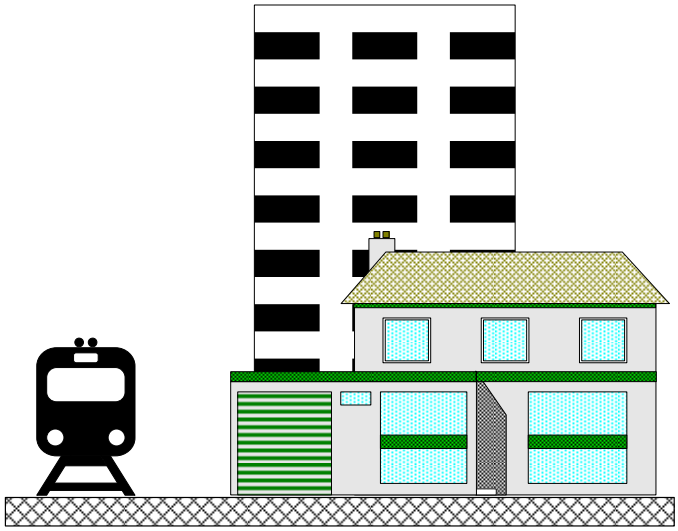
Proje No:	106M443
Proje Adı:	**Raylı Sistem Titreşimlerinin Yolcu ve Çevre Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi**
Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. Rahmi Güçlü
Proje Çalışanları:	Araştırmacılar: Arş. Gör. Muzaffer Metin, Arş. Gör. Hakan Yazıcı, İnş. Yük. Müh. N.Sevgi Yalçın
Destekleyen Kuruluş:	TÜBİTAK 1001
Proje Bütçesi:	160.150,00 TL
Proje Süresi:	(36 ay-Tamamlandı) 01.02.2007-01.02.2010

Proje Özeti:

Bu projede, İstanbul ulaşımında kullanımda olan bir hafif metro aracına ve raylı sistem hattı çevresinde bulunan bir binaya ait titreşim analizleri, teorik ve deneysel olarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Hafif metro aracı ve binaya ait matematik modeller çıkartılmıştır. Daha sonra, raylı taşıt hareket halindeyken, taşıt içerisinde ve hat çevresinde bulunan binada titreşim ölçümleri yapılmıştır. Kurulan modellerin, ölçüm şartları altında gerçek bozucu girişler kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Sistematik bir yaklaşım için, elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Raylı taşıt-yol etkileşimi ile ortaya çıkan titreşimlerin ölçülmesiyle, mevcut durumun konfor ve güvenlik açısından düzeyi, ilgili standartlarla karşılaştırılarak araştırılmıştır. Son aşamada, raylı taşıt-yol etkileşimi ile oluşan titreşimlerin, taşıt içerisinde, yolda ve yayılma alanında azaltması yönünde çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur.

Problemin Tanımı:



Şekil 1. Raylı sistemin çevre ile ilgisi

Tren hareketiyle ortaya çıkan titreşime etki eden faktörleri üç başlık altında toplayabiliriz;

— Ray üzerinde oluşan ondülasyonlar (Şekil 2) ve diğer bozulmalar (balast çökmeleri ve balast hasarları sonucu yol bozukluklarının artması),

Şekil 2. Ray üzerinde oluşan ondülasyonlar (www.corrugation.eu)

— Taşıt tekerleğinin üzerinde yatay-düz bir form oluşması veya tahrip olmuş olması (aplatilik),

— Raylar arasında küçük açıklıkların bulunması veya bu açıklıklarının kaynaklanmış olması.

Raylı sistem kaynaklı titreşim düzeyine etki eden bazı yol faktörleri şu şekilde sayılabilir:

— Yol yapısının esnek (balastlı yol) veya rijit (balastsız yol) olması,

— Traverslerin ahşap veya betonarme olması,

— Köprülerin çelik veya betonarme olmaları,

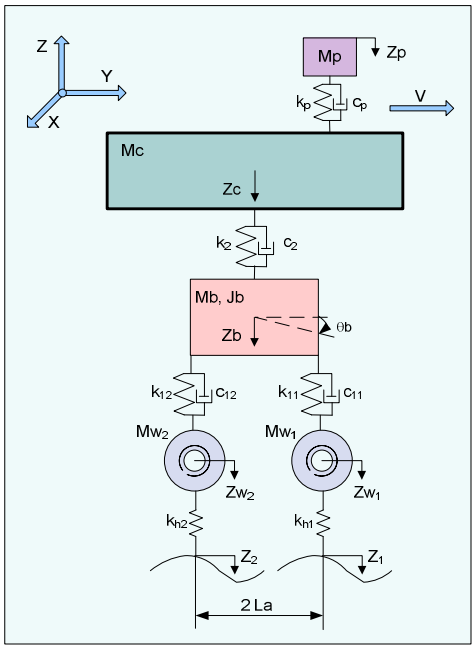
— Rayların aşınma veya kaynak problemlerinin olup olmamaları.

Modelleme ve Simülasyon

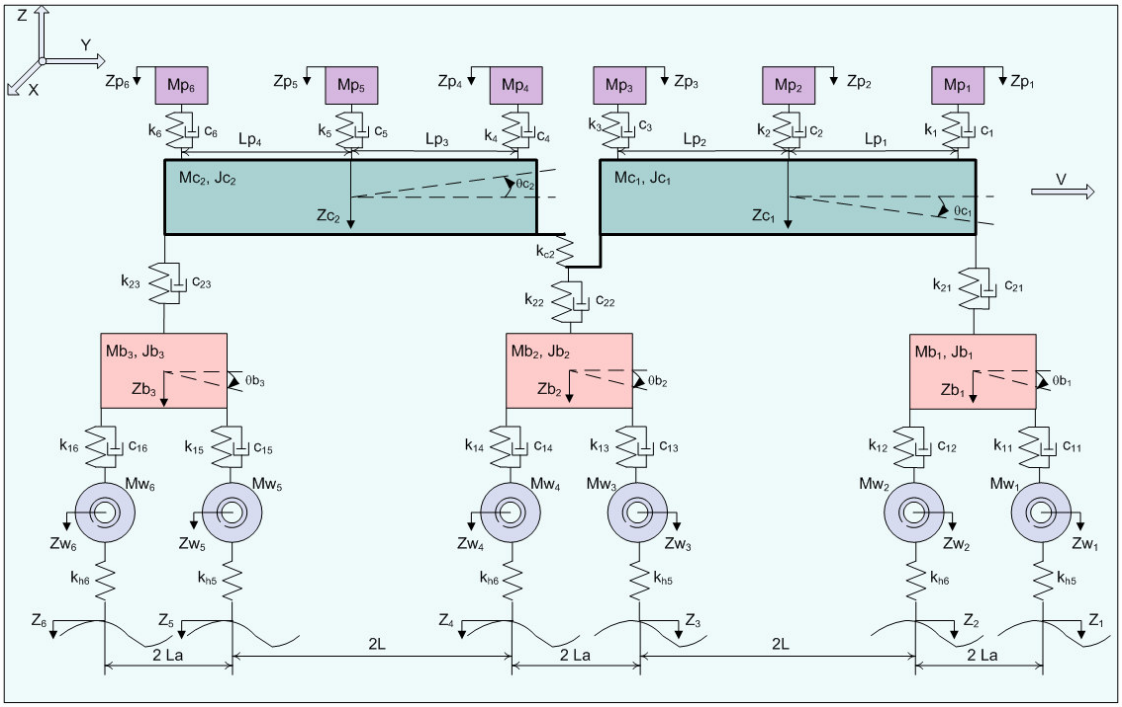
Raylı sistem titreşimlerinin yolcu ve çevreye olan etkileri incelenirken, ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) hafif metro aracı (Şekil 3) kullanılarak titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3. ABB hafif metro aracı

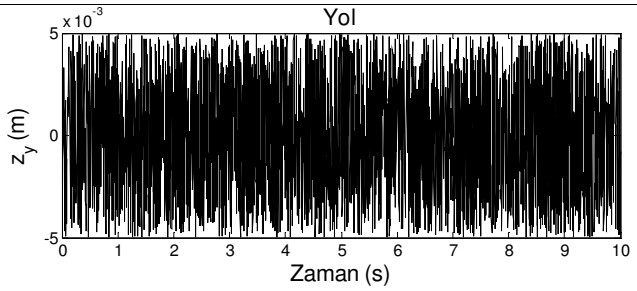
Bu bölümde, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım A.Ş. tarafından kullanıma sunulan ABB raylı sistem hafif metro aracında, gerçek bir yol girişi sonucu oluşan titreşimler 6 ve 22 serbestlik dereceli raylı taşıt dinamik modelleri kurularak incelenmiştir (Şekil 4 ve 5).



