

BALASTSIZ DEMİRYOLU ÜSTYAPI HATTINDAN GEÇEN YÜKSEK HIZ TRENLERİNİN YAKIN ÇEVREDE OLUŞTURDUĞU ZEMİN TİTREŞİMLERİ

Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ, Araş. Gör. Zeynep Dere YAMAN
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ABSTRACT

The aim of this study indicates and discusses a mathematical model and numerical method for solving problems associated with wave propagation in the rigid slab track and sub-soil due to passage of high speed trains. The Thin Layer Method /Flexible Volume Method (TLM/FVM) based on the substructuring approach is used to analyze the structural response to the ground vibrations induced by the moving loads at the specified observation points nearby railway lines.

ÖZET

Yüksek hız trenlerinin geçişinden dolayı balastsız demiryolu üstyapısı ve altındaki zeminde oluşan dalga yayılışına karşı gelen matematik model ve bu problemlerin çözümleri için geliştirilen sayısal yaklaşım çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Demiryolu hattı yakınlarında belirlenmiş gözlem noktaları için hareketli yüklerin meydana getirdiği titreşimlerin yapısal davranış üzerindeki etkilerini incelemek üzere sayısal çözüm tekniği olarak altsistem yaklaşımına dayanan İnce Tabaka/Esnek Hacim Yöntemi kullanılmıştır.

1. GİRİŞ

Yüksek-hız tren teknolojisi araştırmalarının önemli bir bölümü yalnızca yolcuların konforunu sağlamak için değil, aynı zamanda demiryolu ağının içinden geçtiği yoğun yerleşim bölgelerinde yaşayanlarında maruz kalabileceği gürültü ve büyük genlikli titreşimlerden korunması ve bu titreşim etkilerinin azaltılması çalışmalarını da kapsamaktadır. Yüksek-hızlı demiryolu hatlarında tren geçişlerinin, demiryolu altyapısında ve çevre yapılarında oluşturduğu kuvvetli yer hareketlerinin incelenmesi, rahatsızlık verici titreşimlerin azaltılması ve en uygun demiryolu üstyapı tasarımının gerçekleştirilmesi inşaat mühendisliğinin önemli bir konusu olmuştur. Bu alanda kapsamlı ve yoğun araştırmalar özellikle taşıma gücü zayıf, alüvyon zemin ortamlarından geçirilecek demiryolu hatları için güncelliğini korumaktadır.

Hareket hızlarını sürekli artırarak değiştiren yüksek-hız trenlerinin demiryolu üstyapısı ve altındaki zeminde meydana getirmiş oldukları dinamik etkiler, yüzey (Rayleigh ve Love dalgaları) ve cisim dalgaları (kayma ve basınç dalgaları) vasıtasıyla çevreye yayılmaktadır. Titreşim enerjisinin büyük bir bölümü ise Rayleigh yüzey dalgaları tarafından taşınmaktadır. Yüzey dalgalarının yayılma hızı ise Poisson oranına bağlı olmak üzere, zemin ortamının kayma dalga hızının yaklaşık olarak %10 kadar daha azdır. Bazı yumuşak zemin koşullarında ölçülen kayma dalgası yayılma hızlarının 200 km/sa değerlerine kadar düştüğü düşünüldüğünde, bu zayıf zeminlerden geçen yüksek-hızlı demiryolu hatlarındaki tren hızlarının bu değerlere ulaşması demiryolu ve çevresinde kuvvetli yer hareketleri ve bunun sonucunda hasar yapıcı titreşimler oluşturacaktır. Demiryolu alt yapısında en büyük yerdeğiştirmelere neden olan hareketli yük hızı, kritik hız olarak tanımlanmaktadır. Hareketli yükün doğrudan zemin yüzeyine tesir ettiği düşünüldüğünde, bu kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılış hızına özdeş olduğu (rezonans hali) görülecektir. Bu durumda demiryolu üstyapısını özellikle yüzey dalga yayılış hızının küçük değerler aldığı alüvyon zemin koşullarında balastlı oluşturmak yerine balastsız rijit yatak olarak inşa etmek, kritik hız değerinin artırılması için alınacak bir önlemdir. Tren hızlarının bu kritik hızdan yüksek olması, büyük genlikli titreşimlerin altyapıda oluşmamasını sağlayacaktır. Araştırmalar 200 km/saatın üzerindeki hızlarda gürültü ve konfor bozucu titreşim kaynaklarının belirlenmesinde odaklanmıştır.

