

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK ANALİZİ

İnş. Müh. N. Sevgi Yalçın

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın EREL

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DEMİRYOLU YAPISI VE ZORLANMASI	3
2.1 Balastlı Üstyapı	5
2.2 Rijit Üstyapı	5
2.3 Yol Yapısına Gelen Etkiler	13
2.4 Demiryolu Yapısının Zorlanmasına Yönelik Çalışmalar	15
3. TİTREŞİM ANALİZİ	24
3.1 Serbest, Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler	24
3.2 Sönümlü Zorlanmış Titreşimler	29
3.2.1 Sabit Genlikli Harmonik Kuvvetle Zorlanmış Sistem	29
3.2.2 Mesnetin Hareketi İle Zorlanmış Sistem	31
4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK ANALİZİ	34
4.1 Taşıt ve Yol Bileşenlerine İlişkin Dinamik Özellikler	34
4.2 Taşıt - Yol Sisteminde Oluşabilecek Dinamik Problemler	37
4.3 Taşıt için Dinamik Modeller	43
4.4 Yol Bileşenleri için Dinamik Modeller	45
4.4.1 Ray Modelleri	45
4.4.2 Ray Bağlantı Sistemi Modelleri	46
4.4.3 Travers Modelleri	47
4.4.4 Balast ve Zemin Modelleri	48
4.5 Yol için Dinamik Modeller	48
4.5.1 Sürekli Mesnetli Yol Modelleri	49
4.5.2 Ayrık Mesnetli Yol Modelleri	50
4.5.3 Yarımekan Üzerindeki Yol Modelleri	51
4.6 Taşıt - Yol Etkileşimi için Dinamik Modeller	52
4.7 Yol Dinamiği için Kullanılabilecek Çözüm Teknikleri	53
4.7.1 Frekans Tanım Alanlı Çözüm Teknikleri	54
4.7.1.1 Hareketsiz Noktasal Yükler için Frekans Tanım Alanlı Çözüm Tekniği	54
4.7.1.2 Hareketli Noktasal Yükler için Frekans Tanım Alanlı Çözüm Tekniği	55
4.7.2 Zaman Tanım Alanlı Çözüm Teknikleri ve Sonlu Elemanlar Metodu	56
4.8 Seçilen Standart Yol Modeli için Dinamik Analiz ve Uygulamaları	57
4.8.1 Seçilen Standart Yol Modelinin Frekans Tanım Alanlı Çözüm Metodu ile Analizi	

.....	57
4.9 Seçilen Yol Modeli için Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	68
EKLER	69
Ek 1 Seçilen standart yol modeli (CII) için elde edilen grafikler ve çözümlemelerde kullanılan parametrelere ilişkin çizelgeler.....	70
Ek 2 Demiryolu üstyapısının basit giriş modeli ile SAP 2000 programında çözümü ve Winkler Hipotezi ile karşılaştırılması.....	77
Ek 3 Tez hazırlanırken karşılaşılan yabancı kelimelerin kullanılan Türkçe karşılıkları (Sözlük).	82
ÖZGEÇMİŞ.....	84

SİMGE LİSTESİ

A	Travers (mesnet) aralığı.
B	Sanal (Hayali) giriş genişliği.
b_t	Travers taban genişliği.
c	Yay sönümleme katsayısı.
c_b	Balast tabakası ve zeminin sönümleme katsayısı.
c_b^1	Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki sönümleme katsayısı.
c_{rp}	Ray elastomer mesneti (ara mesnet) sönümleme katsayısı.
c_{rp}^1	Birim uzunluktaki ara mesnet sönümleme katsayısı.
c_{sp}	Travers taban mesnetinin sönümleme katsayısı.
C	Elastik tabanın yatak katsayısı.
$C1$	Birincil (Primer) süspansiyon sönümleme katsayısı.
$C2$	İkincil (Sekonder) süspansiyon sönümleme katsayısı.
c_{kr}	Kritik sönüm katsayısı.
E	Elastisite modülü.
EI	Rayın eğilme rijitliği.
f	Frekans.
F_t	Traversin balasta yük ileten taban alanı.
H_r	Dinamik tepki (Birim yük etkisi altındaki dinamik çökme).
I	Atalet momenti.
I_x	x yatay eksenine göre atalet momenti.
k	Yay katsayısı.
k^1	Birim uzunluktaki yay katsayısı.
k_b	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı.
k_b^1	Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki rijitlik (esneklik) katsayısı.
k_{rp}	Ray elastomer mesneti (ara mesnet) rijitlik (esneklik) katsayısı.
k_{rp}^1	Birim uzunluktaki ara mesnet rijitlik (esneklik) katsayısı.
k_{sp}	Travers taban mesnetinin rijitlik (esneklik) katsayısı.
K	Elastik tabanın yay katsayısı.
$K1$	Birincil (Primer) süspansiyon rijitlik katsayısı.
$K2$	İkincil (Sekonder) süspansiyon rijitlik katsayısı.
K_H	Hertz yay rijitliği.
K_θ	Taşıt gövdesi ve boji arasındaki dönme rijitliği.

L	Elastik (Karakteristik) uzunluk.
l_d	Bojideki dingil aralığı.
l_o	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu.
l_t	Travers taban uzunluğu.
m	Kütle.
m_r	Birim uzunluktaki ray kütlesi.
m_t	Travers kütlesi.
m_t^1	Birim uzunluktaki travers kütlesi.
$M(x)$	Kirişin eğilme momenti.
M_{din}	Dinamik eğilme momenti.
m_b	Bojinin kütlesi.
m_c	Taşıt gövdesinin kütlesi.
m_w	Tekerlek kütlesi.
m_{w1}	Kılavuz tekerlek kütlesi.
m_{w2}	Taşıyıcı tekerlek kütlesi.
$\Delta \hat{p}$	Çizgisel yük şiddeti.
P	Sistemi zorlayan kuvvet.
P_{din}	Kiriş tabanının elastik tabana ilettiği dinamik düşey basınç gerilmesi.
P_t	Tekerlek/Ray temas kuvveti.
$(P_t)_K$	Kılavuz tekerlek için tekerlek/ray temas kuvveti.
$(P_t)_T$	Taşıyıcı tekerlek için tekerlek/ray temas kuvveti.
$P(x)$	Kiriş tabanının elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi.
Q	Statik tekerlek yükü.
Q_{din}	Dinamik tekerlek yükü.
R	Genlikler oranı (Büyütme katsayısı).
R_{max}	Maksimum genlikler oranı.
$R_{tekerlek}$	Tekerlek yarıçapı.
R_{mantar}	Ray mantarının yarıçapı.
σ_a	Rayın akma dayanımı.
$\Delta \hat{R}$	Ray ara mesnetine etkileyen dinamik kuvvetin genliği.
$\bar{s}$	Değişim katsayısı.
$\Delta \hat{S}$	Balast tabakasına etkileyen dinamik kuvvetin genliği.
T	Periyot.

t	Süre.
t_g	Güvenlik katsayısı.
V	Hız.
ω	Dairesel (Açısal) frekans
ω_n	Doğal dairese (aşısal) frekans.
ω_s	Sönümlü serbest titreşimlerin doğa dairese (aşısal) frekansı.
x	Titreşimin genliğı.
x_m	Mesnetin genliğı.
$y(x)$	Kirişin düşey doğrultudaki elastik çökmesi.
y_{din}	Kirişin düşey doğrultudaki dinamik çökmesi.
$\hat{y}_r$	Harmonik değışen yük etkisi altında raydaki dinamik çökmenin genliğı.
$\hat{y}_t$	Harmonik değışen yük etkisi altında traversteki dinamik çökmenin genliğı.
ζ	Sönüm faktörü.
β_{dyn}	Dinamik yatak katsayısı.
η_ω	Frekanslar oranı.
η	Çökme etki katsayısı.
μ	Moment etki katsayısı.
ρ	Dinamik etki katsayısı.
ρ_r	Rayın birim hacim ağırlığı.
ν	Poisson oranı.
φ	Hız katsayısı.
θ_b	Bojinin dönme açısı.
$2u$	Traversin yük ileten kesimlerinin uzunluğu.

KISALTMA LİSTESİ

ATD	Asfalt taşıma tabakası üzerine direkt döşeme.
ATD-G	ATD sistemin kentsel ulaşım için geliştirilmiş şekli.
BMLF	Beams on Multi-Layer continuous Foundation : Çok tabakalı sürekli temele oturan kirişler.
BR	British Railways : İngiltere Demiryolları.
BTD	Beton Taşıma tabakası içine Direkt döşeme.
BTT	Beton Taşıma Tabakası.
DB	Deutsche Bahn : Alman Demiryolları.
DOF	Degree Of Freedom : Serbestlik derecesi.
EBEF	Euler Beam on Elastic Foundation : Elastik zemine oturan Euler kirişi.
ERC	Embedded Rail Construction : Gömülü raylı yol yapısı.
FE	Finite Elements : Sonlu elemanlar.
FEM	Finite Elements Method : Sonlu elemanlar metodu.
FGP	Fertigteil-Gleistragplatte : Prefabrik yol taşıma plağı.
GETRAC	German Track Corporation.
ICE	Intercity Express : Alman yolcu vagonu.
KR	Kritik Sönüm.
KR-ALTI	Kritik Altı Sönüm.
KR-ÜSTÜ	Kritik Üstü Sönüm.
LRT	Light Rail Transit : Hafif raylı toplu taşıma sistemi.
LVT	Low Vibration Track : Düşük vibrasyonlu yol.
SFF	Schwingungsgedaempfte Feste Fahrbahn : Titreşim sönümleyici rijit üstyapı.
TBEF	Timoshenko Beam on Elastic Foundation : Elastik zemine oturan Timoshenko kirişi.
TT	Taşıma Tabakası.
UIC	Union Internationale des Chemins de fer : Uluslararası Demiryolları Birliği.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	19 yy. başlarında kullanılan üstyapı tipi (Erkul, 2002).....	3
Şekil 2.2	Balastlı üstyapı.....	5
Şekil 2.3	Rheda 2000 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Esveld, 2003).....	8
Şekil 2.4	PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).....	8
Şekil 2.5	LVT TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	8
Şekil 2.6	ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	9
Şekil 2.7	GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul,2002)	9
Şekil 2.8	Rasengleis monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	9
Şekil 2.9	Shinkansen prefabrik üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	9
Şekil 2.10	Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı (tek ray) kesiti (Erel, 2002).	10
Şekil 2.11	Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).....	11
Şekil 2.12	Gömülü ray yapısı (Erel,2002).	12
Şekil 2.13	'Edilon Corkelast' gömülü raylı yol sistemi (Erel, 2002).....	12
Şekil 2.14	Yol yapısına etki eden kuvvetler (Erel, 1981).	14
Şekil 2.15	Demiryolu Taşıyıcı Sistemi (Erel, 1989).....	19
Şekil 2.16	Elastik temele oturan Winkler kirişi ve sabit Q tekerlek yükü etkisi altındaki Winkler kirişi için moment deformasyon grafiği (Esveld, 1997).	20
Şekil 3.1	Çok genel bir bakışla titreşim sistemi (Erel, 2003).....	25
Şekil 3.2	Serbest titreşim (Erel, 2003).	25
Şekil 3.3	Sönümlü serbest titreşim (Erel, 2003).	26
Şekil 3.4	Sönümlü titreşim türleri (zayıf, kritik ve aşırı sönümlü titreşimler) (Erel, 2003).....	28
Şekil 3.5	Sönümlü zorlanmış titreşim (Erel, 2003).....	29
Şekil 3.6	Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi (Erel, 2003).....	30
Şekil 3.7	Mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim (Erel, 2003).....	31
Şekil 3.8	Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi (Erel, 2003).....	32
Şekil 3.9	Sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi (Erel, 2003).....	33
Şekil 4.1	Yol ve yol bileşenleri için rezonans frekanslarına ilişkin düşey titreşim modları (De Man, 2002).	36
Şekil 4.2	Demiryolu taşıt modeli ve demiryolu taşıtlarının parazit hareketleri (Kumaran, Menon, Nair, 2002).....	37
Şekil 4.3	Taşıt-Yol Bileşenleri ve İlgilenilen Frekans Aralıkları.	41
Şekil 4.4	Taşıt-Yol Etkileşimi sonucu gürültü ve titreşim oluşumu.	42
Şekil 4.5	Demiryollarında seyir hızı (m/s), frekans (Hz) ve dalga boyu (m) arasındaki ilişki (Knothe, 2001).....	43
Şekil 4.6	Taşıt Modelleri (Dong, 1994).	44
Şekil 4.7	(a) Levha elemanı ile ve (b) kiriş elemanı ile rayın modellenmesi (Knothe ve Grassie, 1993).	45
Şekil 4.8	Ray Bağlantı Sistemi : (a) Yay-sönümleyici-modeli, (b) Temel modeli, (c) 2 parametrelili ve 3 parametrelili modeller (Knothe ve Grassie, 1993).	46
Şekil 4.9	Viskoz Sönümlemeli Yol Modeli (Broeck, 2001).	48
Şekil 4.10	Yol Modellerinin Hiyerarşisi (Knothe, 2001).....	49
Şekil 4.11	Tekerlek-Ray temas modeli (Esveld, 2003).....	52
Şekil 4.12	Sonlu eleman üstyapı sistem modeli (Dong, 1994).	56
Şekil 4.13	Sonlu uzunluktaki yolun sonsuz uzunluğa dönüştürülmesi; kesme-birleştirme	