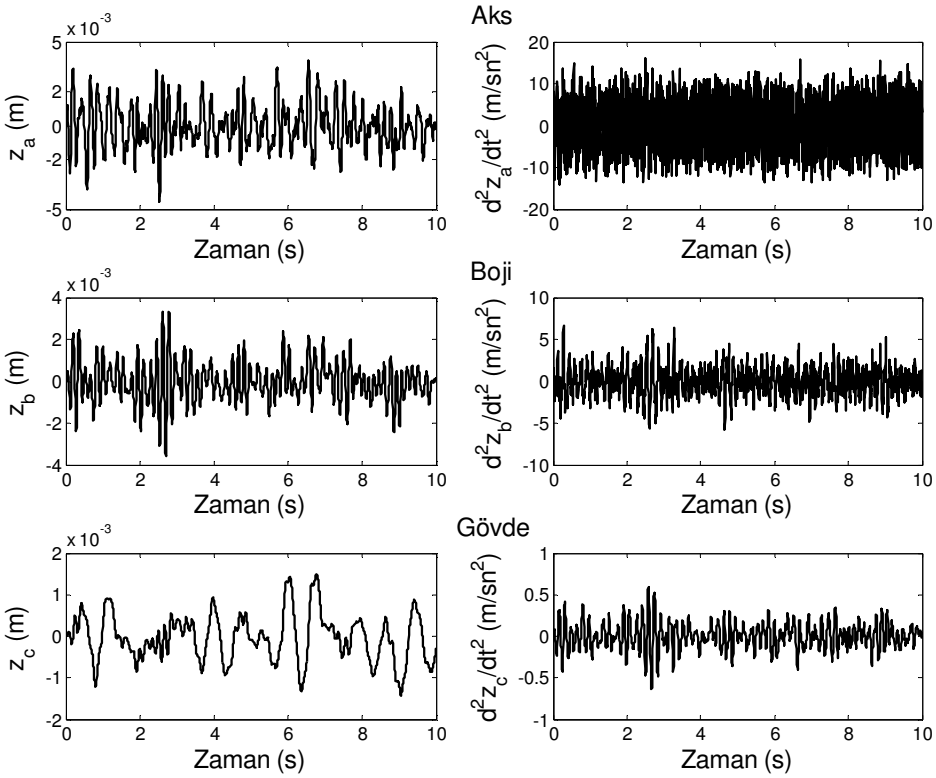
Şekil 4. 6 Serbestlik dereceli raylı taşıt fiziksel modeli



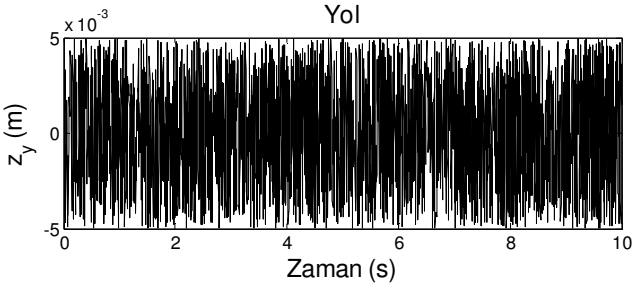
Şekil 5. 22 Serbestlik dereceli raylı taşıt fiziksel modeli



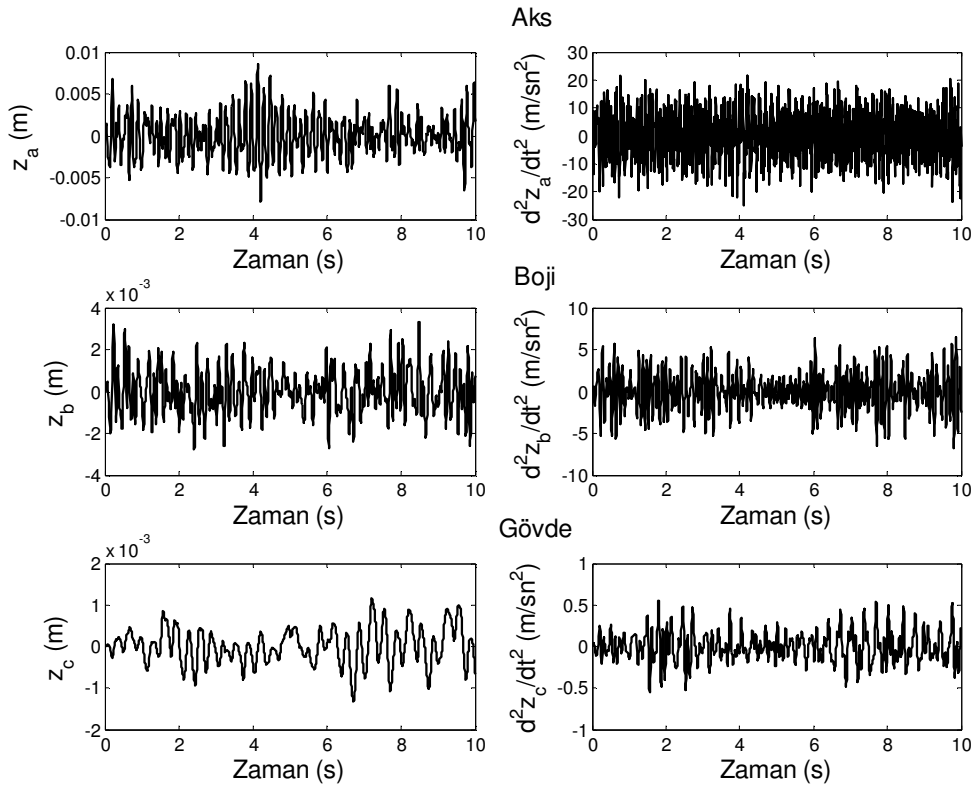
Şekil 6. 6 serbestlik dereceli modele uygulanan rastgele yol girişi



Şekil 7. 6 serbestlik dereceli modele ait zaman cevabı

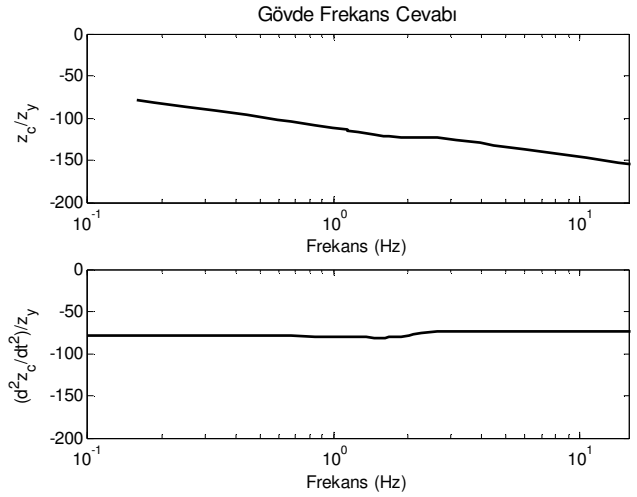


Şekil 8. 22 serbestlik dereceli modele uygulanan rastgele yol girişi

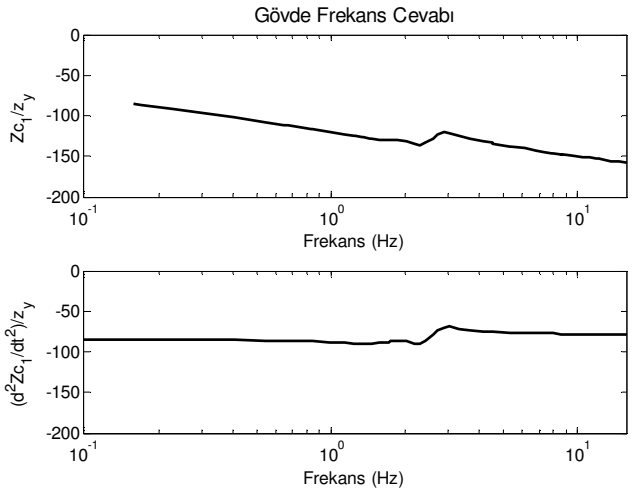


Şekil 9. 22 serbestlik dereceli modele ait zaman cevabı

Frekans analizlerinde, giriş ve çıkış değişkenleri için araç gövdesi seçilmiştir. Böylece, sırasıyla 6 ve 22 serbestlik dereceli modeller için araç gövdesine ait frekans cevapları Şekil 17 ve 18'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