Yapı mühendisleri bu tarz problemlerin yapısal çözümlerini uygun bir sayısal yöntemi kullanarak gerçekleştirebilmeleri için öncelikle dinamik yükü doğru ve gerçeğe yakın tanımlamaları gerekmektedir. Son otuz yılda Avrupa'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarındaki çabuk büyüme, demiryolu üstyapısı ile alt zemin arasındaki dinamik etkileşimi değerlendirilmesi ve matematik modellerinin geliştirilmesi için sayısal çözüm yöntemlerine dayalı birçok araştırma çalışmalarının yürütülmesini başlatmıştır [1-4].

2. ÇALIŞMANIN KONUSU VE AMACI

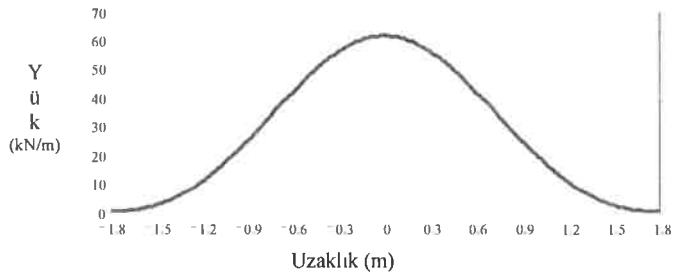
Yüksek hız trenlerinin demiryolu üstyapısı ve çevre zeminde meydana getirmiş oldukları titreşimlerinin incelenmesi için nümerik çözüm tekniklerine dayalı geliştirilen bilgisayar modellerine ait uygulama sonuçlarının doğru ve gerçeğe yakın elde edilebilmesi, modele etkiyen hareketli dinamik yüklerin doğru tanımlanmasına bağlıdır. Bu çalışmanın ilk aşamasında Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan lokomotiflerin (Lok 103) $v = 180$ km/sa, $v = 360$ km/sa ve $v = 540$ km/sa farklı geçiş hızlarına göre tekerlek yüklerinin balastsız üstyapıdaki dinamik etkileri zaman ve frekans tanım aralığında elde edilmiştir. Frekans bölgesindeki çözüm hızlı Fourier dönüşümü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece bir lokomotifin veya katar yükünün balastsız rijit bir üstyapıdan geçişi esnasında meydana getireceği dinamik etkileri gösterebilmek için analitik bir model geliştirilmiştir ve sayısal sonuçları yapı mühendislerinin demiryolu üstyapı tasarımlarında kullanmaları için sunulmuştur. Bu çalışmanın ikinci aşamasında ise yüksek hızda hareket eden katar yüklerinin özellikle taşıma gücü açısından zayıf zeminlerde neden olduğu kuvvetli dalga yayılışını ve sonucunda büyük genlikli yer hareketlerini incelemek için tüm problemi temsil edebilecek uygun matematik model ve onun sayısal uygulamaları için etkin bir nümerik çözüm yöntemi ele alınmıştır.