	metodu (Dong, 1994).....	56
Şekil 4.14	Ayrık mesnetli yol modelinin sürekli mesnetli modele dönüştürülmesi a) Ayrık mesnetli yol modeli, b) Sürekli mesnetli yol modeli (Knothe, 2001).....	58
Şekil 4.15	İki tabakalı üstyapı modeli (Knothe, 2001).	59
Şekil 4.16	Ray ara mesnetine ve balast tabakasına etki eden kuvvetler (Knothe, 2001)...	61
Şekil 4.17	Sürekli mesnetli yol için Dinamik Tepki - Frekans grafiği	62
Şekil E1.1	Farklı travers aralıklarına sahip yollara ilişkin Dinamik Tepki - Frekans grafiği.....	70
Şekil E1.2	Farklı ray tiplerine sahip yollara ilişkin Dinamik Tepki - Frekans grafiği.	71
Şekil E1.3	Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Tepki - Frekans grafiği.....	73
Şekil E1.4	Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Yatak Katsayısı - Frekans grafiği.....	73
Şekil E1.5	Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Tepki- Frekans grafiği.....	75
Şekil E1.6	Farklı yatak malzemesi (balast-zemin) için Dinamik Tepki- Frekans grafiği ..	75
Şekil E1.7	Travers ve ray için Dinamik Tepki-Frekans grafiği	76
Şekil E2.1	Demiryolu üstyapısı için basit kiriş modeli	78
Şekil E2.2	Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin deformasyon grafiği	80
Şekil E2.3	Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin eğilme momenti grafiği.....	81

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Yol tipleri ve bileşenlerine genel bir bakış (De Man, 2002).....	4
Çizelge 2.2	Yapı tipi ve döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002).....	7
Çizelge 4.1	Üstyapı tipleri için ilgili rezonans frekansları (De Man, 2002).....	35
Çizelge 4.2	Orta ve Yüksek Frekanslarda Taşıt-Yol Etkileşimi Problemleri (Knothe, 2001).....	39
Çizelge 4.3	B58 traversinin ölçülmüş ve hesaplanmış doğal frekansları (Alman Demiryolları) Knothe ve Grassie, 1993).....	47
Çizelge E1.1	Şekil E1.1 için kullanılan parametreler.....	70
Çizelge E1.2	Şekil E1.2 için kullanılan parametreler.....	71
Çizelge E1.3	Şekil E1.2 için hesaplamalarda kullanılan rayların teknik özellikleri (Esvel, 2001).....	72
Çizelge E1.4	Şekil E1.3 ve Şekil E1.4 için kullanılan örnek ray elastomer mesnet tiplerine ilişkin parametreler (De Man, 2002).....	72
Çizelge E1.5	Şekil E1.3 ve Şekil E1.4 için kullanılan parametreler	74
Çizelge E1.6	Şekil E1.5 için kullanılan ray elastomer mesnet tiplerine ilişkin parametreler (Cai, 1992)	74
Çizelge E1.7	Şekil E1.6 için balast ve zemine ilişkin parametreler (Cai, 1992).....	74
Çizelge E1.8	Şekil E1.7 için kullanılan parametreler.....	76
Çizelge E2.1	UIC 60 Rayına ilişkin özellikler	77
Çizelge E2.2	SAP 2000 ve Winkler model parametreleri	79

ÖNSÖZ

“Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi” konulu bu tez çalışması sırasında bilgi, kaynak ve deneyimleri ile bana destek olan tez danışmanı Prof. Dr. Aydın Erel’e ve bu çalışmanın her aşamasında bana destek olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Ulaştırma sistemleri içerisinde önemli bir yere sahip olan demiryolları, özellikle son 50 yıl içerisinde hızlı bir gelişim göstermiştir. Günümüzdeki gelişmeler doğrultusunda hat kapasitesindeki artışın yanısıra artan hız ve yük taşıma kapasitesi, bu sistemin verimini artırmakla birlikte birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu koşulların, aşırı dinamik zorlanmalara neden olmasının yanısıra; tekrarlı dinamik dingil yükleri, taşıt ve yol elemanlarında önemli yorulma hasarlarına yol açabilmektedir. Bu durum yolcu konfor ve güvenliğini olumsuz etkilemekte, ayrıca bakım ve onarım masraflarının da artmasına neden olmaktadır. Olası problemleri en aza indirmek amacıyla, hem yol tasarımı için rijit üstyapı seçenekleri, hem de balastlı üstyapı uygulamaları için uygun tasarım ve üstyapı bileşenleri araştırılmaktadır.

Raylı sistemler elastik yapıları nedeniyle yüksek hız ve artan dingil yükleri altında oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvetlere maruz kalmaktadırlar. Bu kuvvetlerin frekans bölgeleri, özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmeye değerdir. Zira zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı sistemin doğal frekansıyla çakıştığı takdirde, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelmektedir. Dolayısıyla rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik problemlerle karşılaşılmasını için taşıt ve yol bileşenlerinin dinamik davranışları çok iyi tanımlanmalı, alternatif yol tipleri için uygun dinamik modeller kurulmalı ve tasarım safhasında kapsamlı bir dinamik analiz yapılmalıdır.

Bu çalışmada “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi” konusunda bir inceleme sunulmuştur. İlk bölümde konuya kısaca giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde öncelikle demiryolu üstyapı tipleri ile yol yapısına gelen etkiler kısaca ele alınmış ve demiryolu yapısının zorlanmasına yönelik günümüze kadar yapılan çalışmalara ilişkin genel bir bilgi sunulmuştur. Üçüncü bölümde, “Titreşim Analizi” başlığı altında, ilgili tanımlamalara yer verilmiş ve sistemlere yönelik titreşim analizi genel bir şekilde anlatılmıştır. Bu çalışmanın ana içeriğini kapsayan dördüncü bölümde ise, taşıt-yol bileşenlerine ilişkin dinamik özellikler, taşıt-yol sisteminde oluşabilecek dinamik problemler, taşıt ve yola ilişkin dinamik modeller ile yol tasarımı için gerekli olan dinamik analizler için kullanılabilecek çözüm teknikleri incelenmiştir. Ayrıca seçilen standart yol modeli için frekans tanım alanlı çözüm metodu ile analitik çözümlemeler yapılarak, farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar Ek 1’de sunulmuştur. Sonuçlar bölümünde ise, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından genel tavsiyelerde bulunulmuş ve bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler ışığında da birtakım önerilere yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu üstyapısı, demiryolunun dinamik modellenmesi, dinamik analiz, titreşim, frekans tanım alanı, zaman tanım alanı.

ABSTRACT

Railways, which have an important role in transportation systems have been rapidly improved especially in the last 50 years. In accordance with the contemporary developments, such as increased line capacity and increase in operating speeds and axle loads in rail transportation, the efficiency of this system has increased; but on the other side, these improvements have caused some problems. The increase of axle loads and operating speeds not only cause the excessive dynamic forces subjected to train-track system but can also cause the damages of train and track components by the repeated dynamic axle loads. All these factors have negative effects on passenger safety and comfort and also cause increase in maintenance costs. To minimize the possible problems, ballastless track alternatives and suitable design and track components for ballasted tracks have been still investigated.

Because of their elastic properties, railway systems are subjected to excessive vibrations and forces due to high velocities and increased axle loads. Frequency spectrums of these forces, especially for the resonance vibrations, are important to be known. Since one or more of the forced vibration frequency coincides with the natural frequency of the system, resonance vibrations, which are destructive because of their magnitude may occur. Therefore, to prevent resonance vibrations and undesirable problems; the dynamic behaviors of train and track components should be well-known, suitable dynamic models should be evaluated for alternative track structures and comprehensive dynamic analysis should be performed during design stages.

In this study, a research about “Dynamic Analysis of Railway Track Structure” is presented. After a brief introduction given in the first section; the type of railway track structures and forces acting on track structure are primarily described and a general information about the extant studies associated with the vertical stability of railway track structure is given in the second section of this study. In the third section titled as “Vibration Analysis”, expressions about vibration and vibration analysis for systems are generally defined. The fourth section comprises the main contents of this study. In this section, dynamic properties of train-track components, dynamic problems that can occur within the train-track system, dynamic models for train and track structure and solution techniques that can be used for necessary dynamic analysis during design stages are examined. Also, analytical solutions calculated by frequency domain method for the selected standard track model according to different track components are presented in Appendix 1. As a conclusion, general recommendations are presented to give an idea and a suggestion for future researches and studies.

Keywords; Superstructure of railway, dynamic modeling of railway track, dynamic analysis, vibration, frequency domain, time domain.

1. GİRİŞ

Demiryolları geçmişten günümüze ulaşım sistemleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Günümüzdeki gelişmeler doğrultusunda, demiryollarında tren hızları yaklaşık 300 km/sa değerine kadar ulaşmış olup, yük taşıma kapasitelerinde de benzer şekilde artış meydana gelmiştir (25 ton/dingil). Artan hız ve yük taşıma kapasitesi, bu sistemin verimini artırmakla birlikte, bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Taşıtların hareketi sonucunda oluşan titreşimler, hız ve dingil yüklerinin artması ile; yolda ve taşıtta oluşabilecek dinamik tepkilerin artışına sebep olmakta ve bir süre sonra taşıt ve yolda istenmeyen hasar ve düzensizliklere yol açmaktadır. Taşıt ve yol sisteminde oluşabilecek hasar ve düzensizlikleri ve bakım masraflarını minimuma indirmek, yolcu konfor ve güvenliğini en iyi şekilde sağlayabilmek için demiryolu yapısının ve yol elemanlarının dinamik davranışlarının çok iyi bilinmesi ve uygun sonuçları araştırmaya yönelik dinamik analizlerin yapılması gerekir.

