etkisi detaylı biçimde yeterince ele alınmamıştır. Özellikle farklı bağlantı geometrilerinin ve temas senaryolarının sistem dinamiği üzerindeki etkisini hem sayısal hem deneysel olarak inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, farklı kalınlıklardaki tutucu sistemleri tasarlayıp, bunların dinamik etkilerini SEM ile analiz ederek ve deneysel olarak doğrularak bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Özellikle cıvata sıkma kuvvetinin rijitlik ve deformasyon üzerindeki etkisi, çalışmanın temel katkılarından birini oluşturmaktadır.

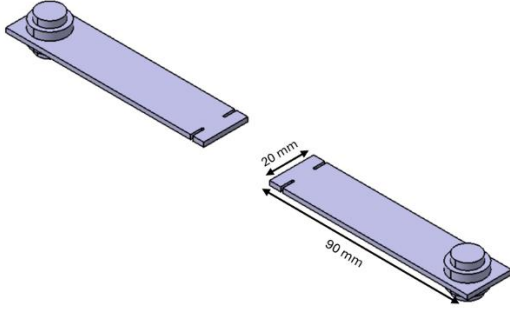
3. YÖNTEM

Sönümleme uygulamasına tabi tutulan alüminyum kiriş tipi yapı, Şekil 1’de sunulmaktadır. Bu yapının bir ucu sabit mesnetle (sabit bağlantı sınır koşulu) yerinde tutulurken, diğer ucuna ise ayarlanabilir kütle sönümleyiciler (AKS) monte edilmiştir. Kirişin birinci doğal frekansı 63 Hz olmakla birlikte, sistem üzerinde 78 Hz’de zorlanmış titreşim meydana gelmektedir. Bu frekansta oluşan titreşim genliğini azaltmak ve yapının dinamik tepkisini iyileştirmek amacıyla uç kısmına ayarlanabilir kütle sönümleyiciler yerleştirilmiştir.

AKS modeli Şekil 2’de gösterilmiştir. Sönümleyiciler, çelikten imal edilmiş üç parçadan oluşan özel bir tutucu sistemi ile yapıya entegre edilmiştir. AKS’nin gövdesini oluşturan çubuk alüminyum malzemeden üretilmiş olup 2 mm kalınlığa sahiptir ve uzunluk ile genişlik ölçüleri Şekil 2’de verilmiştir. Çubuğun ucuna 14.49 gram ağırlığında bir kütle takılmıştır.



Şekil 1 Sönümleme uygulamasına tabi tutulan kiriş tipi yapı

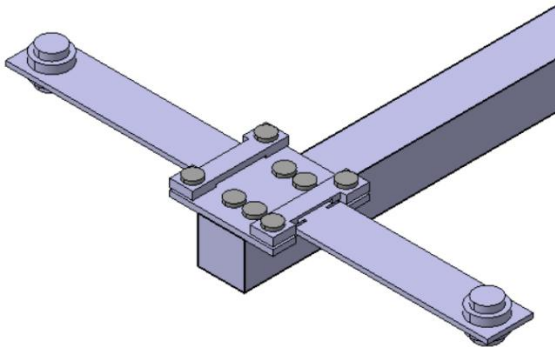


Şekil 2 Ayarlanabilir kütle sönümleyici (AKS) modeli

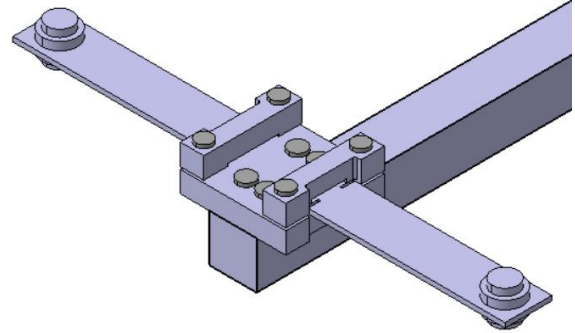
Tutucu sistemin en altındaki plaka, dört adet M4 civata yardımıyla kiriş üzerine sabitlenmiştir. Bu plakanın üzerine ayarlanmış kütle sönümleyiciler yerleştirilmekte, ardından iki parçadan oluşan üst tutucu takımı ile birlikte sıkıştırılarak alt plakaya bağlanmaktadır. Bu bağlantı da yine M4 civatalarla sağlanmakta ve civataların uyguladığı sıkıştırma kuvveti sayesinde sönümleyiciler yapıya sağlam şekilde entegre edilmektedir.

Üç parçadan oluşan bu tutucu sistemi, iki farklı versiyon olarak tasarlanmıştır: kalın ve ince tutucu. Kalın tutucular 9 mm et kalınlığına sahipken, ince tutucular 3.5 mm kalınlıktadır. Bu iki versiyona ait bağlantı örnekleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’de gösterilmiştir.