3. GELİŞTİRİLEN SAYISAL MODEL VE ÇÖZÜM AŞAMALARI

3.1. Balastsız Üstyapı Düzleminden Geçen Yüksek Hız Trenlerine Ait Tekerlek Yüklerinin Analitik Modeli

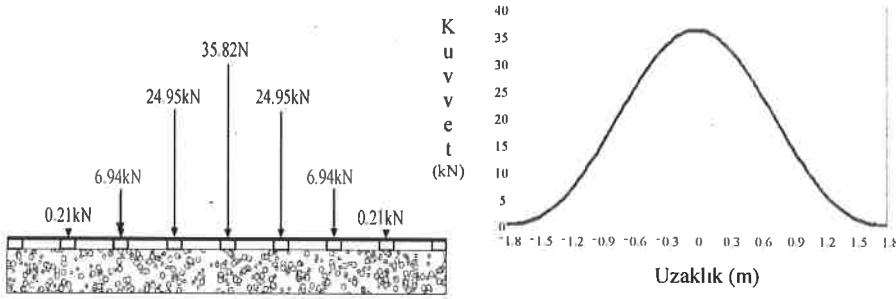
Demiryolu üstyapı tasarımında tren yüklerinin zemine aktarılması işlemi tedrici olarak gerilmelerin azaltılması prensibine dayanır. En büyük gerilmeler tekerlekler ile raylar arasında oluşurken, raylar ile traversler arasındaki gerilmelerin etkisi ikinci mertebeden kaldığından, traversler ile altındaki balast yatağı arasındaki gerilmeler ihmal edilmiştir. Bu çalışmada katar yükü olarak sadece lokomotifin kendisi dikkate alınmıştır. Lokomotifin kendi ağırlığı dingiller aracılığıyla raylara aktarılmaktadır. Vagonların ağırlığının lokomotiflerin ağırlığına göre daha küçük değerlerde kalması, aynı zamanda da hareketinin zemin titreşimine olan katkısının az olması nedeniyle hesaplarda etkileri dikkate alınmamıştır. Tüm yapısal çözümler, elastik yarı uzayın serbest yüzeyinde yer alan elastik bir şeridin üzerinde sabit hızla hareket eden bir yükün dinamik dış etki olarak göz önüne alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Demiryolu ve hemen altındaki zeminde kuvvetli titreşim üreten yüksek-hız trenlerinin balastsız üstyapı düzleminden geçişinin tanımlanması için basit bir model ortaya konulmuştur. Bu modelde katar, dingil yükü, dingil açıklıkları ve hareket hızıyla; üstyapı ise belli bir eğilme rijitliği olan raylar ve traverslerin yatak katsayılarıyla karakterize edilmiştir.

Sayısal uygulamalarda Almanya'nın yüksek hızlı demiryolu hatlarında (ICE) kullanılan Lokomotif (Lok. 103) altı dingilli ve ağırlığı yaklaşık olarak 1200 kN, uzunluğu ise 18 m olarak dikkate alınmıştır. Rayların belirli bir eğilme rijitliğine sahip olduğu düşünüldüğünde tekerlekten raya aktarılan yükü, tekil bir yük olarak değil de belli bir uzunlukta tesiri olan yayılı yük şeklinde hesaplara katmak gerekir. Yükün etkili olduğu uzunluk $L = 3.6$ m olarak seçilmiştir (Şekil 1). İki travers arasındaki mesafenin 0.6 m olduğu düşünüldüğünde yükün etkisi yedi travers elemanına karşı gelmektedir. Katar yükünün konuma ve zamana bağlı dinamik büyüklüğünün tam olarak elde edilebilmesi için etkili olduğu uzunluktaki yayılı yük dağılımının bileşke değerinin, lokomotifin bir tekerleğinin raya uyguladığı kuvvete eşitliğinden hareket edilmiştir. İlk aşamada yükün etkili olduğu uzunluktaki rayların altında yer alan her bir traverse etki edecek tekil yük değerleri bulunur.