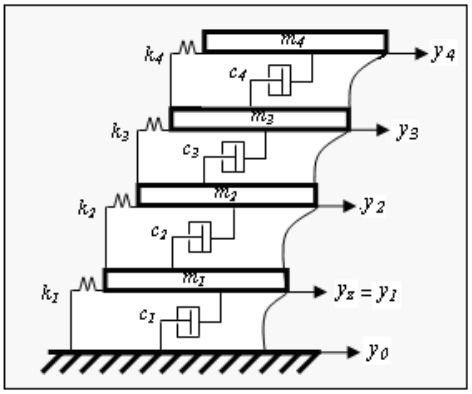
Şekil 10. 6 serbestlik dereceli model için frekans cevabı



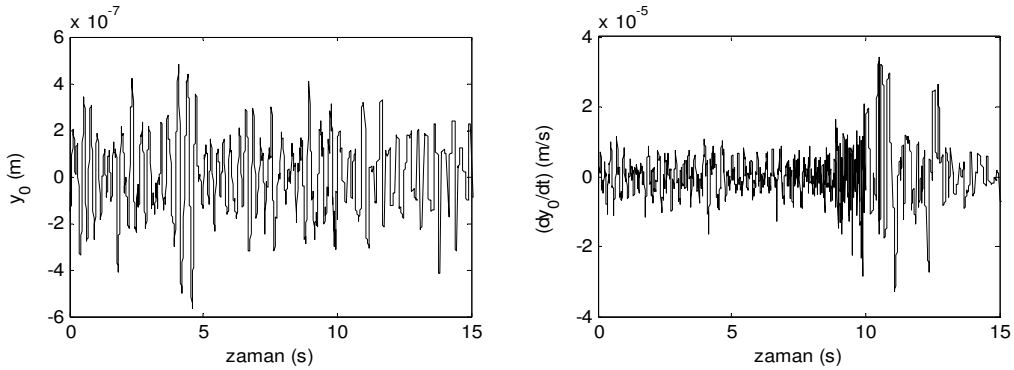
Şekil 11. 22 serbestlik dereceli model için frekans cevabı.

Modellenen Ulaşım A.Ş. yönetim binasının raylı sistem kaynaklı titreşimlerinin analizi için, ölçüm çalışmalarında kullanılan LRT test aracının binanın yanından geçmesi esnasında, binanın zemininden ölçülen yer hareketi bozucu giriş olarak matematik modele dahil edilerek simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

4 serbestlik dereceli yapının fiziksel modeli Şekil 12'de gösterilmektedir.

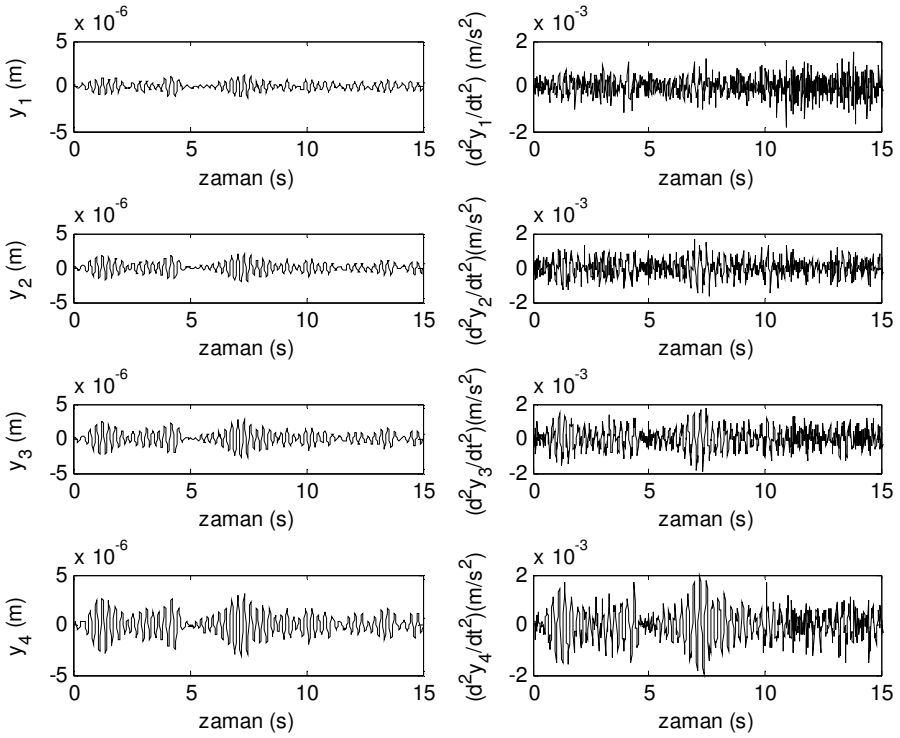


Şekil 12. 4 Serbestlik dereceli bina modeli

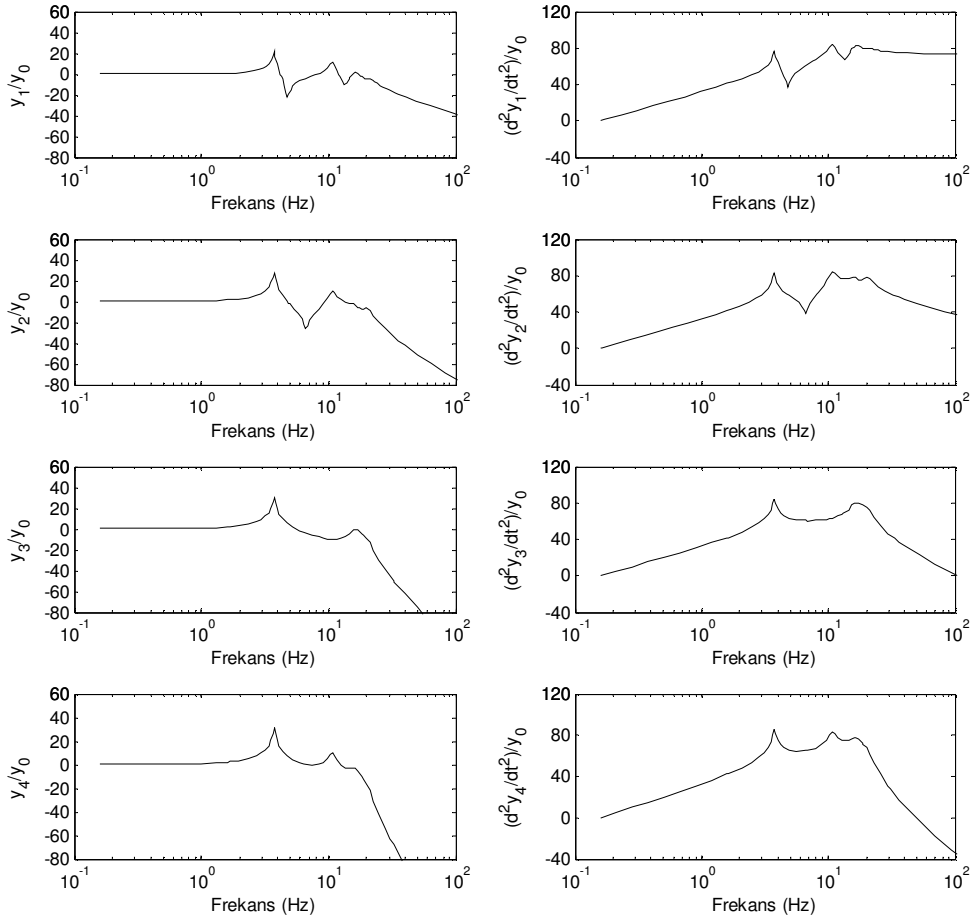


Şekil 13. Ulaşım A.Ş. Yönetim binasına Y yönünde uygulanan bozucu yer hareketi

Ölçüm sonucunda elde edilen bozucu yer hareketine karşı, Ulaşım A.Ş. Yönetim binasının katlarının yer değiştirme ve ivme cevapları Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Ulaşım A.Ş. Yönetim binasının katlarının yer değiştirme ve ivme cevapları