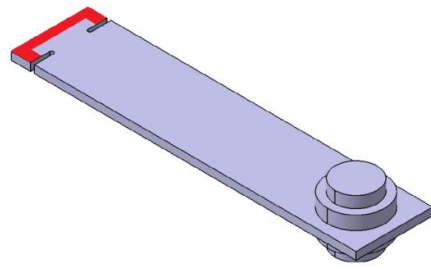
Tutucu bileşenleri birbirlerine M4 metrik vidalar ile bağlanmaktadır. Sönümleyici (AKS), alt ve üst tutucuların arasına yerleştirilmektedir. Civatalar sıkıldığında, oluşan aksel sıkıştırma kuvveti AKS’in her iki tutucuya temas eden yüzeyleri üzerinde etkili olur. Bu temas yüzeyleri Şekil 5’te kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 3 İnce tutucu bağlantısının fiziksel görünümü



Şekil 4 Kalın tutucu bağlantısının fiziksel görünümü



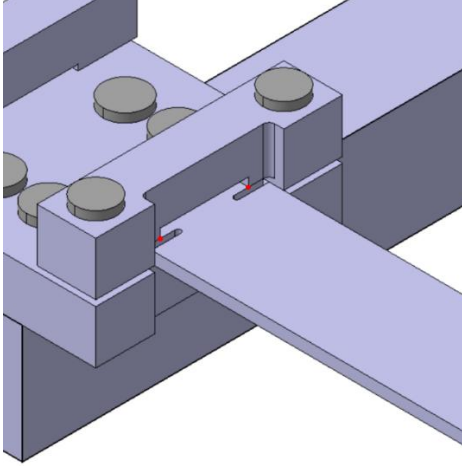
Şekil 5 AKS’in alt ve üst tutuculara temas ettiği yüzeylerin kırmızı renkle gösterimi

Bu noktada, yeterli sıkıştırma kuvvetinin uygulanması kritik öneme sahiptir. Çünkü bu kuvvet, tutucuların AKS ile tam temas etmesini ve bağlantının rijit bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Ancak aynı zamanda bu kuvvetin, tutucu parçaların deformasyona uğramasına neden olmaması gerekmektedir. Bu gereksinimi gerçekleştirilmiştir.

3.1 SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE TUTUCU DEFORMASYONU İNCELEMESİ

Alt ve üst tutucu bileşenleri için sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde MSC Patran [11] yazılımı kullanılmış ve çözümler MSC Nastran [12] sonlu eleman çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Yapısal deformasyonun en aza indirilmesi amacıyla bu parçalar çelik malzemeden üretilmiştir. M4 civataların uygulayabileceği sıkıştırma kuvveti aralığı yaklaşık olarak 2000 N olarak alınmıştır. Analizlerde, bu kuvvetler tutucuların civata deliği bölgelerine uygulanmıştır. Sınır koşulu olarak ise AKS’e temas eden ilk yüzeye

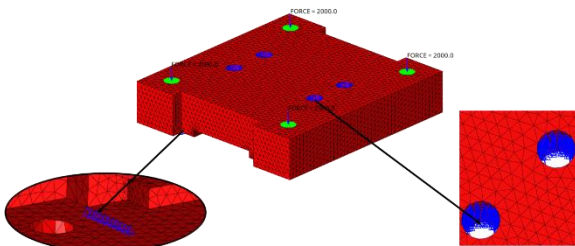
sabitlenme uygulanmış ve temasın karşı ucundaki deformasyon davranışı incelenmiştir. Deformasyonun gözlemlendiği bu nokta, 6'da kırmızı işaretlemelerle gösterilmiştir. Uygulanan sınır koşulları ve kuvvet noktaları, ilerleyen şekillerde detaylı biçimde gösterilmektedir.



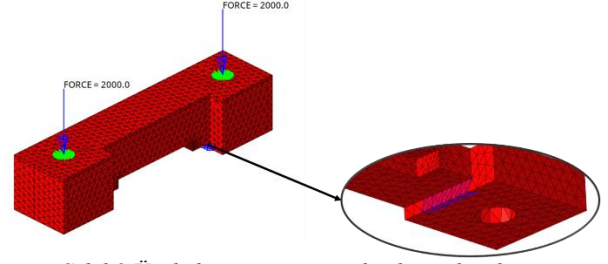
Şekil 6 Sonlu eleman modelinde deformasyonun gözlemlendiği kritik nokta (kırmızı işaretlemelerle)

Bu çalışmanın temel amacı, AKS'in tutucularla temas ettiği uzak uçta oluşabilecek deformasyonu en aza indirerek, bu yüzeyler arasında daha rijit ve güvenilir bir mekanik bağlantı sağlamaktır. Bu doğrultuda, oluşturulan sonlu eleman modelleri lineer analiz yöntemiyle çözülmüş ve deformasyon değerleri, Şekil 6'da belirtilen kritik noktada değerlendirilmiştir.

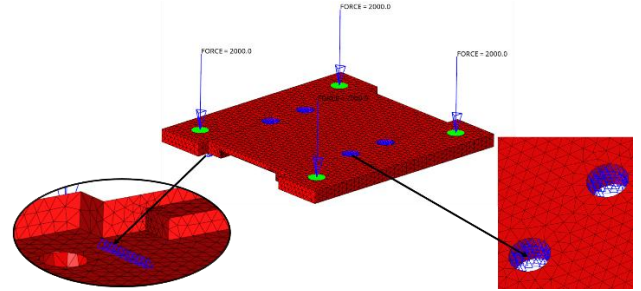
Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu durum, kalın tutucuların bağlantı yüzeylerinde daha rijit bir yapı sağladığını ve AKS'nin hedeflenen frekansa daha doğru şekilde ayarlanmasına olanak tanıyarak sistemin genel kararlılığını artırdığını ortaya koymaktadır.