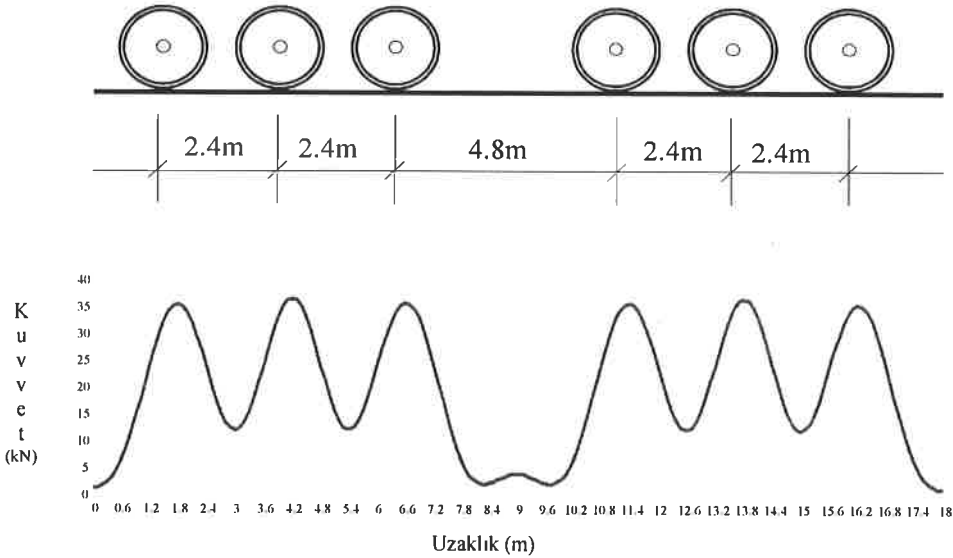


Şekil 1. Tekerlek yükünün etki mesafesine bağlı değişimi.

Katardan raylar arasında bulunan her bir travers elemanına aktarılan tekil kuvvetler, traversler arası mesafe $\Delta L = 0.6$ m olacak şekilde düzenlenerek hesap edilir [5]. Lokomotifin tekerlek dizisinin demiryolundan geçişi esnasında ray üzerinde konuma bağlı etkisi, Şekil 2' de verilen tek bir tekere ait yük dağılımının altı kez süperpoze edilmesiyle elde edilir (Şekil 3).



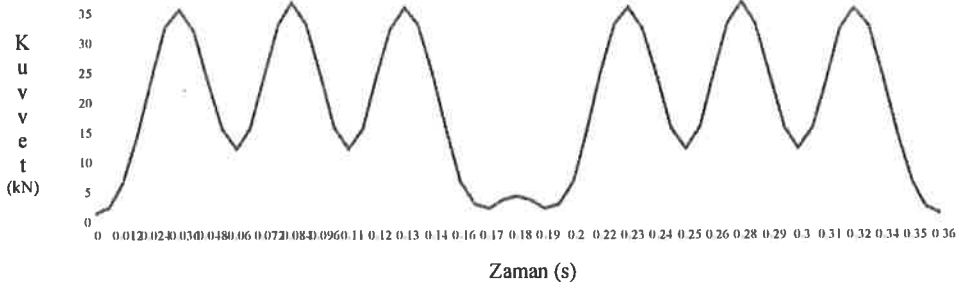
Şekil 2. Traverslere aktarılan tekil kuvvetler ve eşdeğer kuvvet dağılım diyagramı



Şekil 3. Lokomotifin tekerlek aksları arasındaki mesafe ve tesir kuvvetlerinin dağılımı

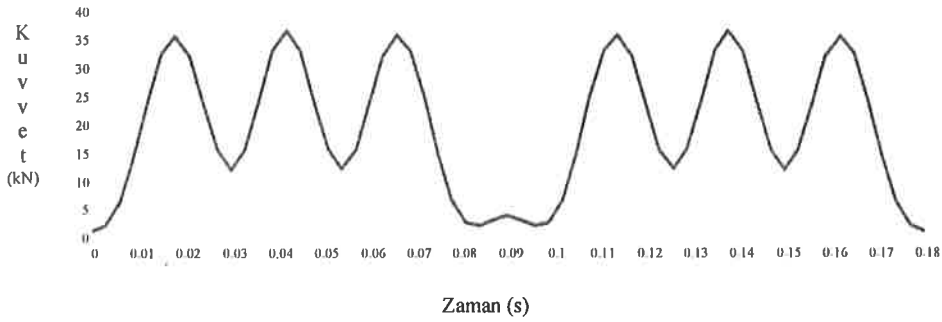
Sayısal işlemlerin ilk aşamasında katar hızı $v = 180$ km/sa = 50 m/s olarak alınmıştır. Uzunluğu 18 m olan lokomotifin geçişi esnasında tekerleklerin değme noktalarında meydana