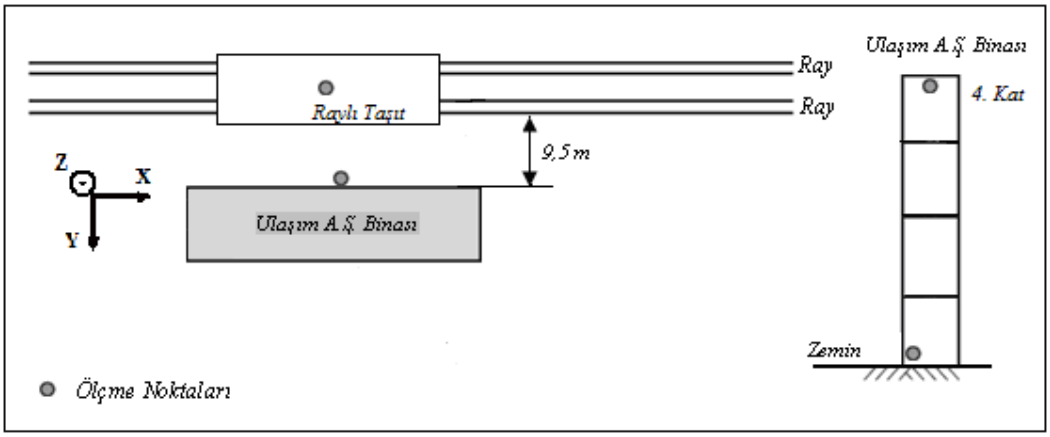
Şekil 15. Katların yer değiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları

Titreşim Ölçümleri:

Ulaşım A.Ş.'de mevcut olan ve tarafımızca modellenen ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) hafif metro raylı aracı ve yakınındaki idari bina üzerinde titreşim ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla ölçüm alanı olarak, Ulaşım A.Ş. Genel Müdürlüğü'nün Esenler'deki raylı taşıt parkı seçilmiştir.

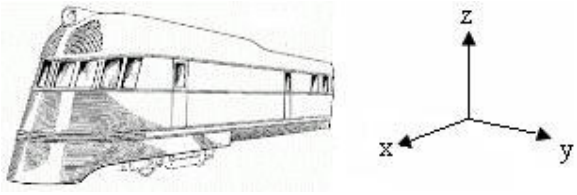
Şekil 16. Titreşim ölçümü yapılan bina

Şekil 17. Titreşim ölçümü yapılan raylı taşıt

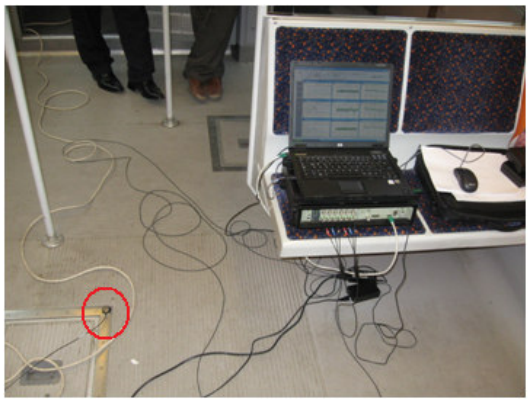


Şekil 18. Ölçüm yapılan alana ait plan

Şekil 19. Titreşim analiz cihazı PULSE Type 3560C-E01 ve ekipmanları



Şekil 20. Ölçüm yapılan eksen takımları

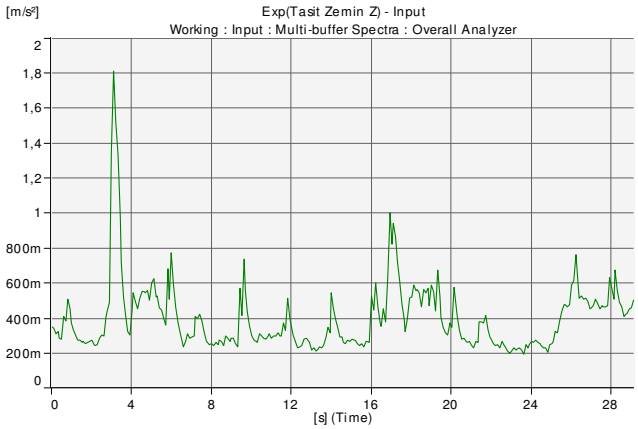


Şekil 21. Raylı taşıt içi zemin titreşimlerinin ölçülmesi

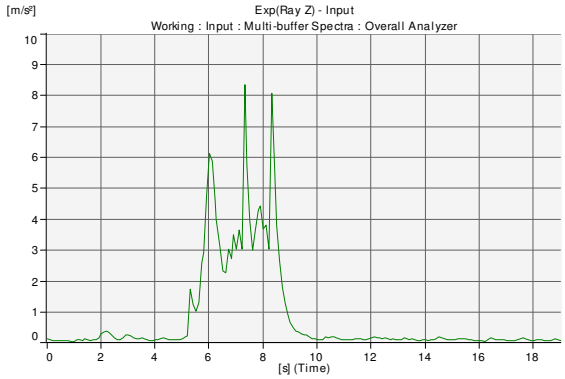
Şekil 22. Yolcu koltuğu titreşimlerinin ölçülmesi

Şekil 23. Ray titreşimlerinin ölçülmesi

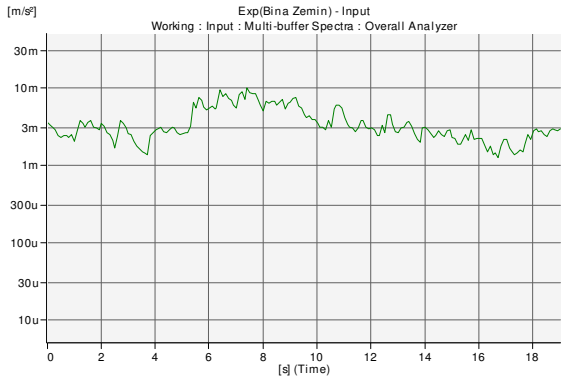
Şekil 24. Bina dış zemininden titreşim ölçümlerinin alınması



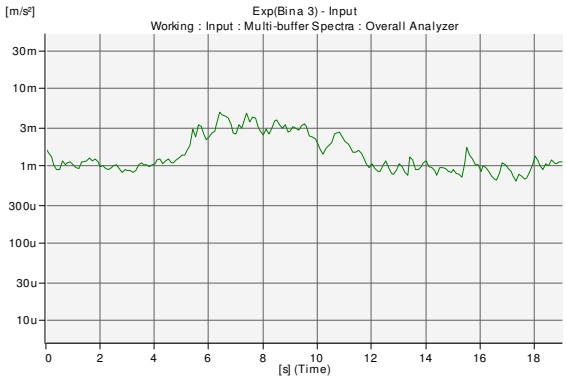
Şekil 25. 30 km/h Taşıt hızı için raylı taşıt iç zemininden ölçülen düşey titreşim ivme değerleri



Şekil 26. 30 km/h Taşıt hızı için raydan ölçülen düşey titreşim ivme değerleri



Şekil 27. 30 km/h Taşıt hızı için bina dış zemininden ölçülen düşey titreşim ivme değerleri