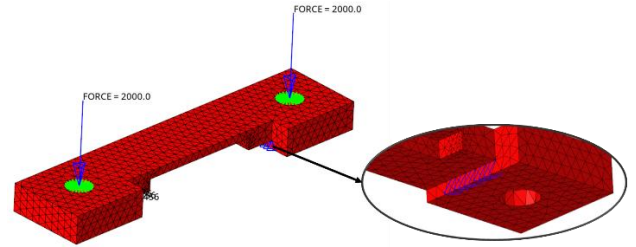
Şekil 7 Alt kalın tutucunun sonlu elemanlar ile modellenmesi



Şekil 8 Üst kalın tutucunun sonlu elemanlar ile modellenmesi



Şekil 9 Alt ince tutucunun sonlu elemanlar ile modellenmesi



Şekil 10 Üst ince tutucunun sonlu elemanlar ile modellenmesi

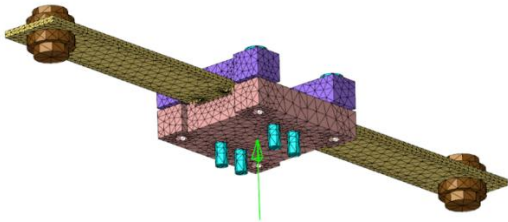
Tablo 1 Tutucuların uç noktasındaki deformasyon sonuçları

	Kalın Tutucular		İnce Tutucular	
	Alt	Üst	Alt	Üst
Deformasyon [mm]	0.0019	0.0013	0.0234	0.0554

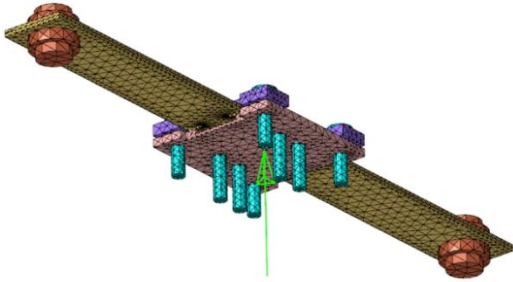
3.2 SONLU ELEMANLAR MODELLERİ İLE İNCE VE KALIN TUTUCULARIN MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZLERİ

Kiriş tipi yapıya AKS bileşenlerinin hem ince hem de kalın tutucu bağlantılarını içeren sonlu

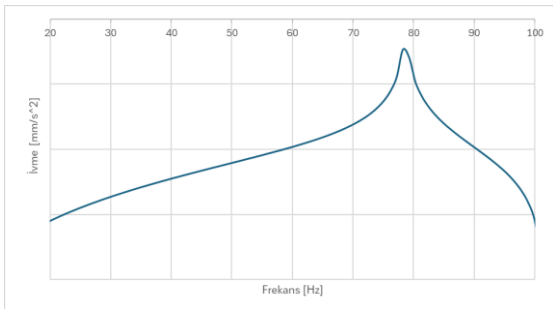
eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Tutucuların yapıya bağlandığı noktadan taban uyarımı uygulanmıştır. Bu modellerin temel amacı, tutucular aracılığıyla yapıya monte edilen AKS’lerin dinamik bağlantı davranışlarını doğru şekilde temsil etmektir. İnce ve kalın tutuculu AKS sistemlerine ait frekans tepki fonksiyonları sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14’de sunulmuştur. Her iki grafikten de AKS’lerin doğal frekansının yaklaşık 78 Hz civarında gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Ana yapıya, dış uyarım nedeniyle 78 Hz civarında yüksek genlikli zorlanmış titreşim göstermektedir. Bu nedenle, tasarlanan AKS’nin hedefi, yapının bu problemlili frekansta titreşim genliğini azaltacak şekilde 78 Hz’e ayarlanmasıdır.



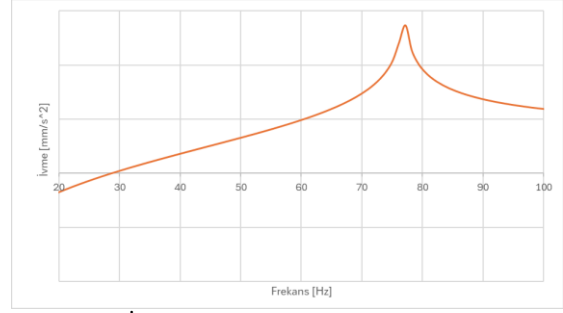
Şekil 11 Kalın tutuculu AKS yapısının sonlu eleman modeli



Şekil 12 İnce tutuculu AKS yapısının sonlu eleman modeli

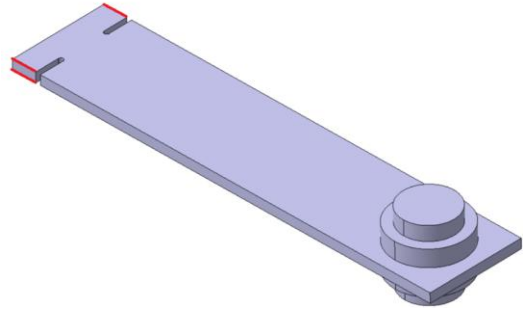


Şekil 13 Kalın tutuculu AKS sistemi için elde edilen frekans tepki fonksiyonu (FRF) grafiği

