T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAREKETLİ YÜK ETKİSİ ALTINDA DEMİRYOLU ÜSTYAPI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ

ARİF ULU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. MUZAFFER METİN

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAREKETLİ YÜK ETKİSİ ALTINDA DEMİRYOLU ÜSTYAPI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ

Arif ULU tarafından hazırlanan tez çalışması 19.07.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Aytaç ARIKOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cihan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, TÜBİTAK' ın sağladığı maddi destek ile 115M586 numaralı 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

ÖNSÖZ

"Hareketli Yük Etkisi Altında Demiryolu Üstyapı Titreşimlerinin Analizi" konulu tez çalışması sırasında;

Yrd. Doç. Dr. Muzaffer Metin: Bilgi, destek, kaynak, yönlendirme ve deneyimleri ile bana destek olduğu ve tezimi hazırlarken yardımını esirgemediği için,

Doç. Dr. Aytaç Arıkoğlu: Bu tez için gerekli bilgileri paylaştığı ve her zaman bana sabır gösterdiği ve zaman ayırdığı için,

Yrd. Doç. Dr. Özgür Demir: Destek, kaynak, yönlendirme ve deneyimleri ile bana destek olduğu için,

Ve bütün hocalarıma, her zaman bana destek olan aileme, halalarıma, enişte lerime, kuzenlerime ve özellikle her zaman yanımda olan bütün arkadaşlarıma sonsuz şükranlarımı sunarım.

Temmuz, 2016

Arif ULU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 6

BÖLÜM 2

DEMİRYOLU ÜSTYAPISI VE ÜSTYAPI TİPLERİ 8

2.1 Demiryolu Üstyapısının Tanıtılması 8
2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları 10
2.2.1 Raylar 10
2.2.2 Traversler 10
2.2.3 Ray Bağlantı Elemanları 11
2.3 Demiryolu Üstyapı Tipleri 11
2.3.1 Balastlı Üstyapı 11
2.3.2 Balastsız (Rijit) Üstyapı 13

BÖLÜM 3

ÜSTYAPI MODELLEME ÇEŞİTLERİ VE ÇÖZÜM TEKNİKLERİ 16

3.1 Üstyapı Modelleme Çeşitleri 16
3.1.1 Zemin Modelleri 16
3.1.2 Üstyapı Modelleri 19
3.1.3 Ray Modelleri 22
3.1.4 Ray Bağlantı Elemanları 22
3.1.5 Travers Modelleri 23
3.1.6 Balast Modelleri 24
3.2 Üstyapı Modelleme Hiyerarşisi 25
3.2.1 Ayrık Mesnetleme 25
3.2.2 Sürekli Mesnetleme 26
3.3 Çözüm Metodları 31

BÖLÜM 4

MATEMATİK MODELLEME 34

4.1 Matematik Modelin Oluşturulması 36
4.2 Galerkin Yöntemi 37
4.3 Sonlu Elemalar Yöntemi 38
4.3.1 Newmark-Beta Yöntemi ile Çözüm 42

BÖLÜM 5

SENARYOLARIN OLUŞTURULMASI 45

5.1 Farklı Ray Pedleri İçin 45
5.2 Farklı Mesnet Mesafeleri İçin 47
5.3 Farklı Taşıt Hızlarında 48
5.4 Farklı Ray Tiplerinde 50
5.5 Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması 52

BÖLÜM 6

SONUÇLAR ve ÖNERİLER 54

KAYNAKLAR 57

ÖZGEÇMİŞ 66

SİMGE LİSTESİ

A	Kesit alanı
B	Şekil fonksiyonu matrisi
C	Sönüm matrisi
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet matrisi
I	Kesit Atalet momenti
K	Rijitlik matrisi
$\hat{K}$	Modifiye rijitlik matrisi
L	Rayın boyu
M	Kütle matrisi
N	Şekil fonksiyonu
P_0	Tekerlek başına düşen yük
T	Periyot
I	Giden trenlerin seti
c	Ray pedi sönüm katsayısı
f	Hareketli yük fonksiyonu
g	Hareketli yükün başlangıç noktasına olan uzaklığı
k_L	Ray pedi yay katsayısı
z	Zaman ve konuma bağlı yer değiştirme
β	Newmark-Beta yöntemi sabiti
ρ	Özkütle
γ	Newmark-Beta yöntemi sabiti
ϑ	Taşıt hızı
q	Nodal yer değiştirme
$\dot{q}$	Nodal hız
$\ddot{q}$	Nodal ivme
δ	Dirac-delta fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

ABB	Asea Brown Boveri
FEM	Finite Element Method
İBB	İstanbul Büyük Şehir Belediyesi
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
SE	Sonlu Elemanlar
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Demiryolu üstyapısını oluşturan elemanlar [4]……9
Şekil 2. 2 a) Vinyol tipi ray, b) Oluklu bir ray tipi……10
Şekil 2. 3 Travers yerleşimleri [4]……10
Şekil 2. 4 Ray bağlantı elemanı ve selet……11
Şekil 2. 5 Balastlı üstyapı [14]……12
Şekil 2. 6 Balastlı ve balastsız üstyapının maliyet karşılaştırılması [5]……12
Şekil 2. 7 Beton içine gömülü tip (solda Rheda, sağda Sonneville-LVT) [5]……14
Şekil 2. 8 Asfalt taşıma tabakası üzerine döşeli (solda ATD sistemi, sağda Getrac) [5]14
Şekil 2. 9 Prefabrik beton plakalı (solda Shinkansen, sağda ÖBB-PORR) [5]……15
Şekil 2. 10 Monolitik (Yekpare) yapılar (solda Rasengleis,sağda BES) [5]……15
Şekil 2. 11 Gömülü raylı yapılar(solda INFUNDO, sağda Saargumi) [3]……15
Şekil 3. 1 Winkler zemin modeli……17
Şekil 3. 2 Pasternak zemin modeli……18
Şekil 3. 3 3 Parametreli zemin modeli [11]……18
Şekil 3. 4 Çok katmanlı yarı -mekan zemin modeli [70]……19
Şekil 3. 5 Viskoelastik zemin üzerinde sonlu uzunluktaki kiriş [82]……20
Şekil 3. 6 İki katmanlı sürekli mesnetli üstyapı [84]……20
Şekil 3. 7 İki katmanlı ayrık mesnetli üstyapı [105]……21
Şekil 3. 8 Üç katmanlı sürekli mesenetli üstyapı [102]……21
Şekil 3. 9 5 Katmanlı zemin modeli [100]……22
Şekil 3. 10 Çeşitli ray pedi modelleri [11]……23
Şekil 3. 11 5 Parametreli balast modellemesi……24
Şekil 3. 12 Ayrık mesnetli üstyapı modelleri [22]……26

Şekil 3. 13 Sürekli mesnetli üstyapı modelleri [15]……..27
Şekil 3. 14 Bağlantı sistemleri [4]……..28
Şekil 3. 16 Yol hiyerarşisi [4]……30
Şekil 4. 1 İstanbul M1 hattın görünüşü [1]……34
Şekil 4. 2 M1 hattında çalışan ABB aracı……..35
Şekil 4. 3 Ayrık mesnetli gerçek model……36
Şekil 4. 4 Sürekli mesnetli hale getirilmiş model……36
Şekil 4. 5 Herbir S eleman için düğüm noktası kuvvetleri……38
Şekil 5. 1 Farklı ray pedleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği.....46
Şekil 5. 2 Farklı mesnet mesafeleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği……47
Şekil 5. 3 Farklı taşıt hızları için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği……49
Şekil 5. 4 Farklı ray tipleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği.....51
Şekil 5. 5 Demiryolu üstyapısının Ansys modelinin kesiti……52
Şekil 5. 6 Farklı yöntemler için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği……53

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Balastsız üstyapı türleri [5]……13

Çizelge 3. 1 B58 Traversinin ölçülmüş ve hesaplanmış doğal frekansları [15]……24

Çizelge 3. 2 Yol tipleri ve bileşenlerine bağlı genel bakış [3]……27

Çizelge 3. 3 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan 6 model [17]……28

Çizelge 4. 1 Üst yapı özellikleri [1]……35

Çizelge 4. 2 Lineer sistemler için newmark-beta metodu uygulama aşamaları [122]……43

Çizelge 5. 1 Farklı ray pedleri [1]……46

Çizelge 5. 2 Farklı ray pedleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması……47

Çizelge 5. 3 Farklı mesnet mesafeleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması……48

Çizelge 5. 4 Farklı taşıt hızları için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması……50

Çizelge 5. 5 Rayların mekanik özellikleri [1]……50

Çizelge 5. 6 Farklı ray tipleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması……52

Çizelge 5. 7 Farklı yöntemler içim maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması……53

ÖZET

HAREKETLİ YÜK ETKİSİ ALTINDA DEMİRYOLU ÜSTYAPI TİTREŞİMLERİNİN ANALİZİ

Arif ULU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Muzaffer METİN

Bu tez çalışması ile kent içi raylı sistem kaynaklı titreşimleri incelemek amacıyla seçilen bir demiryolu üstyapısının hareketli yük etkisi altında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada İstanbul raylı ulaşımında bulunan monoblok rijit bir üstyapı seçilmiş olup, hatta ait gerçek geometrik ve yapısal parametreler kullanılmıştır. Dinamik analizleri gerçekleştirmek amacıyla, öncelikle Euler-Bernoulli kiriş teorisine ve sonlu elemanlar (SE) yöntemine dayanan iki farklı matematiksel model geliştirilmiştir.

Bu modeller ile demiryolu üstyapısında kullanılan farklı ray elastomer malzemeleri, mesnet aralıkları, taşıt hızları ve ray tipleri için çeşitli senaryolarda dinamik analizler gerçekleştirilerek hareketli yük etkisi altındaki ray üzerinde oluşan yer değiştirmeler incelenmiştir. Aynı zamanda bu analizler ile bu iki modelin doğruluğu da ortaya konulmuştur.

Son olarak, dinamik analizlerde kullanılan farklı çözüm yöntemleri, hazır SE paket programında oluşturulan farklı bir modele ait sonuçlarla karşılaştırılarak birbirlerine olan üstünlükleri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu, Euler-Bernoulli, sonlu elemanlar, hareketli yük, dinamik analiz.

ABSTRACT

ANALYSIS OF VIBRATIONS OF RAILWAY SUPERSTRUCTURES UNDER MOVING LOADS

Arif ULU

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Muzaffer METİN

In this study, for the purpose of analysing the urban railway-induced vibration, dynamic analysis of a selected railway superstructure acting on moving load, have been performed in this thesis.

In this study, a rigid superstructure located on Istanbul railway transportation has been selected and the real structural and geometrical parameters have been used. In order to perform the dynamical analysis, two mathematical models depending on Euler-Bernoulli beam theory and finite element method (FEM) have been developed.

For these models, deflection of the midpoint of the rail acting on moving load has been performed by means of dynamic analysis in different scenarios for different rail elastomer materials, support lengths, rail vehicle speeds and rails types, used in railway track structures. At the same time, the accuracy of two model has been revealed.

Finally, the different solution methods used in dynamic analysis have been investigated that the superiority of each methods with compared the results of another different model in finite element package program.

Keywords: Railway, Euler-Bernoulli, finite element, moving load, dynamic analysis

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Konu ile ilgili yapılan çalışmalara dair literatür aşağıda özetlenerek sıralanmıştır.

Arlı V. [1] balastlı ve balastsız üstyapı için analitik ve nümerik yöntemle dinamik analiz yapmıştır. Analitik yöntemde ray, sürekli Winkler temel mesnetli Euler-Bernoulli kirişi olarak ve tekerlek yükü, noktasal hareket eden bir kuvvet olarak modellenmiştir. Demiryolunu yalnızca ray ve yarım traversten oluşan yol sistemi olarak modellemiştir. Çalışmasında, Aksaray-Havalimanı metro hattında titreşim ölçümleri yapmıştır. Demiryolunun öz frekanslarını ve dinamik tepkilerini modal test ile belirlemiştir. Nümerik modellerin doğrulanmasını bu ölçümlere göre yapmış ve ölçümleri farklı zemin (beton veya tabii zemin) farklı travers aralığı ve farklı üstyapı tipleri (balastlı ve balastsız üstyapı) için tekrarlamıştır. Son olarak, elastik ray altı tabakanın ray titreşimlerine olumlu etkisini ölçmüştür. Aynı hat üzerinde belli bir yol kesiminde elastik ray bağlantı elemanlarının olduğu ve olmadığı kısımlarda ray titreşimlerini ölçerek sonuçları karşılaştırmış ve elastik ray bağlantı elemanlarının ray titreşimlerini yarı yarıya azalttığını göstermiştir.

Yılmaz V. [2] yaptığı çalışmada taşıt-yol etkileşim problemleri, taşıt-yol etkileşim modelleri, çözüm teknikleri ve tarihsel araştırma çalışmaları sunmuş ve yol modelleme hiyerarşisinden 2 adet uygun örnek alarak analitik olarak çözümlemiştir. Son olarak seçtiği modellerdeki parametre değişimlerine bağlı olarak dinamik büyütme faktörü değişimlerini irdelemiştir.

Yalçın S. [3] çalışmasında taşıt-yol bileşenlerine ilişkin dinamik özellikler, taşıt ve yola ilişkin dinamik modeller, taşıt-yol sisteminde oluşabilecek dinamik problemler ile yol tasarımı için gerekli olan çözüm tekniklerini incelemiştir. Ayrıca frekans tanım alanlı çözüm metodu ile seçilen yol modeli için analitik çözümlemeler yapmış ve farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçları sunmuştur.

Özalp O. [4] çalışmasında demiryolu yapısının ve demiryolu taşıtlarının dinamik özelliklerini göstermiş, yolun düşey yöndeki dinamik stabilitesi için taşıtların ve yol yapısının dinamik olarak nasıl modellenmesi gerektiğini incelemiştir. Değişik hesap yöntemleri araştırmış ve dinamik analizlerde kullanılan başlıca yöntemlerden birisi olan frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile 0 – 3000 Hz frekans aralığında yolda oluşabilecek dinamik tepkileri hesaplamıştır. Farklı frekans aralıklarında çeşitli üstyapı bileşenlerinin kullanılması durumunda, yolun dinamik davranışında oluşacak değişiklikleri incelemiştir.

Michas G. [5] yaptığı çalışmada dünyada kullanılan 34 adet rijit demiryolu üstyapı sistemini biraraya getirip özelliklerini belirtmiştir. Seçtiği bir rijit üstyapıyı 3 boyutlu olarak modellemiş ve ticari bir sonlu elemanlar paket programıyla analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmayla balastsız yapıların balastlı yapılara göre uzun vadede daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.

Şenalp A. D. [6] yaptığı çalışmada çeşitli büyüklüklerde, hareketli yükler altındaki homojen, izotropik Euler-Bernoulli ve Timoshenko tipi kirişlerin dinamik cevaplarını incelemiştir. Hareketli yüklerin hızlarını sabit, doğrusal artan ve doğrusal azalan olarak modellemiştir. Çalışmasında, basit mesnetli, bir kirişin ona etki eden tekil yüke karşı dinamik cevaplarını, sabit hızlı ve ivmeli hareket için incelemiştir. Yükün hızının, tipinin, sönümlemenin, kayma ve dönmenin dinamik tepkilere etkilerini araştırmıştır. Hareketli yük probleminde Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorisi yaklaşımlarının birbirinden farklarını göstermiştir. Sonra, düzgün kesit alanına sahip, sonlu uzunlukta, basit mesnetli ve viskoelastik bir zemin üzerindeki Euler-Bernoulli kirişinin titreşim davranışını, bir sayısal yöntem yardımıyla incelemiştir. Viskoelastik zemin modellerini lineer ve nonlineer olarak modellemiştir. Taban katılığındaki nonlineerliğin titreşim davranışına olan etkilerini incelemiştir. Kirişlerin zamana bağlı yer değiştirme değerlerini, çeşitli hızlar ve sönümleme oranlarında, grafiklerle ortaya koymuştur.

Esen İ. [7] köprülü kren kirişlerinin dinamik davranışını, üzerinde hareketli yükler bulunması durumunda ele alınmıştır. Bir Berneuolli-Euler ince kirişi ve kutu kesitli gerçeğe yakın bir çift kirişli köprülü kren kiriş sistemini incelemiştir. Dinamik analizleri Newmark doğrudan zaman integrasyonu metodu ile gerçekleştirmiştir. Ticari bir sonlu elemanlar paket programıyla kirişin özdeğerlerini ve titreşim modlarını göstermiştir. Kirişin dinamik davranışını, yükün hareket hızının ve hareketli kütlenin kiriş kütlesine olan oranının farklı değerleri için incelemeler yapmıştır.

Turan M. [8] elastik zemine oturan sonsuz kirişin hareketli yük altında dinamik analizini analitik olarak incelemiştir. Analitik çözümü kompleks fourier dönüşümü, rezidü integral teoremi ile birlikte kullanarak yapmıştır. Hareketli yük altındaki kirişin dinamik tepkilerini, sistemi oluşturan parametrelerin (hız, yay sabiti, sönüm) değiştirilmesiyle çok çeşitli şartlarda incelemiştir.

Reis M. [9] hareketli yüklerin etkisi altındaki Euler-Bernoulli kirişlerinin dinamik davranışlarını araştırmıştır. Farklı tip ve şartlardaki kirişlerin serbest titreşimlerini tespit etmiş ardından dikey kolonlarla desteklenen düz kirişlerin, eğrisel kirişlerin ve çatlak ihtiva eden kirişlerin hareketli yüklerin etkisi altındaki titreşimlerini incelemiştir. Eğri kirişlerde ve yüksek hızla hareket eden sistemlerde atalet etkisinin yanında merkezcil ve Coriolis ivme etkilerinin önemini vurgulamıştır.

Hügül S. [10] hareketli tekil yüke maruz kiriş ve kafes yapıların dinamik cevaplarının elde edilmesini araştırmıştır. Titreşim analizinde sonlu elemanlar yöntemi ve nümerik integrasyon yöntemi (Newmark-Beta Yöntemi) kullanmıştır. Kafes tipi yapılarda kiriş ve kolonların birleşme noktalarına bağlanan yayların esnekliğinin dinamik harekete etkilerini değerlendirmiştir. Dinamik analizler için Matlab kodları geliştirdikten sonra alınan sonuçları ticari bir sonlu elemanlar paketi olan Ansys ile karşılaştırmış ve iyi bir uyumluluk gözlemlemiştir.

Rajib U. [11] 2 parametreli Pasternak zemini üzerinde oturan Euler-Bernoulli kirişini hareketli kütle ve yük altında olmak üzere 2 şekilde çalışmıştır. Kirişteki yer değiştirmeleri, gerilmeleri ve kesme kuvvetlerini farklı hızlar, kayma modülleri ve yay katsayıları için araştırmıştır. Tekerlek bozuklukları varlığında ray-tekerlek etkileşimlerini demiryolunu 3 boyutlu olarak modelleyerek çeşitli yaklaşımlarda bulunmuştur.

Oluşturduğu modelde traversleri rijit kütleli, ray pedi ve balastı yay-sönüm elemanı olarak alıp ayrık mesnetli Timoshenko kirişi gibi demiryolunu modellemiştir. 2 boji, 4 tekerlek seti olan gerçek taşıtı 17 serbestlik dereceli ayrık kütleli olarak modellemiştir.

Sevim R. [12] yaptığı çalışmada İstanbul'da bulunan mevcut raylı sistemleri tanıtmış ve proje aşamasındaki hatları hakkında da bilgi vermiştir. Çalışmasında, Winkler hipotezini kullanarak Zimmermann yöntemiyle statik hesapları yaparken dinamik etkileri dâhil etmiş ve mevcut üstyapıların yeterli olduğu sonucuna varmıştır.

Fryba[13] hareketli yükler altındaki yapıların ve katıların titreşim problemlerini çok geniş bir yelpazede Fourier dönüşümleri ve Laplace dönüşümlerinin kombinasyonlarını kullanarak incelemiştir.

Esveld[14] demiryolu üstyapısı üzerine yazmış olduğu kitabında, üstyapıya etki eden yüklerinden, üstyapı kararlılığından, üstyapı tasarımından, ray üretiminden, rayın mukavemet özelliklerinden ve kaynağından, üstyapı bakım ve onarımından bahsetmiştir.

Knothe ve Grassie[15] demiryolu üstyapı modellemesinin tarihsel gelişimi, tekerlek-ray etkileşimi kaynaklı titreşimler, farklı tiplerdeki araç-yol modelleri üzerinde kapsayıcı bir çalışma yapmışlardır. Ortaya koydukları modellerle demiryolu mühendisliğindeki problemlere pratik çözümler getirmişlerdir.

Dong[16] yaptığı doktora çalışmasında araç-yol etkileşimi için yeni bir sonlu elemanlar yöntemi ortaya koymuştur. Bu yöntemde sonlu uzunluktaki bir üstyapı sonsuz uzunluk gibi modellenebilmektedir. Çalışmasında ayrık mesnetli üstyapılarda Timoshenko kiriş teorisini kullanmış ve demiryolu mühendisliğindeki ray-tekerlek temas yokluğu, travers altı boşluğu oluşması, ray altının boşalması gibi lineer olmayan problemleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm getirmiştir.