getireceği darbe etkileri $t = 0.36$ s sürecektir. Şekil 4' de katar yükünün zamana bağlı darbesel etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4. Tesir kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ($v = 180$ km/sa).

Geçiş hızı $v = 360$ km/sa = 100 m/s ve uzunluğu $L = 18$ m olan bir lokomotifin meydana getirdiği darbesel yükün tesir süresi $T = L/v = 18/100=0.18$ s olacaktır. Bu hızdaki katar yükünün zamana bağlı fonksiyonu Şekil 5' de verilmiştir.

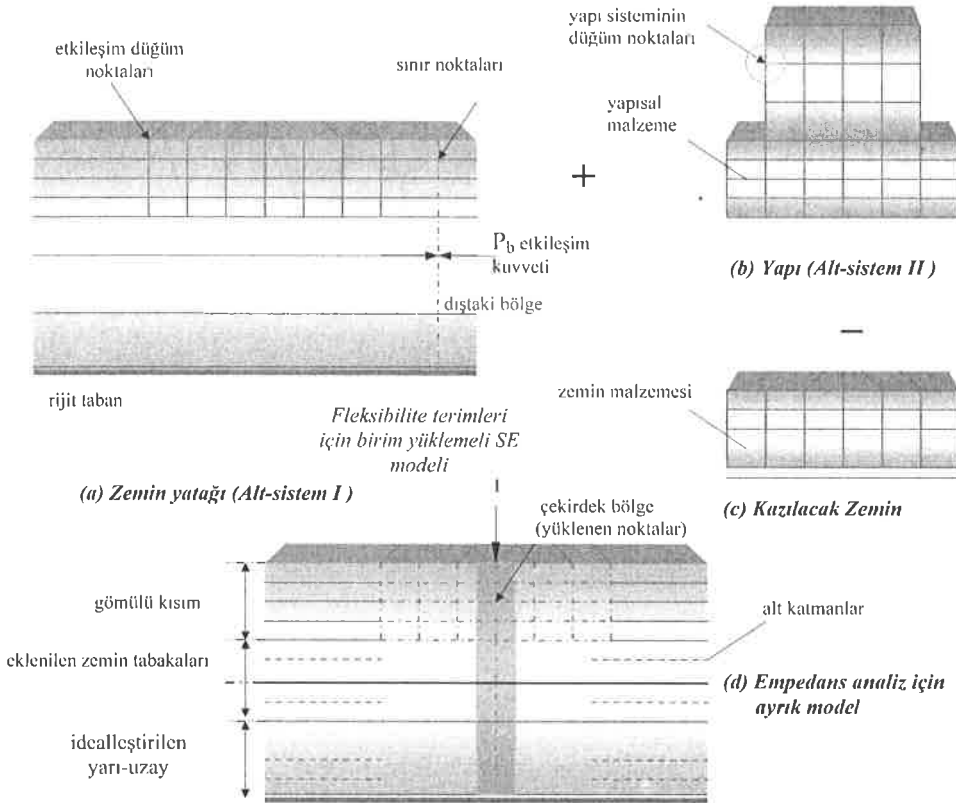


Şekil 5. Tesir kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi ($v = 360$ km/sa).