Ne yazık ki ülkemizde, demiryolu dinamik davranışı ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı yok denebilecek kadar azdır ve bu konu hakkında yapılabilecek her türlü çalışma ülkemiz ekonomisi için oldukça faydalı olacaktır. Ülkemizde gelişen kentiçi demiryolu sistemlerinde de, demiryolunun dinamik davranışı konusunda birçok problemle karşılaşilmektedir. Örneğin, İstanbul gibi tarihi mirası çok olan bir kentte yapılacak kentiçi demiryolu sistemi, doğurduğu titreşimler ile tarihi eserlere çok büyük hasarlar verebilmektedir. Oysa, demiryolu yapısının hesabı aşamasında iyi yapılmış bir dinamik analize göre tasarım, bu gibi titreşimlerin etkisini minimuma indirebilmektedir. Ayrıca, demiryolu sistemleri için yetersiz yapılan tasarım ve boyutlandırma sonucunda, yanlış seçilen yol elemanları ve/veya yol tipleri ile yolun işletmeye açılmasından sonraki bakım ve onarım masrafları da artmaktadır. Bu durumun önlenmesi için demiryolu yapısının tasarımı aşamasında doğru tanımlanmış dinamik modellerin kullanılması ve bu modeller doğrultusunda dinamik analizlerin yapılması gerekir. Ne var ki; ülkemizde çoğu zaman tasarım aşamasında demiryolu yapısının dinamik analizi bir yana, statik analizi bile yapılmamaktadır ve sonuç olarak, karşılaşılan problemler doğrultusunda maliyeti yüksek çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle demiryolu işletmeleri, demiryolu sistemlerindeki ondülasyon, gürültü ve titreşim oluşumu, yolcu konforunun bozulması, bakım masraflarının artması ve yolun stabilitesinin bozulması gibi problemlerle, olması gerekenden çok daha kısa zamanda karşılaşmaktadırlar. Bu problemler ile olduğunca geç karşılaşmak, etkilerini minimuma indirmek ve mevcut altyapıdan en iyi şekilde verim sağlayabilmek adına alternatif yol tipleri için uygun dinamik modeller kurulmalı ve dinamik analizler yapılmalıdır.

Bu çalışmada “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi” konusunda bir inceleme sunulmuştur. İlk bölümde konuya kısaca giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde öncelikle demiryolu üstyapı tipleri ile yol yapısına gelen etkiler kısaca ele alınmış ve demiryolu yapısının zorlanmasıyla yönelik günümüze kadar yapılan çalışmalara ilişkin genel bir bilgi sunulmuştur. Üçüncü bölümde, “Titreşim Analizi” başlığı altında, ilgili tanımlamalara yer verilmiş ve sistemlere yönelik titreşim analizi genel bir şekilde anlatılmıştır. Bu çalışmanın ana içeriğini kapsayan dördüncü bölümde ise, taşıt-yol bileşenlerine ilişkin dinamik özellikler, taşıt-yol sisteminde oluşabilecek dinamik problemler, taşıt ve yola ilişkin dinamik modeller ile yol tasarımı için gerekli olan dinamik analizler için kullanılabilecek çözüm teknikleri incelenmiştir. Ayrıca seçilen standart yol modeli için frekans tanım alanlı çözüm metodu ile analitik çözümler yapılarak, farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar Ek 1’de sunulmuştur. Sonuçlar bölümünde ise, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından genel tavsiyelerde bulunulmuş ve bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler ışığında da birtakım önerilere yer verilmiştir.

2. DEMİRYOLU YAPISI VE ZORLANMASI

Raylı ulaştırma sistemlerinin üstyapı tipi, günümüzdeki yapısına ve boyutlarına ulaşmaya dek, teknik ve ekonomik gereksinimler doğrultusunda değişik aşamalar geçirmiştir. Stephenson'un 1825 yılında Stockton-Darlington arasında döşettirdiği taş mesnetler üzerindeki ve açıklıklarda balık karnı kesiti verilmiş olan dökme demirden rayların yerini (Şekil 2.1), bugün kırma taş tabakasından oluşan bir yatak üzerine döşenen traversler üzerine rijit ya da elastik olarak mesnetlenmiş olan geniş tabanlı ray dizileri almıştır.



1825 : Stockton Darlington /1835 : Bayer. Ludwigsbahn (Nbg. Fürth)

Şekil 2.1 19 yy. başlarında kullanılan üstyapı tipi (Erkul, 2002).

Demiryolu yapısı altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımda inşa edilmektedir. Altyapı, üzerine demiryolunu inşa edebilmek için zeminde yapılması gerekli her türlü yapı ve işleri içerir. Yani dolgu ve yarmadaki esas platformun oluşturulması ile demiryolunun sürekliliğinin sağlanması için yolların altında veya üstünde kalan bütün sanat yapılarını ihtiva eder. Altyapı platformu üzerine oturan yapı kısmına ise 'üstyapı' denir. Taşıtlardan gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya ve üstyapıdan da altyapıya aktarılır. Üstyapı, taşıtların yol üzerindeki hareketi sonucu oluşacak tüm statik ve dinamik kuvvetleri güvenli bir şekilde alt yapıya iletecek ve tüm dış etkilere karşı koyabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Yol yapısının davranışı, önemli ölçüde yapı tipine, kullanılan yapı elemanlarına ve malzemelerine, yapım kalitesine ve bakım düzeyine bağlıdır.

Demiryolu üstyapı tipleri iki ana grupta toplanabilir, bunlar;

- Balastlı Üstyapı (Ballasted Track Structures),
- Rijit Üstyapı (Slab Track Structures / Ballastless Track).

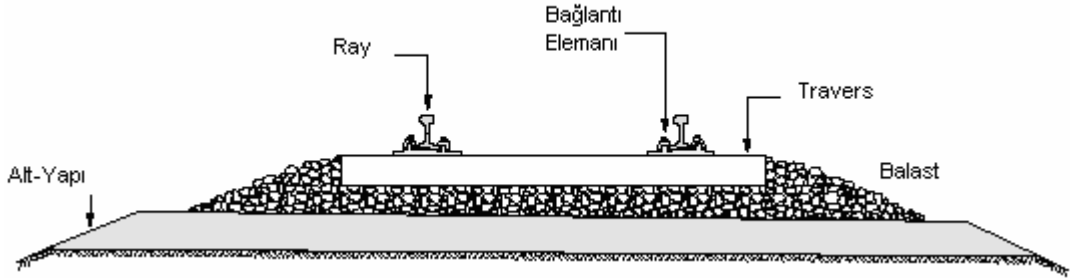
Bölüm 2.1 ve 2.2’de başlıca demiryolu üstyapı tipleri olan “Balastlı Üstyapı” ve “Rijit Üstyapı” ile ilgili genel bir bilgi sunulacaktır. Ayrıca, Çizelge 2.1’de, demiryolu üstyapı tipleri ve bileşenlerine ilişkin genel bir bilgi verilmiştir.

Çizelge 2.1 Yol tipleri ve bileşenlerine genel bir bakış (De Man, 2002).

Yol Tipleri	Yol Bileşenleri												
	Raylar	Traversler	Bloklar	Ray Altı Levhası	Beton Plak	Ray Elastomer Mesneti	Gömülü Ray	Ray Altı Levhası Padi	Blok Kılıf / Travers çizmesi	Balast Malzemesi	Zemin / Tabakalaşmış Ortam	Mühendislik Yapıları	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.													

2.1. Balastlı Üstyapı

Bugün dünyada kullanılan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı, balast tabakası üzerine döşenmiş ahşap, çelik veya betonarme traverslere mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmektedir. Balastlı üstyapı elemanları balast tabakası, traversler, çelik ray ve bağlantı elemanlarından oluşur (Şekil 2.2). Yapım, bakım, onarım kolaylıkları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle balastlı üstyapı sistemlerinin gelecekte de uzun bir süre kullanılacağı aşikârdır. Fakat rijit üstyapının maliyeti daha fazla olmasına ve kalifiye işçilik gerektirmesine karşın, kullanılabilirlik süresi klasik üstyapıdan daha fazla, bakımı için harcanan zaman ve maliyet ise daha azdır. Bu durum, günümüzün gittikçe artan trafik yoğunluğunda bakım ve yenileme işlemlerinin yapılabilmesi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.2 Balastlı üstyapı.

2.2. Rijit Üstyapı

Rijit üstyapı (Slab Track Structures), balast tabakası yerine; daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapı tipidir. Taşıma tabakası asfalt ya da beton olabilir. Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır (Erel, 2002).

Rijit üstyapı Almanya’da ‘Feste Fahrbahn’, İngiltere ve ABD’de ‘Slab Track’, ‘Ballastless Track’ ya da ‘Direct Fixation Track’ adlarıyla tanınmaktadır.

Günümüzde, yatırım maliyetlerinin yüksek olması, rijit üstyapı sistemlerinin yaygın kullanımını engellemiştir. Rijit üstyapıda, en büyük tasarruf tünel ve köprülerde elde edilmektedir. Daha etkili inşaat metotlarının kullanılmasıyla inşaat maliyetinin daha da düşürülmesi sağlanabilecektir.

Rijit üstyapının en önemli nitelikleri;

- Gevşek bağlantılı balastta yetersiz olan yük iletiminin, yükü dağıtan daha rijit bir tabaka ile sağlanması,
- Balastlı üstyapının etkili elastikliğinin, yol boyunca ray tabanının altına ya da travers tabanı altına konulan elastik elemanlarla sağlanmasıdır.

En iyi bilinen ve şu anda kullanımda olan, rijit üstyapı sistemleri şunlardır:

- Taşıma tabakası içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (PORR - Avusturya, Rheda, Züblin - Almanya, Stedef, Sonneville LVT-Fransa) (Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5),
- Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (ATD sistemi - Nant, GETRAC) (Şekil 2.6, Şekil 2.7),
- Monolitik rijit üstyapı sistemi (Rasengleis) (Şekil 2.8),
- Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (Shinkansen - Japonya, Güney Kore, IP İtalya) (Şekil 2.9),
- Gömülü raylı üstyapı (Embedded Rail Structure) (Infundo üstyapı sistemi - Hollanda) (Şekil 2.11),
- Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı sistemi (Hollanda Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi) (Şekil 2.13).

Rijit üstyapı sistemleri değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. En genel sınıflandırma şekilleri şunlardır:

- Demiryolu türüne göre,
- Uygulama yerine göre,
- Yapı tipi ve döşenme şekline göre (Çizelge 2.2),
- Ülkeye özgün gelişmelere göre,
- Kronolojik gelişime göre.

Demiryolu türüne göre sınıflandırmada, kentlerarası demiryollarında ve kentiçi raylı sistemleri olan metro, hafif raylı sistem (LRT) ve tramvay yollarında uygulanan rijit üstyapı tipleri yer alır.

Uygulama yerine göre rijit üstyapı tipleri şunlardır:

- Tünelde,
- Viyadük, köprü gibi yüksek yapılarda,
- Toprak gövde üzerinde.

Rijit üstyapıya özellikle tünel ve yüksek yapılarda gereksinim duyulmaktadır. Ancak kentlerarası yüksek hızlı demiryollarında toprak gövde üzerindeki balastlı üstyapı yerine, fazla bakım gerektirmeyen iyi bir seyir yolu sağlayabilmek için, rijit üstyapı kullanılması daha uygundur.

Rijit üstyapı sistemlerinin yapı tipi ve döşenme şekline göre sınıflandırılması en yaygın olanıdır (Çizelge 2.2). Döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri mesnetli döşeme ve sürekli döşeme olmak üzere başlıca iki grupta incelenebilir.

Çizelge 2.2 Yapı tipi ve döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002).

MESNETLİ DÖŞEME					<i>SÜREKLİ DÖŞEME</i>	
TRAVERSLİ		TRAVERSSİZ				
GÖMÜLÜ	DÖŞELİ	BAĞLAYICI HARÇ MESNETLİ	MONOLİTİK	PREFABRİK	<i>RAY GÖMÜLÜ</i>	<i>RAY KAMALI</i>

Mesnetli döşeme, ray tabanının 0,50 m ile 0,80 m arasında (en çok 0.65 m) değişen sabit aralıklı mesnetlere, 2 parçalı olan ve yaylı elemanları ile ayarlanabilen bağlantılar yardımıyla, alttaki taşıma tabakası üzerine bağlanmasından oluşur. Taşıma tabakası içine bağlantı, değişik türdeki ankraj elemanları yardımıyla olabilir (Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8, Şekil 2.9).