De Man[17] kitabında demiryolu üstyapısının mekanik modellere dönüştürülmesini, üstyapı titreşimlerini, balastlı, balastsız ve gömülü üstyapıları ve ray pedlerinin lineer olmayan davranışlarını incelemiştir.

Dahlberg [18] raylar ve tren tekerlekleri arasındaki dinamik kuvvetleri ve üstyapı çökmelerini modelleyen nümerik bir metod geliştirmiştir. Üstyapıda yeralan bileşenlerin

dinamik tepkilerini çeşitli şartlarda hesaplamış ve test sonuçları ile karşılaştırıp yorumlamıştır.

Zhai ve Cai [19] çalışmasında taşıt-yol etkileşimini içeren nümerik bir model oluşturmuşlardır. Araç 10 serbestlik dereceli ayrık kütleli olarak, üstyapı ise sonsuz uzunlukta ayrık mesnetli olarak modellenmiş ve düşey titreşimleri bulmak için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir. Üstyapı elemanlarının yolun dinamik tepkisine olan etkilerini incelemişlerdir.

Lee [20] Winkler zemini üzerine oturan Timoshenko kirişinin dinamik cevaplarını araştırmıştır. Sabit hızlı hareket eden kütle ve kiriş arasındaki temas kuvvetini hesaplamıştır.

Kargarnovin ve Younesian [21] harmonik hareketli yük altındaki, Pasternak tipi viskoelastik zemin üzerine oturan uniform bir Timoshenko kirişinin cevaplarını incelemiştir. Çözümlemelerini kompleks Fourier dönüşümleriyle ve integral teoremleriyle yapmışlardır. Parametrik çalışmada, yükün hızı ve frekansını değiştirerek, kirişin dinamik tepkilerini araştırmışlardır.

Literatür incelendiğinde matematiksel modellerin oldukça karmaşık ve çözüm yöntemlerinin zorluğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, ortaya konan sonuçlar genelde boyutsuz sayılarla ifade edilmektedir veya sonuçların frekans tanım alanında verildiği gözlemlenmiştir.

Bu tezde, Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı basit bir modelleme yapılmış, daha önceki çalışmalarda [6, 123] olduğu gibi Galerkin yöntemi ile bu matematiksel ifade çözdürülmüştür. İkinci model olan SE modeli ile de birinci yöntem doğrulanmıştır [124]. Senayolar bölümünde parametre değişimlerine bağlı olarak rayın dinamik cevapları zaman alanında verilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Demiryollarında teknolojinin gelişmesi ile daha hızlı ve güvenli seyahat ve taşımacılık imkânı oluşmuş ve böylece karayolları ile rekabet edebilir düzeye gelmiştir. Özellikle şehirlerde nüfus yoğunluğunun artması ile ortaya çıkan trafik problemlerine en verimli çözüm olarak demiryolu ulaşımı gösterilmektedir. Bu nedenlerden ötürü ülkemizde de

son yıllarda demiryollarına büyük bir yatırım yapılmaktadır. Yeni hatların açılması, eski hatların yenilenmesi, teknolojilerinin geliştirilmesi ve demiryolu kullanımının yaygınlaşması titreşim problemi gibi yeni problemleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle şehir içi raylı ulaşımda hatta yakın meskûn mahallerde titreşim problemleri gündelik konforu önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle ortaya çıkan titreşim problemi, hat henüz proje aşamasında iken analiz edilmeli ve projelendirme buna göre yapılmalıdır. Bu tez ile ortaya çıkarılacak yazılım sayesinde demiryolu üstyapısı proje aşamasında iken yayılan titreşimleri minimize eden model ve üstyapı elemanları belirlenebilecektir. Bu nedenle, tez çıktısı olacak olan bu yazılımın tüm demiryolu projelerinde kullanılabilmesi hedeflenmektedir.

Demiryolu titreşimlerinin simulasyonunun yapılabileceği matematiksel bir model oluşturulacaktır. Tezde matematik modeller kullanarak ortaya çıkan kodlar sayesinde zamana bağlı simulasyon sonuçları elde edilecektir. Ortaya çıkan yazılım ile travers aralıkları, elastomer malzeme tipleri (fiziksel özellikleri, rijitlik vs), malzeme boyutları daha doğru biçimde değerlendirilip demiryolu projeleri için bir referans kaynağı olacaktır.

1.3 Hipotez

Demiryolu üstyapı titreşimlerinin belirlenmesi genelde frekans tanım alanlı yöntemlerle belirlenmektedir. Bu tezde dinamik tepkiler zamana bağlı olarak ifade edilecektir. Frekans tanım alanlı çözüm teknikleri kuvvetleri statik olarak ele alıp dinamik tepkiler belirli bir katsayı ile çarpılarak elde edilirken, zaman tanım alanlı tekniklerde kuvvetler dinamik olarak ele alınıp ivme, hız ve yer değiştirmeler gerçek zamanlı incelenmiştir. Bu tezin orjinalliği hareketli yük etkisi altında viskoelastik zemin üzerine oturan bir kirişin modellenmesidir. Viskoelastik zeminde sönüm etkisi de bulunmaktadır. Viskoelatik zemin ray altındaki elastomer mesnetleri temsil etmektedir.

İstanbul'da kullanılmakta olan bir demiryolu hattından elde edilecek veriler kullanılmıştır. Bu tezde demiryolu üstyapısı hareketli yük altında sürekli mesnetli kiriş gibi modellenmiştir. Oluşturulan matematiksel model önce Galerkin yöntemiyle çözdürülmüştür. Sonra sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapılıp iki sonuç

karşılaştırılmıştır. Son olarak demiryolu üstyapısında kullanılan eleman parametrelerinin değişiminin rayın dinamik cevaplarına olan etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada demiryolu üstyapısını oluşturan elemanların geometrik ve yapısal özelliklerinin rayın dinamik cevaplarına olan etkisi araştırılmıştır. Senaryolar farklı ray pedleri, farklı mesnet mesafeleri, farklı taşıt hızları, farklı ray tipleri için oluşturulmuş ve en az yer değiştirmenin meydana geldiği malzemeler veya parametreler tespit edilmeye çalışılmıştır. Yer değiştirmenin fazla olması demek ray başta olmak üzere diğer elemanların daha büyük etkilerle zorlanması ve dolayısıyla ömürlerinin kısa olması demektir.

Farklı ray elastomer mesnetleri kullanıldığında rijitliği en fazla olan ray pedinde en az yer değiştirme meydana geleceği düşünülmüştür. Farklı mesnet mesafelerinde doğal olarak en küçük uzaklıkta en az yer değiştirme beklenmektedir. Farklı taşıt hızlarında ise senaryodaki hızlar eğer kritik hızın üstünde ise hızın artmasıyla daha büyük yer değiştirmelerin meydana geleceği, eğer hız kritik hızın altında ise azda olsa farklı yer değiştirmelerin meydana geleceği düşünülmüştür. Farklı ray tiplerinde ise kesit atalet momenti en fazla olan rayda en az yer değiştirme meydana geleceği düşünülmüştür.

Hız analizleri hariç bütün senaryolarda beklenilen sonuçlar elde edilmiştir. En fazla rijitliğe sahip olan 1403 N tipi ray tipi, en az mesnet mesafesi olan 50 cm'de ve en fazla kesit atalet momentine sahip olan UIC60 tipi rayda en az yer değiştirmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Hız senaryosunda ise kullanılan hızlar kritik hızdan (demiryolu üstyapısındaki titreşimin yayılım hızı) düşük olduğu için göze görülür şekilde bir değişim meydana gelmemiştir.

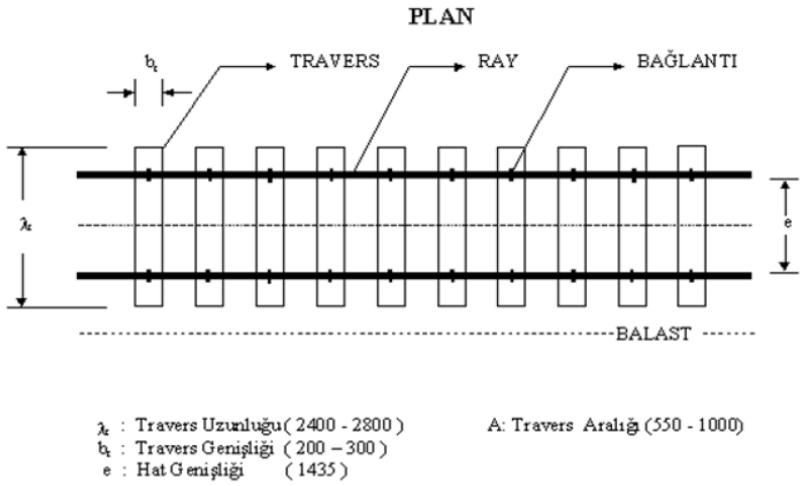
BÖLÜM 2

DEMİRYOLU ÜSTYAPISI VE ÜSTYAPI TİPLERİ

Bu bölümde demiryolu üst yapı elemanları hakkında bilgiler verilerek bu elemanlardan meydana gelen üstyapılar tanıtılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

2.1 Demiryolu Üstyapısının Tanıtılması

Bir demiryolunda üstyapı, altyapı sistemi üzerine oturan yapıya denir. Demiryolu araçlarından gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya ve buradan da altyapıya aktarılır. Ayrıca üstyapı dış etkilerden de doğrudan doğruya etkilenir. Demiryolu araçlarının tekerlekleri ray denilen sürekli iki sıra metalik çubuk üzerinde yuvarlanma hareketi yaparlar. Raylarda travers denilen ve rayların altında onlara dik yönde belirli aralıklarla yer alan mesnetlere oturtularak tespit edilmişlerdir. Ray ve traversler şekilde görüldüğü gibi bir yapı meydana getirirler.



Şekil 2. 1 Demiryolu üstyapısını oluşturan elemanlar [4]

Balast, demiryolu üstyapısı yol ekseni boyunca altyapı üzerine döşenen ve genellikle kırma taşlardan oluşturulan bir tabakadır. Balast tabakası, bu tabakanın içine gömülü olarak yol eksenine dik yönde ve belirli aralıklarla döşenen ahşap, çelik ya da betonarme traversler, bu traverslerin üzerine sabit aralıkla ve yol eksenine paralel olarak döşenen bir çift çelik ray ve traversleri raylara, rayları birbirlerine bağlamaya yarayan bağlantı elemanlarından oluşur.

Rijit üstyapı ise balast yerine ondan daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapısıdır. Taşıma tabakası asfalt ya da beton olabilir. Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır [22].

Demiryolu üstyapısının görevleri şunlardır:

1) Taşıtlara istenilen geometrik ve fiziksel standartlarda, düzgün, pürüzsüz ve güvenli bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,

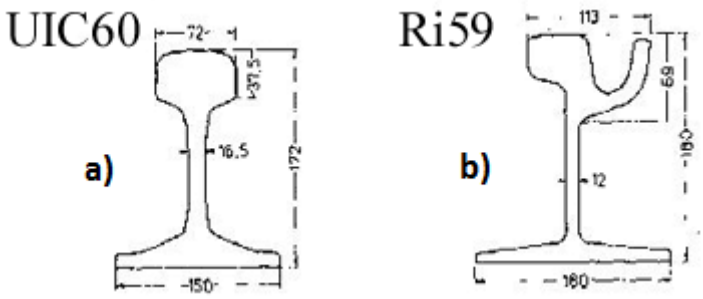
2) Taşıtların oluşturduğu dinamik etkiler ile diğer dış etkileri güvenlikle (hiçbir kalıcı yer ve şekil değiştirme yapmadan) karşılamak, bunları (elastik şekil değiştirmeler ile) kısmen azaltarak geniş bir yüzey boyunca altyapıya iletmek,

3) Bu görevleri düşük maliyetle uzun bir süre sürdürmek [23].

2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları

2.2.1 Raylar

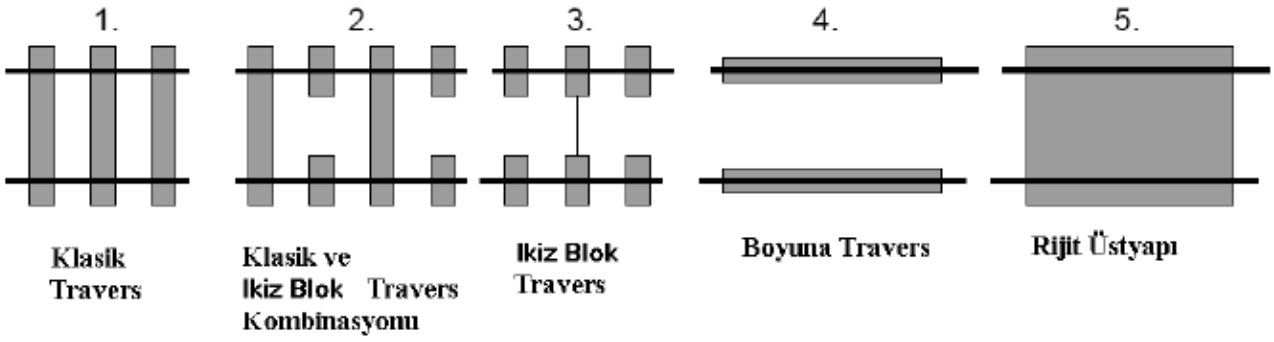
Raylar, demiryolu arabalarının tekerleklerine az direnim gösteren bir yuvarlanma yüzeyi sağlar ve tekerlekleri kılavuzlar. Ayrıca dingillerden aktarılan etkileri, mesnet görevi yapan traversler aracılığıyla zemine iletirler. Günümüzde en çok iki tip ray çeşidi kullanılmaktadır. Vinyol tipi ve Oluklu tip raylardır.



Şekil 2. 2 a) Vinyol tipi ray, b) Oluklu bir ray tipi

2.2.2 Traversler

Traversler, yol eksenine dik veya paralel yönde ve belirli aralıklarla, rayların altına balast tabakası içine gömülü olarak döşenen enine ve boyuna kirişler olup, raylara mesnet görevi yapmaktadırlar. Raydan gelen kuvvetleri balasta ve ray pedine iletirler. Traversler şekilde gösterildiği gibi çeşitli şekillerde yerleştirilebilirler.



Şekil 2. 3 Travers yerleşimleri [4]

2.2.3 Ray Bağlantı Elemanları

Demiryolu taşıtlarından raya gelen 3 eksendeki kuvvetlerin traverse iletimi için travers ile ray arasında çeşitli şekilde elastik bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Şekil 2. 4 de ray bağlantı elemanı ve ray altında kullanılan elastik selet gösterilmektedir.



Şekil 2. 4 Ray bağlantı elemanı ve selet

Bu elemanların görevleri aşağıda sıralanmıştır;

1. Ray pedleri yük dağılımını daha geniş alana yayar.
2. Yorulma gerilmelerini ve yük dengesizliklerini azaltır.
3. Ray ve tekerlek temas yüzeylerinde meydana gelen beklenmedik ani etkileri sönümler.
4. Gürültü ve titreşimleri azaltır.
5. Rayın mesnetlere daha iyi yataklanmasını sağlar.
6. Ray ve mesnetlerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar.

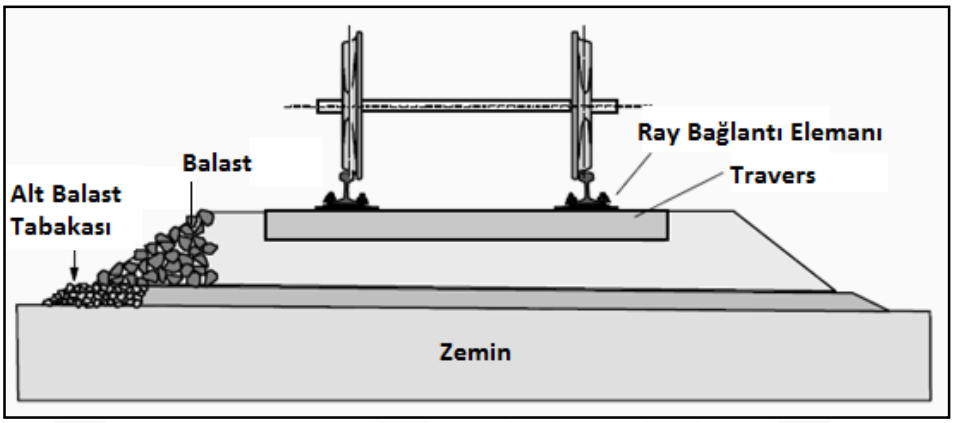
2.3 Demiryolu Üstyapı Tipleri

Bu kısımda demiryolu üstyapı çeşitlerinden balastlı ve balastsız yapı tipleri ve özellikleri yer alacaktır.

2.3.1 Balastlı Üstyapı

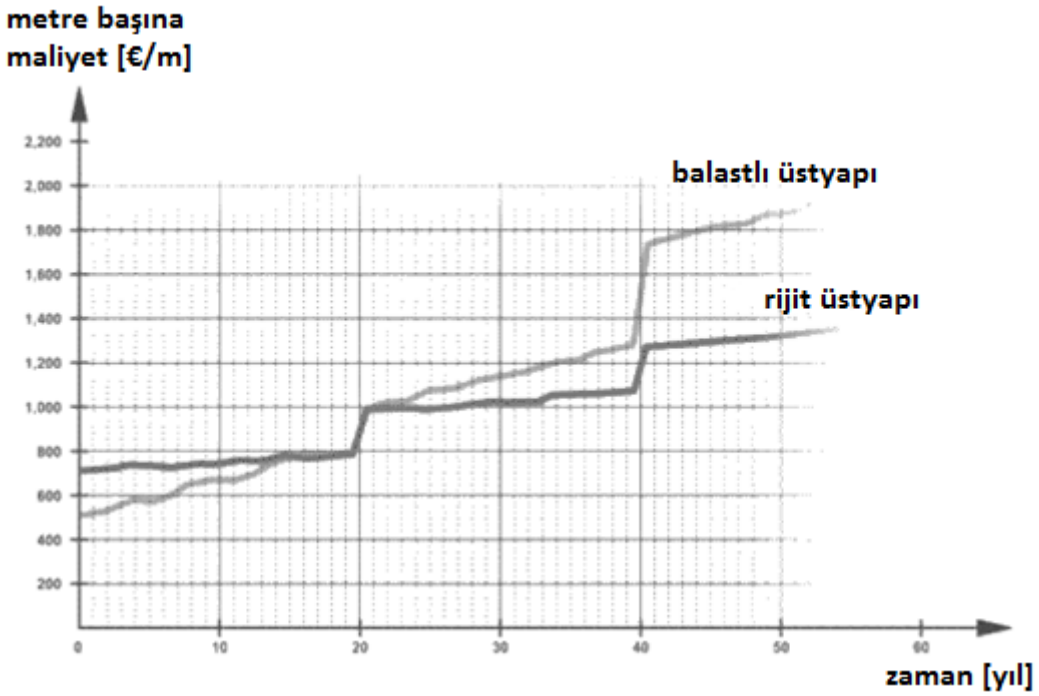
Dünyada kullanımda olan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı, balast üzerine döşenmiş traversler üzerine mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmiştir. Balastlı üstyapıda balast tabakası, alt balast tabakası, ray bağlantı elemanları, ray ve traverslerden oluşmaktadır. Bu yapı tipinin yapım, bakım, onarım kolaylığı ve düşük maliyetli olması sebebiyle tercih edilmektedir. Diğer bir yapı tipi olan balastsız (rijit)

üstyapının maliyeti ve işçiliği yüksek olmasına karşın, uzun yıllar kullanılabilmesi, bakımının daha kolay olması ve artan trafik yükünden dolayı hızlı yenileme işlemleri için tercih edilmektedir.



Şekil 2. 5 Balastlı üstyapı [14]

Şekil 2. 6 da gösterilen grafikte balastlı yapının rijit üstyapıya göre metre başına maliyeti, ilk başta az olmasına karşın yıllar sonra bakım maliyetlerinden dolayı metre başına fiyatı artmaktadır.



Şekil 2. 6 Balastlı ve balastsız üstyapının maliyet karşılaştırılması [5]

2.3.2 Balastsız (Rijit) Üstyapı

Rijit üstyapı balast tabakası yerine daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapı tipidir. Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır. Rijit üstyapı Almanya'da 'Feste Fahrbahn', İngiltere ve ABD'de 'Slab Track', 'Ballastless Track' ya da 'Direct Fixation Track' adlarıyla tanınmaktadır. Rijit yapıda en büyük tasarruf tünel ve köprülerde elde edilir. Ayrıca köprülerde daha hafif bir yapı rijit üstyapı sayesinde meydana gelir. Rijit yapının dinamik olarak en büyük özelliği yük iletiminin tam olarak sağlanmasıdır. Balastlı yapılarda meydana gelen gevşeklikler nedeniyle traversler zamanla kaymakta, traverslerin altları boşalabilmekte ve yük iletimi kesintiye uğrayabilmektedir. Rijit yapılarda elastiklik traverslerle ray arasına veya tamamen ray altına döşenen elastik elemanlarla sağlanmaktadır.