3.2. Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Nümerik Çözümü

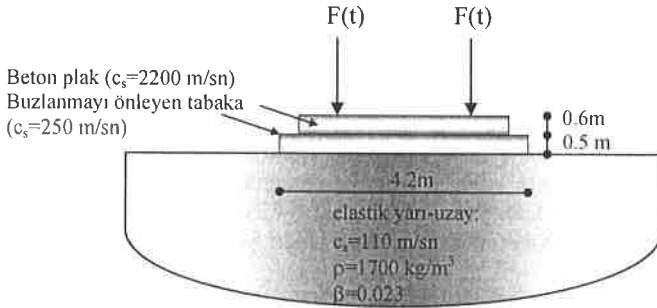
Gömülü yapıların genel durumlarında, sayısal modelinin gerçekleştirilebilmesi için üç alt bölge tespit edilir: Bunlar, yapının yer almadığı yapısız zemin bölgesi, gömülü parçasıyla birlikte yapının kendisi ve yapının gömülü kısmı için kazılacak zemin parçasıdır (Şekil 6(a)-(c)). Demiryolu üstyapısı ise her bir düğüm noktası üç ötelenme serbestlik derecesine sahip olacak şekilde üç boyutlu sonlu elemanlar ile ayrıştırıldı.

Birinci altsistem olarak sınıflandırılan zemin bölgesi İnce Tabakalar Yöntemi (İTY) olarak isimlendirilen yarı ayırık bir çözüm tekniğiyle ele alınmaktadır. Burada zemin yatağı, ana kayaya ya da yarı sonsuz uzayın üzerinde yer alan lineer elastik veya visko elastik malzemeli yarı sonsuz yatay katmanlardan meydana geldiği varsayılmaktadır. İkinci ve üçüncü altsistemler olarak tanımlanan gömülü temel ile birlikte üstyapı ve kazılacak zemin parçası sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) idealize edilir. Kazılıp çıkartılacak zemin temel ile birlikte dikkate alınmaktadır. Yapı ile temel arasındaki etkileşim sadece arakesit yüzeyindeki düğüm noktalarında değil, gömülü bölgenin tüm noktalarında gerçekleşmektedir. Yukarıda tanımlanan bu üç altsistem birbirlerine her bir altsisteme ait etkileşim düğüm noktaları aracılığıyla bağlanırlar. Tüm sistemin birleştirilmesinde Esnek Hacim Yöntemi (EHY) kullanılır. Çıkartılacak zemin bölgesini temsil eden hacim elemanları ile yatay tabakaların kesişme noktaları, İTY/EHY yaklaşımında etkileşim düğüm noktaları olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6(d)). SASSI programının da temelini oluşturan bu yöntemin detaylı teorik bilgilerine literatürden ulaşılabilir[5-6].



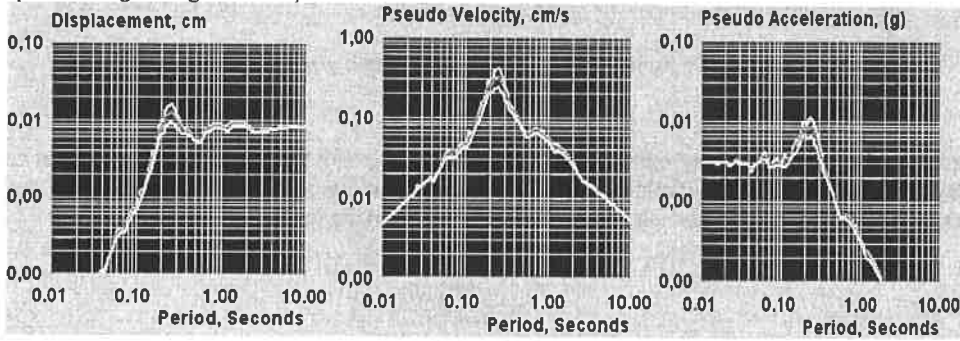
Şekil 6. İnce Tabaka / Esnek Hacim çözüm tekniğinde altsistem yaklaşımı.