Sürekli döşeme ise, rayların doğal ya da yapay elastik bir yastık sistemi içine gömülerek, sürekli olarak elastik mesnetlenmesi esasına dayanır. Rijit üstyapı tiplerinden biri olan bu sürekli döşeme şekli ise “Gömülü Raylı Yol Yapısı” (Embedded Rail Structures) adını alarak sınıflandırılmaktadır.

Gömülü raylı yol tipinin yapı prensibi, rayların sürekli olarak elastik mesnetlenmiş (yataklanmış) olmasıdır. Raylar, beton taşıma tabakası üzerinde yol eksenine doğrultusunda ve beton ya da istisnai durumlarda çelik malzemeden yapılmış paralel iki kirişin (boyuna travers)

içlerinde oluşturulan oluklarda, doğal ya da kauçuk yataklar içine döşenmektedir.



Şekil 2.3 Rheda 2000 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Esveld, 2003).



Şekil 2.4 PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.5 LVT, TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.6 ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.8 Rasengleis monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



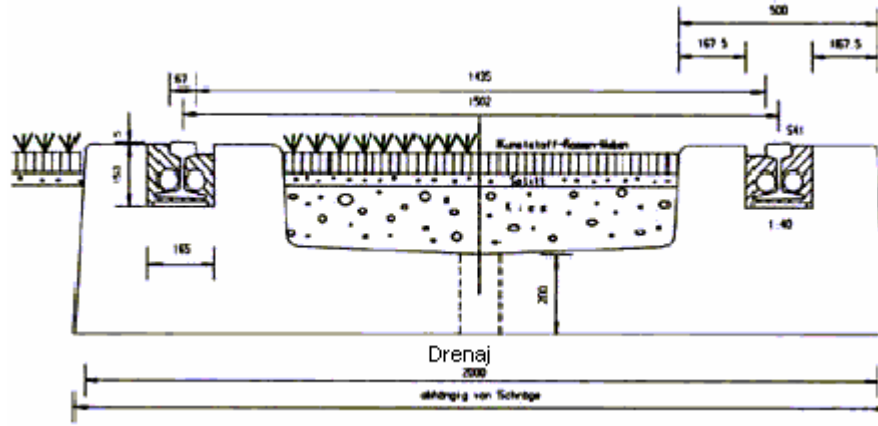
Şekil 2.7 GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.9 Shinkansen prefabrik üstyapı sistemi (Erkul, 2002).

Sürekli yataklandırma, ray mantarı yanakları ve tekerlek budeni için gerekli alan boş kalacak şekilde, ray tabanı ve gövdesi boyunca yapılır. Mesnetlerde noktasal elastiklik bulunmadığı için, ray sürekli olarak elastik mesnetlenmelidir. Bu yapı tiplerinde, bağlantı malzemesinin aynı zamanda sönümlleme görevi yapması esastır. Daha sonra herhangi bir yanal ve düşey ayarlama mümkün olamayacağı için, bu üstyapı tipinde rayların yerleştirilmesi çok duyarlı yapılmalıdır. Rayların yol eksenine doğru enine eğimleri ile kurba kesimlerinde uygulanması gereken deyer, rayların yatak içine yerleştirilmesi sırasında verilir

Gömülü raylı rijit üstyapı tipinin, “sürekli gömülü raylı” ve “kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı” olmak üzere iki farklı uygulama şekli bulunmaktadır.



Şekil 2.11 Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).

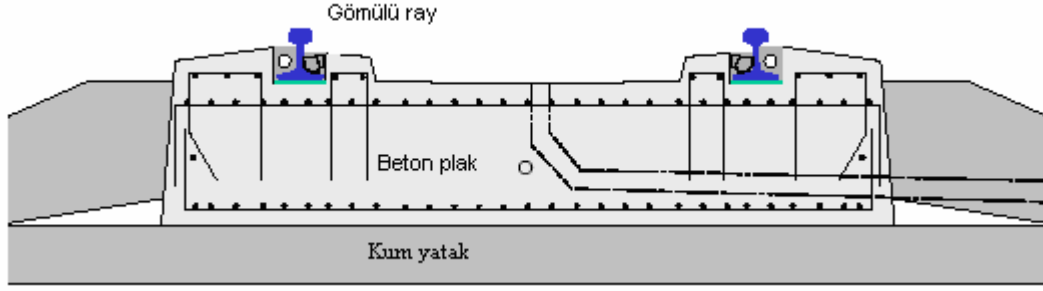
Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı tipinde ise, raylar yine beton taşıma tabakası üzerinde olukların içine elastik yataklı olarak döşenmekte, ancak konumlarını koruyabilmeleri için gövdelerinin her iki yanından kamalarla sıkıştırılmaktadırlar.

Günümüzde bu tipte gelişen rijit üstyapı tipleri SFF (Ortec), Saargummi ve ERC (Embedded Rail Construction)'dir.

Ortec firması tarafından geliştirilen Ortec (Ortwein Technik) ya da SFF (Schwingungsgedaempfte Feste Fahrbahn : Titreşim Sönümleyici Rijit Üstyapı) adıyla anılan bu sistemde, raylar belirli kesite sahip boyuna kauçuk koruyucularla, beton taşıma tabakası kanalları içine döşenen tekne kesitli beton kirişlerin içine yerleştirilir ve vida yardımıyla hareket ettirilebilen kamalarla yanal yönde ankrajlanır. Almanya'da bu yol tipinin kentiçi raylı sistemlerinde ve tünellerde kullanımına izin verilmiştir.

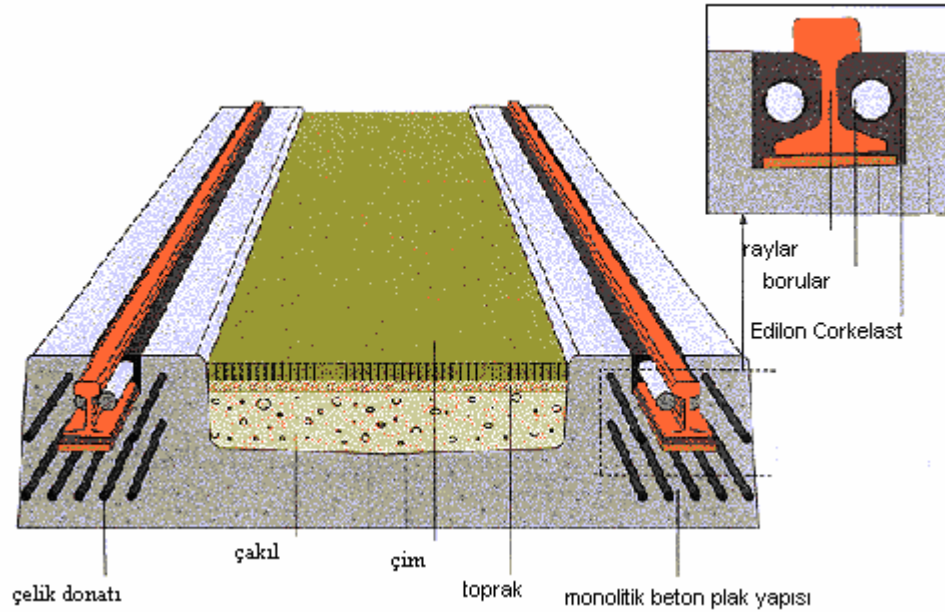
Edilon blok rijit üstyapı sisteminin uygulama alanı genelde köprü ve tünellerdir. Raylar ve blokların pozisyonlarına yerleştirilmeleri yapım aşamasında ilk sırayı alır. Daha sonra bloklar gerekli elastik desteği sağlamak amacıyla, Corkelast kullanılarak yerleştirilir. Kullanılmakta olduğu önemli uygulama yerleri, Norveç'te hafif raylı sistem ve Madrid Metrosu'nun 100 km'lik bir kısmıdır.

Edilon Corkelast gömülü sisteminde, geleneksel balast yatağının yerini, çelik veya beton yapılar alır. Bu temel, gömülü raya da yapılabildiği gibi otomatik olarak yerleştirilebilir. Raylar kaldırılır ve Edilon Corkelast maddesi etrafına dökülür. Edilon Corkelast maddesi akışkan olduğundan istenilen şekli alabilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12 Gömülü ray yapısı (Erel,2002).

Gömülü raylar çevre açısından sağlıklı olduğu gibi titreşim de azaltılmıştır. Sistem ömrü boyunca bakım masrafsızdır ve geri dönüşümlüdür. Bütün ray sistemlerine ve kısıtlı alanlara (tünel vs.) uygulanabilir. Gömülü raylar kesiştikleri karayolu sistemleri ile aynı seviyede olduklarından yardım araçlarına geçiş kolaylığı sağlar. Son olarak, gömülü ray sistemi geleneksel traversli sistemlerden daha hafif olduğu için köprü inşaatlarında tercih edilir.



Şekil 2.13 Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi (Erel,2002).

2.3 Yol Yapısına Gelen Etkiler

Demiryolu yapısının stabilitesine ve dinamik davranışına değinmeden önce, yol yapısına etki eden zorlayıcı kuvvetlerden bahsetmek gerekir. Genel olarak yol yapısını zorlayan etkileri düşey, yanal ve boyuna yöndeki etkiler olmak üzere üç ayrı şekilde sınıflandırabiliriz (Şekil 2.14). Taşıt-yol etkileşimine, seyir koşullarına, yol yapısının özelliklerine, taşıt özelliklerine sıcaklık gibi çevresel faktörlere vb. bağlı olarak ortaya çıkan ve demiryolu yapısını zorlayan bu etkiler kökenlerine göre aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler:

1. *Taşıtların oluşturduğu etkiler* : Bu grupta, düşey doğrultudaki dinamik dingil yükleri ile taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde yol eksenine doğrultusunda oluşturdukları yatay kuvvetler sayılabilir. Yol yapısının zorlanmasında etkili olan dingil yükleri, yoldaki aşınmalar, balast tabakasındaki çökmeler sonucunda traverslerin altında oluşan boşluklar, çeşitli nedenlerle yolun boyuna doğrultusundaki elastikliğinin değişmesi, balast ve taban zeminindeki çökmeler sonucunda yolda oluşan yükselti farklılıkları gibi uyarı kaynakları ile taşıtların süspansiyon ve amortisör düzenleri tarafından dinamik karaktere dönüştürülürler.

2. *Yolun geometrik karakteristikleri, taşıtların yapısal özellikleri ve demiryolu üzerindeki hareket koşullarının oluşturduğu etkiler* : Cebireli ray eklerindeki şoklar, kurba kesimlerinde dengelenmemiş merkezci ya da merkezkaç kuvvetler, tekerleklerle dingillerin rijit bağlı ve tekerlek bandajlarının konik olmaları nedeniyle ortaya çıkan zorlanmalar da ikinci grup içinde sayılabilirler.

3. *Yol ve taşıtlardaki bozuklukların oluşturduğu etkiler* : İşletme etkisiyle yolda zamanla aşınmalar, cebireli ray eklerinin bulonlarındaki ve rayı traverslere bağlayan bağlantı elemanlarındaki gevşemeler, düşey ve yanal kuvvetlerin etkisiyle bu iki doğrultudaki ray eğrilikleri, ray mantarında oluşan yorulma hasarları, periyodik (ondülasyon) ve periyodik olmayan aşınmalar, balast ve taban zemininde kalıcı çökmeler ve travers altlarında boşluklar oluşur. Arzu edilmeyen bu yol bozuklukları, taşıtların seyir koşullarını ve dolayısıyla yol yapısının zorlanmasını olumsuz yönde etkilerler.