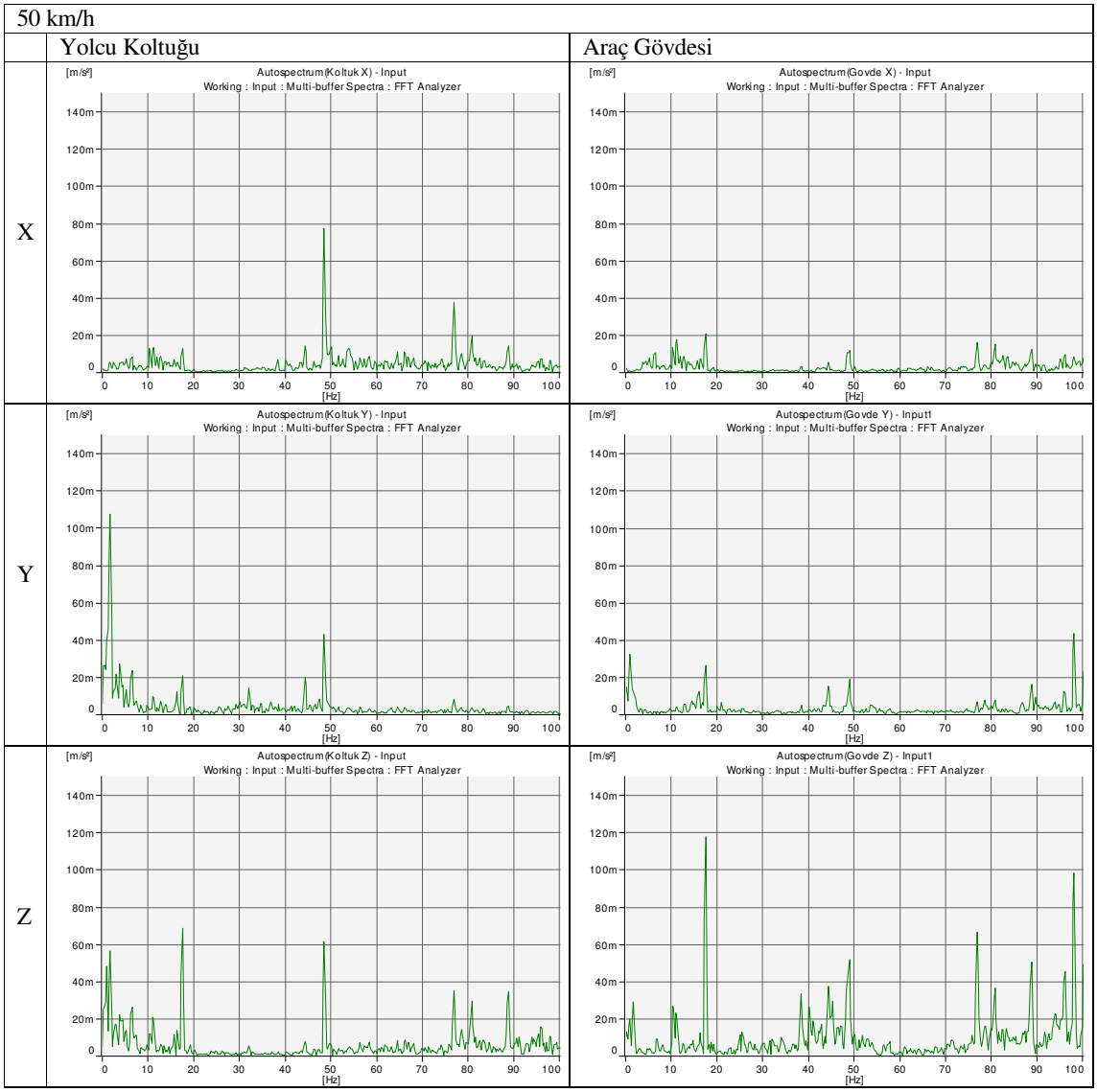


Şekil 28. 30 km/h Taşıt hızı için bina 4. katından ölçülen düşey titreşim ivme değerleri

Aksaray-Havalimanı hafif metro hattının Bakırköy-Bahçelievler istasyonları arasında yapılan konfor ölçümleri için, tekerlekleri tornalanmış 3 vagon dizisinden oluşan ABB 514 numaralı hafif metro aracının yolcu koltuğundan ve araç zemininden titreşim ölçümleri alınmıştır.

Ölçüm sonuçları, "ISO 2631-1 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 1: General requirements" ve "ISO 2631-4 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems" standartlarına uygun olarak yolcu konforu amacıyla değerlendirilmiştir. Yolcuların ve personelin konforu amacıyla yapılan ivme titreşimlerinin ölçüm ve değerlendirmeleri, ilgili standartlara uygun olarak, 0.4

Hz ile 100 Hz frekans aralığında (ISO 2631-1, 1997) ve 1/3 oktav bantlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 29. Aksaray-Havalimanı hafif metro hattı Bakırköy-Bahçelievler istasyonları arasında, LRT aracı ile 50 km/h seyahat hızında, yolcu koltuğu ve araç gövdesinden ölçülen titreşim değerleri

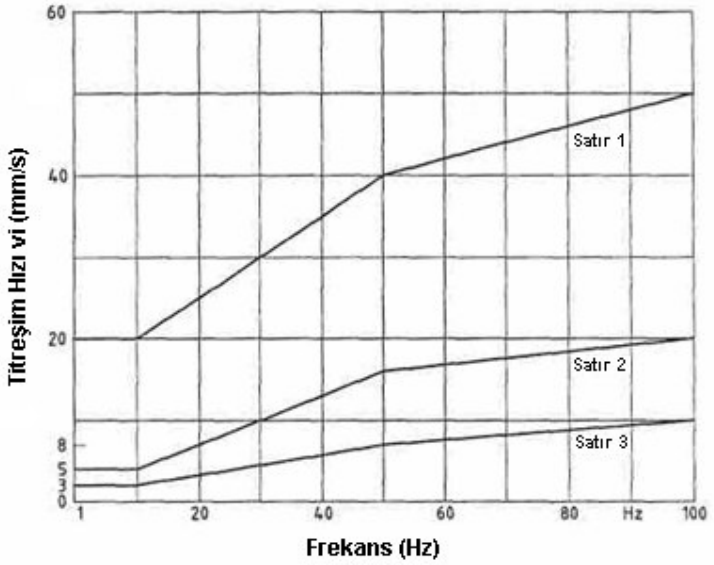
Tablo 1. Yapılan ölçümler sonucu LRT aracında elde edilen toplam ivme düzeyleri ve konfor açısından değerlendirilmesi

		Toplam İvme Düzeyleri a_v (m/s^2)	Değerlendirme
50 km/h	Yolcu Koltuğu	0,76	7
	Araç Zemini	0,58	8
30 km/h	Yolcu Koltuğu	0,66	7
	Araç Zemini	0,47	9

Bu sonuçlara göre, hafif metro aracının ölçüm yapılan mevkide, 50 km/h ve 30 km/h hızlarda seyehat etmesi halinde genel konfor düzeyinin iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Raylı Sistem Titreşimlerinin Çevredeki İnsanlar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi:

Proje kapsamında raylı sistem titreşimlerinin yapısal sistemler üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla Ulaşım A.Ş. Genel Müdürlüğünün Esenler'deki idari binasında ölçümler yapılmıştır. Güvenlik analizi için DIN 4150-3, konfor analizi için ise DIN 4150-2 standardına uygun olarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 30. Titreşim hızı (v_i) dayanak değerlerinin grafik gösterimi

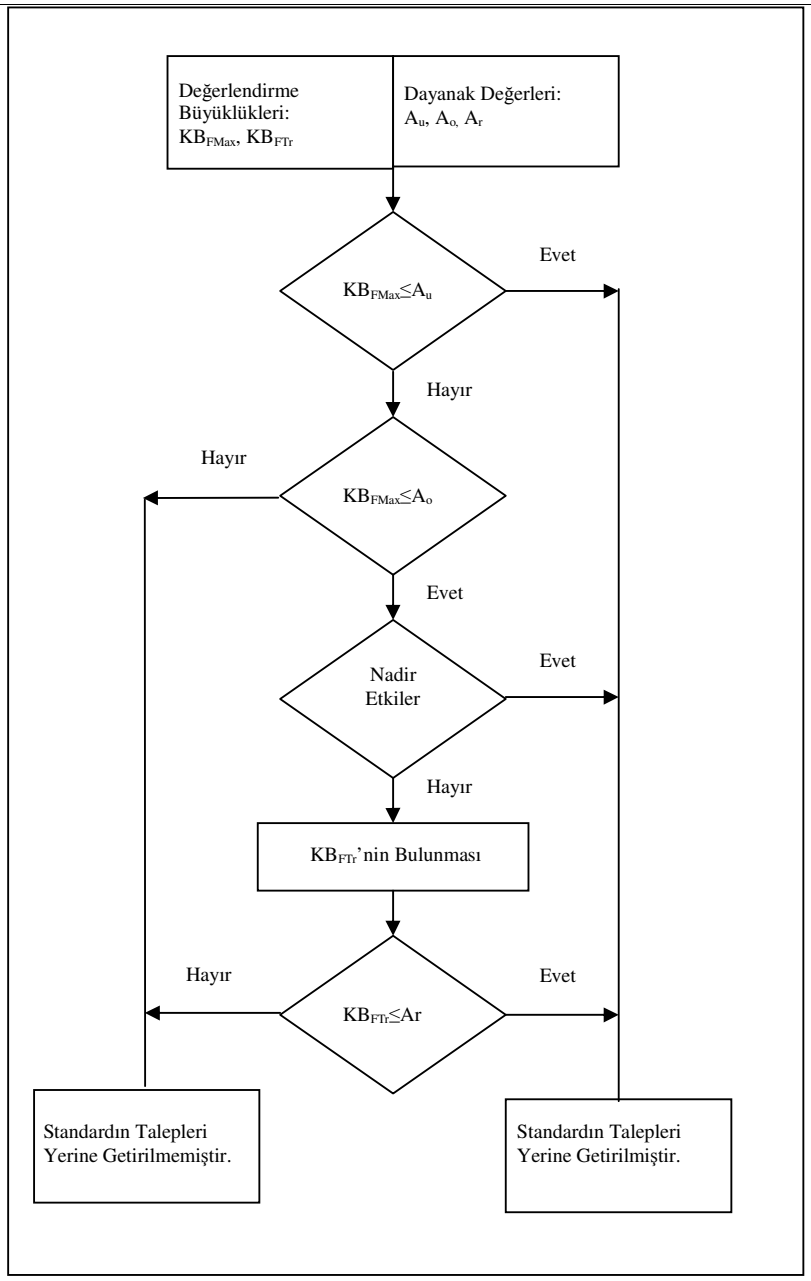
Tablo 2. Ulaşım A.Ş. yönetim binasında ölçülen en yüksek hız değerleri