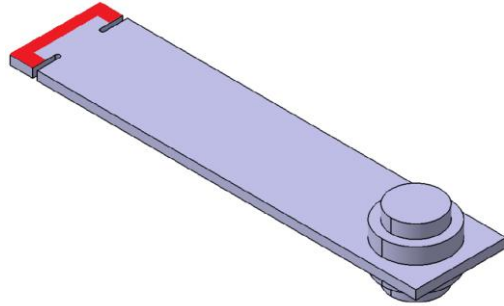


Şekil 14 İnce tutuculu AKS sistemi için elde edilen frekans tepki fonksiyonu (FRF) grafiği

AKS, alt ve üst tutucular arasında uygulanan sıkıştırma kuvveti sayesinde yapıya sabitlenmektedir. Bu nedenle, söz konusu bağlantının sonlu eleman modellemesinde gerçekçi sınır koşullarını yansıtabilmek adına iki farklı yaklaşım geliştirilmiştir.



Şekil 15 Kenar temasına dayalı bağlantı senaryosunda temas edilen bölgelerin gösterimi



Şekil 16 Yüzey temasına dayalı bağlantı senaryosunda temas edilen bölgelerin gösterimi.

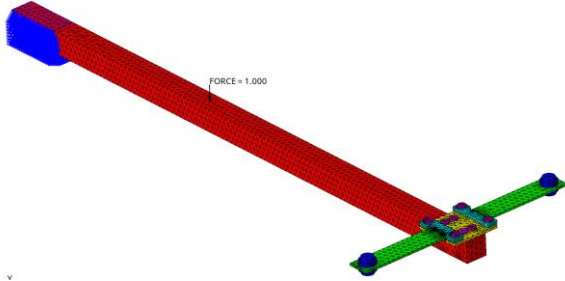
Birinci yaklaşımda, tutucu bileşenlerin deformasyona uğrayabileceği varsayılmış ve bu doğrultuda AKS’in yalnızca kenar bölgelerinden tutuculara temas ettiği kabul edilmiştir. Bu kenarlar Şekil 15’de gösterilmiştir. İkinci yaklaşımda ise, tutucuların deformasyona uğramadığı ya da deformasyonun ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu varsayılmıştır. Bu senaryoda, AKS’in tutuculara temas eden yüzeylerinin tamamında

rijit bir bağlantı olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzeyler Şekil 16'de gösterilmiştir. Böylece, temas alanlarının maksimum düzeyde etkileşim sağladığı ve daha rijit bir bağlantının gerçekleştiği varsayılmıştır.

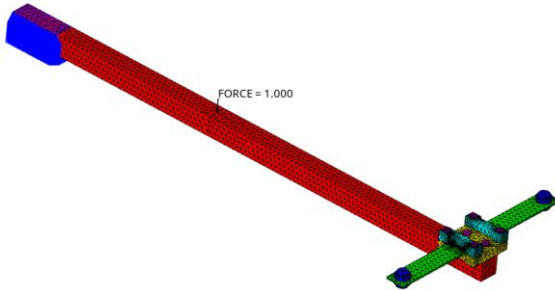
Her iki yaklaşımın hem ince hem de kalın tutucu geometrileri için uygulanmasıyla, toplam dört farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur: (1) ince tutucu – kenar bağlantı, (2) ince tutucu – yüzey bağlantı, (3) kalın tutucu – kenar bağlantı ve (4) kalın tutucu – yüzey bağlantı.

Bu modeller üzerinde yapılan analizler, MSC Patran yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sistemlerin dinamik davranışlarını değerlendirebilmek amacıyla, her bir model için frekans tepki analizleri uygulanmıştır. Bu analizlerle tutucu geometrisi ve bağlantı tipinin sistemin dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

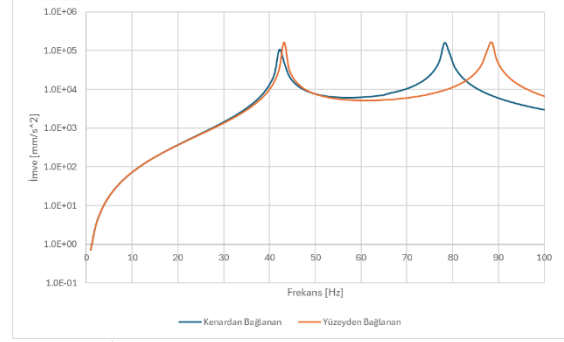
İnce tutuculu bağlantıya ait oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 17'de, kalın tutuculu bağlantıya ait model ise Şekil 18'de sunulmuştur. Her iki şekilde de kuvvetin uygulandığı noktalar ile sistemin sınır koşulları açık ve anlaşılır biçimde gösterilmektedir.