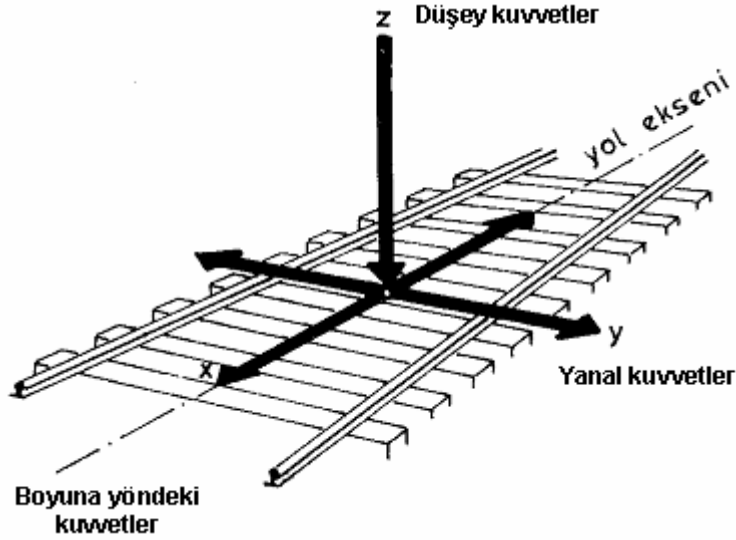
Taşıtlarda ise süspansiyon ve amortisör düzenlerindeki gevşemeler ve tekerlek aşınmaları dinamik etkileri artırır. Fazla aşınma sonucunda tekerleklerin dairesel kesitleri değişerek, seyir sırasında çarpma şeklinde aşırı dinamik kuvvetler oluşur.

4. *Çevre koşullarının etkisi* : Yaz ve kış aylarındaki büyük sıcaklık farklılıkları özellikle kaynaklı uzun raylarda ısı gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar. Hava kirliliği ve nemliliği ise, tekerlekler ile ray arasındaki sürtünmeyi azaltarak, kayma olasılığını artırır. Don

etkisinde balast ve taban zemininin elastiklikleri azalacağından, yol yapısına gelen zorlanmalar da artarak, büyük gerilmeler oluştururlar. Ayrıca, oksitlenmenin de yaratacağı olumsuz etkilerden söz etmek gerekir. Oksitlenme ile ray kesitinin zayıflaması, atalet ve mukavemet momentlerini azaltıcı etki yaparken, mantar üst yüzeyi pürüzlülükleri de yorulma mukavemetinde azalmaya neden olurlar.

Sayılan bu etkilerden üçüncü grup ile son gruptaki ısı gerilmeleri dışındaki etkiler işletme ve çevre koşullarına bağlı olarak, diğer bir deyişle zamana ve yerine göre değişmektedir. Zamana ve mekâna göre değişen bu etkileri matematiksel olarak tanımlayabilmek oldukça zordur. Ancak deneyimlere dayanarak, belirli koşullar için sayısal değerler verilebilir. İlk iki grup ve ısı gerilmelerinin yol yapısında oluşturacakları zorlanmalar ise bazı varsayımlara dayanan özel hesap yöntemleri ile detaylı bir şekilde incelenebilir (Erel, 1981).

Hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından yukarıda ifade edilen yol yapısına etki eden başlıca kuvvetleri, daha önce de belirtildiği gibi (x; y; z) koordinat sistemine göre, düşey, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler olmak üzere üç ayrı grupta inceleyebiliriz (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Yol yapısına etki eden kuvvetler (Erel, 1981).

Dingil yükleri, kurba kesimlerinde tekerlek yükü değişimi, conta ve ek yerlerindeki şoklar ve tekerlek aplatılığı sonucu taşıtların geçişi sırasında oluşan dinamik ani kuvvetler yol yapısına düşey yönde (z eksenine) etki eden kuvvetlerdir. Taşıt şasileri ile dingil başlarına ve tekerlekler ile raya aktarılan dingil yükleri, taşıt ve yol durumuna bağlı olarak artan dinamik etkilerle birlikte, tüm yol yapısını ve taban zeminini zorlarlar. Normal koşullarda her iki raya eşit olarak etkimesi gereken (Q) tekerlek yükleri, eksantrik yükleme ve kurba kesimlerindeki

dengelenmemiş deyer ile farklı değerler almaktadırlar. Kurba yarıçapı, seyahat hızı, deyer ve taşıtların ağırlık merkezi yüksekliklerine bağlı olarak değişen tekerlek yükü artışlarının yol yapısının zorlanmasında hesaba katılmaları zorunludur. Ayrıca, taşıt ve yol yapısının özelliklerine bağlı olarak değişen titreşimlerin oluşturduğu dinamik etkiler dingil yüklerinde artışa neden olmaktadır. Dolayısıyla dinamik stabilite problemlerinde taşıt ve yol sisteminin çok iyi tanımlanması gerekir.

Yol yapısına yanal yönde (y eksenı) etki eden kuvvetler, bandaj konikliğinden kaynaklanan ve yolun doğru kesimlerinde etki eden lase kuvvetlerini, kurbalarda dengelenmemiş merkezkaç ya da merkezci kuvvetleri, kılavuzlama kuvvetlerini ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan yanal yöndeki kuvvetleri içermektedir.

Boyuna doğrultuda (x eksenı) yol yapısına etki eden kuvvetler ise, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ve rayların boyuna genleşmelerinin sınırlandırılması nedeniyle oluşan kuvvetler, taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde oluşan kuvvetler, ray içsel gerilmeleri ve kaynaklama sonrası ortaya çıkan büzölme gerilmelerinin oluşturdukları boyuna kuvvetler şeklinde sıralanabilirler. Ayrıca, rayların yürümesi (şöminman) ile oluşan kuvvetler, conta ve ek yerlerinde oluşan şoklar ve tekerlek aplatiliğinden kaynaklanan yanal kuvvetler de yolun boyuna doğrultusunda etki eden zorlayıcı kuvvetlerdir.

Genellikle hesaplamalarda kolaylık sağlanması açısından düşey dinamik stabilite analizlerinde yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmektedir. Bu çalışmada yer alan dinamik analizlerde de, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmiş olup, düşey yöndeki dingil yükleri dikkate alınmış ve dinamik dingil yükleri frekansa bağlı olarak tanımlanmıştır. Böylece, taşıt-yol etkileşimi ile oluşan titreşimler sonucunda frekansa bağlı olarak farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda yolda oluşabilecek dinamik tepkiler hesaplanmıştır.

2.4 Demiryolu Yapısının Zorlanmasına Yönelik Çalışmalar

Demiryolunun ilk yıllarında değişik yol tipleri, yani farklı ray kesitleri, bağlantı elemanları, travers türleri ve yol çerçevesinin üzerine oturacağı değişik yatak tipleri yoktu. Dolayısıyla, en uygun seçeneği bulmayı amaçlayan kuramsal modellere ve hesap yöntemlerine gereksinim duyulmuyordu. Demiryolu ağlarının büyümesiyle, değişik yol tiplerine rastlanmaya başlandı. Raylar kırıldıkça, balast tabakasında aşırı zorlanma sonucu çökmeler oluştuğca, güvenilir hesap yöntemlerine gereksinim duyulmaya başlandı. 19. yüzyıl ortalarında statik ve mukavemet bilimindeki gelişmeler doğrultusunda, uygun hesap yöntemleri araştırılmaya başlandı. Statik yükler altında demiryollarında oluşacak zorlanmaların nasıl tahmin

edilebileceği konusundaki kayda değer ilk çalışma, 1867 yılında Emil WINKLER tarafından yapılmıştır. “Boyuna traversli demiryolu hesabı için elastik yataklandırılmış kiriş modeli” adındaki bu teorik çalışmanın geçerliliği, 1888 yılında H. ZIMMERMANN tarafından yapılan deneysel çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Winkler adıyla günümüzde de kullanılmakta olan bu teori, basitliği ve uygulama kolaylığı bakımından her zaman tercih edilmiştir. Winkler hipotezi ile oluşturulan elastik zemine oturan sürekli kiriş modeli, Zimmermann tarafından geliştirilerek; taban karakteristiklerinin sabit olduğu varsayımıyla demiryolu çerçevesi, “Elastik Tabana Oturan Sürekli Kiriş” şeklinde düşünülmüş ve yoldaki statik zorlanmalar hesaplanmıştır. Bu arada Johann Wilhelm Schwedler aynı modeli 1882 yılında Londra İnşaat Mühendisleri Enstitüsü’nde sunmuş, ancak “Winkler” ismini anmamıştır (Knothe, 2001). Zimmermann yöntemi ile elde edilen statik zorlanmalardan mevcut dinamik zorlanmaların tahmin edilebilmesi için ise, Münih Teknik Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü’nce Eisenmann ve ekibi tarafından yapılan uzun süreli ölçüm sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi sonucu, seyir hızı ve üstyapının bakım durumuna bağlı olarak bir “Dinamik Etki Katsayısı” geliştirilmiştir (Erel, 1989). Zimmermann hesap yöntemi ile dinamik etki katsayısının hesabı bu bölümün sonunda özetlenmiştir.

Ancak günümüzdeki gelişmeler doğrultusunda, demiryollarında tren hızları yaklaşık 300 km/sa değerine kadar ulaşmış olup, yük taşıma kapasitelerinde de benzer şekilde artış meydana gelmiştir (25 ton/dingil). Artan hız ve yük taşıma kapasitesi, sistemin verimini artırmakla birlikte, bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Taşıtların hareketi sonucunda oluşan titreşimler, hız ve dingil yüklerinin artması ile birlikte; yolda ve taşıtta oluşabilecek dinamik tepkilerin artışına sebep olmakta ve bir süre sonra taşıt ve yolda istenmeyen hasar ve düzensizliklere yol açmaktadır. Bu nedenle taşıt ve yol bileşenlerinin dinamik davranışlarının çok iyi bilinmesi ve günümüzdeki gelişmeler doğrultusunda olası problemleri minimuma indirecek şekilde, taşıt-yol sisteminin bütünüyle dikkate alındığı daha karmaşık hesap yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, demiryolu üstyapısının dinamik analizi konusunda günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Bir asırdan önce, Schwedler, demiryollarında oluşacak tepki kuvvetlerini hesaplamak ve bu hesaplar yardımıyla, gerilmelerden dolayı oluşabilecek ray kırılmalarını ve yol bileşenlerindeki hasarları önleyebilmek için, bir demiryolu modelinin kurulmasına ihtiyaç olduğunu belirterek, demiryolu ve inşaat mühendislerinin dikkatini çekmiştir. Schwedler’in demiryollarının matematik modelleri ile ilgili yaptığı yorum bugün için de geçerlidir: ‘Öncelikle yapım şeklinin belirlenmesinde esas alınacak teorik koşullar belirlenmeli, daha

sonra hipotezin doğruluğu gerçek değerlerle test edilmelidir.’(Knothe, 2001). Schwedler’in de belirtmiş olduğu üzere, öngörülen yol tipine bağlı olarak yol bileşen özellikleri iyi bir şekilde tanımlanmalı, teorik koşullar doğrultusunda uygun yol modelleri oluşturulmalı, bu modeller doğrultusunda gerekli analitik çözümler yapılmalı ve elde edilen sonuçlar test verileri ile karşılaştırılmalıdır.