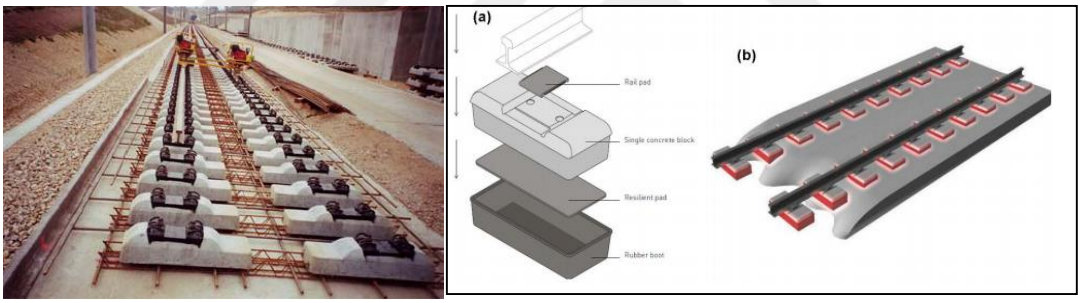
Çizelge 2. 1 Balastsız üstyapı türleri [5]

Ayrık Mesnetli				Sürekli Mesnetli	
Beton İçine Gömülü Traversli veya	Asfalt Tabakası Üzerine Döşeli Traversli	Prefabrik Beton Plakalı	Monolitik (Yekpare)Yapılar	Ray Gömülü	Ray Kamalı
Rheda	ATD	Shinkansen	Lawn Track (Rasengleis)	Deck Track	Cocon Track
Rheda-Berlin	BTD	Bogl	FFC	INFUNDO-Edilon	ERL
Rheda 2000	SATO	OBB-Porr	Hochtief		Vanguard
Zublin	FFYS	IPA	BES	BBERS	KES
Stedef	GETRAC		BTE-BWG/HILTI		SFF
SONNEVILLE-LVT	WALTER		PACT		Saargummi

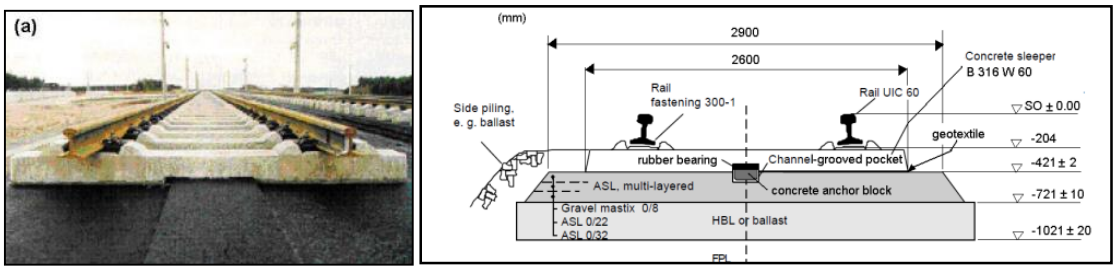
Çizelge 2. 1 Balastsız üstyapı türleri [5] (devamı)

Heitkamp SBV WALO					

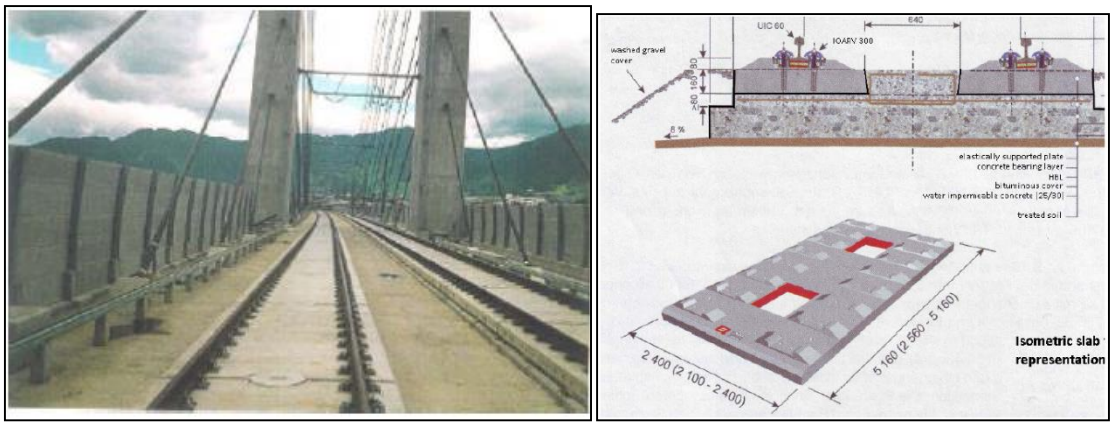
Çizelge 2. 1 de çeşitli rijit üstyapı tipleri gösterilmektedir. Bu yapılar inşaat tekniklerine veya yapan firmaya göre tanımlanmaktadır. Bizim çalışma alanımız için rayların ayrık veya sürekli mesnetli olması ve kullanılan üstyapı sistemlerinin dinamik özellikleridir. Dinamik özelliklerden kasıt kullanılan her bir elemanın yay katsayısı, sönüm katsayısı ve yerine göre birim kütleleridir. Aşağıdaki resimlerde her bir yapı tipinden örnekler verilmiştir.



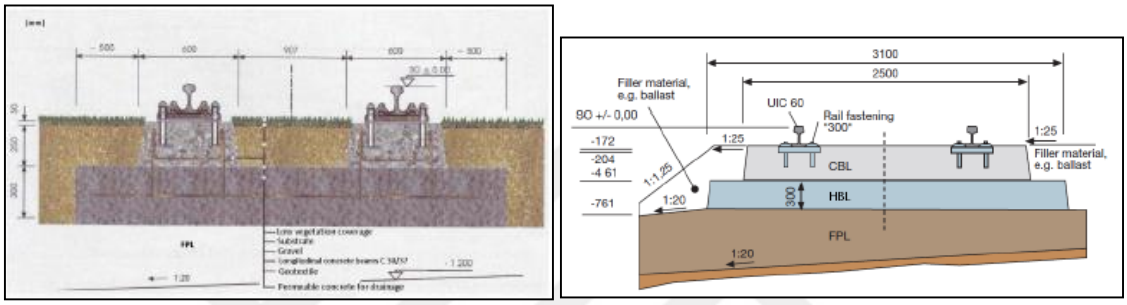
Şekil 2. 7 Beton içine gömülü tip (solda Rheda, sağda Sonneville-LVT) [5]



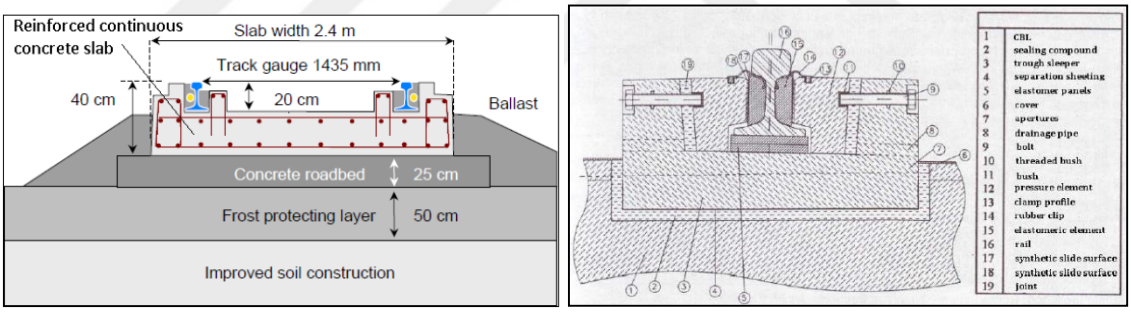
Şekil 2. 8 Asfalt taşıma tabakası üzerine döşeli (solda ATD sistemi, sağda Getrac) [5]



Şekil 2. 9 Prefabrik beton plakalı (solda Shinkansen, sağda ÖBB-PORR) [5]



Şekil 2. 10 Monolitik (Yekpare) yapılar (solda Rasengleis,sağda BES) [5]



Şekil 2. 11 Gömülü raylı yapılar(solda INFUNDO, sağda Saargumi) [3]

BÖLÜM 3

ÜSTYAPI MODELLEME ÇEŞİTLERİ VE ÇÖZÜM TEKNİKLERİ

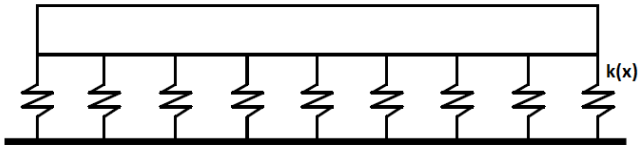
Demiryolu mühendisliğinde üstyapıların dinamik davranışlarını incelemek için her bir eleman modellenmeye çalışılmış, günümüzde de kullanılan ve geliştirme aşamasında olan, yaklaşık cevapları alabildiğimiz modeller oluşturulmuştur. Bu bölümde ilk olarak üstyapı eleman modelleri, ikinci olarak bu modellerin gruplandırılması, en sonda ise çözüm teknikleri hakkında bilgi verilecektir. Zemin modelleri ile balast ve balast altı yapılar, Euler-Bernolli ve Rayleigh-Timoshenko kiriş teorileri ile raylar ve traversler (1 boyutlu analizlerde çoğu zaman ayrık kütleli alınırlar), yay ve sönüm elemanları ile ray pedleri, ayrık veya sürekli mesnetler ile üstyapılar modellenmektedir.

3.1 Üstyapı Modelleme Çeşitleri

3.1.1 Zemin Modelleri

1867 yılında Emil Winkler tarafından yapılan “Boyuna traversli demiryolu hesabı için elastik yataklı kiriş modeli” çalışması, statik yükler altında demiryollarında oluşan zorlanmaların nasıl hesap edilmesi gerektiği konusunda ilk ciddi çalışmayı yapmıştır. Winkler teorisi adıyla günümüzde de kullanılan bu hesap yöntemi, basitliği ve uygulama kolaylığı bakımından tercih edilegelmektedir. 1888 yılında, Winkler teorisini, H. Zimmermann deneysel çalışmalar yaparak kanıtlamıştır [1]. Özellikle raylı sistem mühendisliğinde, hareketli yük ve kütle altında elastik zemin üzerine oturan kirişlerin dinamik analizleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yüksek hızlar altındaki demiryollarının dinamik davranışlarının yaklaşık benzetimlerinin yapılarak incelenmesi,

son yıllarda önem kazanan araştırmalardan biri olmuştur. Bu çalışmaların çoğu hareketli yüke maruz kalan yaylardan oluşan Winkler elastik zemini üzerine oturan kirişler üzerine olmuştur [13,25-28]. Bu modeller bir parametreli [29] model olarak da bilinir.

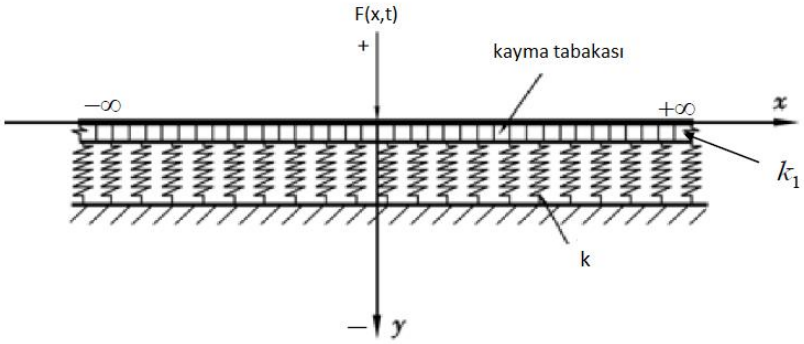


Şekil 3. 1 Winkler zemin modeli

Şekil 3.1’ de gösterilen bir parametreli modeller ilk çalışmalarda hareketli yüke maruz kalan kirişlerin dinamik analizi için çokça kullanılmıştır. Hareketli kütle problemlerinde ise herhangi elastik mesnet olmadan tek mesnetli [30-42] veya çok mesnetli [43,44] olarak farklı sınır koşulları ile çalışılmıştır. Çok az çalışmada hareketli kütleye maruz kalan kirişlerin dinamik cevaplarını tahmin etmek için bir parametreli modeller kullanılmıştır [45-47].

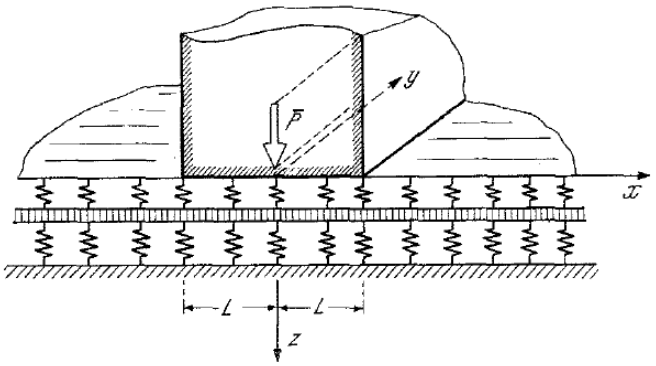
Fakat bir parametreli modeller zeminin karakteristik özelliklerini sunmada kesin bir sonuç verememektedir. Çünkü zemin rijitliğini temsil eden yaylar arasında bir etkileşim söz konusu değildir. Toprağın etkisi (kohezif veya non-kohezif olması durumu) ihmal edilmiş olur [48].

Hareketli yüke maruz kalan kirişlerin dinamik davranışlarının analizi amacıyla, bir parametreli modelin kısıtlamasının üstesinden gelmek için Pasternak zemin modeli olarak da bilinen iki parametreli modeller geliştirilmiştir [49-51].İkinci parametre zemindeki kayma etkilerini dâhil eden kayma tabakası olarak ifade edilir. Şekil 3.2 de iki parametreli Pasternak zemin modeli gösterilmektedir.



Şekil 3. 2 Pasternak zemin modeli

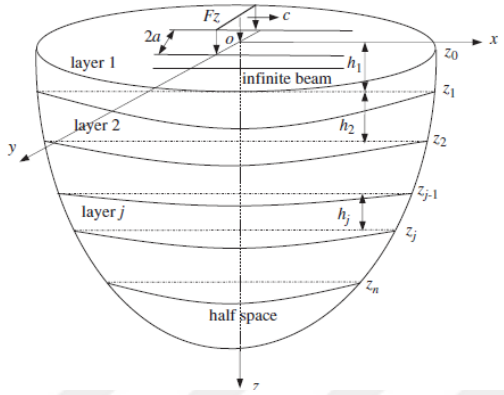
Fakat iki parametreli zemin modeli üzerinde hareketli kütleye maruz kalan kirişin dinamik cevapları fazlaca araştırılmamıştır. Dahası Pasternak zemini üzerindeki kirişin eğilme momenti cevapları, eğilme halindeki zeminin rijitliği ve kayma etkileri hareketli kütle problemleri için incelenmemiştir. Kohezif ve kohezif olmayan toprak zeminler için gerilmelerin tespitinde 3 parametreli modeller geliştirilmiştir [52-54]. Şekil 3.3 de gösterilen çalışmada toprak yüzeyinin yüklü ve yüksüz durumlarında dikey yer değiştirmeleri süreklilik sunmaktadır [55].



Şekil 3. 3 3 Parametreli zemin modeli [11]

Hareketli yüke maruz kalan kirişlerin titreşim analizlerinde ray Timoshenko kiriş teorisi [30, 47, 48, 56-61] veya Euler-Bernoulli kiriş teorisi [24-29, 32-38, 43, 50, 51, 62-64] kullanarak modellenebilmektedir. Hareketli yük altında sonsuz kirişlerin titreşiminin analitik çözümleri araştırmacılar tarafından dikkate alınmıştır [21, 24, 28, 51, 65]. İki parametreli zemin modeli durumunda çalışmalar, parametre değerleri tahmininde zor ve karmaşık modellerden dolayı az yapılmıştır [21, 51, 65, 67].

Bir, iki ve üç parametreli zemin modellerinden ayrı olarak, poroelastik yarı-mekân zemin modelleri, salınan yüklerden [69,71] veya hareketli noktasal yüklerden [70,72-76] dolayı kirişlerin dinamik analizlerini yapmak için kullanılmaktadır. Bu yarı-mekân modelleri tek katmanlı [71, 72, 74-76] veya çok katmanlı [70, 73] olabilmektedir. Şekil 3.4'de hareketli yük altında çok katmanlı yarı-mekân zemin modeli gösterilmektedir.



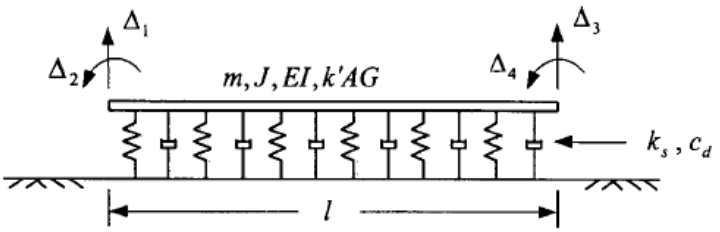
Şekil 3. 4 Çok katmanlı yarı -mekan zemin modeli [70]

Bu çalışmalarda kirişin yer değiştirmeleri [69-76], eğilme momentleri [70], ivmeleri [71] ve kayma gerilmeleri [70] analiz edilmiştir.

3.1.2 Üstyapı Modelleri

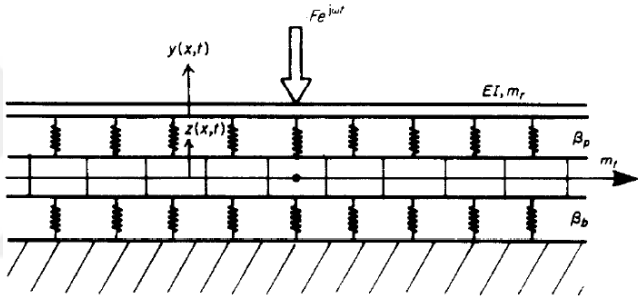
Demiryolu üstyapıları modellenirken temel olarak ayrık mesnetli yapı ve sürekli mesnetli yapı olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli mesnetli modeller tanıtıldıktan sonra ayrık mesnetli yapı modelleri anlatılacak ve son olarak 3 ve 5 katmanlı zemin modelleri kullanan çalışmalara yer verilecektir.

Newton ve diğ. [66] ve Chen ve diğ. [82] hareketli yük altında, elastik zemin üzerindeki sonlu ve sonsuz ray kirişini tek katmanlı sürekli üst yapı modelini kullanarak incelemişlerdir. Böyle bir model, üst yapıyı oldukça iyi bir şekilde sunmakta ve kapalı formda analitik çözüm sağlamaktadır. Dahası yay katsayısına bağlı frekans ve dalga katsayısıyla beraber toprak zemini modellenebilir. Fakat bu model çok ciddi kısıtlamalar getirmektedir. Örneğin, traversler yeterli derecede raya dağıtılamamakta ve travers davranışı incelenememektedir.



Şekil 3. 5 Viskoelastik zemin üzerinde sonlu uzunluktaki kiriş [82]

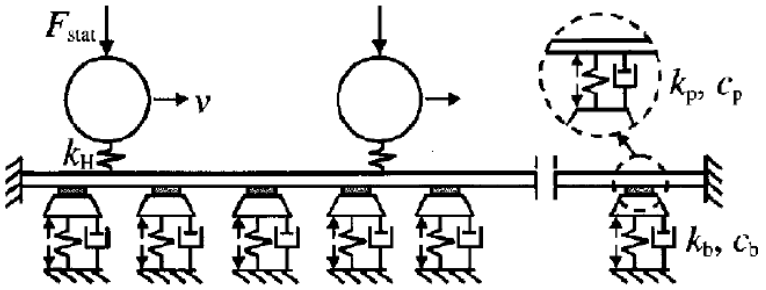
Alternatif olarak iki katmanlı sürekli üstyapı modeli iki adet Timoshenko kirişinden oluşmaktadır. Kirişler sürekli yay ve sönüm elemanları ile desteklenmektedir. Bu model Bitzenbauer ve Dinkel [83] tarafından geliştirilmiştir. Aynı yapıyı kullanan çeşitli araştırmacılar üst yapı ve hareket eden araç arasındaki dinamik etkileşimlerini, ray birleşim noktalarından dolayı tekerlek-ray etkileşimini, tekerlek-ray gürültüsünü ve ray bozukluklarını incelemek için kullanmışlardır [83, 84, 85].



Şekil 3. 6 İki katmanlı sürekli mesnetli üstyapı [84]

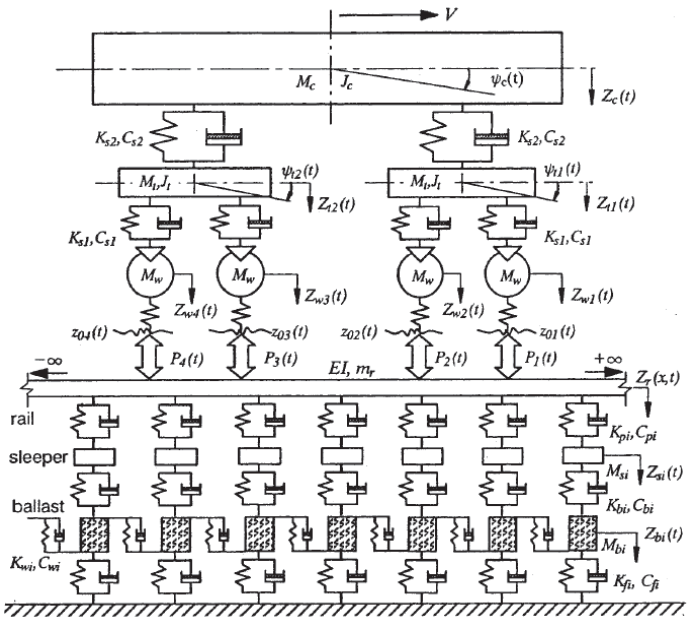
Şekil 3.6’ da gösterilen model travers dinamik davranışı analizine imkân sağlar. İki yay tabakası arasında kalan tabaka traversleri temsil etmektedir.