Şekil 17 İnce tutucu bağlantısına ait sonlu eleman modeli



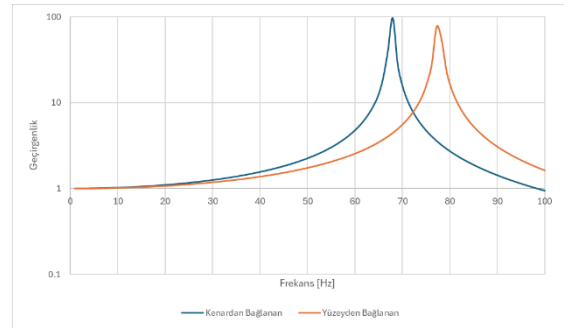
Şekil 18 Kalın tutucu bağlantısına ait sonlu eleman modeli



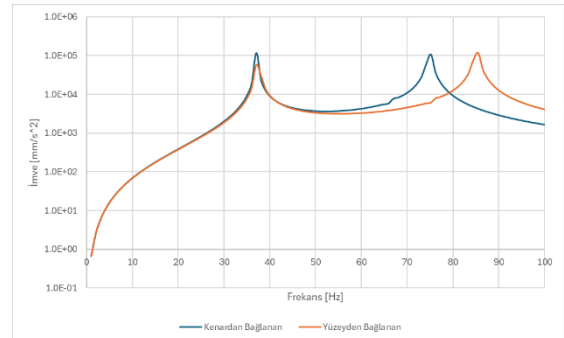
Şekil 19 İnce tutucu – kenar bağlantı modelinin frekans tepki fonksiyonu (FRF) grafiği

Sonlu eleman modelleri kullanılarak, belirlenen noktalardan uygulanan kuvvetin, AKS'in uç noktasında yer alan kütlede oluşturduğu ivme değerleri incelenmiştir. Buna ek olarak, kiriş tipi yapının serbest ucu ile kütle arasındaki geçirgenlik fonksiyonu analiz edilmiştir.

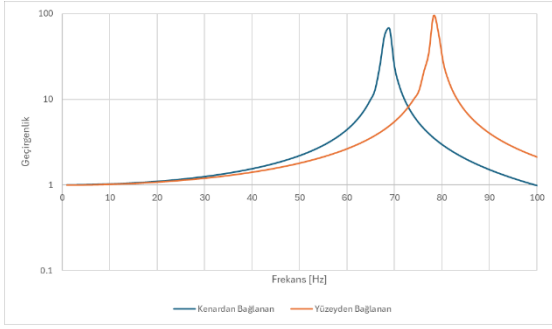
Analizler, MSC Patran yazılımı üzerinden kurulan modeller aracılığıyla, MSC Nastran çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, ince tutucuya sahip modellerin frekans tepki fonksiyonu ve geçirgenlik grafiklerine Şekil 19 ve Şekil 20'de yer verilmiştir. Aynı analizlerin kalın tutuculu versiyonları ise Şekil 21 ve Şekil 22 sunulmuştur.



Şekil 20 İnce tutucu – kenar bağlantı modelinin geçirgenlik fonksiyonu grafiği



Şekil 21 Kalın tutucu – yüzey bağlantı modelinin frekans tepki fonksiyonu (FRF) grafiği



Şekil 22 Kalın tutucu – yüzey bağlantı modelinin geçirgenlik fonksiyonu grafiği

Tüm senaryolarda, yüzeyden sabitlenen bağlantı modellerinde grafiklerin frekans ekseninde sağa kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum, şu anlama gelmektedir: Eğer tutucuların uç kısmında meydana gelen deformasyon ihmal edilebilecek düzeydeyse ve AKS ile tutucular arasında daha rijit bir bağlantı sağlanabilirse, hedeflenen AKS doğal frekansı sağlanabilir. Buna karşılık, tutuculara belirgin bir deformasyon oluşuyorsa ve bağlantı rijitliği tam olarak sağlanamıyorsa, sistemin davranışı kenardan sabitlenen modellerin sonuçlarına daha yakın olacaktır.

Bu bağlamda, önceki bölümde açıklandığı üzere, ince tutuculara daha fazla deformasyon beklenmektedir. Bu nedenle, bu yapıdaki konfigürasyonların dinamik tepkisinin, kenardan sabitlenen modellerin grafiklerine benzerlik göstermesi beklenmektedir. Buna karşılık, kalın tutucular daha rijit bir yapıya sahip olduğundan, yüzeyden sabitlenen modellerde elde edilen grafiklere daha yakın sonuçlar vermesi öngörülmektedir.

3.3 DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu çalışmada, ince ve kalın tutucuların dinamik yanıtlarını karşılaştırmak amacıyla sarsıcı sistemi kullanılarak titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde, giriş yapısına taban uyarımı uygulanmış ve bu uyarım random giriş sinyali ile sağlanmıştır. Sinyal işleme sürecinde Hanning pencere fonksiyonu ve %50 overlap yöntemi kullanılmıştır. Frekans tepki fonksiyonunun hesaplanmasında 30 ortalama alınmıştır. Titreşim ölçümleri, PCB Piezotronics marka piezoelektrik ivmeölçerler