Winkler Modeli’nin ayırık mesnetli, diğer bir deyişle enine traversli demiryoluna uygulanması için ise yaklaşık 40 yıl geçmiştir. H. Zimmermann 1888 yılında enine traversli yoldaki eğilme momentlerini ve travers altında oluşan balast gerilmelerini Winkler Modeli ile hesaplamışsa da, enine traversli yolun sürekli mesnetlenmiş kiriş modeli ile hesaplanabileceğini ilk kez Stephen P. Timoshenko kanıtlamıştır. Günümüzde “ayırık mesnetlemenin sürekliye dönüştürülmesi (Almanca : Verschmieren)”, 1915 yılında Petersburg’da yayınlanmış ve ilk kez 1926 yılında Zürich’de yapılan 2. Uluslararası Uygulamalı Mekanik Kongresi’nde tanıtılmıştır. Ayrıca, Timoshenko’nun 1915 yılındaki bu çalışmasında, yol dinamiği konusundaki ilk araştırmalar yer almaktadır. Timoshenko, Winkler’in elastik yatak kavramını dinamik olarak ele almış, aplatı (yassılaştırılmış) tekerleklerin ve raylardaki aşınmaların etkilerini araştırmıştır (Knothe, 2001).

1930’lu yılların başından itibaren, artan hız ve dingil yükleri ile birlikte dinamik stabilite problemlerinin çözülebilmesi için daha iyi yol modellerine gereksinim duyulmuş, bu konuda J. Dörr tarafından çalışmalar yapılmıştır (1943, 1948). Ayrıca, 1920’li yıllardan itibaren sürekli kaynaklı rayların kullanılmasıyla ortaya çıkan, sıcak havalardaki ray burkulmaları ve soğuk havalardaki ray kırılmaları problemleri de ek olarak yol stabilitesi analizini gerekli kılmıştır. Ne var ki, 1970 yılına kadar, içinde yeni pratik problemleri çözmek için kullanılabilecek yeni dinamik yol modellerini içeren hiçbir yayın yapılmamıştır. Buna karşın, elastik olarak yataklanmış bir kirişin, hareketli bir yük altındaki dinamik stabilitesine yönelik çok sayıda teorik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, elastik yataklandırılmış kirişte en düşük dalga yayılma hızına erişildiği “kritik seyir hızı” araştırılmıştır. Bu problem demiryolları için yalnızca akademisyenleri ilgilendirir. Yol için elastik yataklandırılmış bir kirişin yol modeli olarak kullanılması durumunda, kritik hızın bugünkü ve gelecekte ulaşılması öngörülen maksimum tren hızlarından daha büyük olacağı açıkça gösterilebilir. 1933 yılında, B. K. Hovey, hareketli yük altındaki stabilite probleminin hiçbir pratik öneminin bulunmadığını kanıtlamıştır. Ancak elastik yarımekan üzerindeki bir kirişin gerçeğe uygun modeli ile ilgilenildiğinde, bu durum şüphesiz değişecektir. Çok yumuşak zeminlerde yüksek hızlı trenlerin seyir hızları, Rayleigh dalgalarının yayılma hızına erişebilir, hatta

üstüne çıkabilir (Yılmaz, 2004).

Geçtiğimiz son 20 yıl içerisinde, demiryolu üstyapısının dinamik stabilitesi ile ilgili pratik problemleri anlamak ve çözmek amacıyla matematik model uygulamalarına çok daha fazla ilgi duyulmuştur. Ayrıca son yıllarda matematik modellerin yanısıra bilgisayar ortamında çeşitli paket programlarının kullanımıyla, nümerik çözüm yöntemlerinin demiryolu dinamiği konusunda kullanımının yaygınlaşmasıyla oldukça duyarlı ve uygulanabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise, seçilen standart yol modeli için frekans tanım alanında farklı yol bileşenlerine (travers aralığı, ray tipi, ray elastomer mesnet tipi vb.) bağlı olarak 0-5000 Hz frekans aralığındaki yol yapısına ilişkin dinamik tepki değerleri (birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri) MATLAB programı aracılığıyla hesaplanmış; rezonans frekanslarında yoldaki rijitlik özellikleri ve dinamik çökme değerleri belirlenmiştir.

Ayrıca Zimmermann'ın demiryolları için geliştirdiği Winkler kiriş modeli SAP 2000 programında modellenmiş ve Zimmermann hesap yöntemi (Winkler hipotezi) ile karşılaştırılmıştır. Ek 2'de çözüm sonuçları ile elde edilen grafikler verilmiştir.

Şekil 2.15'te demiryolu taşıyıcı sistemi, bir çerçeve, elastik tabana oturan sürekli bir kiriş, elastik mesnetli sürekli kiriş ve elastik mesnetli kısa kiriş olmak üzere dört ayrı şekilde gösterilmiştir. Winkler hipotezine bağlı olarak Şekil 2.15'teki yol çerçevesi, traverslerin yük ileten kısımlarının 90° döndürülerek, uç uca eklenmesiyle ray ve traverslerden oluşan sanal (hayali) bir sürekli kompozit kirişe dönüştürülmüştür. Winkler hipotezine bağlı olarak Zimmermann'ın geliştirdiği hesap yöntemine ilişkin eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Winkler hipotezine bağlı olarak geliştirilen kiriş için öncelikle sanal (hayali) kiriş genişliği “B” ve elastik (karakteristik) uzunluk “L” değerleri elde edilmiştir (Şekil 2.15).

Sanal kiriş genişliği;

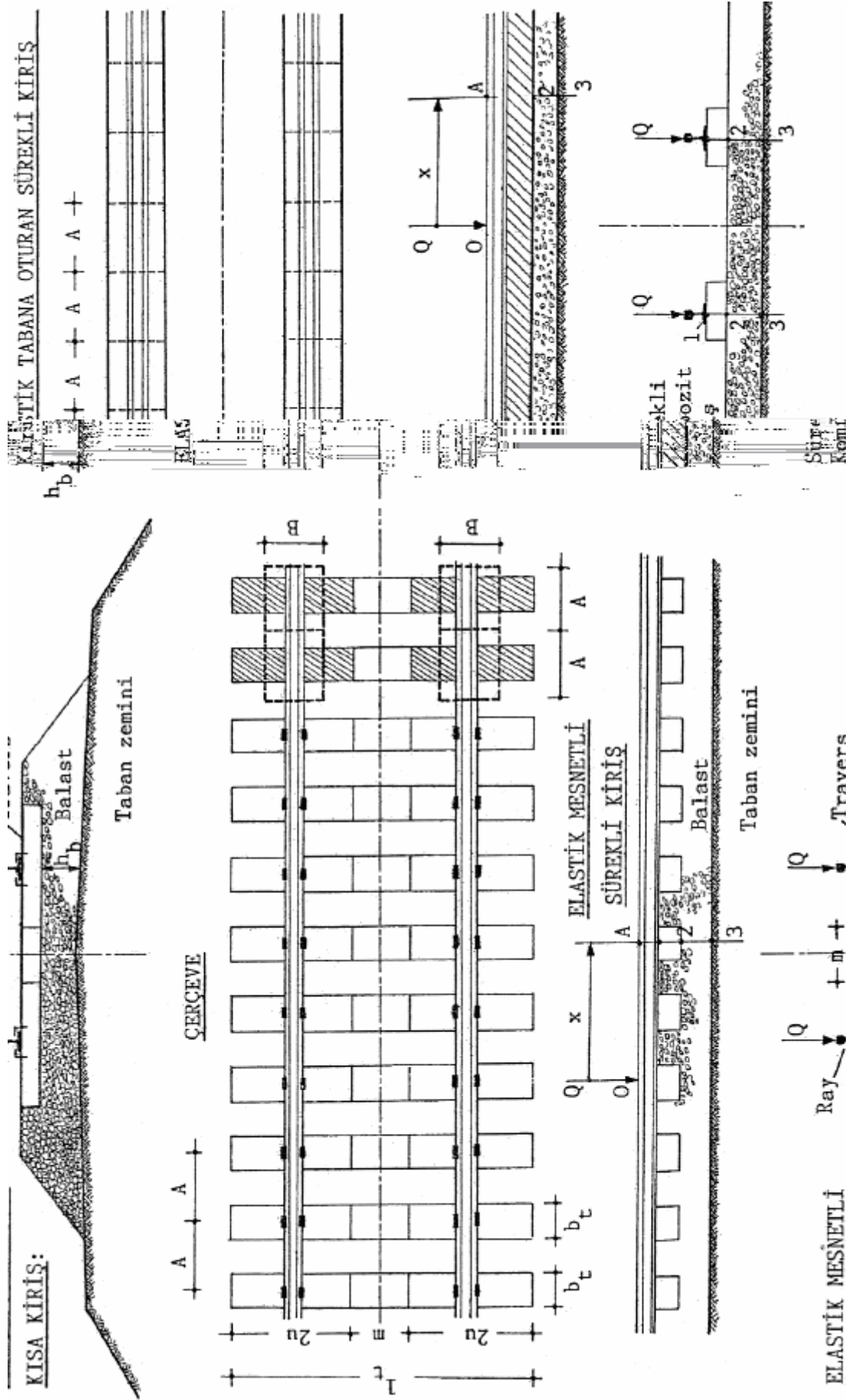
$$B = \frac{F_t}{2A} = \frac{2u \cdot b_t}{A} \quad (mm) \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1'de yer alan “2u” değeri traversin yük ileten kesimlerinin uzunluğu olup;

$$2u = \frac{l_t - l_o}{2} \quad (mm) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

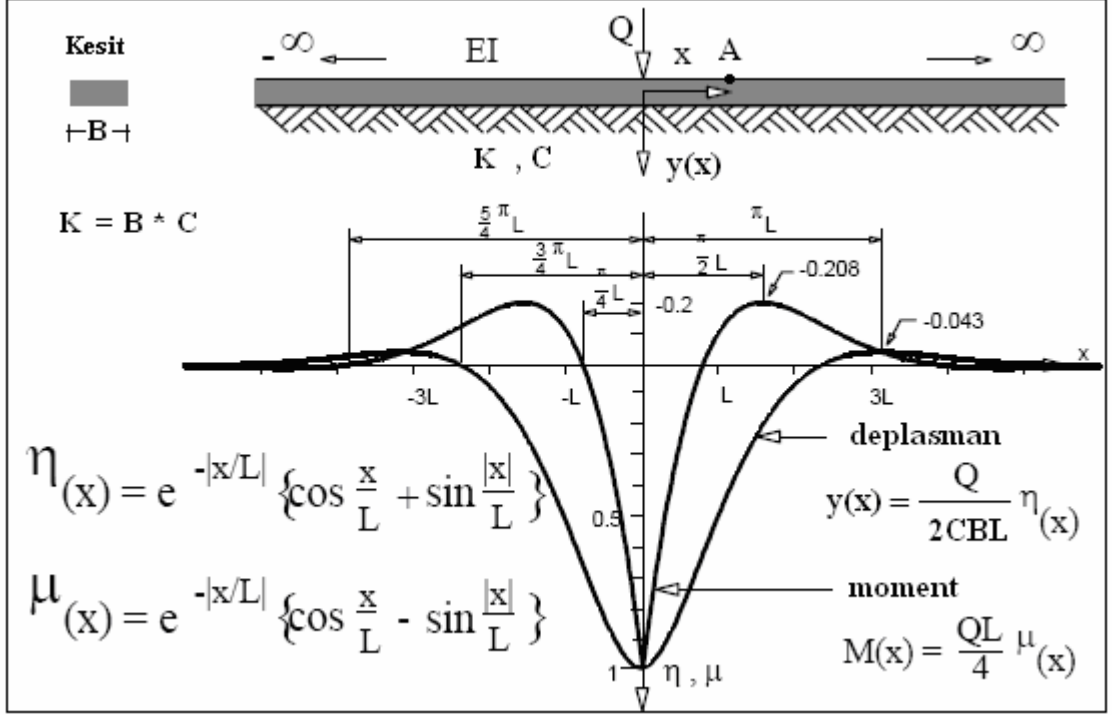
Not : Sembollerin birimleri ve anlamları Sayfa 21'de verilmiştir.