Ayrık mesnetler üzerindeki ray modelleri, mesnet etkilerini dâhil etmek yerine, ray deformasyonlarının ve tekerlek sebebiyle oluşan ani kuvvetlerin incelenmesi daha geniş bir alanda kullanılması tercih edilmiştir [24, 81, 86]. Ayrıca benzer modeller ray-tekerlek etkileşimi gürültüsünü, yüksek hız altındaki araçlar ve üst yapıların dinamik davranışını ve bozuk tekerlek profillerinin etkilerini incelemek için kullanılır [77, 87]. Bu modeller travers, ray ve üst yapının doğal frekanslarını göstermek için kullanılabilir [88]. Şekil 3.7’ de iki katmanlı ayrık mesnetli üst yapı gösterilmektedir.



Şekil 3. 7 İki katmanlı ayrık mesnetli üstyapı [105]

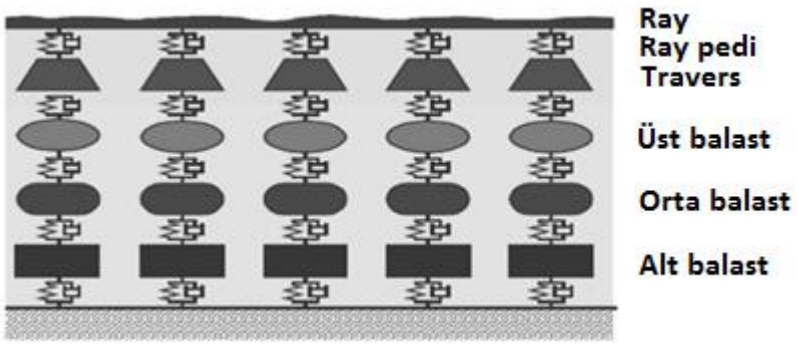
Travers kütlesi yerine kütleli balast yapısının dikkate alındığı 3 katmanlı üstyapı modelleri Zhai ve Cai [102, 104] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda ray birleşimi ve tekerlek düzleşmesinden dolayı meydana gelen ani ray-tekerlek yükleri araştırılmıştır. Jin ve diğ. [101, 103] araç-yol dinamiklerinde etkili olan ray bozukluklarını çalışmışlardır. Oscarsson [89] araç-yol etkileşimini çözümlemek için bu modeli kullanmıştır. Balast kütleleri arasındaki etkileşimi gösteren model Şekil 3. 8' de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8 Üç katmanlı sürekli mesenetli üstyapı [102]

Ishida ve Ban [100], Şekil 3. 9 da gösterilen 5 katmanlı bir model ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, balastın yay-sönüm elemanı içeren 3 farklı katmana ayrıldığı, ray titreşimi ve ani darbe yükleri yönünden çeşitli tiplerdeki tekerlek düzleşmesi etkilerini analiz etmişlerdir. Bu model ray-tekerlek etkileşimi içinde farklı yerlerdeki balast cevaplarını

analiz etmeye izin verir. Daha basit modellerle ray-tekerlek etkileşimi dinamik yükleri hesaplanabilir.



Şekil 3. 9 5 Katmanlı zemin modeli [100]

3.1.3 Ray Modelleri

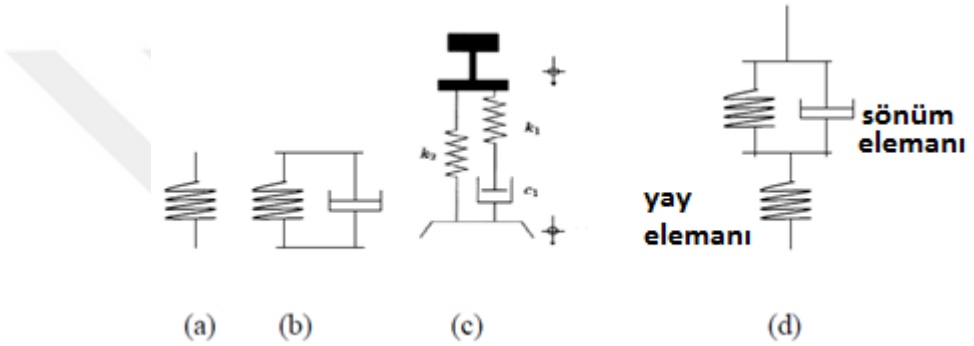
Raylar sürekli kiriş olarak Euler-Bernoulli veya Timoshenko kirişleri olarak sonlu uzunluk veya sonsuz uzunlukta modellenir. Araç-yol dinamiği analizlerinde birçok çalışma Euler-Bernoulli kirişi olarak modellenmiştir. Örneğin, tekerlek düzleşmesi [80, 90], köprü-tren etkileşimi [92], daldırmalı ray bağlantısı [91], ray kaynakları [90, 106], ray ondülasyonları [101, 103, 107], tekerlek yuvarlaklığının bozulması [81]. Fakat Euler-Bernoulli kiriş modelinde kayma gerilmesi ve rayın dönme ataleti yer almamaktadır. Bu sebeple yüksek frekanslarda cevapsız kalmaktadır. Euler-Bernoulli 500 Hz altı frekanslarda, Timoshenko ise 2500 Hz e kadar cevap verebilmektedir [15]. Bu yüzden gürültü oluşmasında, tekerlek ve ray etkisindeki ray pedinin rijitliği ve lineer olmayan etkiler, ray ve tekerlek bozulmaları gibi etkilerin incelenmesinde Timoshenko kiriş teorisi daha geniş anlamda çalışmalarda yer almaktadır [87, 93, 94, 108, 109]. 2000 li yılların sonlarına doğru üst yapı düzensizlikleri [96, 110, 111], tekerlek düzleşmesi [78, 95, 102] gibi sebepler yüzünden araç-üstyapı etkileşimlerini analiz etmek için Timoshenko kiriş teorisi kullanan birçok çalışma yapılmıştır.

3.1.4 Ray Bağlantı Elemanları

Ray pedleri, rayı desteklemek ve traversi aşınmadan ve hasardan korumak için kullanılır. Üstyapı dinamiği bakımından ray elastomer mesnetleri, bütün üstyapının dinamik özelliklerinde önemli rol oynamaktadırlar. Yumuşak ray elastik mesnetleri, tren hareket

ederken oluşan dinamik ve statik zorlamalara karşı rayların elastik deformasyonuna müsaade ederek, aks yüklerinin daha fazla sayıda traverse iletilmesini sağlarlar. Ray elastik mesnetleri kauçuk, mantar, kauçuk kaplı mantar gibi malzemelerden üretilir [3].

Ray pedleri ayrık ve sürekli mesnetlemelerde, genelde yay elemanları olarak [86, 97] veya yay-sönüm elemanları olarak [81, 90, 101, 103] modellenir. 3 parametreli viskoelastik ray pedi, Anderson ve Oscarsson [112] tarafından düşük ve yüksek frekanslarda pedin dinamik davranışını incelemek için modellenmiştir. Ray deformasyonlarının analizi için birçok farklı model geliştirilmiştir. Ray pedleri rayın altında traversin tam ortasına gelecek şekilde modellenir.



Şekil 3. 10 Çeşitli ray pedi modelleri [11]

3.1.5 Travers Modelleri

Traversler, ray ve tekerlek bozulması analizlerinde balastı temsil eden elastik zemin üzerinde üniform veya değişken kesitli enine kiriş olarak [99] veya ayrık kütleli olarak [18, 87, 89, 101, 103] düşünülebilir. Bu çalışmalar eğilme rijitliği ihmalinde araç-yol dinamik etki kuvvetinin belirlenmesi için rijit kütleli olarak modellemek yeterli gelmektedir.

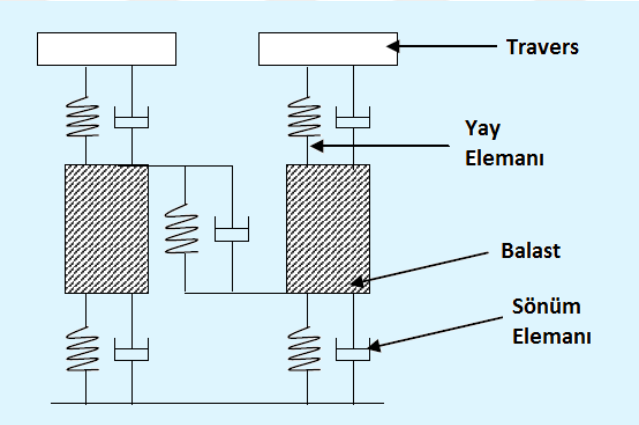
Traversler modellenirken 500 Hz altı frekans aralığı için Euler-Bernoulli kiriş teorisi yeterli gelmekteyken, 500 Hz üstü frekanslarda Timoshenko kiriş teorisi doğru sonuçlar vermektedir. Aslında Timoshenko kiriş teorisi bütün frekans aralıklarında kullanılabilir [15].

Çizelge 3. 1 B58 Traversinin ölçülmüş ve hesaplanmış doğal frekansları [15]

Frekanslar	1.Doğal Frekans (Hz)	2.Doğal Frekans (Hz)	3.Doğal Frekans (Hz)	4.Doğal Frekans (Hz)	5.Doğal Frekans (Hz)
Ölçülmüş	140	395	765	1212	1695
Hesaplanmış (Timoshenko kiriş elemanı)	140.1	396.4	759.7	1206	1719

3.1.6 Balast Modelleri

Balast genelde birbirine paralel yay-sönüm elemanları olarak [16, 18, 81, 86, 87, 113, 114] veya kesme etkili yaylı rijit kütleli [101, 102, 103, 104] olarak modellenir. Kesme etkili yay ile modellemek tekerlek-ray etkileşimi altında balast deformasyonlarının analiz edilmesine imkân tanır. Kesme etkilerini içeren en geniş kapsamlı balast modeli Zhai ve diğ tarafından geliştirilmiştir [102, 104].



Şekil 3. 11 5 Parametreli balast modellemesi

Üst yapının elastik özellikleri lineer veya non-lineer olarak yaylı ve sönümlü modellenebilir. Pratikte balast ve ray pedlerinin özellikleri non-lineer olmasına rağmen, ray-tekerlek etkileşimini içeren çalışmaların çoğunluğu yay ve sönümlemeyi lineer olarak düşünmüşlerdir [16, 79, 80, 102, 103, 113, 115, 116]. Tekerlek bozulmaları varlığında ray-tekerlek ani darbe yüklerini araştıran analitik çalışmalarda, tekerlek bozukluğundan kaynaklanan ölçülen ve hesaplanan en yüksek temas kuvveti iyi uyum göstermiştir [102, 117]. Ama yüksek hızlarda, ölçülen ile hesap edilen temas kuvveti çok farklı çıkmaktadır [16, 113]. Johansson ve Nielsen [105] lineer ve non-lineer üst yapı özellikleri kullanarak

tekerlek-ray ani darbe yüklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada lineer modeller çok düşük hızlarda, non-lineer modeller ise orta ve düşük hızlarda daha iyi cevap vermişlerdir. Fakat her ikisi de 70 km/h üstündeki hızlarda ölçülen değerlere göre çok yüksek kuvvet hesaplamışlardır. Non-lineer ray pedi modelleri çok az çalışmada ray-tekerlek etkileşimini incelemek için kullanılmıştır [87, 98]. Bu çalışmalar lineer ve non-lineer yol modelleri arasında ciddi bir fark olduğunu ortaya koymuştur.

3.2 Üstyapı Modelleme Hiyerarşisi

Demiryolunda kullanılan yapıların literatürde nasıl modellendiğini ve kimler tarafından hangi amaçlar için kullanıldığı bir önceki bölümde açıklandı. Bahsedilen bu bilgilere dayanarak Knothe ve Grassie [15] bu modelleri bir hiyerarşi şekline getirmiştir. Başka çalışmalar da modelleme hakkında yardımcı olacaktır. Bu yardımcı bilgilerden ileride bahsedilecektir. Modelleme oluşturulurken temel husus rayların ayrık olarak mı sürekli olarak mı desteklendiğidir.

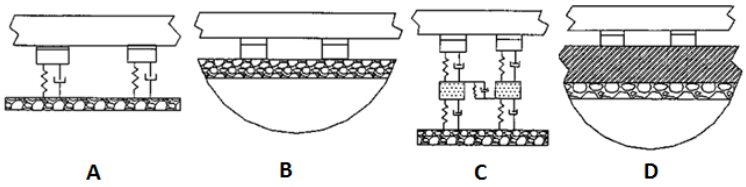
3.2.1 Ayrık Mesnetleme

Düşey doğrultudaki analiz yöntemlerinin çoğu basit bir ayrık mesnet modelini kullanır. Eğer tekerlek gözlenen traverse yakınken yüksek frekanslı dinamik davranış ile ilgilenirse bu model kullanılabilir. Bir bojinin travers üzerinden geçerkenki yükleme ve boşaltma durumlarında kullanılabilir. Şekil A'da basit ayrık mesnetli model gösterilmektedir.

Balast ve zemin birlikte visko elastik davranışta (half-space) düşünülmüştür. Travers için yay ve sönüm katsayılar, taşıtın yol üzerindeki rezonans durumundan elde edilir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda zemin titreşimlerini belirlemek için bu model kullanılmaktadır. Bu modellerdeki travers altındaki yay ve sönümleyiciler birbirinden bağımsızdır. Şekil B' de yarı mekân ayrık mesnetli model gösterilmektedir.

Sato ve Zhai tarafından kullanılan bu model (Şekil C) her bir travers altında, araları yaylar ve sönümleyicilerle bağlı ek balast kütleleri ve zemini içerir. Balast ve zemin kütlelerinin beraber hareket ettikleri düşünülür. Bu modelin ölçüm sonuçları ve hesap sonuçları arasında iyi bir korelasyon sağladığı ifade edilmiştir. Yalnız, zemin ve balast parametrelerini bulmak zordur. Bu modelde balast katmanları 3 tabakalı yarı-mekan

şeklinde modellenmiştir. Rücker ve ekibi bu modellerin teorik araştırmalarını zor olarak tanımlamışlardır. Şekil D'de gösterilmektedir.



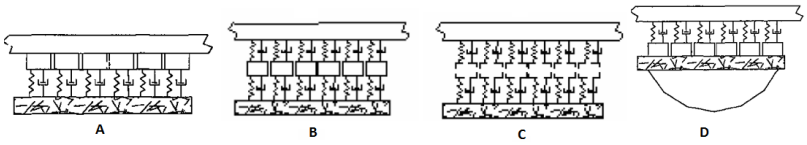
Şekil 3. 12 Ayrık mesnetli üstyapı modelleri [22]

Birkaç görüş, modellerde bağlantısız balast kütlesi ve zemin şeklinin kullanılmasının daha doğru olduğunu belirtir. Çünkü, yapılan araştırmalar göstermiştir ki gerçekte 25-40 Hz ve 100 Hz civarı durumların her ikisinde de rezonans olabilmektedir. 100 Hz civarı rezonans durumu balastın kendi esnekliği boyunca ray ve traversin hareketinden oluşurken, 25-40 Hz civarı rezonans durumu ise elastik zeminin ve balastın her ikisinin de birbirinden bağımsız hareketinden oluşmaktadır. Bu göstermektedir ki 50 Hz' den düşük frekanslarda bağlantısız balast kütlesi ve zemin şekli tercih edilebilir [15].

3.2.2 Sürekli Mesnetleme

Sürekli mesnetlemelerde travers altında balast ve zemin birbirine paralel bağlı yay ve sönümleyiciler ile temsil edilirler. Ayrık mesnetlemede olduğu gibi zemin tam elastik veya visko-elastik şeklinde düşünülür. Sürekli mesnetler genellikle frekans tanım alanlı yöntemlerle çözülürler. Zeminin yay ve sönüm katsayıları deney ve hesapların korelasyonundan elde edilir.

Şekil A modeli sönümlü Winkler zemin modeli olarak ifade edilir. Travers kütlesi ray kiriş elemanına dahil edilerek üst yapı boyunca düzgün yayılı olduğu varsayılır. Şekil B' deki model ray mesnedi ve balast tabakası sürekli elastik mesnetli viskoz sönümleyici olarak tanımlamıştır. Şekil C'deki travers elemanını eğilme rijitliğini dikkate alarak fakat boyuna rijitliği gözardı ederek, ayrı bir tabaka olarak kiriş olarak oluşturulmuştur. Bu model yaklaşımı traverslerin dinamik davranışını ayrıntılı bir şekilde belirlemek için kullanılmıştır. Şekil D'deki model aynen ayrık mesnetlerde olduğu gibi balast ve zemin visko-elastik davranışta yani yarı-mekân olarak düşünülmüştür. Traversler için yay ve sönüm katsayıları önceden hesaplanmış diyagramlar ile bulunur.



Şekil 3. 13 Sürekli mesnetli üstyapı modelleri [15]

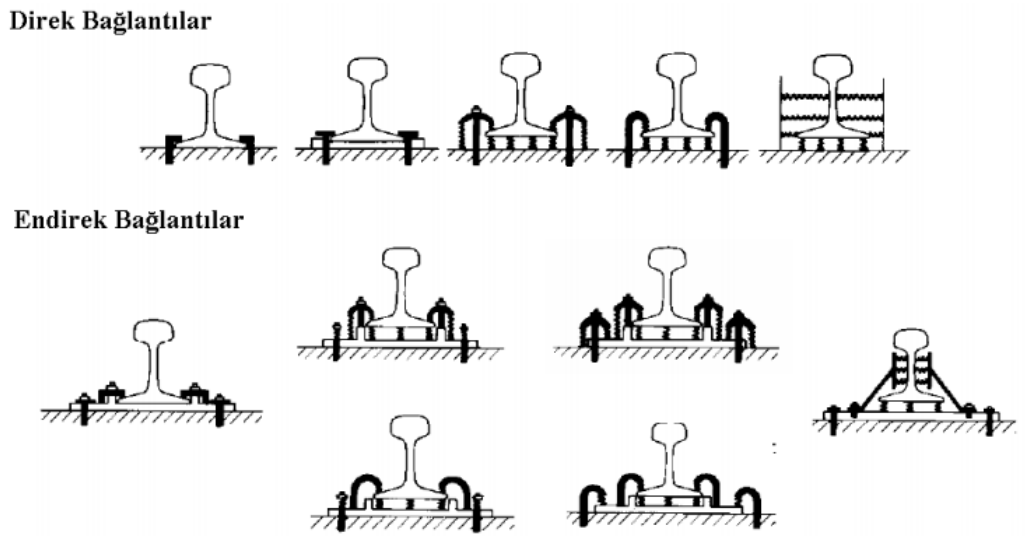
Sürekli mesnetli modeller 500 Hz den düşük frekanslar için uygun sonuçlar verirken, daha geniş frekans aralığında ayrık mesnetli modeller gerçeğe daha uygun sonuçlar vermektedir.

Demiryolu üstyapısı modellenirken aşağıdaki çizelgeler ve yol hiyerarşisi dikkate alınırsa daha rahat bir modelleme yapılabilir.

Öncelikle analiz yapılacak yolun hangi tipte olduğu ve üstyapıda yer alan malzemeler belirlenmelidir. Çizelgede daha önce bahsi geçen üstyapı tipleri ve içinde bulunan bileşenler gösterilmektedir. Buradan faydalanarak modellemeye girecek bileşenler belirlenebilir.

Çizelge 3. 2 Yol tipleri ve bileşenlerine bağlı genel bakış [3]

Yol Tipleri	**Raylar**	**Traversler**	**Bloklar**	**Ray Alt Levhası**	**Beton Plak**	**Ray Elastomer Mesneti**	**Gömülü Ray**	**Ray Alt Levhası Pedi**	**Blok Kılıf / Travers çizmesi**	**Balast Malzemesi**	**Balast Malzemesi**	**Muhendislik Yapılar**	**Elastik Tabaka Sayısı**
Balastlı Yol	X	X				X				X	O	X	2
İndirekt Bağlı Balastlı Yol	X	X		X		X				X	O	X	3
Çizmeli Balastlı Yol	X	X				X			X	X	O	X	2
Çizmeli Plak Yol	X	X			X	X			X			X	2-3
Direkt Bağlı Yol	X				X	X						X	1-2
Direkt Bağlı Blok Yol	X		X		X	X			X			X	2-3
İndirekt Bağlı Yol	X			X	X	X		X				X	2-3
İndirekt Bağlı Blok Yol	X		X	X	X	X		X	X			X	3-4
Gömülü Raylı Yol	X				X		X				O	X	1-2
Not = X : Kullanılması zorunludur. O :Genellikle kullanılır													



Şekil 3. 14 Bağlantı sistemleri [4]

Yolda bulunan bileşenler belirlendikten sonra yol hiyerarşisinden faydalanarak modeller oluşturulabilir. De Man yaptığı çalışmada en çok kullanılan 6 model için bir modelleme ve çözüm matrisi oluşturmuştur. Daha önce bahsedildiği gibi sürekli mesnetli modeller analitik yöntemle çözümlenirken, ayrık mesnetli modeller nümerik yöntemle çözümlenmektedir.