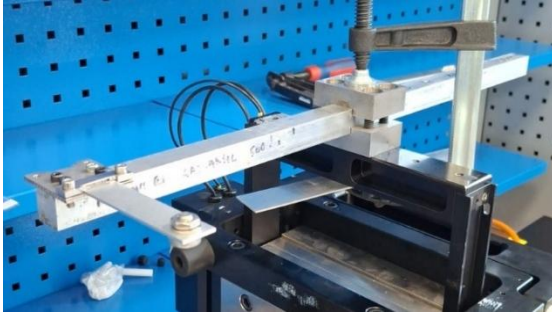
ile gerçekleştirilmiş; veri toplama ve analiz için Dewesoft marka donanım ve yazılım kullanılmıştır. Uyarım, APS Dynamics marka elektromekanik sarsıcı aracılığıyla uygulanmıştır. Bu uyarımlar sonucunda elde edilen frekans cevabı, geçirgenlik eğrileri üzerinden değerlendirilmiştir. Geçirgenlik eğrilerinde gözlemlenen tepe noktaları, sistemdeki AKS'nin doğal frekansını temsil etmektedir.

Deney düzeneği, sayısal analiz modelinden farklı olarak pratikte daha hızlı ve uygulanabilir olması adına taban uyarımı esas alınarak kurulmuştur. Aynı nedenle, simetrik tasarıma sahip AKS'nin yalnızca tek tarafı yapıya bağlanmıştır. Teorik olarak bu yöntem farkının geçirgenlik eğrisi üzerinde anlamlı bir değişikliğe yol açması beklenmemektedir. Dolayısıyla, test modelinin de analiz modelinde elde edilenle benzer bir geçirgenlik eğrisi üretmesi öngörülmektedir. Bu öngörü, gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmış ve tek taraflı bağlantı senaryosunun sistemin dinamik tepkisinde kayda değer bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Ayrıca, analizde kullanılan sınır koşulları ve uyarım konfigürasyonları ile uyumlu deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi planlanmakta olup, söz konusu çalışmalar ileriki araştırma aşamaları kapsamında değerlendirilecektir. Geçirgenlik hesaplamaları, kütle-sönümleyici sistemin uç kütlelerine ve bu kütlelerin bağlandığı giriş üzerindeki noktalara yerleştirilen ivmeölçerlerden elde edilen verilerle yapılmıştır. Bu ivmeölçerlerin frekans alanındaki genlik oranları alınarak geçirgenlik eğrileri oluşturulmuştur. Böylece sistemin farklı frekanslardaki titreşim geçirgenlik davranışı doğrudan gözlemlenebilmiştir.

Deney düzeneği, her bir tutucu türü için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Öncelikle kalın tutucularla testler gerçekleştirilmiş, ardından aynı düzenek ince tutucularla uygulanmıştır. Kalın tutucuya ait deney düzeneği Şekil 23'de gösterilmiştir. Aynı sistem ince tutucular için de kullanılmıştır. İnce tutucuya ait deney düzeneği Şekil 24'de gösterilmiştir.

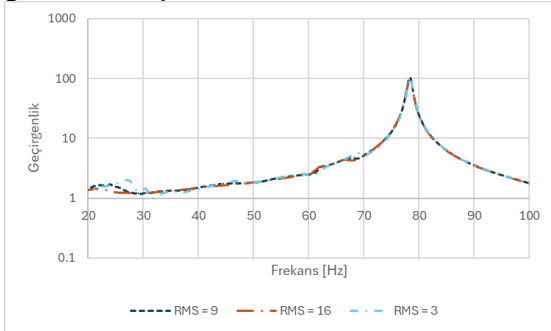


Şekil 23 Kalın tutucuya ait deney düzeneği



Şekil 24 İnce tutucuya ait deney düzeneği

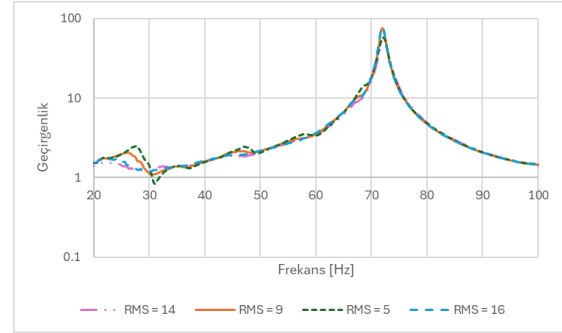
DeneySEL veriler, farklı giriş ivme (RMS) seviyelerinde gerçekleştirilen titreşim testleri sonucunda elde edilmiştir. İlk olarak kalın tutucularla 9, 16 ve 3 m/s² RMS değerlerinde testler yapılmıştır. Elde edilen geçirgenlik eğrileri Şekil 24’de sunulmuştur. Kalın tutucu için uygulanan üç farklı RMS seviyesinde de benzer sonuçlar elde edilmiş, geçirgenlik eğrilerinin büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 25 Kalın tutucu için farklı RMS seviyelerinde elde edilen geçirgenlik eğrileri