	Dış Zemin (mm/s)	4. Kat (mm/s)
x yönünde	0.462	0.429
y yönünde	0.421	0.115
z yönünde	0.073	0.0187

Tablo 3. Ulaşım A.Ş. Yönetim binası için değerlendirme büyüklüklüleri

	v_{max}(mm/s)	KB	KB_{Fmax}
Dış Zemin	0.462	0.324	0.227
4.Kat	0.421	0.295	0.207

Raylı taşıtın, Ulaşım A.Ş. Yönetim Binasının yanından 20 km/h hızla geçmesi esnasında binada oluşan titreşimlerin, binada çalışan insanlar açısından herhangi bir konfor problemine neden olmayacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 31. DIN 4150-2 Standardı değerlendirme yöntemi için kullanılan akış diyagramı

Titreşimlerin Azaltılması İçin Çözüm Önerileri:

Titreşimi Kaynağında Azaltmak

Titreşim oluşturan kaynakların azaltılması başlığı altında yapılan çalışmanın içine taşıtların, tekerlek-ray etkileşimi açısından tekerlek ve rayların tasarımı sırasında alınacak önlemler girmektedir. Bu nedenle imalat yapılırken, tekerlek-ray etkileşimi sonucu ortaya çıkacak titreşimin standartlara uygun olup olmadığı araştırılmalıdır. Daha sonra bu tasarımın zaman aşımıyla titreşim üretim veya yalıtımlarında değişiklik olup olmadığı kontrol edilmeli ve bununla ilgili standartlara uygunluğu araştırılmalıdır. Bu nedenle raylı ulaşım araçları, hat boyundaki gürültü ve titreşim oluşturan ekipmanların periyodik bakımları yapılmalı, arızalı parçalar en kısa zamanda onarılarak gürültü ve titreşim oluşumunun önüne geçilmelidir.

Tekerlek-Ray Etkileşiminden Kaynaklanan Titreşimlerin Önlenmesi

Taşıt-yol etkileşimi sonucunda oluşan titreşim ve gürültüyü azaltmak için demiryolu yapısında alınabilecek önlemler şu şekildedir sıralanabilir:

— Daha düzgün ve pürüzsüz yüzey elde etmek için rayların bakımı, taşlanması ve yağlanması,

— Düzgün temas yüzeyi oluşturmak için ve tekerlek üzerindeki aşınmaları ve düzleşen bölgeleri gidermek için tekerleklerin tornalanması.

— Rayların elastik ya da plastik lifler ile kaplanması,

— Birbirini izleyen raylar arasındaki küçük boşlukların sürekli kaynaklarla doldurulmasıyla bu boşlukların ortadan kaldırılması,

— Balastlı üstyapıda gerekli periyodik bakımların yapılarak, ray altında meydana gelen balast boşluklarının önüne geçilmesi,

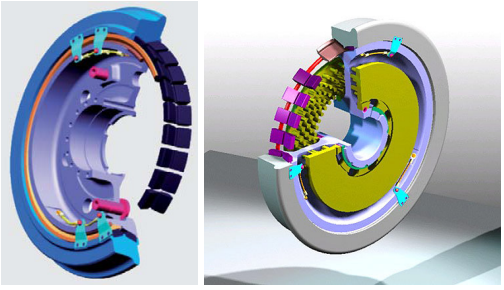
— Demiryolunun periyodik bakımlarla, oluşabilecek çökmelerin veya bozulmaların önüne geçilmesi,

— Demiryolu kurplarının uygun bir şekilde tasarlanması,

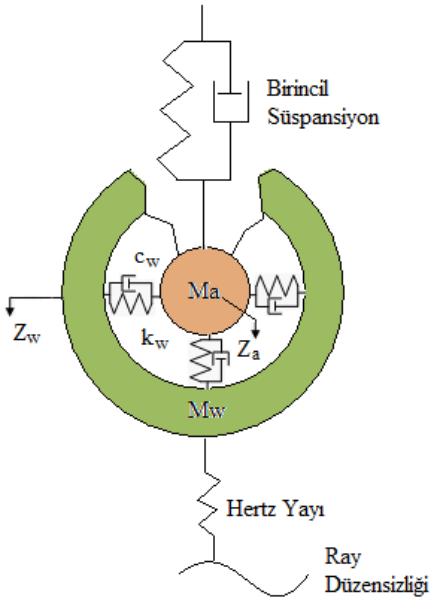
— Dizel motorlu ve ağır trenler yerine elektrikli sistemler ve hafif trenler kullanılmalıdır.

Titreşimi İletim Yolunda Azaltmak- Esnek Tekerlek Uygulaması

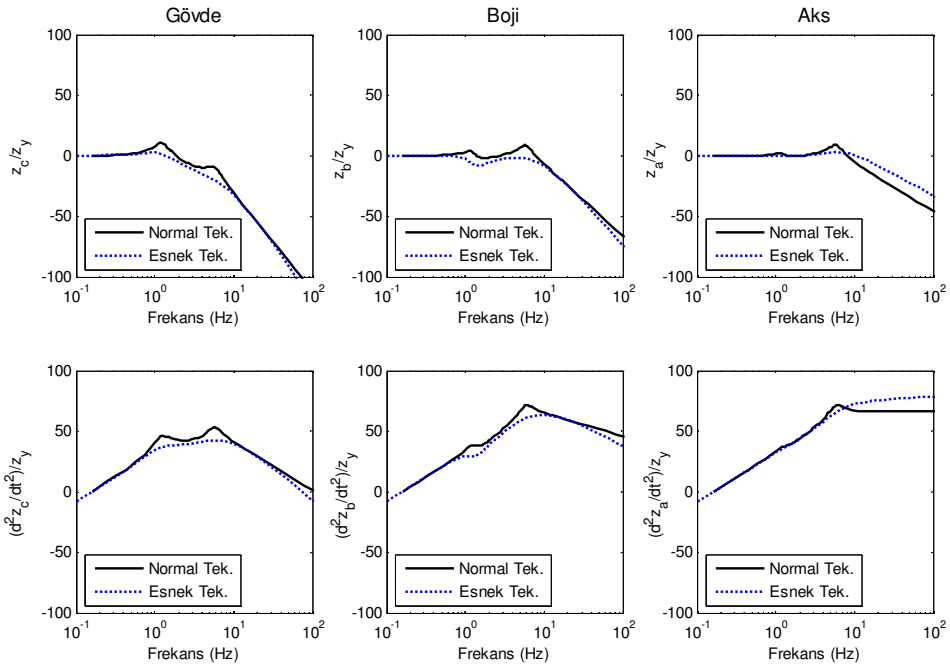
Gerek konfor ihtiyacından gerekse titreşimlerin çevreye etkilerinin azaltılması bakımından, yüksek düzeyde titreşim problemlerinin olduğu hatlarda titreşimleri sönümleyen, gelişmiş, esnek raylı taşıt tekerleklerinin kullanılması ile oluşacak titreşimler henüz yayılma alanının başında iken sönümlenebilir.



Şekil 32. Düşük tabanlı tramvaylar için üretilen Bonotrans esnek tekerlekler (www.bonotrans.cz)



Şekil 33. Esnek tekerlek modeli

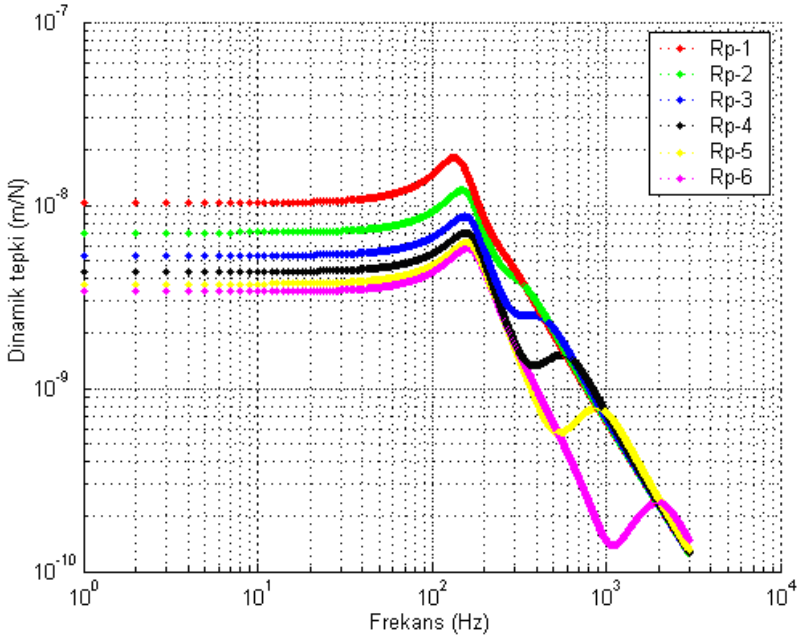


Şekil 34. Normal ve esnek tekerlek modelleri için 1. gerçek ray düzensizliği etkisi altında, taşıt gövdesi, bojisi ve aksında meydana gelen düşey titreşimlerin frekans alanında yer değişim ve ivme cevapları.