Çizelge 3. 3 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan 6 model [17]

	Yol Bileşenleri	Raylar	Traversler	Bloklar	Ray Altı Levhası	Beton Plak	Ray Altı Elastik Mesnedi	Gömülü Ray	Ray Altı Levhası Pedi	Blok Kılıf/Travers Çizmesi	Balast Materyali	İyi Zemin	Mühendislik Yapıları
Analitik Kullanılan Modeller													
A I	Tek Kiriş (Bernoulli - Euler, Timoshenko) Sürekli Mesnetli	X	3	3	3		1	X	1	1	1	1	2
B I	Çift Kiriş (Bernoulli-Euler, Timoshenko) Sürekli Mesnetli	X				X		X				X	X
C I	Çift Kiriş (Bernoulli-Euler, Timoshenko) Amortisörlü yaylar üzerinde Sürekli Mesnetli	X	1	1	1		1		1	1	1	1	2

Çizelge 3. 3 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan 6 model [17] (devamı)

Nümerik Kullanılan Modeller													
A II	Tek Kiriş (Timoshenko) Amortisörlü yaylar üzerinde Ayrık Mesnetli	X	X	X	X		X		X	X	X	X	2
BII	Çift Kiriş (Timoshenko) Ayrık Mesnetli	X	3	3	3	X	X		X	X	X	X	X
C II	Çift Kiriş (Timoshenko) Ayrık Mesnetli	X				X		X				X	X

Şekil 3. 15 Yol hiyerarşisi [4]

Literatür taramasında karşılaşılan önemli bilgiler;

1- Raylar modellenirken Euler - Bernoulli kiriş teorisi 500 Hz altı frekanslar için daha kolay bir çözüm sunmaktayken, 500 Hz üstü frekanslarda kayma etkilerini dikkate alan Timoshenko kiriş teorisi kullanılmalıdır.
2- Ayrık mesnetlemedeki parametreler travers aralığına bölünerek sürekli mesnet haline getirilebilir. Bu dönüşüm yola ait frekansları daha hızlı bir şekilde elde etmeye yarayacaktır. Sürekli mesnetli modellerde mesnet-mesnet frekansları hesaplanamamaktadır.
3- Mühendislik problemlerinin çözümünde sınır şartlarının büyük önemi vardır. Demiryolu problemlerinde raylar sonsuz bir kiriş gibi modellenmektedir. Sınır şartları olarak yer değiştirme, moment ve kesme kuvveti sıfır olarak kabul yapılır. Bu sonsuzluk şartının sağlanması için de yeterli uzunlukta bir ray uzunluğu seçimi yapılmalıdır. Zakeri [4] yaptığı çalışmada araç-yol etkileşimini araştırmış ve gerçek dışı sınır koşullarının etkisini en aza indirmek için yol modeli uzunluğunun aracın uzunluğundan 1,5 katından fazla olması gerektiğini belirtmiştir.
4- Yolun hesap uzunluğu, özellikle hareketli yüklerde, sınır koşulları ile doğrudan bağlantılıdır. Bu modeller için 15 travers aralığı tavsiye edilen bir uzunluktur ve bu da takriben 20 m olmalıdır [2].
5- Araç-yol etkileşimi problemlerinde özellikle köprü-tren etkileşimi önemlidir. Köprüler modellenirken basit kiriş (simply supported) olarak modellenmektedir.

3.3 Çözüm Metodları

Hareketli yük ve hareketli kütle problemlerinin analizinde iki farklı teknik uygulanır. Bunlar zaman tanım alanlı çözüm tekniği ve frekans tanım alanlı çözüm tekniğidir.

Frekans tanım alanlı çözüm tekniklerinde, frekansa bağlı tahrik fonksiyonu transfer fonksiyonu ile çarpılarak sistemin frekansa bağlı tepki fonksiyonu elde edilir. Dinamik tepki fonksiyonu, sistemin giriş verisi olan taşıt tahrik fonksiyonu ile sistemin çıkış verisi olan yolun yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi veren bir fonksiyondur ve frekansa bağlı bir fonksiyon olduğu için H(f) olarak gösterilir. Eğer dinamik tepki fonksiyonu belirlenirse, taşıt yük fonksiyonuna bağlı olarak,

yolun yer değiştirmesi kolaylıkla hesaplanabilir. Frekans tanımlı teknikte sadece tam lineer sistemler incelenebilir. Yol tepkisi sabit kabul edildiği için ray contası, asılı travers (balast teması olmayan) gibi tekil olaylar bu yöntemde incelenemez [1].

Zaman tanım alanlı çözüm tekniklerinde hesaplanan dinamik tepkiler zamana bağlı fonksiyonlarla ifade edilir. Zaman tanım alanlı tekniklerde modal analiz ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) teknikleri kullanılır. Modal analizde kullanılan modeller lineer olmalıdır. Modellemelerde karışık modellerin genellemesi zordur. SEY de ise lineer olmayan elemanlar ve lineer olmayan modeller çözümlenebilmektedir. Örneğin, balast ve ray pedleri normalde non-lineer özellik gösterirler ve SEY de bu modeller nasıl davranacaksa o şekilde eleman özelliği oluşturulan modellere verilebilir.

Fryba [13] Winkler zemini üzerine oturan sonsuz uzunluktaki Euler kirişini modellediği hareketli yük problemlerini detaylı bir şekilde sunmuştur. Hareketli yük problemleri ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu Euler ve Timoshenko kiriş teorileri ile ortaya çıkan diferansiyel denklemleri çözmek için Fourier dönüşümleri ile değerlendirilmiştir [13, 21, 28, 51, 65]. Pasternak veya Winkler zemini üzerine oturan hareketli yük altındaki sonsuz kiriş cevapları Fourier dönüşümü ve Green fonksiyonu ile çalışılmıştır. [21, 26, 118].

Kiriş analizlerinde non-lineer etkileri düşünmek için sonsuz uzunluktaki kiriş çalışmaları sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sürdürülmüştür [119-121]. Bu çalışmalarda uzay ve zamanın değiştiği hareketli yük altındaki yapıların non-lineer dinamik analizleri için SEY adapte edilmiştir.

Hareketli kuvvet probleminde kuvvetin büyüklüğü sabit kabul edilmiş olup hareketli kütlenin atalet kuvvetleri ihmal edilmiştir. Fakat hareketli kütle problemlerinde kütleden ve merkezkaç kuvvetinden oluşan atalet kuvvetleri meydana gelmektedir. Bu yüzden etkileşim problemlerinde hareketli kütlenin kiriş kütlesine oranı, yapısal esneklik ve kütlenin hızı önemli bir rol oynamaktadır. Hareketli kütle problemine kapalı bir çözüm getiren çalışma Michaltos ve diğerleri [32] tarafından kütle etkisiz yaklaşık bir çözüm ile yapılmıştır. Ting ve diğerleri [36], Foda ve Abduljabbar [37], Sadiku ve Leipholz [39] tarafından Green

fonksiyonu metodu kullanarak, sistem parametrelerinin etkileri hareketli kütlenin, kirişin dinamik cevapları üzerinde çalışılmıştır. Öz fonksiyonun seri açılımları veya modal analiz metodu Akin ve Mofid [41], Bowe ve Mullarkey [42], Ichikawa ve diğ. [43], Stanisic ve Lafayette [46] ve Lee [47] tarafından çalışılmıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak hareketli kütle altında çok veya tek mesnetli kirişlerin dinamik cevapları Lou ve diğ. [60], Yavari ve diğ. [61], Vu-Quoc ve Olsson [62], Bajer ve Dyniewicz [63] ve Cifuentes [64] tarafından çalışılmıştır.

BÖLÜM 4

MATEMATİK MODELLEME

Bu çalışmada kullanılacak gerçek yapı İstanbul'da M1 Havalimanı-Yenikapı metro hattında Dünya Ticaret Merkezi istasyonu yönünde (2.Yol, Km 10+190) yer almaktadır. Yapı ayrık mesnetli, çelik seletli, balastsız (rijit) üstyapıdır. Bu yapının elemanları Şekil 4.1'de ray, ray pedi, rijit zemin olarak gözükmekte ve teknik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4. 1 İstanbul M1 hattın görünüşü [1]

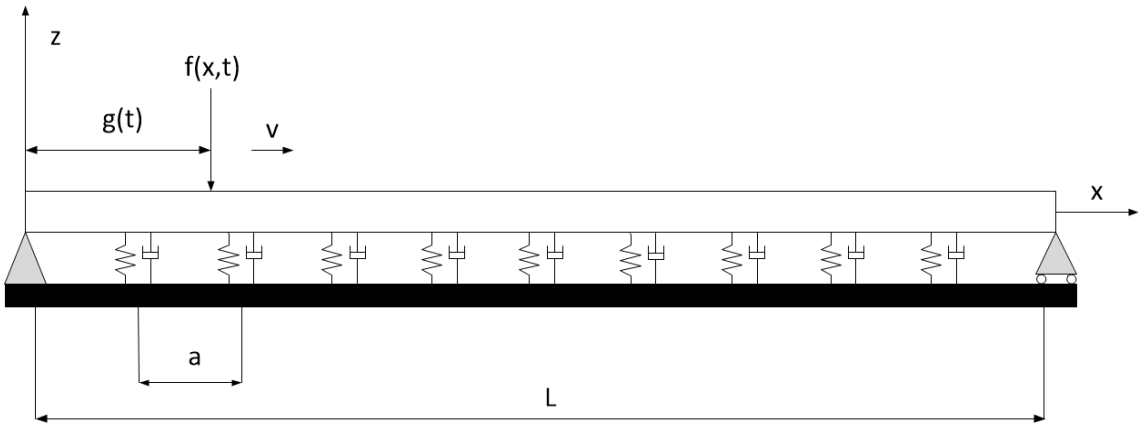


Şekil 4. 2 M1 hattında çalışan ABB aracı

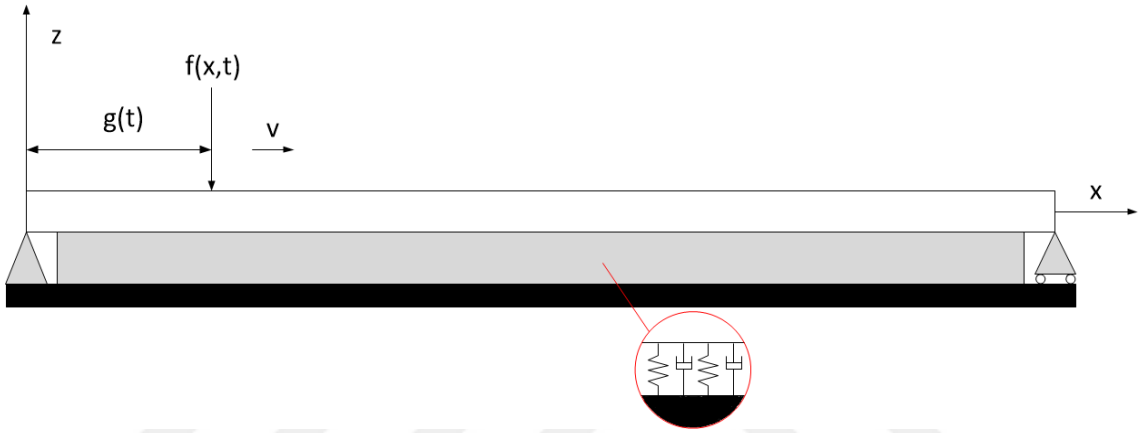
Çizelge 4.1'de, Şekil 4.2'deki taşıtın dolu haldeki 1 tekerleğinin yükü yani m^2 başına 6 yolcu olarak alınmıştır. Ayrıca, S49 tip ray özellikleri, tekerlek yükü ve rayla zemin arasındaki ray pedinin yay katsayısı verilmiştir. Aracın seyir hızı olarak maksimum tasarım hızı olan 80 km/h (22,22 m/s) alınmıştır.

Çizelge 4. 1 Üst yapı özellikleri [1]

Ray Young Modülü (N/m^2)	$2.1x10^{10}$
Ray alan atalet momenti (m^4)	$1819x10^{-8}$
Ray Kesit Alanı (m^2)	$6297x10^{-6}$
Ray Özkütlesi (kg/m^3)	7850
Rayın Uzunluğu (m)	50
Ray pedi yay katsayısı (N/m)	$90x10^6$
Dolu Taşıtın 1 Tekerleğinin Yükü (N)	40000
Mesnet Uzaklığı "a" (m)	0.75



Şekil 4. 3 Ayrık mesnetli gerçek model



Şekil 4. 4 Sürekli mesnetli hale getirilmiş model

Normalde ayrık mesnetli olan yapıyı sürekli mesnetli hale getirmek için ray pedinin yay ve sönüm katsayıları iki mesnet arasındaki mesafeye bölünmüştür. Böylece sürekli bir sistem elde edilmiş olup analitik metodla daha kolay çözülebilir hale getirilmiştir.

4.1 Matematik Modelin Oluşturulması

Demiryolu üstyapısını oluşturan elemanlarından ray içinde kayma etkileri bulundurmayan Euler-Bernoulli kirişi olarak, ray altında kullanılan viskoelastik yatak ise sürekli mesnetli olarak düşünülmüştür. Euler-Bernoulli kiriş teorisinde E rayın elastite modülünü, I rayın kesit atalet momentini, ρ rayın özkütlesini, A rayın kesit alanını ifade etmektedir. Teoriye ek viskoelastik yatağın dinamik özelliklerinden k_L elastomer yatağın yay katsayısını, c yatağın sönüm katsayısını temsil etmektedir. Eşitliğin diğer tarafına ise hareketli yük etkisi için dirac-delta fonksiyonu ile birlikte verilen P_0 kuvveti eklenir. Denklem (4.1) hareketli yük probleminin genel hareket denklemidir. Sonraki başlıklarda

bu problem Galerkin yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemiyle çözdürülüp sonuçlar mukayese edilecektir.

$$EI\frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4}+\rho A\frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2}+k_L z(x,t)+c\frac{\partial z(x,t)}{\partial t}=\delta(x-vt)P_0 \tag{4.1}$$

4.2 Galerkin Yöntemi

$$f(x,t)=\delta\left(x-g(t)\right)P_0 \tag{4.2}$$

$$g(t)=vt \tag{4.3}$$

$$\int_a^b \delta(x-vt)\,f(x)\,dx=f(\xi)\quad \text{for}\quad a<\xi<b \tag{4.4}$$

Basit mesnetli kirişte sınır şartları x=0 ve x=L noktalarında, düşey eksende yer değiştirme ve moment sıfırdır. Denklem (4. 5) ve (4. 6) da sınır şartları verilmiştir. Başlangıç şartlarını içeren ifade denklem (4. 7) de gösterilmektedir.

$$z(0,t)=z(L,t)=0 \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial^2 z(0,t)}{\partial x^2}=\frac{\partial^2 z(L,t)}{\partial x^2}=0 \tag{4.6}$$

$$z(x,0)=\frac{\partial z(x,0)}{\partial t}=0 \tag{4.7}$$

Denklem (4. 1)'in normalde kapalı formda çözümü yoktur. Bu sebepten dolayı başlangıç şartlarına uygun, zamana ve x'e bağlı bir mukayese fonksiyonu seçilir ve yer değiştirmeyi ifade eden w(x,t), eşitlik (4. 8) deki hale getirilir.

$$z(x,t)=\sum_{i=1}^{N} Q_i(t)\,sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) \tag{4.8}$$

Denklem (4. 8) in zamana ve x'e göre türevleri elde edilip (4.1) ifadesinde yerlerine koyulduktan sonra bütün eşitlik $\sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right)$ ile çarpılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa denklem (4. 9) elde edilir.

$$\sum_{i=1}^{N}\int_{0}^{L}\left(\left[EI\left(\frac{i\pi}{L}\right)^4+k_L\right]Q_i(t)+\rho A\ddot{Q}_i(t)+c\dot{Q}_i(t)\right)sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right)dx$$
$$=P_0\int_0^L\delta(x-vt)\,sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right)dx \tag{4.9}$$

Denklem (4. 9) sıfırdan L'ye kadar integre edilir fakat ortogonallik şartının sağlanması için i=j olmalıdır. İntegral alındıktan sonra denklem 2.dereceden lineer adi bir diferansiyel denklem haline gelmiş olacaktır(4.10). Sayısal sonuç almak için Çizelge 4. 1 de verilen değerler kullanılacak ve Mathematica programında NDSolve komutu kullanılacaktır. Çözümde kullanılacak başlangıç şartları (4.11) de verilmiştir.

$$\left[EI\left(\frac{j\pi}{L}\right)^4+k_L\right]Q_j(t)+\rho A\ddot{Q}_j(t)+c\dot{Q}_j(t)=2\frac{P_0}{L}sin\left(\frac{j\pi vt}{L}\right),\ j=1,2,3,\ldots,N \tag{4.10}$$

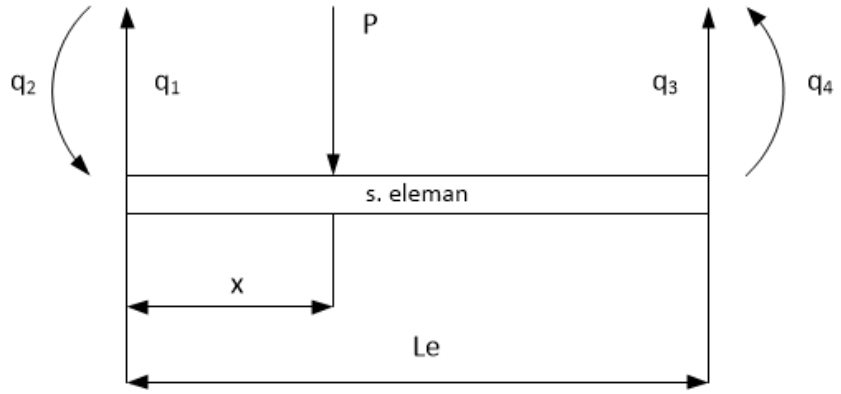
$$Q_j(0)=\dot{Q}_j(0)=0\quad j=1,2,3,\ldots,N \tag{4.11}$$

4.3 Sonlu Elemalar Yöntemi

Çok serbestlik dereceli sistemlerin genel hareket denklemi denklem (4.12) de verilmiştir. Bu eşitlikte [M] kütle matrisini, [C] sönüm matrisini, [K] rijitlik matrisini ve [K_L] viskoelastik yatağın rijitlik matrisini ifade etmektedir. $\{\ddot{q}\},\{q\},\{\dot{q}\}$ sırasıyla ivme, yer değiştirme ve hızların vektörleridir. {F} ise zamana bağlı hareketli yük ifadesidir.

$$[M]\{\ddot{q}\}+[K]\{q\}+[K_L]\{q\}+[C]\{\dot{q}\}=\{F\} \tag{4.12}$$

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak eleman tipi Şekil 4. 3 de verilmiştir. Bu eleman uç noktalarında dönme (q_2, q_4) ve ötelemeler (q_1, q_3) tanımlanmıştır.