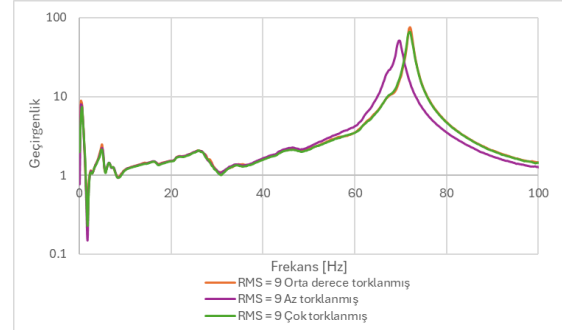
Ardından ince tutucularla 5, 9, 14 ve 16 m/s² RMS giriş ivmesi seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir. Bu tutucu için elde edilen geçirgenlik eğrilerinde (Şekil 26), özellikle tepe değerlerinde belirgin kaymalar meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, ince tutucunun dinamik davranışının uygulanan giriş

seviyesine daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

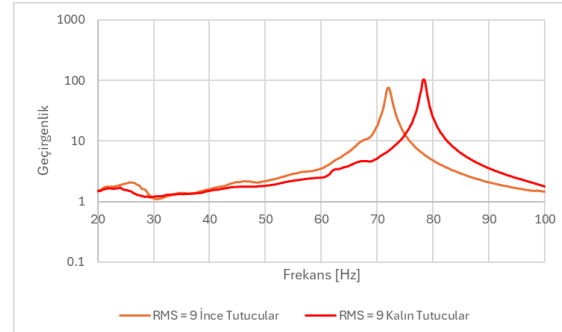


Şekil 26 İnce tutucu için farklı RMS seviyelerinde elde edilen geçirgenlik eğrileri

İnce tutucularda, montaj sırasında cıvatalara uygulanan torkun yapısal deformasyona neden olması beklenmektedir. Bu deformasyonun tutucunun dinamik karakteristiğini etkilediği öngörülerek, farklı tork seviyelerinde (standarttan düşük ve yüksek) testler tekrarlanmıştır. Bu kapsamda elde edilen geçirgenlik eğrileri Şekil 27’de sunulmuştur. Bu grafikten torklanma miktarının da hedeflenen AKS doğal frekansını tutturma üzerine etkisi olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 27 İnce tutucu için farklı tork seviyelerinde elde edilen geçirgenlik eğrileri



Şekil 28 İnce ve kalın tutucu için aynı RMS seviyelerinde elde edilen geçirgenlik eğrileri

İnce ve kalın tutucular arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, her iki

yapı için de ortak test koşulu olan 9 m/s^2 RMS giriş ivme seviyesi referans olarak alınmıştır. Bu seviyedeki geçirgenlik eğrileri karşılaştırıldığında (Şekil 28), tepe noktalarının frekans konumları arasında anlamlı bir fark gözlemlenmiştir. Özellikle ince tutucunun geçirgenlik eğrisinde, tepe (rezonans) noktasının kalın tutucuya kıyasla yaklaşık 6 Hz daha düşük frekansta gerçekleştiği belirlenmiştir.

3.4 SEM VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

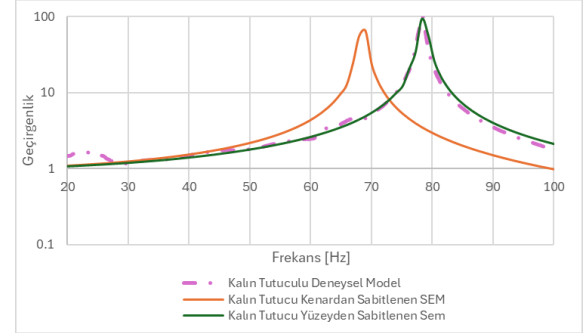
Bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen geçirgenlik eğrileri ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada her iki tutucu tipi için 9 m/s^2 RMS giriş ivmesine karşılık gelen deneysel veriler esas alınmıştır. Bu değer hem ince hem de kalın tutucular için ortak referans seviyesi olarak kullanılmıştır.

Kalın tutucu için oluşturulan SEM modellerinde iki farklı bağlama yaklaşımı uygulanmıştır: biri, tutucunun tabana geniş bir yüzeyden tam temasla bağlandığı model; diğeri ise yalnızca kenar bölgesinden sınırlı temasla bağlandığı modeldir. Her iki modelden elde edilen geçirgenlik eğrileri, deneysel olarak ölçülen eğriyle birlikte Şekil 29'da gösterilmiştir. Şekil 29'dan görüldüğü üzere, deneysel geçirgenlik eğrisi yüzeyden bağlanan SEM modeliyle yüksek oranda çakışmaktadır.

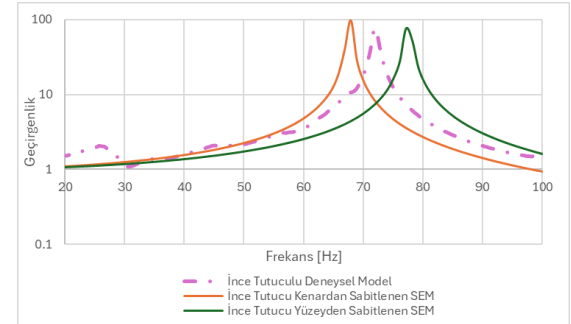
Bu durum, kalın tutucunun montajında yeterli rijitliğin sağlandığını ve bu sayede sönümleyicinin hedeflenen frekansa başarılı şekilde ayarlanabildiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, rijit bağlantı sayesinde sistem teorik olarak öngörülen dinamik tepkiye yakın davranış sergilemiştir.