Yüksek-hız treninin geçişi esnasında demiryolu yakınındaki serbest yüzeyde ürettiği büyük genlikli titreşimler, sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte İnce Tabaka / Esnek Hacim çözüm tekniği kullanılarak incelenmiştir. Sayısal çözümlerde demiryolu güzergahının geçtiği zemin ortamı, her bir düğüm noktası üç serbestlik derecesine karşı gelen, bir boyutu 0.3 m olan 35 adet üç boyutlu sekiz düğüm noktalı küp biçiminde sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Simetrisinin sağladığı kolaylıktan da faydalanarak, modelin yalnızca yarısı ayrıklaştırılmıştır. Demiryolu hattının toplam uzunluğu 21 m olarak dikkate alınmıştır. Doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilen homojen zemin ortamı, serbest yüzeyinden itibaren eşit kalınlıkta on ince tabakaya ve en son ince tabakanın hemen altında yarı uzayın geri kalan kısmı ise kalınlığı titreşim frekansı ile değişen on adet tabakaya bölünerek modellenmiştir.

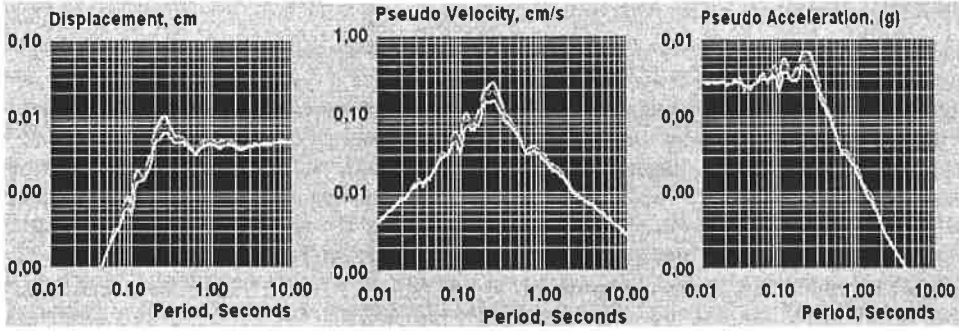


Şekil 7. Balastsız demiryolu üstyapı kesiti ve zemin özellikleri.

Sayısal çözümler alt-sistem yaklaşımıyla ele alınarak frekans tanım aralığında gerçekleştirilmiştir. Sayısal uygulamaların yapısal analizlerinde SASSI bilgisayar programı kullanılmıştır [5-6]. İncelenen zemin modeli için katar hızları sırasıyla $v_{1x} = 180$ km/sa, $v_{2x} = 360$ km/sa, $v_{3x} = 540$ km/sa olarak alınmıştır. Demiryolu hattına dik doğrultuda farklı uzaklıklardaki üç gözlem noktası ($L_{yi} = 3.7, 8.2$ ve 14.2 m; $i = 1, 2$ ve 3) için hareket doğrultusuna paralel ve ona dik bileşenlerin davranış spektrum eğrileri elde edilmiştir. Şekil 8'de lokomotif hızının $v_{1x} = 180$ km/sa olması durumuna karşı gelen, demiryolu hattından $L_{y1} = 3.7$ m ve $L_{y3} = 14.2$ m dik uzaklıktaki gözlem noktalarının yer hareketi kaydına ait davranış spektrum eğrileri gösterilmiştir.