Şekil 2.15 Demiryolu Taşıyıcı Sistemi (Erel, 1989).

Kirişin elastik (karakteristik) uzunluğu, ray eğilme rijitliğine, sanal kiriş genişliğine ve elastik tabanın yatak katsayısına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{BC}} \quad (mm) \quad (2.3)$$



Şekil 2.16 Elastik temele oturan Winkler kirişi ve sabit Q tekerlek yükü etkisi altındaki Winkler kirişi için moment ve deformasyon grafiği (Esveld, 1997).

Şekil 2.16'da, Winkler hipotezine bağlı olarak dikkate alınan kiriş elemanı ile birlikte tekil Q statik dingil yükünün yol yapısına $x = 0$ noktasında etkimesi durumunda elde edilebilecek moment ve deformasyon grafikleri verilmiştir.

Q statik tekerlek yükünün etkimesi durumunda kirişin A noktasında oluşacak çökme ve çökme etki katsayısı değerlerine ilişkin eşitlikler;

$$y(x) = \frac{Q}{2CBL} \eta(x) \quad (mm) \quad (2.4)$$

$$\eta(x) = e^{-(x/L)} (\cos(x/L) + \sin(x/L)) \quad (2.5)$$

Kirişin A noktasındaki eğilme momenti ve moment etki katsayısı değerleri ise;

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) \quad (N.mm) \quad (2.6)$$

$$\mu(x) = e^{-(x/L)} (\cos (x/L) - \sin (x/L)) \quad (2.7)$$

şeklinde hesaplanır.

Kiriş tabanının A noktasında elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi ise, elastik tabanın yatak katsayısı ve düşey elastik çökme değerlerine bağlı olarak aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır;

$$P(x) = C \cdot y(x) \quad (N/mm^2) \quad (2.8)$$

Yukarıdaki sembollerin anlamları ve birimleri aşağıda verilmiştir;

Q : Statik tekerlek yükü (N)

$P(x)$: Kiriş tabanının (travers tabanının) A noktasında elastik tabana (balast tabakasına) ilettiği düşey basınç gerilmesi (N/mm^2)

$y(x)$: Kirişin (ray ve traversin) A noktasındaki düşey elastik çökmesi (mm)

$M(x)$: Kirişin A noktasındaki eğilme momenti ($N.mm$)

A : Travers aralığı (mm)

b_t : Travers taban genişliği (mm)

l_t : Travers taban uzunluğu (mm)

l_o : Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu (mm)

B : Sanal (Hayali) kiriş genişliği (mm)

L : Elastik (Karakteristik) uzunluk (mm)

F_t : Traversin balasta yük ileten taban alanı (mm^2)

C : Elastik tabanın yatak katsayısı (N/mm^3)

K : Elastik tabanın yay katsayısı (N/mm^2)

η : Çökme etki katsayısı

μ : Moment etki katsayısı

Daha önce de bahsedildiği gibi yukarıda verilen Zimmermann hesap yöntemi statik zorlanmaların hesabı için kullanılmaktadır. Zimmermann yöntemi ile elde edilen statik zorlanmalardan mevcut dinamik zorlanmaların tahmin edilebilmesi için ise, Münih Teknik Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nce Eisenmann ve ekibi tarafından yapılan uzun süreli ölçüm sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi sonucu, seyir hızı ve üstyapının bakım durumuna bağlı olarak bir “Dinamik Etki Katsayısı” geliştirilmiştir (Erel, 1989).

Dinamik etki katsayısının belirlenmesi için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\rho = 1 + t_g \cdot \bar{s} \quad (2.9)$$

ρ : Dinamik etki katsayısı

$$t_g : \text{Güvenlik katsayısı; } \begin{cases} t_g = 1 & \%68,3 \text{ güvenlik için.} \\ t_g = 2 & \%95,4 \text{ güvenlik için.} \\ t_g = 3 & \%99,7 \text{ güvenlik için.} \end{cases}$$

$$\bar{s} : \text{Değişim katsayısı; } \begin{cases} \bar{s} = 0,1\varphi & \text{İyi konumlu üstyapı için.} \\ \bar{s} = 0,2\varphi & \text{Orta konumlu üstyapı için.} \\ \bar{s} = 0,3\varphi & \text{Kötü konumlu üstyapı için.} \end{cases}$$

Değişim katsayısının belirlenmesinde kullanılan “ φ ” değeri “Hız Katsayısı” olup “V” seyir hızına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad ; \quad 60 < V \leq 200 \text{ Km/sa .}$$

$$\varphi = 1 \quad ; \quad V \leq 60 \text{ Km/sa .}$$

(2.10)

Dinamik etki katsayısına bağlı olarak ise Q_{din} , y_{din} , M_{din} , P_{din} değerleri;

$$Q_{din} = \rho \cdot Q \quad (N) \quad (2.11)$$

$$y_{din} = \rho \frac{Q}{2CBL} \eta(x) \quad (mm) \quad (2.12)$$

$$M_{din} = \rho \frac{QL}{4} \mu(x) \quad (N.mm) \quad (2.13)$$

$$P_{din} = \rho . C . y(x) = \rho \frac{Q}{2BL} \quad (N / mm^2) \quad (2.14)$$

şeklinde hesaplanır. Bu çözüm yöntemi ile demiryolu üstyapısının dinamik dingil yükleri etkisi altındaki zorlanması basit bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Bu çözüm yöntemine bağlı olarak demiryolu üstyapısının basit kiriş modeli ile SAP 2000 programında çözümü ve Winkler Hipotezi ile karşılaştırılmasına ilişkin grafikler Ek 2’de verilmiştir.

3. TİTREŞİM ANALİZİ

Sistemlerin doğal frekanslarını ve titreşime tepkilerini tespit etmek oldukça önemlidir. Çünkü rezonans durumunda genlikler sonsuza gider, gürültü ve gerilmeler artar, sistem tahrip olur. Bu bakımdan sistemlerin doğal frekans analizi yapılır ve sistem tasarımı rezonans olmayacak şekilde gerçekleştirilir.

Günümüzde imal edilen sistemler yüksek hız ve elastik yapıları itibarıyla oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvete maruzdurlar. Bu kuvvetlerin frekans bölgeleri, özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmeye değer bir konudur. Zira zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansının, sistemin doğal frekansıyla çakışması halinde, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelir. Dolayısıyla rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik durumla karşılaşmamak için tasarım safhasında titreşim analizi yapılmalıdır.

Titreşim, belirli zaman aralığıyla tekrarlanan hareket şeklinde tanımlanabilir. Diğer bir ifadeyle titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu harekettir. Buna en basit örnek basit sarkacın salınım hareketidir.

Titreşim, bir genlik ve bir frekans değeri ile gösterilir. Genlik titreşen cismin denge konumundan olan maksimum yer değiştirmesidir. Eğer genlik belirli zaman aralıklarında hep eşit aralıklarla tekrarlanıyorsa T periyodu gösterir, periyodun tersi olan $f = 1/T$ eşitliği ise sistemin frekansı olarak tanımlanır.

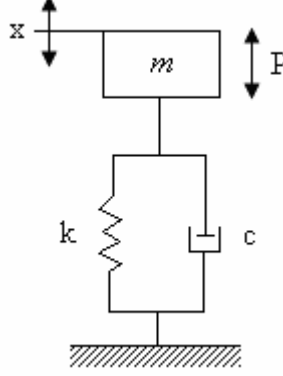
Buna göre periyot, hareketin kendini tekrar etmesi yani bir tam salınım için geçen zaman, frekans ise saniyedeki titreşim sayısıdır. Frekans (titreşim/saniye) şeklinde gösterilebileceği gibi, kısaca Hertz (Hz) olarak da gösterilir.

3.1 Serbest, Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler

Bir titreşim sistemi genellikle potansiyel enerji depolayan elemanlar (yay, kauçuk ve elastik elemanlar), kinetik enerji depolayan elemanlar (kütle, kütle atalet momenti) ve yavaş yavaş enerjiyi yutan elemanlardan (damper, amortisör, sönümleyici elemanlar) oluşur (Şekil 3.1).

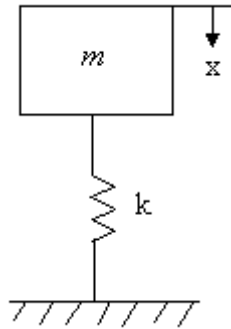
Bir sistemin titreşimi, bu sistemin potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye, kinetik enerjisinin de potansiyel enerjiye dönüşümü ile olur. Eğer bu sistemde bir sönüm elemanı varsa, titreşimin her periyodunda bir miktar enerji kaybı olacak ve bir süre sonra sistemdeki titreşim sönümlenecektir. Eğer titreşimin sürekliliği arzu ediliyorsa, bu durumda sisteme dışarıdan bir enerji verilmelidir. Ötelenen bir sistemde (m) kütlesi bir (x) konumunda iken, ($k.x$) yay

kuvvetinin, $c.(dx/dt)$ sönüm kuvvetinin ve $m.(d^2x / dt^2)$ atalet kuvvetinin etkisinde olup, bu kuvvetler hareketin tersi yönündedir. Eğer zorlanmış titreşim durumu söz konusu ise kütleye bir de zorlayıcı kuvvet etki eder (Erel, 2003).



Şekil 3.1 Çok genel bir bakışla titreşim sistemi.

Eğer bir sistem dışarıdan sürekli zorlayıcı bir etki olmaksızın başlangıçtaki denge konumunun bozulması ile kendi kendine titreşim yapıyorsa, bu hareket “serbest titreşim” olarak adlandırılır (Şekil 3.2). Serbest titreşim sırasında sistemin titreşim frekansı, sistemin doğal frekansına eşittir. Sistemlerin doğal frekansları elastiklik ve kütle özelliklerine bağlı olup dışarıdan gelen etkilerle değişmez. Zorlayıcı kuvvetin herhangi bir etkisi yoktur. Sistemlerin doğal frekanslarını ve titreşime tepkilerini tespit etmek oldukça önemlidir. Çünkü rezonans durumunda genlikler sonsuza gider, gürültü ve gerilmeler artar, sistem tahrip olur. Bu bakımdan sistemlerin doğal frekans analizi yapılır ve sistem tasarımı rezonans oluşmayacak şekilde gerçekleştirilir.



Şekil 3.2 Serbest titreşim.

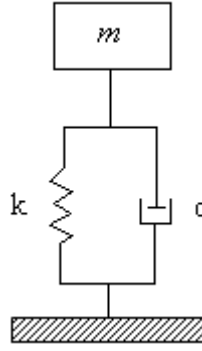
Titreşim boyunca sistemde sürtünme ya da diğer sebepler ile bir enerji kaybı olmuyorsa, böyle sistemlere “sönümsüz titreşimler” denir. Titreşim süresince sistemde enerji kaybı söz konusu ise, böyle titreşimlere de “sönümlü titreşimler” denir (Şekil 3.3). Çoğu fiziksel

sistemde var olan küçük miktardaki sönümler gözardı edilebilir, ancak rezonans bölgesi civarında titreşim analizi yapılırken sönümün göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır.

Kütlesi m (Kg) , yay katsayısı k (N/m) olan bir sistemin sönümsüz serbest titreşiminin frekansı,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad \text{ya da} \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1/\text{s}) \quad \text{ya da} \quad (\text{Hz}) \quad (3.1)$$

olup, buna “öz frekans” ya da “doğal frekans” adı verilir.



Şekil 3.3 Sönümlü serbest titreşim.

Sönümlü serbest titreşimlerin doğal frekansı ise,

$$\omega_s = \left[\omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{rad/s}) \quad (3.2)$$

m : Kütle (Kg).

ω_n : Doğal dairesel (açısal) frekans (rad/s).

ω_s : Sönümlü serbest titreşimlerin doğal dairesel (açısal) frekansı (rad/s).

c : Sönümleme katsayısı (Ns/m).

ile tanımlanır.