Şekil 4. 5 Herbir S eleman için düğüm noktası kuvvetleri

Sonlu elemanlarda gerekli olan rijitlik, kütle, sönüm matrislerini elde etmek için yapılan iş (W) iç enerjiye (U) eşitlenir ve iki enerji ifadesinin virtüelleri alınır.

$$U = W \tag{4.13}$$

$$\delta U = \delta W \tag{4.14}$$

Sabit kesitli bir dx parçacığının virtüel iç enerji ifadesi Denklem (4.15) de belirtilmiştir.

$$\delta U = \int_A \int_0^L \delta\varepsilon^T \sigma_x dx dA \tag{4.15}$$

Denklem (4.17) de şekil fonksiyonları ve nodal kuvvetler arasındaki ilişki belirtilmiştir. N şekil fonksiyonları matrisini u_e vektörü ise nodal kuvvetleri temsil etmektedir. Denklem (4.16) da gerinimi, B matrisi ise şekil fonksiyonlarının ikinci türevini göstermektedir.

$$\varepsilon_x = -z\frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} = -z\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}u_e = -z.B.u_e \tag{4.16}$$

$$v(x) = N_1 q_1 + N_2 q_2 + N_3 q_3 + N_4 q_4 \tag{4.17}$$

N_i (i=1-4) şekil fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$N_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \tag{4.18}$$

$$N_2 = (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)L_e \tag{4.19}$$

$$N_3 = 3\xi^2 - 2\xi^3 \tag{4.20}$$

$$N_4 = (-\xi^2 + \xi^3)L_e \tag{4.21}$$

$$\xi = x / L_e \tag{4.22}$$

$$B = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \left[\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_3}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 N_4}{\partial x^2}\right] \tag{4.23}$$

Denklem (4.16) daki gerinimin virtüeli denklem (4.24) de verilmiştir.

$$\delta\varepsilon_x = -z.B.\delta u_e \tag{4.24}$$

Gerilme, elastisite modülü ve şekil fonksiyonlarına bağlı olarak ifade edilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\sigma_x = E.\varepsilon_x = E(-z.B.u_e) = -E.z.B.u_e \tag{4.25}$$

Denklem (4.24) ve (4.25) deki ifadeler (4.15) de yerine koyulursa iç enerjiyi veren denklem (4.26) elde edilir.

$$\delta U = \int\int \delta\varepsilon^T \sigma_x dAdx = \int\int (-z.B.u_e)^T (-E.z.B.u_e) dAdx \tag{4.26}$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa iç enerji elastisite modülüne, atalet momentine, şekil fonksiyonlarına ve nodal yer değişitirmelere bağlı olarak ifade edilir.

$$\delta U = \delta u_e{}^T E \left[\int_0^L \int_A z^2 dAB^T Bdx \right] u_e = \delta u_e{}^T EI \left[\int_0^L B^T Bdx \right] u_e \tag{4.27}$$

İç enerjiyi veren denklem (4.27) yi elde ettikten sonra nodal kuvvetlerin yaptığı işin virtüeli denklem (4.28) de verilmiştir. F_1 ve F_2 birim elemandaki nodların yer değiştirmesini, M_1 ve M_2 ise birim elemandaki momentleri temsil etmektedir.

$$\delta W = \delta q_1 F_1 + \delta q_2 M_1 + \delta q_3 F_2 + \delta q_4 M_2 \tag{4.28}$$

Denklem (4.16) da görüldüğü gibi nodal kuvvetler u_e olarak ifade edilmişti.

$$\delta W = \begin{bmatrix} \delta q_1 & \delta q_2 & \delta q_3 & \delta q_4 \end{bmatrix} \{F\} = \delta u_e \{F\} \tag{4.29}$$

$$\delta W = \delta u_e{}^T \{F\} \tag{4.30}$$

Denklem (4.30) da yapılan iş ve denklem (4.27) deki iç enerji ifadeleri eşitlenirse sistemin rijitlik matrisi bulunacaktır. Kuvvet matrisi verildikten sonra sistemin diğer matrisleri verilecektir.

$$\cancel{\delta u_e{}^T} EI \left[\int_0^L B^T Bdx \right] u_e = \cancel{\delta u_e{}^T} \{F\} \Rightarrow K.u_e = \{F\} \tag{4.31}$$

Kuvvet, kiriş üzerinde hareket ederken, hangi elemanda ise o elemanın düğüm noktaları hariç bütün düğüm noktaları sıfır değerini alacaktır. Eleman üzerindeki kuvvet ve momentler düğüm noktaları arasında paylaşılacaktır. {F} global matrisi herhangi bir anda aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\{F(t)\} = \{000...F_1^s(t)M_1^s(t)F_2^s(t)M_2^s(t)...000\} \tag{4.32}$$

$$\{F^s\} = [F_1^s(t) M_1^s(t) F_2^s(t) M_2^s(t)]^T = P\{N\} \tag{4.33}$$

$$\{N\} = [N_1 N_2 N_3 N_4]^T \tag{4.34}$$

Şekil 4. 3 de görüldüğü gibi L_e eleman boyunu x ise kuvvetin elemanın sol ucuna olan uzaklığını göstermektedir.

$$x(t) = \vartheta.t \tag{4.35}$$

Denklem (4.36), (4.37), (4.38), (4.39) ve (4.40) da sırasıyla kuvvet, kütle, sistemin rijitliği, viskoelastik zeminin sönümü ve viskoelastik zeminin rijitliği verilmiştir [6,16,122]. Bu matrisler, kiriş kaç elemana ayrılacaksa o eleman sayısı kadar birleştirilecektir. Sınır şartları uygulandıktan sonra çözümlemeye geçilecektir.

$$\{F^s\} = P\begin{bmatrix} 1+2\dfrac{t^3v^3}{L_e^{\,3}} - 3\dfrac{t^2v^2}{L_e^{\,2}} \\ tv + \dfrac{t^3v^3}{L_e^{\,2}} - 2\dfrac{t^2v^2}{L_e} \\ 3\dfrac{t^2v^2}{L_e^{\,2}} - 2\dfrac{t^3v^3}{L_e^{\,3}} \\ \dfrac{t^3v^3}{L_e^{\,2}} - \dfrac{t^2v^2}{L_e} \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

$$[M] = \rho A\left[\int_0^L B^T B dx\right] \Rightarrow [M] = \frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

$$[K] = EI\left[\int_0^L B^T B dx\right] \Rightarrow [K] = \frac{EI}{L^3}\begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

$$[C] = c\left[\int_0^L B^T B dx\right] \Rightarrow [C] = \frac{cL}{420}\begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

$$\left[K_L\right]=k_L\left[\int_0^L B^T B dx\right]\Rightarrow\left[K_L\right]=\frac{k_L L}{420}\begin{bmatrix}156 & 22L & 54 & -13L\\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2\\ 54 & 13L & 156 & -22L\\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2\end{bmatrix} \tag{4.40}$$

Örneğin, kiriş 2 eleman için incelenecekse iki matris, 10 eleman için incelenecekse 10 matris birleştirilip global matrisler elde edilecektir. Aşağıdaki matriste 2 matrisin birleştirilmesi gösterilmiştir.

$$M=\frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix}156 & 22L & 54 & -13L & 0 & 0\\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 & 0 & 0\\ 54 & 13L & 156+156 & -22L+22L & 54 & -13L\\ -13L & -3L^2 & -22L+22L & 4L^2+4L^2 & 13L & -3L^2\\ 0 & 0 & 54 & 13L & 156 & -22L\\ 0 & 0 & -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2\end{bmatrix} \tag{4.41}$$

Sınır şartları basit mesnetli kiriş olacağından matrisin ötelemeyi ifade eden 2.satır, 2.sütunu ve sondan bir önceki satır ve sütun silinir. Örneğin, (4.42) deki matrise sınır şartları uygulanırsa aşağıdaki matris elde edilir. Bu işlem bütün kütle, rijitlik ve kuvvet matrislerine uygulanır.

$$M=\frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix}156 & \cancel{22L} & 54 & -13L & \cancel{0} & 0\\ \cancel{22L} & \cancel{4L^2} & \cancel{13L} & \cancel{-3L^2} & \cancel{0} & \cancel{0}\\ 54 & \cancel{13L} & 312 & 0 & \cancel{54} & -13L\\ -13L & \cancel{-3L^2} & 0 & 8L^2 & \cancel{13L} & -3L^2\\ \cancel{0} & \cancel{0} & \cancel{54} & \cancel{13L} & \cancel{156} & \cancel{-22L}\\ 0 & \cancel{0} & -13L & -3L^2 & \cancel{-22L} & 4L^2\end{bmatrix}= \tag{4.42}$$

$$\frac{\rho AL}{420}\begin{bmatrix}156 & 54 & -13L & 0\\ 54 & 312 & 0 & -13L\\ -13L & 0 & 8L^2 & -3L^2\\ 0 & -13L & -3L^2 & 4L^2\end{bmatrix}$$

4.3.1 Newmark-Beta Yöntemi ile Çözüm

Sonlu elemalar ile modellenen sistem nümerik integrasyon metodu kullanılarak yer değiştirmeler bulunacaktır.

1959 yılında N.M. Newmark aşağıdaki eşitliklere dayanarak zaman adımlı bir metod geliştirmiştir [122].

$$\dot{q}_{i+1} = \dot{q}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{q}_i + (\gamma\Delta t)q_{i+1} \tag{4.43}$$

$$q_{i+1} = q_i + \Delta t q_i + [(0.5-\beta)(\Delta t)^2]\ddot{q}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{q}_{i+1} \tag{4.44}$$

β ve γ parametreleri zaman adımlarının kararlılığı ve doğruluk karakteristiklerini ifade etmektedir. Genellikle $\gamma = 1/2$ ve $1/6 \le \beta \le 1/4$ arasında alınır. Δt ise kullanılacak zaman adımıdır. $\gamma = 0$ alınıp ilgili terimler yok edilirse merkezi farklar yöntemine geçiş yapılabilir. İleride Merkezi Farklar ile Newmark-Beta metodları arasında karşılaştırma yapılacaktır. Tablo 4.2 de lineer sistemler için Newmark-Beta metodunun uygulama aşamaları verilmiştir.

Sayısal yöntemlerle problemler çözülürken adım sayısını seçmek büyük bir önem arzetmektedir. Çünkü adım sayısı yeterince küçük seçilmezse yöntemler kararsız hale gelmekte ve doğru sonuçları vermemektedir. Denklem (4.45) [122] da Newmark-Beta yöntemi için karalılık ifadesi yer almaktadır. Denklem (4.45) de değerler yerine koyulursa denklem (4.46) [122] da görüldüğü gibi yöntem bütün adım sayılarında kararlıdır. Senaryolar bölümünde bahsedileceği üzere adım sayısını arttırmak daha hassas sonuç verirken çözüm zamanını arttırmaktadır.

$$\frac{\Delta t}{T_n} \le \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \tag{4.45}$$

$$\frac{\Delta t}{T_n} < \infty \tag{4.46}$$

Çizelge 4. 2 Lineer sistemler için newmark-beta metodu uygulama aşamaları [122]

A.	Başlangıç Hesapları
1.	$\ddot{q}_0 = [M]^{-1}\left[F_0 - [C]\dot{q}_0 - [K]q_0 - [K_L]q_0\right]$
2.	Δt seçilir.
3.	Modifiye katılık matrisi bulunur.

Çizelge 4. 2 Lineer sistemler için newmark-beta metodu uygulama aşamaları [122] (devamı)

$$\left[\hat{K}\right]=[K]+[K_L]+\frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C]+\frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2}[M]$$

4. A ve B matrisleri bulunur.

$$[A]=\frac{1}{\beta\Delta t}[M]+\frac{\gamma}{\beta}[C]$$

$$[B]=\frac{1}{2\beta}[M]+\Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta}-1\right)[C]$$

B. Her zaman adımında

1. $\left[\Delta\hat{F}_i\right]=[F_{i+1}]-[F_i]+[A]\dot{q}_i+[B]\ddot{q}_i$
2. $\Delta q_i=\left[\hat{K}\right]^{-1}\left[\Delta\hat{F}_i\right]$
3. $\Delta\dot{q}_i=\frac{\gamma}{\beta\Delta t}\Delta q_i-\frac{\gamma}{\beta}\dot{q}_i+\Delta t\left(1-\frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{q}_i$
4. $\Delta\ddot{q}_i=\frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta q_i-\frac{1}{\beta\Delta t}\dot{q}_i-\frac{1}{2\beta}\ddot{q}_i$
5. $q_{i+1}=q_i+\Delta q_i,\dot{q}_{i+1}=\dot{q}_i+\Delta\dot{q}_i,\ddot{q}_{i+1}=\ddot{q}_i+\Delta\ddot{q}_i$

C. Bütün zaman adımlarında B tekrar edilir.
Bu problem için $\beta=1/4,\gamma=1/2$ kabul edildi.

BÖLÜM 5

SENARYOLARIN OLUŞTURULMASI

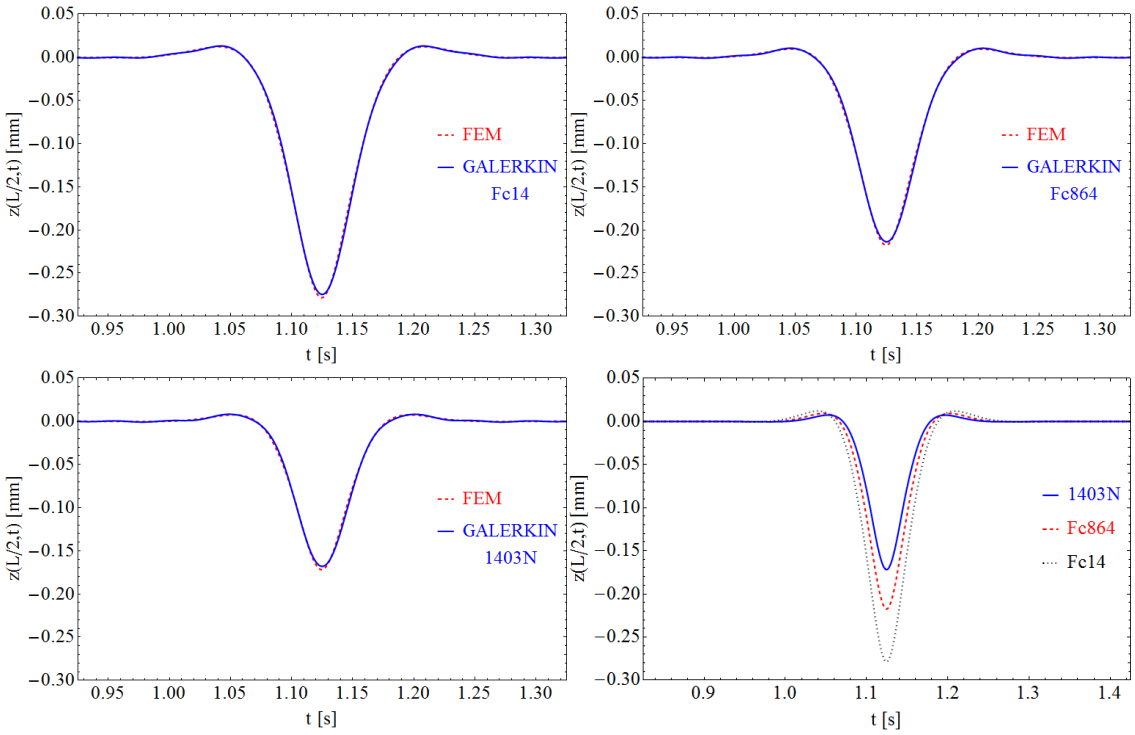
Bu bölümde öncelikli amaç parametre değişiklerinin, sistemin davranışlarına etkisinin araştırılmasıdır. İkinci amaç ise Galerkin metodu ile sonlu elemanlar yönteminin kıyaslaması olacaktır. İlk kısımda farklı özellikteki ray pedleri, ikinci kısımda farklı mesnet mesafeleri, üçüncü kısımda taşıtın farklı seyir hızları, son olarak da farklı ray tipleri kullanılarak sistemdeki değişimler incelenecektir. Sonlu elemanlar yönteminde ve bu yöntemin çözümünde kullanılan Newmark-Beta yöntemi için öncelikle yakınsama ve ıraksama için birkaç adet analiz yapılır. Artık yakınsamaya başlayan uygun bir eleman sayısı ve adım sayısında bütün senaryolar seçilmiş olan bu değerlere göre yapılmıştır. Sonlu elemanlar için 50, 75, 100, 150, 200, 300 eleman sayısı seçilmiş ve eleman sayısı arttıkça analiz süresinin arttığı görülmüştür. Daha kısa süre ve uygun yakınsama için 100 eleman seçilmiş ve bütün senaryolar gerçekleştirilmiştir. Newmark- Beta yöntemi için daha önce bahsi geçtiği üzere her adım sayısında kararlı olduğu vurgulanmıştı. Adım sayısını çok küçük tutmak grafikleri daha pürüzsüz hale getirirken çözüm zamanını aşırı derecede arttırmıştır. Maksimum yer değiştirme değerleri için ise yüzde 0,5 bile olmayan sapmalar gözlenmiştir. Bunun için uygun olan 0,045 adım sayısı seçilmiştir.

5.1 Farklı Ray Pedleri İçin

Çizelge 5.1'de İstanbul metro hatların da kullanılan bazı ray pedlerinin özellikleri verilmiştir. Analizlerde araç hızı 80 km/h, mesnet mesafesi 0,75 m ve S49 ray tipi kullanılmıştır.

Çizelge 5. 1 Farklı ray pedleri [1]

Ray Pedi Tipleri	Yay Katsayısı (10^6 N/m)	Sönüm Katsayısı (10^3 Ns/m)
Fc 14	90	4,1
Fc 864	125	8
1403 - N	171	17,1



Şekil 5. 1 Farklı ray pedleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği

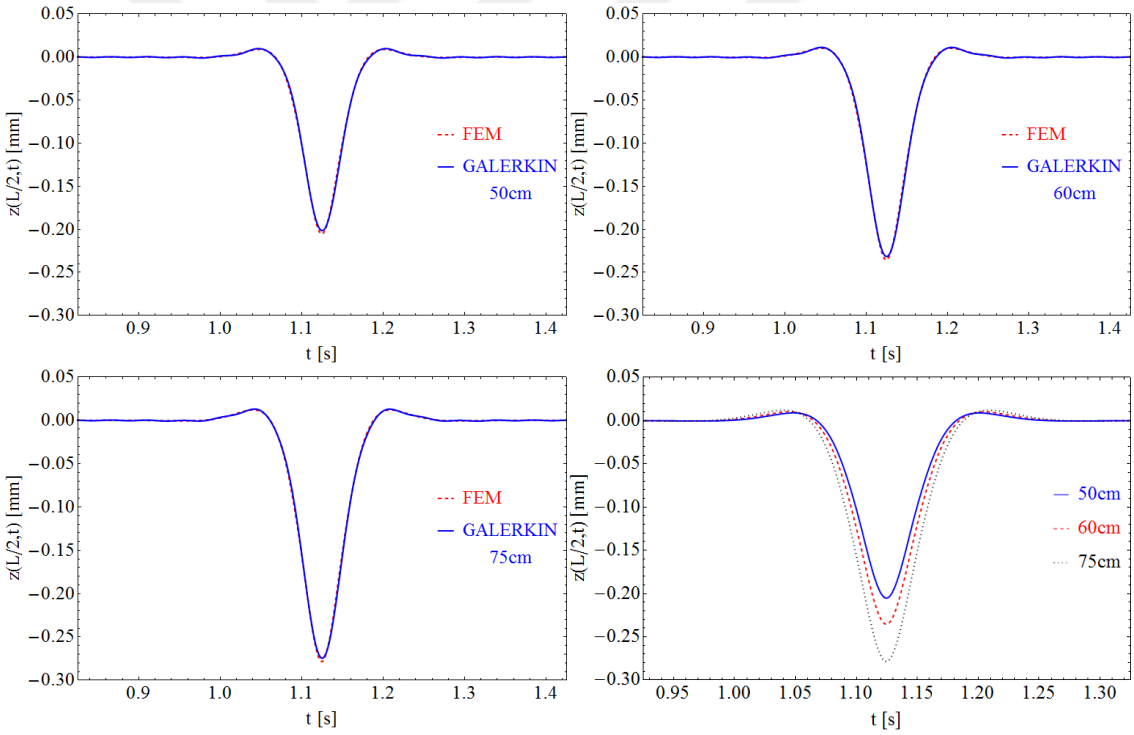
Şekil 5.1'de sistemde farklı ray pedleri için yer değiştirme miktarlarının zamana bağlı grafikleri ve iki yöntem arasındaki farklılıklar gösterilmektedir. Çizelge 5. 2'de maksimum yer değiştirme miktarları bulunmaktadır. En az yer değiştirme 1403-N tipi ray pedinde, en fazla yer değiştirme Fc 14 tipi ray pedinde meydana gelmiştir. 1403-N tipi ray pedi kullanmak yer değiştirme miktarını yaklaşık %36,5 azaltacaktır. Galerkin yönteminde, sonlu elemanlar yöntemine göre yer değiştirme değerleri yaklaşık %1,41 ile %2,23 daha az çıkmaktadır.

Çizelge 5. 2 Farklı ray pedleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Ray Pedi Tipleri	Galerkin Yöntemi (mm)	Sonlu Elemanlar (mm)
Fc 14	0,274647	0,278527
Fc 864	0,213706	0,217524
1403 - N	0,168033	0,171783

5.2 Farklı Mesnet Mesafeleri İçin

Bu analizde iki selet arası mesafenin rayın yer değiştirmesine etkisi araştırılmıştır. Analizlerde araç hızı 80 km/h, Fc 14 ray pedi ve S49 ray tipi kullanılmıştır.