Şekil 34 göstermektedir ki, özellikle yolcu konforu açısından raylı taşıt zemini incelendiğinde esnek tekerlek uygulamasıyla düşey titreşimlerin yer değişimi ve ivmelenmesi frekans alanında, tepe değerlerde yaklaşık 10 dB azaltılarak etkin bir biçimde bastırılmıştır.

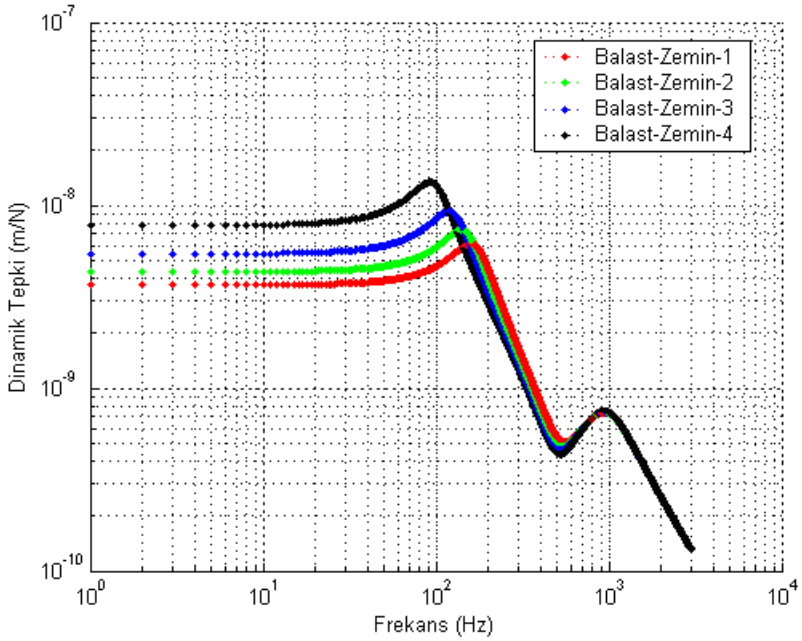
Raylı Sistem Yolunda Çözüm

– **Ray Altı Pedlerinin Kullanılması**



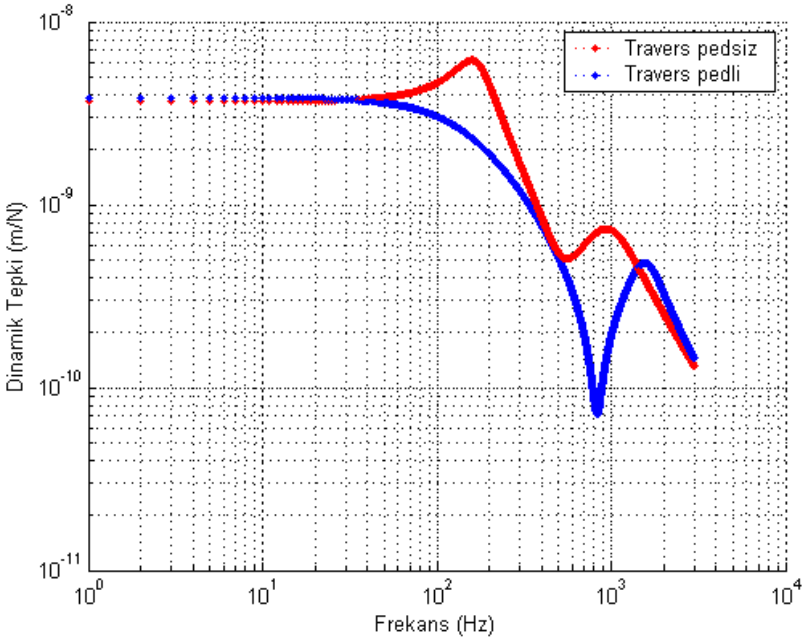
Şekil 35. Farklı ray altı pedleri için Dinamik Tepki-Frekans eğrileri

– **Yatak Malzemesi (Balast-Zemin) Kalitesi**



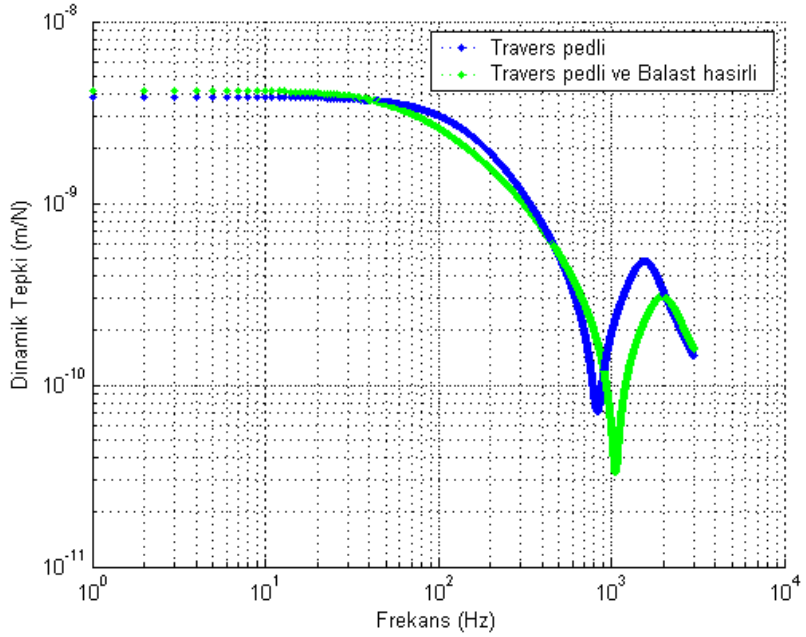
Şekil 36. Farklı kalitede yatak malzemesi (balast-zemin) için Dinamik Tepki-Frekans eğrileri

– **Travers Altı Pedlerinin Kullanılması**



Şekil 37. Travers altı pedi kullanılan ve kullanılmayan balastlı yol yapıları için Dinamik Tepki-Frekans eğrileri

– **Balast Hasırı Kullanılması**

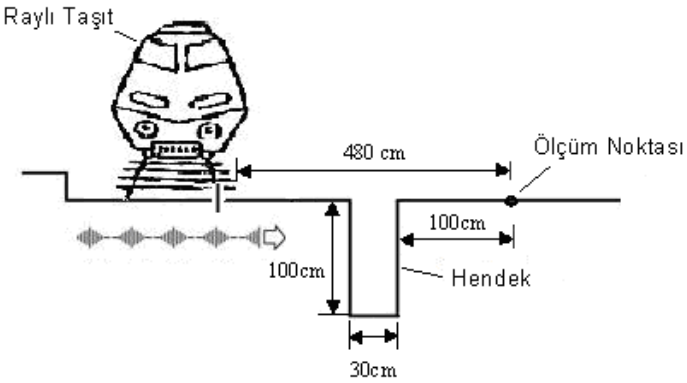


Şekil 38. Balast hasırı kullanılan ve kullanılmayan balastlı yol yapıları için Dinamik Tepki-Frekans eğrileri

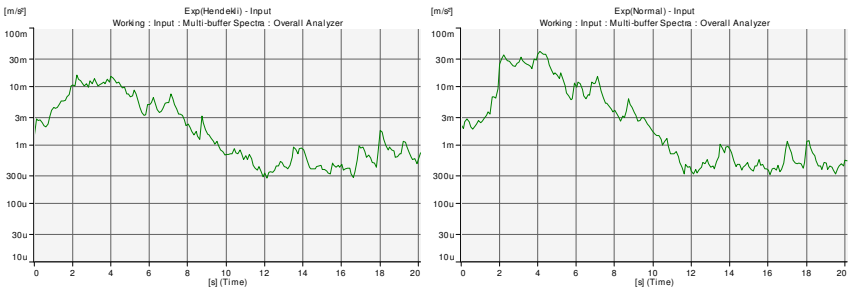
– **Kanal (Hendek) Uygulaması**

Bu yöntemde amaç, demiryolu yakınındaki yapıları hareketli yüklerden kaynaklanan zemin titreşimlerinin etkilerinden korumak için belirli boyutlarda içi dolu veya boş olan dalga bariyerleri (hendekler) kullanarak yerel zeminin dalga iletimini modifiye etmektir.