Benzer analiz, ince tutucu için de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 30'da verilmiştir. İnce tutucu için oluşturulan yüzey ve kenar bağlantılı SEM modellerinden elde edilen eğriler ile deneysel eğri karşılaştırıldığında, deneysel rezonans frekansının iki model arasında bir konumda gerçekleştiği görülmüştür. Yani, tepe frekansı yüzey bağlantılı modele göre daha düşük, kenar bağlantılı modele göre ise daha yüksek

çıkmıştır. Bu sonuç, ince tutucunun bağlantı bölgesinde tam rijitliğin sağlanmadığını ve sönümleyicinin hedeflenen frekansa tam olarak ayarlanmadığını göstermektedir. Montaj sırasında meydana gelen deformasyon ve sınırlı temas alanı, cıvatalama ile sağlanması gereken rijitliği azaltmış ve bu durum, sistemin dinamik tepkisinde frekans kaymalarına yol açmıştır. Elde edilen bulgular, sönümleyici sistemin hedeflenen tuning frekansına ulaşabilmesi için bağlantı noktalarının yeterli rijitliğe sahip olması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Bağlantı koşullarındaki gevşeklik veya deformasyon, sadece yapısal stabiliteyi değil, aynı zamanda AKS sisteminin frekans hassasiyetini ve performansını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 29 Kalın tutucular için sonlu eleman ve deneysel geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 30 İnce tutucular için sonlu eleman ve deneysel geçirgenlik grafiklerinin karşılaştırılması

Sonuç olarak, sonlu elemanlar metoduyla elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olabilmesi; yalnızca malzeme özelliklerinin ve geometrinin doğru tanımlanmasına değil, aynı zamanda bağlantı şekli ve temas kalitesinin de gerçeğe uygun biçimde modellenmesine bağlıdır. Özellikle ince ve esnek yapıların yer aldığı sistemlerde, bağlantı rijitliği rezonans frekanslarını doğrudan etkileyebilmekte; bu da sistemin dinamik tepkisinde önemli sapmalara

neden olabilmektedir. Bu nedenle, SEM analizlerinde bağlantı koşullarının doğru şekilde tanımlanması, model doğruluğu ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi açısından kritik bir gerekliliktir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, ayarlanmış kütle sönümleyicilerin (AKS) yapıya bağlantı rijitliğinin, sistemin dinamik davranışı ve özellikle sönümleyicinin hedeflenen frekansa doğru şekilde ayarlanabilmesi üzerindeki etkisi hem deneysel yöntemlerle hem de sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Farklı rijitlikte tasarlanan iki bağlantı elemanı olan kalın ve ince tutucular kullanılarak yapılan testler sonucunda, kalın tutucuların yapıya daha rijit bir bağlantı sağladığı ve bu sayede AKS'nin hedeflenen doğal frekansına daha doğru şekilde ayarlanabildiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, ince tutucularda bağlantı deformasyonları ve temas kayıpları nedeniyle sistemin rezonans frekansında kaymalar meydana gelmiş ve frekans cevabında tutarsızlıklar ortaya çıkmıştır.

Sonlu eleman analizleri ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, bağlantı şekli ve rijitliğinin doğru modellenmesinin, sistem tepkisinin güvenilir şekilde tahmin edilmesi açısından kritik olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, AKS sistemlerinin istenilen performansa ulaşabilmesi için yalnızca frekans ayarının değil, bağlantı tasarımının da titizlikle ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] E. Frahm, "Device for damping vibrations of bodies," 1909.
- [2] Den Hartog, J. P. (1956). Mechanical Vibrations. McGraw-Hill.
- [3] Soong, T. T., and Spencer, B. F., Jr., 2002, "Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of the Practice," Eng. Struct., 24, pp. 243–259

[4] Chen, G., & Wu, J. (2001). Optimal placement of multiple tune mass dampers for seismic structures. *Journal Of Structural Engineering*, 33(9), 1054-1062. 10.1061/(ASCE)0733-445(2001)127:9(1054)

[5] Qinyu W., Gennaro S., Kaspar J., Arjan H, Patrick T., (2020), Vibration Suppression Through Variable Stiffness and Damping Structural Joints. *Frontiers in Built Environment*
<https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2020.550864>

[6] Padmanabhan, K. K., & Murty, A. S. R. (1991). Damping in structural joints subjected to tangential loads. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 205(2), 121-129.

[7] Karpanan, K., O'Toole , B., & Masoud Feghhi, M. (2006). Experimental and finite element analysis of preloaded bolted joints under impact loading. *Structural Dynamics, and Materials Confere*.
DOI: 10.2514/6.2006-1757

[8] Kim, D. H., & Han, J. S. (2022). Frequency response similarity-based bolt attaching force prediction method using convolutional neural networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(8), 3801-3813.

[9] Zhang, Ming & Jiang, Yanyao & Lee, Chu-Hwa. (2007). Finite Element Modeling of Self-Loosening of Bolted Joints. *Journal of Mechanical Design*. 129. 10.1115/1.2406092.

[10] Ewins, D. J. (1984). *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press.

[11] MSC Software Corporation. (2023). MSC Patran (Version 2019) [Computer software]. Hexagon AB.

[12] MSC Software Corporation. (2023). MSC Nastran (Version 2019) [Computer software]. Hexagon AB.