Şekil 5. 2 Farklı mesnet mesafeleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği

Şekil 5.2'de farklı mesnet mesafeleri için yer değiştirme miktarlarının zamana bağlı grafikleri ve iki yöntem arasındaki farklılıklar gösterilmektedir. Çizelge 5.3'de maksimum yer değiştirme miktarları bulunmaktadır. En az yer değiştirme 50 cm' de, en fazla yer değiştirme 75 cm' de meydana gelmiştir. Seletleri 50 cm mesafe ile yerleştirmek, yer

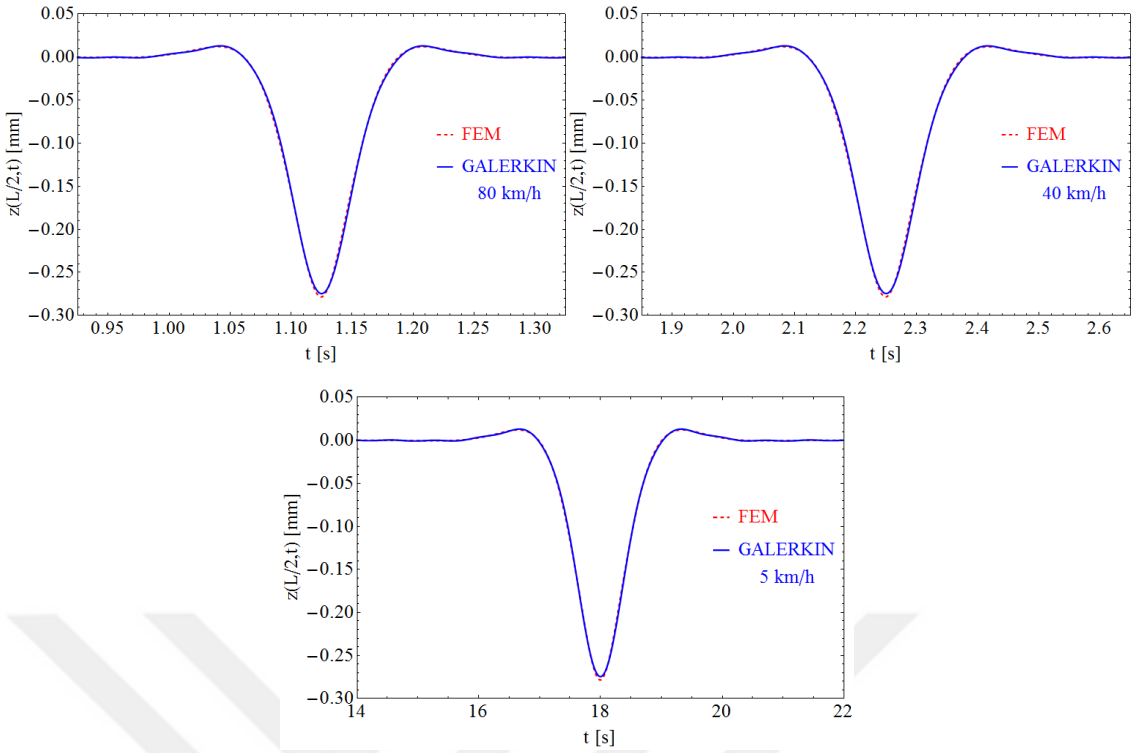
değiştirme miktarını yaklaşık %26 azaltacaktır. Seletleri 50 cm mesafe ile yerleştirmek maliyeti arttırıcı bir işlem olup projenin bütün bütçesini etkiyebileceği için optimizasyona gidilmesi gerekmektedir. Galerkin yönteminde, sonlu elemanlar yöntemine göre yer değiştirme değerleri yaklaşık %1,41 ile %1,88 daha az çıkmaktadır.

Çizelge 5. 3 Farklı mesnet mesafeleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Mesnet Mesafeleri	Galerkin Yöntemi (mm)	Sonlu Elemanlar (mm)
50 cm	0,201474	0,205276
60 cm	0,231640	0,235479
75 cm	0,274647	0,278527

5.3 Farklı Taşıt Hızlarında

Şekil 4.2 de gösterilen ABB hafif metro aracının maksimum tasarım hızı 80 km/h dir. Aracın günlük işletme hızı 40 km/h (11,11 m/s) dir ve araç istasyona yaklaşırken ortalama hızı 5 km/h (1,38 m/s) dir. Analizlerde selet aralığı 75 cm, Fc 14 ray pedi ve S49 ray tipi kullanılmıştır.



Şekil 5. 3 Farklı taşıt hızları için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği

Şekil 5.3'de farklı taşıt hızları için yer değiştirme miktarlarının zamana bağlı grafikleri ve iki yöntem arasındaki farklılıklar gösterilmektedir. Çizelge 5.4'de maksimum yer değiştirme miktarları bulunmaktadır. Analizde kullanılan farklı hız değerlerindeki yer değiştirme miktarları arasında neredeyse fark yoktur. Çünkü kullanılan hızlar, kritik hızın yani dalga yayınım hızının (kritik hız) altında kaldığı için çok büyük farklar meydana gelmemiştir. Galerkin yönteminde, sonlu elemanlar yöntemine göre yer değiştirme değerleri yaklaşık %1,41 daha az çıkmaktadır.

L.Frayba [1] kitabında elastik zemin üzerindeki sonsuz kirişlerin dinamik cevaplarını irdelerken kritik hız kavramından bahsetmiştir. Denklem (5.1) de görülen ifade kritik hızın hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki değerler yerine koyulduğunda kritik hız yaklaşık 930 km/sa gibi bir değer çıkmaktadır.

$$\nu_{kr} = 2\sqrt[4]{\frac{k_L}{4EI}}\sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \tag{5.1}$$

Çizelge 5. 4 Farklı taşıt hızları için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

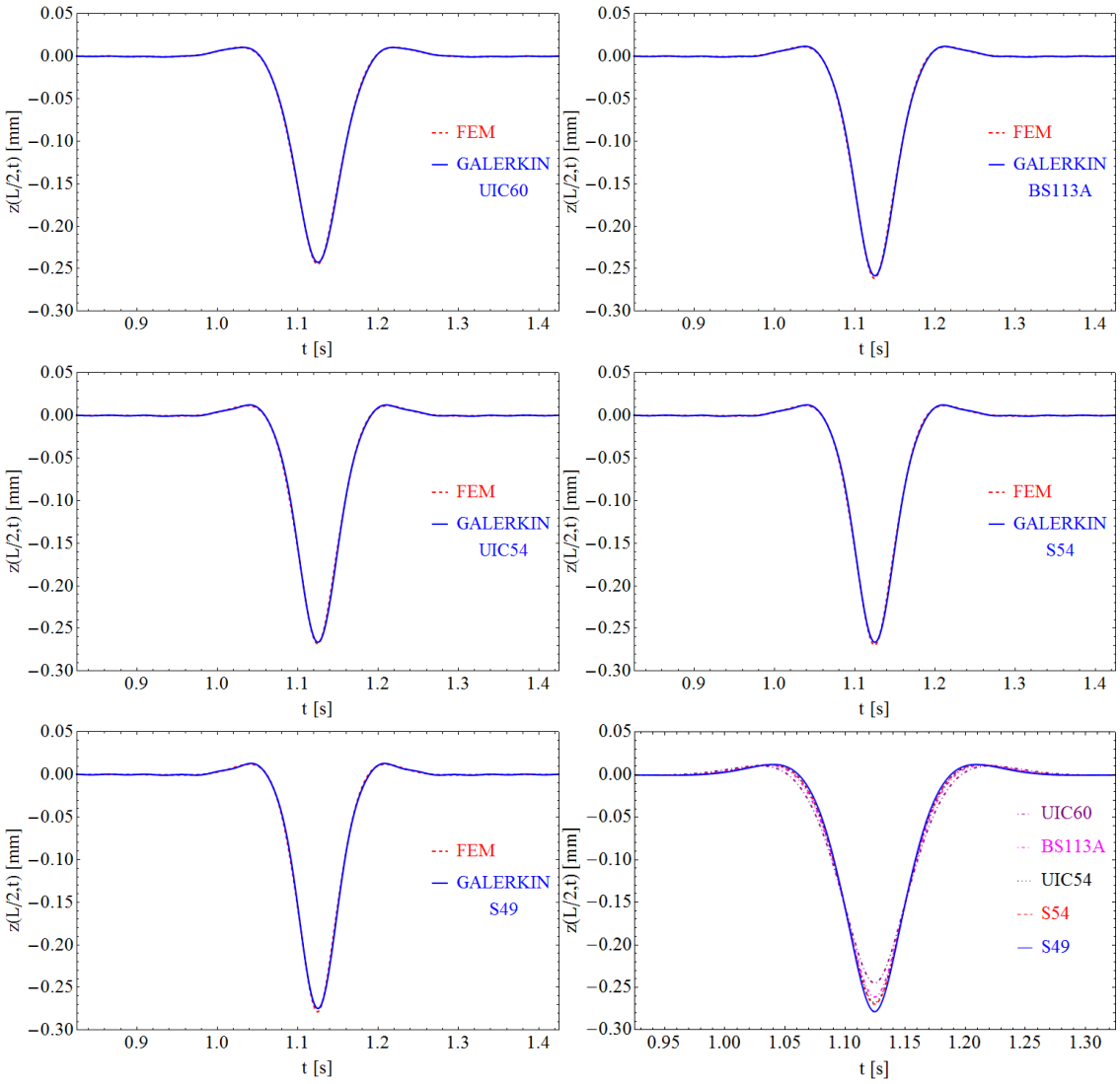
Farklı Taşıt Hızları	Galerkin Yöntemi (mm)	Sonlu Elemanlar (mm)
5 km/h	0,274567	0,278444
40 km/h	0,274587	0,278462
80 km/h	0,274647	0,278527

5.4 Farklı Ray Tiplerinde

Bu kısımda Çizelge 5.5'de verilen farklı ray tiplerinin yer değiştirmeye etkisi araştırılmıştır. Analizlerde selet aralığı 75 cm, Fc 14 ray pedi ve 80 km/h taşıt hızı kullanılmıştır.

Çizelge 5. 5 Rayların mekanik özellikleri [1]

Ray Tipi	Kesit Alanı A (mm^2)	Atalet Momenti I ($10^{-8}\ m^4$)	Eğilme Rijitliği EI ($10^6\ Nm^2$)
S49	6297	1819	3,82
S54	6948	2073	4,35
UIC54	6934	2127	4,93
UIC60	7687	3055	6,42
BS113A	7183	2349	4,90



Şekil 5. 4 Farklı ray tipleri için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği

Şekil 5.4'de sistemde farklı ray tipleri için yer değiştirme miktarlarının zamana bağlı grafikleri ve iki yöntem arasındaki farklılıklar gösterilmektedir. Çizelge 5.6'da maksimum yer değiştirme miktarları bulunmaktadır. En az yer değiştirme UIC 60 ray tipinde, en fazla yer değiştirme S54 tipi ray tipinde meydana gelmiştir. UIC 60 ray kullanmak yer değiştirme miktarını yaklaşık %12 azaltacaktır. Galerkin yönteminde, sonlu elemanlar yöntemine göre yer değiştirme miktarları yaklaşık %0,97 ile %1,41 daha az çıkmaktadır.

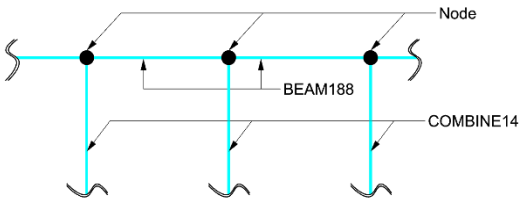
Çizelge 5. 6 Farklı ray tipleri için maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Ray Tipi	Galerkin Yöntemi (mm)	Sonlu Elemanlar (mm)
S49	0,274647	0,278527
S54	0,266217	0,269642
UIC54	0,264583	0,267925
UIC60	0,242500	0,244858
BS113A	0,258360	0,261398

5.5 Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması

Şimdiye kadar parametre değişikliklerinin sistemde meydana getirdiği değişiklikler incelendi ve Galerkin yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırıldı. Yapılan analizlerin yeterince güvenilir olup olmadığını ve yöntemlerin birbirleri arasındaki farkları görebilmek için aynı problem Ansys gibi bir paket program ve merkezi farklar yöntemi kullanıldı. Ansys yapılan hesaplamaların doğruluğu için seçildi. Merkezi farklar ise Newmark-Beta yöntemi ile kıyaslamak için seçildi.

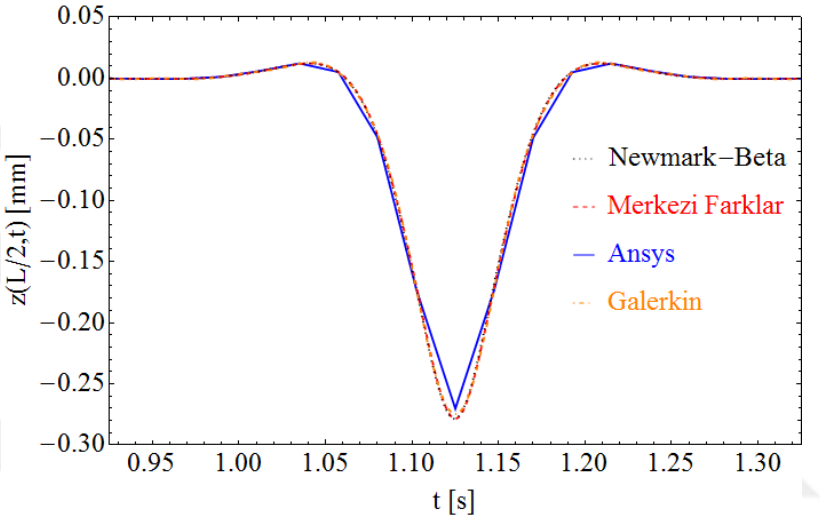
Ansys 16. 1 de ray Beam188 olarak, viskoelastik yatak Combine14 olarak, kuvvet ise dirac delta fonksiyonu olarak modellendi.



Şekil 5. 5 Demiryolu üstyapısının Ansys modelinin kesiti

Merkezi farklar ile problemi çözmek için diğer yöntemdeki gama değeri sıfır alındı ve ilgili terimler yok edildi. Merkezi farklar yönteminin uygulama aşamaları [122] den alınmıştır. Adım sayısı 0,00225 alındı. Bu kadar küçük olmasının sebebi bu yöntemin çok küçük adım sayılarında doğru sonuçlar vermesidir.

Şekil 5.5'de farklı yöntemlerin rayın orta noktasındaki yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması verilmiştir. Çizelge 5.7'de de görüldüğü üzere sonlu elemanlar çözdürülürken kullanılan 2 yöntem neredeyse aynıdır. Ama çözüm zamanı olarak Newmark-Beta daha hızlı sonuç vermiştir. Çünkü merkezi farklar analiz yaparken iki adım önceki yer değiştirmeleri bellekte tutmakta ve daha uzun sürede sonuç vermesini sağlamaktadır. Newmark-Beta ise bütün adım sayılarında kararlıdır. Ansys grafiğinin şeklinin çok pürüzlü olmasının sebebi adım sayısının büyük 0,225 seçilmesidir. Ansys'deki yer değiştirme %3 daha az çıkmıştır. Ansys sonuçları da matematik modellemelerin doğrulunu göstermektedir.



Şekil 5. 6 Farklı yöntemler için rayın orta noktasının zamana bağlı yer değiştirme grafiği

Çizelge 5. 7 Farklı yöntemler içim maksimum yer değiştirmelerin karşılaştırılması

Yöntemler	Maksimum Yer Değiştirmeler (mm)
Ansys	0,270329
Merkezi Farklar	0,278532
Newmark-Beta	0,278527
Galerkin	0,274647

BÖLÜM 6

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Başta dünyada olmak üzere Türkiye' de artan ticaret ve seyahat yükü için demiryolu taşımacılığının önemi kısa sürede ve yüksek güvenlikte olmasından dolayı gün geçtikçe daha fazla hissedilmektedir. Bu ihtiyaçlara cevap verebilmek için devletler kendi içlerinde veya diğer devletlerle ortak demiryolu projeleri hazırlamakta, inşaa edilmekte ve kullanılmaktadır. Hatta bazı özel şirketler demiryolu mühendisliğini çok ileriye taşıyacak adımlar atmaktadır.

Bu tezde öncelikle demiryolu üst yapısı elemaları, üst yapı çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha çok rijit üst yapı tipi örnekleri verilmiştir. Üst yapı çeşitlerinde kullanılan elemanlar tablo şeklinde verilmiş ve bu üst yapıların matematiksel modellerinin hazırlanması için en çok kullanılan modelleme çeşitleri de verilmiştir. Bu tezde incelenen modelin daha önce frekans tepki analizleri yapılmış [1] ve demiryolunun özfrekansı 500 Hz 'in altında olduğu için Çizelge 3.3'de yer alan A1 tek kirişli sürekli mesnetli model kullanılmıştır.

Bu tezin modelleme bölümünde İstanbul'da kullanımda olan bir metro hattının matematiksel modeli oluşturulmuştur. Gerçek yapı ayrık mesnetli olmasına rağmen elastomer mesnetlerin özellikleri iki mesnet arasına dağıtılarak sürekli mesnetli hale getirilmiştir. Matematiksel model önce Galerkin yöntemi ile sonra da SE modeli ile oluşturulmuştur. Bu modellerde ray Euler-Bernoulli kirişi olarak, elastomer mesnetler viskoelastik malzeme olarak ve raylı taşıtın yükü ise hareketli yük olarak modellenmiştir. Senaryolar oluşturulurken gerçek hatta ait parametreler kullanılmıştır ve taşıtın tam

yüklü olma durumu dikkate alınmıştır. SEY çözümlenirken zaman adımı yöntemlerinden olan Newmark-Beta yöntemi kullanılmıştır.

Galerkin yöntemi ve SEY karşılaştırıldığında iki yönteminde iyi bir şekilde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İkisi arasında en büyük fark %2 civarlarında meydana gelmektedir. Son yapılan analizde bu iki yöntemin iyi modellendiği ve doğru çalıştığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca Galerkin yöntemi gerçek hatta uygulanarak bu yöntemin doğru çalıştığı gösterilmiştir.

Rayda meydana gelen yer değiştirmeleri azaltmak için tezde değerlendirilen diğer ray pedlerine karşı 1403N tipi ray pedi kullanılmalıdır. Rayın daha az yer değiştirmesini sağlamak taşıttaki ve zemine iletilen titreşimleri azaltacağından dolayı hem çevre konforunu, hem taşıt konforunu hem de üstyapının daha uzun ömürlü olmasını sağlayacaktır.

Selet aralığı olarak 60 cm ve 75 cm yerine 50 cm kullanmak yine yer değiştirmeleri en aza indirgeyecektir. Ama burada mesnet mesafelerini azaltmak daha fazla selet kullanmak anlamına gelmektedir. Bu da hattın maliyetini arttıracak bir kalem olacaktır.

Taşıt işletme hızları ve taşıtın tasarım hızı arasındaki analizde hızın maksimum yer değiştirmeye gözle görülür bir etkisi bulunmamaktadır. Çünkü bu hızlar üstyapının üzerinde yayılan titreşimlerin dalga hızından çok daha yavaştır. Bu analizi yapılan hızlarda yer değiştirmenin farklı olmamasının bir sebebi ise ray pedlerinin lineer olarak modellenmesidir. Çünkü daha önce yapılan çalışmada [6] non-lineer zemindeki yer değiştirmeler lineer zemindeki yer değiştirmelere göre daha fazla çıkmıştır. Ayrıca gerçek modele uygun olarak bilgisayar ortamında ayrık mesnetli modeller oluşturulursa daha farklı sonuçlar elde edilebilir.

Mevcut hatta kullanılmakta olan S49 tipi ray yerine UIC60 tipi ray modeli kullanmak raydaki yer değiştirmeleri azaltacaktır. Bu iki ray arasında rayların maliyeti, kullanım ömrü, bakım onarım sıklığı gibi etkilerin işletmeci tarafından dikkate alınması gerekmektedir.

Son analizde ise farklı yöntemler ve paket program çıktıları analiz edilmiştir. Paket program oluşturulan matematiksel modellerin doğruluğundan emin olmak için kullanılmıştır. Merkezi farklar yöntemi, Newmark-Beta yöntemine göre çok yavaş

çalışmaktadır. Hatta aynı eleman sayılarına sahip olmasına rağmen daha küçük adım sayısı kullandığından dolayı 20 kat daha yavaş çalıştığı gözlemlenmiştir. Çünkü yöntem iki adım önceki yer değiştirmeleri hafızada tutmakta ve bilgisayarın belleğinde daha fazla alan kaplamasına neden olmaktadır. Ayrıca merkezi farklarda adım sayısını belirlemek çok önemli iken Newmark yöntemi bütün adım sayılarında kararlıdır. Merkezi farklar büyük adım sayılarında yöntem sonuç vermemektedir. Adım sayısı ve analiz hızından dolayı yapılan sonlu eleman analizlerinde Newmark-Beta yöntemi kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Arlı, V. , (2009).Demiryolu Titreşimlerinin Model Hat Üzerinde Çok Yönlü Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] Yılmaz, V. , (2004). Demiryolu Üstyapısının Dinamik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[3] Yalçın, S. , (2006). Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] Özalp, O. , (2004). Kent içi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] Michas, G. , (2012). Slab Track Systems for High-Speed Railways, MSc Thesis, Royal Institute of Technology Department of Transport Science Division of Highway and Railway Engineering, Stockholm.

[6] Senalp, A. D., Arikoglu, A., Ozkol, I. ve Dogan, V., (2010). "Dynamic response of a finite length Euler-Bernoulli beam on linear and nonlinear viscoelastic foundations to a concentrated moving force", Journal of Mechanical Science and Technology, 24:1957-1961.

[7] Esen, İ. , (2009).Hareketli Yükler Altındaki Köprülü Kren Kirişlerinin Dinamik (Mukavemet) Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] Turan, M. , (2012).Elastik Zemine Oturan Sonsuz Uzun Elastik Kirişin Hareketli Yük Altında Dinamik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[9] Reis, M. , (2009).Hareketli Yüklere Maruz Mesnetli Eğrisel Kirişlerin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[10] Hügül, S. , (2005).Vibration Analysis Of Systems Subjected To Moving Loads By Using The Finite Element Method, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[11] Uzzal, R. , (2012).Analysis of A Three-Dimensional Railway Vehicle - Track System and Development of A Smart Wheelset, PhD Thesis, Concordia University Department of Mechanical and Industrial Engineering, Quebec.