Şekil 39. Kanal uygulaması için yapılan ölçümler ve sensörlerin yerleştirilmesi



Şekil 40. Kanal uygulaması için ölçüm planı



Şekil 41. Kanalın olduğu ve kanalın olmadığı zeminde meydana gelen titreşimlere ait eğriler

Yapılan ölçüm sonuçları, raylı taşıt kaynaklı titreşimlerin yapılara olan etkilerinin azaltılması için iletim yolunda raya paralel oluşturulacak kanalların, % 64'e varan oranlarda titreşimleri azaltılabileceğini göstermiştir.

Sonuç ve Değerlendirme:
Bu projede ülkemizdeki raylı sistemler üzerinde taşıt-yol etkileşimi sonucu ortaya çıkan titreşimlerin, raylı taşıt içerisindeki yolcu konforuna, çevresindeki insan ve yapılara olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik gerçekleştirilen projede, İstanbul ulaşımında kullanımda olan gerçek bir hafif metro aracı ve hat çevresinde yer alan bir binaya ait matematik modeller çıkartılmıştır. Bu sistemlerin, gerçek bozucu girişlere karşı cevaplarının elde edilmesi için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra, modellenen gerçek sistemler üzerinde, taşıt-yol etkileşimi sonucu oluşan titreşimler ölçülmüştür. Modellenen sistemlere, titreşim ölçümlerinin yapıldığı şartlar altında gerçek bozucu girişler etki ettirilerek elde edilen simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları zaman ve frekans alanında karşılaştırılmıştır. Böylece kurulan modellerin uygunluğu gösterilerek, olası titreşim analizleri için sistematik bir yaklaşım oluşturulmuştur. Hafif metro aracı ve hat çevresindeki binadan ölçülen titreşim değerlerinin konfor ve güvenlik açısından ne düzeyde olduğu, ilgili standartlarla karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Son aşamada, raylı sistem titreşimlerini azaltma yönünde çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Projede öncelikle, hafif metro aracı 6 ve 22 serbestlik dereceli olarak modellenerek, yapılan simülasyonlarla gerçeğe en yakın modeller elde edilmiştir. Böylece, oluşacak titreşim düzeylerini belirlemek için, gerçek taşıt üzerinde sürekli ölçüm yapmak yerine yalnızca yol düzensizliğinin elde edilmesi ile yapılacak simülasyonlar önemli bir veri olacaktır. Yol düzensizliğinin tespiti ise zaten hat bakımları için periyodik olarak yapılması gereken bir çalışmadır. Bu projede ayrıca, Aksaray-Havalimanı hafif metro hattında belirlenen uygun bir bölgede araç içinde yapılan titreşim ölçümleri sonucu elde edilen veriler, ilgili standartla karşılaştırılarak yolcu konforu bakımından analiz edilmiştir. Bu analiz, hattın müsaade ettiği en yüksek raylı taşıt sabit hız seviyesi olan 50 km/h ve 30 km/h'de gerçekleştirilmiştir. Her iki hızda da konfor seviyesinin uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, raylı taşıtın zaman zaman daha yüksek hızlara çıktığı ve daha zor yol şartlarında seyahat etmesinin mümkün olabileceği düşünülerek, raylı taşıt içerisinde konforu artırmak için yapılabilecek rutin iyileştirmelerin dışında esnek tekerlek uygulaması tavsiye edilmiştir. Bu şekilde, araç gövdesinde meydana gelen titreşimlerde 10 dB'e varan iyileştirmelerin yapılabileceği gösterilmiştir (Şekil 84). Benzer şekilde, tekerlek-ray teması ile çevreye yayılan titreşimin azaltılması yönünde, yolda uygulanabilecek çeşitli çözüm önerilerinde de bulunulmuştur. Raylı sistem veya trafik kaynaklı titreşimlerin, zemin yoluyla çevredeki yapılara iletilmesinin güvenlik ve konfor problemlerine neden olduğu bilinmektedir. Proje kapsamında, raylı taşıt titreşimleri etkisindeki 4 katlı bir bina örnek yapı olarak ele alınmış ve bu yapı üzerinde modelleme, titreşim ölçümleri, yapı güvenliği ve konfor analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, ele alınan yapının statik kat planlarından bina parametreleri analitik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra raylı taşıtın, yapının yanından geçmesi esnasında yapının değişik katlarında meydana gelen titreşimler ölçülmüştür. Bina dış zemininden ölçülen titreşimler, bozucu giriş olarak alınarak bilgisayar ortamında simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak elde edilen matematik modelin gerçeğe yakınlığı gözlemlenmeye çalışılmıştır. Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan modellenen binada, ölçüm ve simülasyon sonuçlarının birbirine yakın çıkması modelin gerçeğe uygunluğunu göstermektedir. Projenin bir sonraki aşamasında, raylı taşıtın yapının yanından geçmesi esnasında yapıda oluşturduğu titreşimler, yapı güvenliği ve konfor açısından incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, LRT aracının yapının yanından 30 km/h hızla geçmesi esnasında, yapıda herhangi bir güvenlik ve konfor problemine neden olmayacağı ilgili standartlar kullanılarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen bu proje ile aşağıdaki çıktılar elde edilmiştir:

Titreşimlerin minimize edildiği bir raylı taşıt ve yol modelleri geliştirilmiştir.

Mevcut kullanılan raylı sistemlerin titreşim yönünden uygun olup olmadığı araştırılmış ve titreşimlerin minimize edilmesi için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Farklı taşıt ve yol modellerinin oluşturulabilmesi için bir sistematik ortaya konulmuştur.

Değişik yol elemanları, tekerlek ve süspansiyon sistemleri için simülasyonlar yapılarak, bu konuda ülkemizde yapılacak Ar-Ge çalışmalarına katkıda bulunulmuştur.

Raylı sistem ile yapılar arasındaki yolda titreşim izolasyonu sağlanarak, çevredeki yapılar ve insanlar titreşimlerin olumsuz etkilerinden korunmuş olacaktır. Bu yönde yapılmış olan kanal (hendek) uygulamasında, yapıya iletilen tekerlek-ray etkileşimi kaynaklı titreşimlerin Z doğrultusundaki ivmelerinin % 64'e varan oranlarda azaltılabildiği gösterilmiştir.

Ayrıca, raylı taşıt içindeki yolcuların daha konforlu bir yolculuk yapması için önerilerde (rayların ve araç tekerleklerinin düzenli bakımı, ray boşluklarının doldurulması, balast bakımı, esnek tekerlek uygulaması vs.) bulunulmuştur. Bu öneriler, raylı taşıtın seyir kalitesini iyileştirdiği gibi, yük taşımacılığında da taşınacak yüklerin zarar görmemesi açısından kullanılabilecek niteliktedir.

Yapılan ölçümler ile elde edilen sonuçlar, raylı sistem tasarımı ile ilgili yeni çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

Yapılan çalışma ölçüm ve analizler, her türlü yapı için tekrarlanabilir niteliktedir. Bu kapsamda hastane, okul, tarihi binalar, köprüler ve viyadükler gibi titreşime duyarlı yapısal sistemlerin titreşimlerinin incelenmesi, güvenlik ve konfor araştırmalarının yapılması projede gerçekleştirilen analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Yapısal sistemlerin ideal modellerinin elde edilmesi ile ileride tekerlek-ray etkileşimi kaynaklı trafik, deprem gibi bozucu girişler için yapıların vereceği cevapların önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar yapılabilecektir.

Bu proje vasıtasıyla, raylı sistem titreşimleriyle ilgili yapılan teorik ve deneysel çalışmalar bir bütün olarak ele alınarak, ülkemizin öncelikli çalışma konuları arasında olan bu alanda faydalı bir çalışma sunulmuştur.

Bu proje ile çeşitli sistemler üzerinde titreşim ölçümleri gerçekleştirebilecek ve bu sonuçları analiz edebilecek bir ekip yetiştirilmiştir.