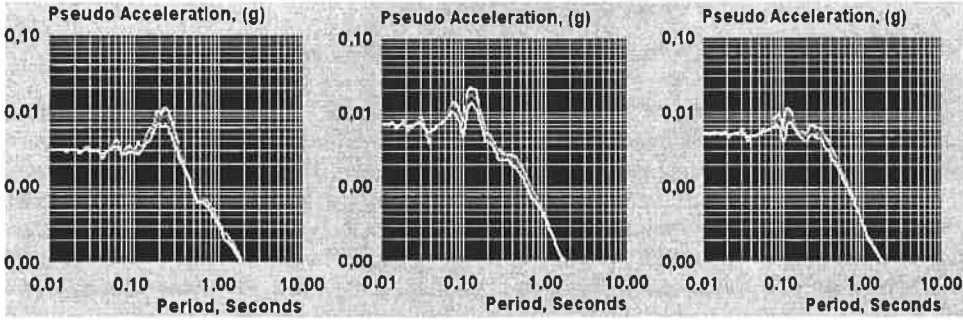
(a) $L_{y1}=3.7$ m



(b) $L_{y3}=14.2\text{m}$

Şekil 8. Katarın hareket yönüne paralel doğrultudaki yerdeğiştirme, hız ve ivme spektrumları ($v_{1x}=180\text{ km/sa}$).

Demiryolu güzergâhına yakın noktalarda titreşim etkilerinin büyük olduğu gözlemlenmektedir. Demiryolu hattından uzaklaştıkça bu dinamik etkilerde azalmaktadır. Lokomotif hızının üç farklı değeri için demiryolu hattından $L_{y2}= 8.2\text{m}$ dik uzaklıktaki gözlem noktasının yer hareketi kaydına ait ivme davranış spektrum eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir.



(a) $v_{1x}=180\text{ km/sa}$

(b) $v_{2x}=360\text{ km/sa}$

(c) $v_{3x}=540\text{ km/sa}$

Şekil 9. Katarın farklı hızları için $L_{y2}=8.2\text{m}$ uzaklıktaki gözlem noktasına ait ivme spektrumları

Şekil 9'daki ivme spektrum eğrilerinden katar hızının $v_{2x}=360\text{ km/sa}$ olması durumunda en büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Buradan da anlaşılıyor ki katar hızı Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılış hızına özdeş olmaktadır ve bu hızda rezonansa girmiştir.

4. SONUÇLAR

Yüksek-hızlı demiryolu ağının yoğun yerleşim bölgelerinden geçirilmesinden dolayı katar yüklerinin yumuşak zemin ortamında ürettiği kuvvetli yüzey dalgalarının yayılışının incelenmesi, çevre yapılarında bu konfor bozucu ve hasar yapıcı titreşimlerin azaltılması için en uygun demiryolu üstyapı tasarımı, yapı ve geoteknik mühendisliği açısından bu çalışmanın önemini ortaya çıkarmaktadır. Bu konuları yerinde incelemek üzere pahalı saha araştırmaları ve zaman alıcı laboratuvar deney çalışmaları yerine problemin alt-sistem yaklaşımına dayanan nümerik çözüm tekniklerinin kullanılmasıyla bilgisayar ortamında geliştirilen matematik modellerin sunulması bu araştırmaların katma değerini artırmıştır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Massarsch, K., R., "Passive ground vibration isolation measures" Proceedings of the 1st. International Workshop Wave'94 and Reduction of Vibrations, pp. 21-32, 1994.
- [2] Verbic, B., Schmid, G. and Köpper, H. D., "Investigating the dynamic behavior of rigid track" Railway Gazette International, pp. 583-586, 1997.
- [3] Tosecky, A., "Nümerische Untersuchung der Erschütterungsausbreitung infolge bewegter Lasten auf einem Feste Fahrbahn-System mittels der Methode der dünnen Schichten/Methode der flexiblen Volumen " Diploma thesis, Ruhr Universität Bochum, 2001.
- [4] Çelebi, E., G. Schmid, "Investigation of Ground Vibrations Induced by Moving Loads" Journal of Engineering Structures, Volume 27, Issue 24, Pages 1981-1998, 2005.
- [5] Lysemer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S. and Tajirian, F., "SASSI – A system for analysis of soil-structure interaction" Theoretical manual, 1988a.
- [6] Lysemer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S. and Tajirian, F., "SASSI – A system for analysis of soil-structure interaction" User's manual, 1988b.