[12] Sevim, R. , (2007). İstanbul'da Kent İçi Raylı Sistemler Ve Üstyapı Hesapları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[13] Fryba, L. , (1999). Vibration of solids and structures under moving loads, Third Edition, Thomas Telford Ltd, Prague, Czech Republic.

[14] Esveld, C., (1989). Modern Railway Track, First Edition, MRT-Productions, Germany.

[15] Knothe, K., ve Grassie, S.L., (1993). Modeling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies, Vehicle System Dynamics, 22, 209-262.

[16] Dong, R., (1994).Vertical Dynamics of Railway Vehicle-Track System, PhD Thesis, Concordia University Department of Mechanical Engineering, Quebec.

[17] De Man, (2002).DynaTrack A Survey of dynamic railway track properties and their quality, Delft Technology University, Holland.

[18] Dahlberg, T., (1995). "Vertical dynamic train-track interaction - verifying a theoretical
model by full-scale experiments", Vehicle System Dynamics, 24(Supplement): 45-57.

[19] Zhai, W. ve Cai, Z., (1997). "Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track", Computers and Structures, 63(5): 987-997.

[20] Lee, H. P., (1998)."Dynamic Response of a Timoshenko Beam on a Winkler Foundation Subjected to Moving Mass", 55(3): 203-215.

[21] Kargarnovin, M. H. ve Younesian, D., (2004)."Dynamics of Timoshenko beams on Pasternak foundation under moving load", 31:713-723.

[22] Erkul, C., (2002). Demiryolunun Tarihsel Gelişimi ve Demiryolu Üstyapısı, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi, İstanbul.

[23] Erel, A. , (2005). Demiryolu Üstyapısı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders Notu, İstanbul

[24] Nielsen, J.C.O, ve Johansson, A., (2000). "Out of round railway wheels a literature survey" Journal of Rail and Rapid Transit, 214:79-91

[25] Sun, L., (2001). "Dynamic displacement response of beam-type structures to moving line loads", International Journal of Solids and Structures, 38:8869-8878.

[26] Patil, S., (1998). "Response of infinite railroad track to vibrating mass", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 114(4):688-703

[27] Clastornik, J., Eisenberger, M., Yankelevsky, D. Z., ve Adin, M. A., (1986). "Beams on variable Winkler elastic foundation." Journal of Applied Mechanics, ASME, 53(4):925928.

[28] Sun, L., Deng, X., (1986), “Dynamic analysis to infinite beam under a moving line load with uniform velocity” Applied Mathematics and Mechanics, 19(4):367-373.

[29] Eisenberger, M., ve Clastornik, J., (1987). “Beams on variable two parameter elastic foundation”, Journal of Engineering Mechanics, 113(10):1454-1466.

[30] Mackertich, S., (1992). “Response of a beam to a moving mass”, Journal of Acoustical Society of America, 92(3):1766-1769.

[31] Esmailzadeh, E., ve Ghorashi, M., (1997). “Vibration analysis of a Timoshenko beam subjected to a travelling mass”, Journal of Sound and Vibration, 199(4):615-628.

[32] Michaltsos, G., Sophianopoulos, D., ve Kounadis, A. N., (1996). “The effect of a moving mass and other parameters on the dynamic response of a simply supported beam” Journal of Sound and Vibration 191(3):357-362.

[33] Lee, H. P., (1996). “Dynamic response of a beam with a moving mass”, Journal of Sound and Vibration, 191(2):289-294.

[34] Lee, H. P., (1995). “On the dynamic behavior of a beam with an accelerating mass”, Archive of Applied Mechanics, 65:564-571.

[35] Dehestani, M., Mofid, M., ve Vafai, A., (2009). “Investigation of critical influential speed for moving mass problems on beams”, Applied Mathematical Modeling, 33:3885-3895.

[36] Ting, E. C., Genin, J., ve Ginsberg, J. H., (1974). “A general algorithm for moving mass problems”, Journal of Sound and Vibration, 33(1): 49-58.

[37] Foda, M. A., ve Abduljabbar, Z., (1998). “A dynamic green function formulation for the response of a beam structure to a moving mass”, Journal of Sound and Vibration, 210(3):295-306.

[38] Wang, Y. M., (1998). “The dynamical analysis of a finite inextensible beam with an attached accelerating mass”, International Journal of Solids and Structures, 35(9):831-854.

[39] Sadiku, S., ve Leipholz, H. H. E., (1987). “On the dynamics of elastic systems with moving concentrated masses” Ingenieur-Arehive, 57:223-242.

[40] Murphy, D. P., (1984). The dynamic response of engineering structures subject to excitation by moving mass systems, Ph.D thesis, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, USA.

[41] Akin, J. E., ve Mofid, M., (1989). “Numerical solution for response of beams with moving mass” Journal of Structural Engineering, 115 (1): 120-131.

[42] Bowe, C.J., ve Mullarkey, T.P., (2008). “Unsprung wheel-beam interactions using modal and finite element models” Advances in Engineering Software, 39:911-922.

[43] Ichikawa, M., Miyakawa, Y., ve Matsuda, A., (2000). “Vibration analysis of the continuous beam subjected to a moving mass” Journal of Sound and Vibration, 230(3):493-506.

[44] Banerjee, B.B., Das, R.N., ve Sahoodynamic, M.C., (1975).“Response of a multi-span beam to transverse impact”, Nuclear Engineering and Design, 34:335-348.

[45] Duffy, D. G., (1990). “The Response of an Infinite Railroad Track to a Moving, Vibrating Mass”, Journal of Applied Mechanics, 57:66-73.

[46] Stanisic, M. M., ve Lafayette, W., (1985). “On a new theory of the dynamic behavior of the structures carrying moving masses”, Ingenieur-Archiv, 55: 176-185.

[47] Lee, H. P., (1998). “Dynamic response of a Timoshenko beam on a Winkler foundation subjected to a moving mass”, Applied Acoustics, 55(3):203-215.

[48] Avramidis, I. E. ve Morfidis, K., (2006). “Bending of beams on three-parameter elastic foundation” International Journal of Solids and Structures, 43:357-375.

[49] Kerr, A. D., (1964). “Elastic and viscoelastic foundation Models”, Journal of Applied Mechanics, 31(3): 491-498.

[50] Zhaohua, F., ve Cook, R. D., (1983)."Beam element on two-parameter elastic foundations", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 109(6):1390-1402.

[51] Mallik, A. K., Chandra, S., ve Singh, A. B., (2006). “Steady-state response of an elastically supported infinite beam to a moving load” Journal of Sound and Vibration, 291:1148-1169.

[52] Kerr, A. D., (1965). “A study of a new foundation model”, Acta Mechanica, 1(2):135-147.

[53] Reissner, E., (1967). “Note on the formulation of the problem of the plate on an elastic foundation”, Acta Mechanica, 4:88-91.

[54] Horvath, J. S., (1983). “New subgrade model applied to Mat foundations”. Journal of Geotechnical Engineering, 109 (12):1567-1587.

[55] Hetenyi, M., (1950). “A general solution for the bending of beams on an elastic foundation of arbitrary continuity”, Journal of Applied Physics, 21:55-58.

[56] Criner, H. E., ve McCann, G. D., (1953). “Rails on elastic foundation under the influence of high-speed travelling loads”, Journal of Applied Mechanics, ASME, 75:13-22.

[57] Chen, Y. H., ve Huang, Y. H., (2000). “Dynamic stiffness of infinite Timoshenko beam on viscoelastic foundation in moving co-ordinate” International Journal of Numerical Method and Engineering, 48:1-18.

[58] Achenbach, J. D., ve Sun, C. T., (1965). “Moving load on a flexible supported Timoshenko beam”, International Journal of Solids and Structures, 1:353-370.

[59] De Rosa, M. A., (1995). “Free vibrations of Timoshenko beams on Two-parameter elastic foundation”, Computer and Structure, 57(1):151-156.

[60] Lou, P., Dai, G. L., ve Zeng, Q.Y., (2006). “Finite-element analysis for a Timoshenko beam subjected to a moving mass”, Journal of Mechanical Engineering Science, 220:669-678.

[61] Yavari, A., Nouri, M., ve Mofid, M., (2002). “Discrete element analysis of dynamic response of Timoshenko beams under moving mass”, Advances in Engineering Software, 33:143-153.

[62] Vu-Quoc, L., ve Olsson, M., (1989). “A computational procedure for interaction of high-speed vehicles on flexible structures without assuming known vehicle nominal motion”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 76:207-244.

[63] Bajer, C. I., ve Dyniewicz, B., (2009). “Numerical modeling of structure vibrations under inertial moving loads”, Archive of Applied Mechanics, 79:499-508.

[64] Cifuentes, A. O., (1989). “Dynamic response of a beam excited by a moving mass”, Finite Elements in Analysis and Design, 5:237-246.

[65] Yong, C. C., ve Yang, Z., (2008). “Dynamic responses of a beam on a Pasternak foundation and under a moving load” Journal of Chongqing University, 7(4):311-316.

[66] Newton, S.G., ve Clark, R.A., (1979). “An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles” Journal of Mechanical Engineering Science, 21(4):287-297

[67] Zehsaz, M., Sadeghi, M. H., ve Asl, A. Z., (2009). “Dynamic response of Railway under a moving Load”, Journal of Applied sciences, 9(8):1474-1481.

[68] Hardy, M. S. A., ve Cebon, D., (1994). “Importance of speed and frequency in flexible pavement response”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 120(3):463¬482.

[69] Jin, B., (2004). “Dynamic displacements of an infinite beam on a poroelastic half space due to a moving oscillating load”, Archive of Applied Mechanics, 74:277-287.

[70] Xu, B., Lu, J. F., ve Wang, J. H., (2007). “Dynamic response of an infinite beam overlying a layered poroelastic half-space to moving loads” Journal of Sound and Vibration, 306:91-110.

[71] Cao, Z. G., Cai, Y. Q., Sun, H. L., ve Xu, C. J., (2011).“Dynamic responses of a poroelastic half-space from moving trains caused by vertical track irregularities” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35:761-786.

[72] Kononov, A. V., ve Wolfert, R. A. M., (2000). “Load motion along a beam on a viscoelastic half-space” European Journal of Mechanics - A/Solids, 19:361-371.

[73] Barros, F.C.P., ve Luco, J.E., (1994). “Response of a layered viscoelastic half-space to a moving point load” Wave Motion, 19:189-210.

[74] Yunmin, C., ve Changjing, W., (2006). “Steady-state response of a Timoshenko beam on an elastic half-space under a moving load” Acta Mechanica Solida Sinica, 19(1):26-39.

[75] Steenbergen, M. J.M.M., ve Metrikine, A. V., (2007). “The effect of the interface conditions on the dynamic response of a beam on a half-space to a moving load” European Journal of Mechanics A/Solids, 26:33-54.

[76] Sun, H., Cai , Y., ve Xu, C., (2010). “Three-dimensional simulation of track on poroelastic half- space vibrations due to a moving point load” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(10):958-967.

[77] Nielsen, J.C.O., ve Igeland, A., (1995). “Vertical dynamic interaction between train and track- influence of wheel and track imperfections” Journal of Sound and Vibration, 187(5):825-839.

[78] Zhu, J.J., Ahmed, W., Rakheja, S., ve Hu, Y.S., (2009). “Impact load due to railway wheels with multiple flats predicted using an adaptive contact model Proceedings of the IMechE, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, 223 (4):391-403.

[79] Jin, X., Xiao, X., Wen, Z., Guo, J., ve Zhu, M., (2009). “An investigation into the effect of train curving on wear and contact stresses of wheel and rail” Tribology International, 42:475-490.

[80] Zhai, W., Wang, K., ve Cai, C., (2009). “Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics” Vehicle System Dynamics, 47(11):1349-1376.

[81] Morys, B., (1999). “Enlargement of out-of-round wheel Profiles on high speed trains” Journal of Sound and Vibration, , 227(5):965-978.

[82] Chen, Y-H., ve Huang, Y-H., (2003). “Dynamic characteristics of infinite and finite railways to moving loads” Journal of Engineering Mechanics, 129 (9):987-995.

[83] Bitzenbauer, J., ve Dinkel, J., (2002). “Dynamic interaction between a moving vehicle and an infinite structure excited by irregularities - Fourier transforms solution” Archive of Applied Mechanics, 72:199-211.

[84] Tassilly, E., ve Vincent, N., (1991). “A linear model for the corrugation of rail”, Journal of Sound and Vibration, 150:25-45.

[85] Thompson, D., (1991). “Theoretical modeling of wheel rail noise generation” Journal of Rail and Rapid Transit, 205:137-149.

[86] Wu, T.X., ve Thompson, D.J., (2002). “Behavior of the normal contact force under multiple Wheel/Rail interaction.” Vehicle System Dynamics, 37 (3):157-174.

[87] Thompson, D., ve Wu, T.X., (2003). “The effect of non-linearity on wheel/rail impact” Journal of Rail and Rapid transit, 218:1-15.

[88] Dahlberg, T., (2001). “Some railroad settlement models—a critical review” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, 215 (4):289-300.

[89] Oscarsson, J., (2002). “Simulation of Train-Track Interaction with Stochastic Track Properties” Vehicle System Dynamics, 37(6):449-469.

[90] Zhai, W. M., Cai, C. B., Wang, Q. C., Lu, Z.W., ve Wu., X. S., (2001). “Dynamic effects of Vehicles on Tracks in the case of raising train speed” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, 215:125-135.

[91] Zhai, W., ve Cai, Z., (1997). “Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track” Computers and Structures, 63(5):987-997.

[92] Michal, M., ve Michael, H., (2008). “Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles” Computers and Structures, 86:556-572.

[93] Lei, X., (2001). “Dynamic analysis of the track structure of a high speed railway using finite elements” Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part F, 215:301-309.

[94] Nielsen, J.C.O., ve Oscarsson, J., (2004). “Simulation of dynamic train-track interaction with state-dependent track properties” Journal of Sound and Vibration, 275:515-532.

[95] Mazilu, T., (2007). “Green’s functions for analysis of dynamic response of wheel/rail to vertical excitation” Journal of Sound and Vibration, 306:31-58.

[96] Zakeri, J.A., Xia, H., ve Fan, J.J., (2009). “Dynamic responses of train-track system to single rail irregularity” Latin American Journal of Solids and Structures, 6:89-104.

[97] Arnold, D. K., ve Joel, E.C., (1999). “Analysis and tests of bonded insulated rail joints subjected to vertical wheel loads” International Journal of Mechanical Sciences, 41:1253 - 1272.

[98] Dahlberg, T., (2002). “Dynamic interaction between train and non-linear railway track model” International conference (EURODYN), 2-5 September, Munich, Germany.

[99] Chen, Y. H., ve Huang, Y.H., (2000). “Dynamic stiffness of infinite Timoshenko beam on viscoelastic foundation in moving co-ordinate” International Journal of Numerical Method and Engineering, 48:1-18.

[100] Ishida, M., ve Ban, T., (2001). “Modelling of the wheel flats for track dynamics” 30th Convegno Nazionale AIAS, 12-15 September, Cagliari, Italy.

[101] Jin, X., Wang, K., Wen, Z., ve Zhang, W., (2005). “Effect of rail corrugation on vertical dynamics of railway vehicle coupled with a track” Acta Mech Sinica, 21:95¬-102.

[102] Zhai, W. M., Cai, C. B., Wang, Q. C., Lu, Z.W., ve Wu., X. S., (2001). “Dynamic effectsof Vehicles on Tracks in the case of raising train speed” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, 215:125-135.

[103] Jin, X., Wen, Z., Wang, K., ve Xiao, X., (2006). “Effect of passenger car curving on rail corrugation at a curved track” Wear, 260:619-633.

[104] Zhai, W., ve Cai, Z., (1997). “Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and a discretely supported continuous rail track”, Computers and Structures, 63(5):987-997.

[105] Johansson, A., ve Nielsen, J. C. O., (1995). “Out of round railway wheels, wheel rail contact forces and track response derived from the field tests and numerical simulation” Journal of Rail and Rapid Transit, 217:135-146.

[106] Wen, Z., Xiao, G., Xiao, X., Jin, X., ve Zhu, M., [2009]. “Dynamic vehicle-track interaction and plastic deformation of rail at rail welds” Engineering Failure Analysis, 16: 1221-1237.

[107] Jin, X.S., Wen, Z.F., Wang, K.Y., Zhou, Z.R., Liu, Q.Y., ve Li, C.H., (2006). “Three-dimensional train-track model for study of rail corrugation”, Journal of Sound and Vibration, 293: 830-855.

[108] Wu, T.X., ve D.J. Thompson, (2003). “On the impact noise generation due to a wheel passing over rail joints” Journal of Sound and Vibration, 267: 485-496.

[109] Thompson, D., (1991). “Theoretical modeling of wheel rail noise generation” Journal of Rail and Rapid Transit, 205:137-149.

[110] Wen, Z., Xiao, G., Xiao, X., Jin, X., ve Zhu, M., (2009). “Dynamic vehicle-track interaction and plastic deformation of rail at rail welds” Engineering Failure Analysis, 16:1221-1237.

[111] Sun, Y.Q., ve Cole, C., (2007). “Comprehensive wagon-track modelling for simulation of three- piece bogie suspension dynamics” Journal of Rail and Rapid transit, part F, 221:905-917.

[112] Andersson, C., ve Oscarsson, J., (1999). “Dynamic train/track interaction including state- dependent track properties and flexible vehicle components”, Vehicle System Dynamics Supplement, 33:47-58.

[113] Newton, S.G., ve Clark, R.A., (1979). “An investigation into the dynamic effects on the track of wheel flats on railway vehicles” Journal of Mechanical Engineering Science, 21(4):287-297.

[114] Thompson, D., (1991). “Theoretical modeling of wheel rail noise generation” Journal of Rail and Rapid Transit, 205:137-149.

[115] Cai, Z., (1992). Modeling of Rail track dynamics and wheel rail interaction, Ph D thesis, Dept. of Civil Engineering, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada.

[116] Hou, K., Kalousek, J., Dong, R., (2003). “A dynamic model for an asymmetrical vehicle/track system” Journal of Sound and Vibration, 267: 591-604.

[117] Fermer, M., ve Neilson, J. C. O., (1995). “Vertical interaction between train and track with soft and stiff rail pads” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 209:39-47.

[118] Reilly, K., (2003). “Railway Wheelsets”, Rail Safety and Standards Board, London, UK.

[119] Gullers, P., Andersson, L., ve Lunden, R., (2008). “High-frequency vertical wheel-rail contact forces-field measurements and influence of track irregularities” Wear, 265:1472-1478.

[120] Nordborg, A., (1998). “Vertical Rail Vibrations: Parametric Excitation” Acta Acustica, 4:289-300.

[121] Mead, D. J. ve Mallik, A.K., (1976). “An approximate method of predicting the response of periodically supported beams subjected to random convected loading” Journal of Sound and Vibration, 47 (4):457-471.

[122] Chopra, A., K., (2002). Dynamics of Structures – Theory and applications to earthquake engineering, Fourth Edition, Prentice Hall.

[123] Metin M., Ulu A., Demir O., Arikoglu A., (2016). “Dynamic Response of an Euler-Bernoulli Beam under A Concentrated Moving Load on Linear Viscoelastic Foundation”, DAKAM (Eastern Mediterranean Academic Research Center), Mechatech’16 International Mechanical Engineering and Technologies Conference, 164 (CD), 17-18 May 2016, Istanbul, Turkey.

[124] Metin M., Ulu A., Demir O., Peker R. C., Arikoglu A., (2016). “Comparing Dynamic Response of an Euler-Bernoulli Beam under a Concentrated Moving Load on Linear Viscoelastic Foundation between FEM and Galerkin Method”, ICENS 2016 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences, 24-28 May 2016, Sarajevo,Bosnian and Herzegovinian.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Arif ULU

Doğum Tarihi ve Yeri : 1989 - İskenderun

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : uluarif1@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Yüksek Lisans	Makine Teo. Ve Kont.	YTU	2016
Lisans	Makine Mühendisliği	YTU	2011
Lise	Sayısal	Karabük Anadolu Öğr. Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013	Aktes Müh. San. Tic. AŞ.	Teklif Mühendisi
2015	ERME-İMC Adi Ortaklığı	Saha Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Metin M., **Ulu A.**, Demir O., Arikoglu A., (2016). “Dynamic Response of an Euler-Bernoulli Beam under A Concentrated Moving Load on Linear Viscoelastic Foundation”, DAKAM (Eastern Mediterranean Academic Research Center), Mechatech’16 International Mechanical Engineering and Technologies Conference, 164 (CD), 17-18 May 2016, Istanbul, Turkey.

2. Metin M., **Ulu A.**, Demir O., Peker R. C., Arikoglu A., (2016). “Comparing Dynamic Response of an Euler-Bernoulli Beam under a Concentrated Moving Load on Linear Viscoelastic Foundation between FEM and Galerkin Method”, ICENS 2016 2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences, 24-28 May 2016, Sarajevo,Bosnian and Herzegovinian.