Sönümlü serbest titreşimin hareket denklemi:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -c \frac{dx}{dt} - kx \quad (3.3)$$

olup, bu eşitliğin çözümü için aşağıdaki (y) zaman değişkeni kullanılırsa:

$$x = y \cdot e^{-\frac{c}{2m}t} \quad (3.4)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left[\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right] \cdot y = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left[\omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right] \cdot y = 0$$

denklemini bulunur. Bu denklemin çözümünde ise,

$$\omega_s^2 = \omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 = 0 \quad , \quad \omega_s^2 < 0 \quad \text{ve} \quad \omega_s^2 > 0 \quad (3.6)$$

olmak üzere üç farklı durum söz konusudur. Bunlar;

a) Kritik Sönüm Durumu $[\omega_s^2 = 0]$

Bu durumda sistemde titreşim devam etmez, sistem hızlı olarak denge konumuna geçer. Bu durumdaki viskoz sönüm sabiti (c), “kritik sönüm sabiti” olarak bilinen aşağıdaki değeri alır:

$$c = c_{kr} = 2m\omega_n \quad \zeta = \frac{c}{c_{kr}} = 1 \quad (3.7)$$

ζ : Sönüm Faktörü.

c_{kr} : Kritik sönüm katsayısı (Ns/m).

b) Aşırı (Kritik Üstü) Sönüm Durumu $\left[\omega_s^2 < 0 \quad , \quad \left(\frac{c}{2m} \right)^2 - \omega_n^2 > 0 \quad , \quad \zeta > 1 \right]$

Bu durumda sönümleme etkisi titreşim etkisinin çok üzerinde olup, sistem titreşim yapmadan yavaşça denge konumuna geçer. Viskoz sönüm sabitinin değeri, kritik sönüm sabitinin 2 katına eşittir.

$$c = 4m\omega_n = 2c_{kr} \quad (3.8)$$

c) Zayıf (Kritik Altı) Sönüm Durumu $[\omega_s^2 > 0 \quad , \quad \zeta < 1]$

Bu durumda sönümleme etkisi ile genliği gittikçe azalan ve sonunda sıfır olan bir titreşim söz konusudur.

$$\omega_s^2 = \omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2$$

$$2m = \frac{c_{kr}}{\omega_n} \quad (3.9)$$

$$\omega_s^2 = \omega_n^2 - \left(\frac{c}{c_{kr}} \cdot \omega_n\right)^2 = \omega_n^2 (1 - \zeta^2)$$

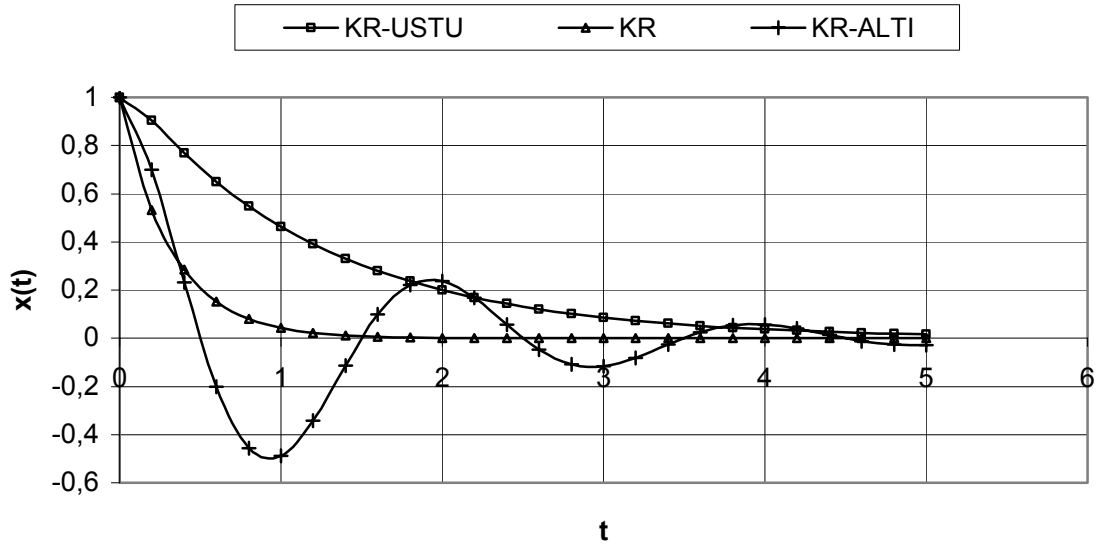
Periyodu (T) olan ardışık iki titreşim arasındaki sönümlenme miktarı, bu iki titreşimin genliklerinin birbirine oranına eşittir:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{1}{f_s} = \frac{2\pi}{\omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}} = \frac{1}{f_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$\frac{x_{n-1}}{x_n} = \exp\left(\frac{c}{2m} \cdot T\right) = \exp\left(\frac{c}{2m \cdot f_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}}\right)$$

T : Periyot (s).

f_n : Doğal frekans (Hz).



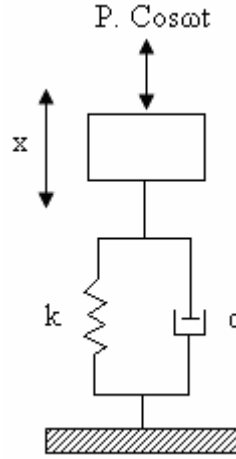
Sönümlü Titreşim Türleri ; KR: Kritik Sönüm, KR-ÜSTÜ: Kritik Üstü Sönüm,
KR-ALTI: Kritik Altı Sönüm

Şekil 3.4 Sönümlü titreşim türleri (zayıf, kritik ve aşırı sönümlü titreşimler) (Erel, 2003).

Şekil 3.4’te sönümlü titreşim türleri birarada görülmektedir. Salınım yapmadan en kısa zamanda sönümlenen durum “kritik” sönüm durumudur ($\zeta=1$). En çok salınıma sahip ve zor sönümlenen sistem “kritik altı” sönüm ($\zeta<1$), az bir salınım hareketi ile sönümlenen sistem ise “kritik üstü” sönüm ($\zeta>1$) koşullarındadır. Eğer bir sistemde sönüm yok ($\zeta=0$) ise bu sistem teorik olarak sonsuza kadar titreşecektir.

3.2 Sönümlü Zorlanmış Titreşimler

Eğer bir sistem dışarıdan tahrik eden zorlayıcı bir etki (kuvvet veya moment) altında titreşiyorsa, bu titreşim hareketi “zorlanmış titreşim” adını alır. Bir dizel motorunun titreşimi bu tip titreşimlere örnek olarak verilebilir (Şekil 3.5). Zorlanmış titreşimlerin frekansı, zorlayıcı kuvvet veya zorlayıcı momentin frekansına eşittir.



Şekil 3.5 Zorlanmış sönümlü titreşim.

3.2.1. Sabit Genlikli Harmonik Kuvvetle Zorlanmış Sistem

Genliği (P) ve dairesel (açısal) frekansı (ω) olan bir $P.Cos\omega t$ harmonik kuvveti ile zorlanmış titreşimin genliği,

$$x = P \frac{1}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (m) \quad (3.10)$$

değerine eşittir. Bu bağıntıda,

$$x_{st} = \frac{P}{k}, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m}, \quad \eta_\omega = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad k = m\omega_n^2 = \frac{2m\omega_n}{2} \cdot \omega_n = \frac{c_{kr}\omega_n}{2} \quad (3.11)$$

değerleri yerine konursa, (x/x_{st}) oranından R “Genlik Oranı (Büyütme Katsayısı)” elde edilir:

$$R = \frac{x}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta_{\omega}^2)^2 + 4\zeta^2 \eta_{\omega}^2}} \quad (3.12)$$

x_{st} : Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sistemin statik yer değıştirmesi (m).

η_{ω} : Frekanslar oranı.

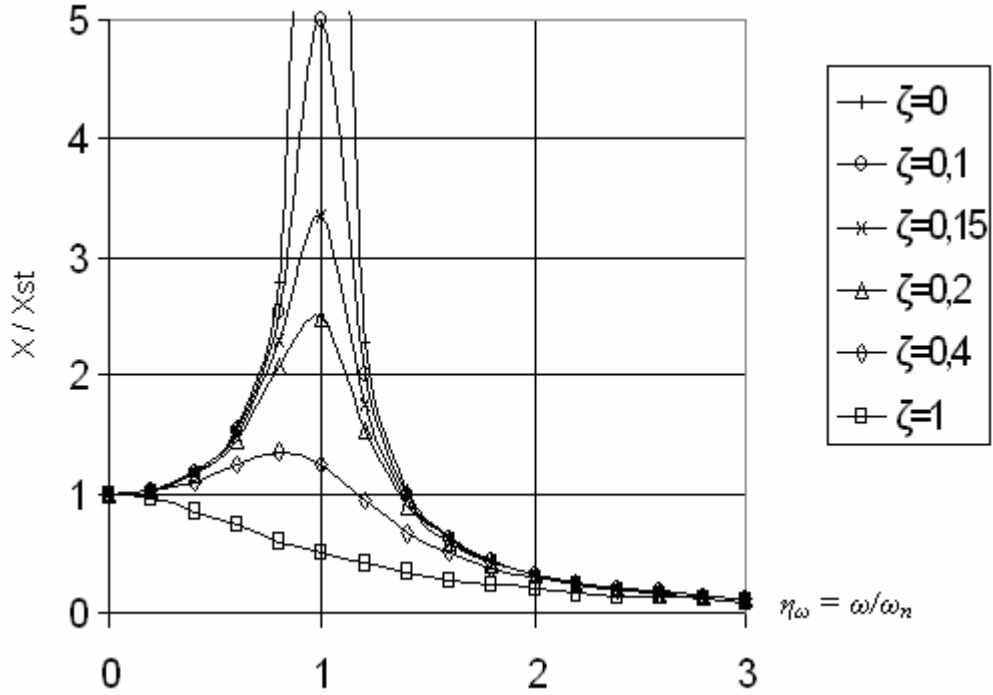
Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış titreşimde maksimum genlikler oranı,

$\eta_{\omega} = \frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ noktasında olup, aşağıdaki değere eşittir:

$$R_{\max} = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.13)$$

Küçük sönüm durumlarında, ($\zeta < 0,2$) , η_{ω} değeri bire çok yakın olduğundan,

$$(R_{\max})_{\eta_{\omega}=1} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{c_{kr}}{2c} = \frac{m\omega_n}{c} = \frac{\sqrt{km}}{c} \text{ alınabilir.}$$



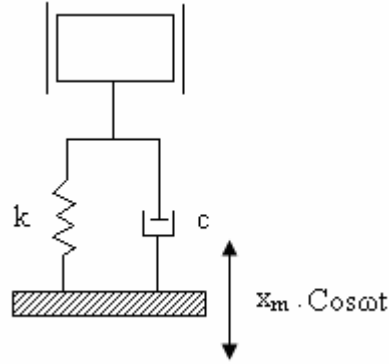
Şekil 3.6 Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta_{\omega} = \omega/\omega_n$) ile değışimi (Erel, 2003).

$\eta_\omega = 1$ civarında genliklerin büyük değerler alması sonucu, bu durumda çalışan sistem elemanlarında yorulma kırılmaları olduğundan, “Rezonans Yeri” denilen bu bölgedeki titreşimlerden kaçınılması gerekir (Şekil 3.6). Rezonans durumunda sistemin genliği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$x = \frac{P}{2m\omega_n} t \sin(\omega_n t) \quad (m) \quad (3.14)$$

3.2.2. Mesnetin Hareketi İle Zorlanmış Sistem

Mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim şekli genel olarak Şekil 3.7’deki gibidir.



Şekil 3.7 Mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim.

Mesneti hareket ettiren kuvvet,

$$P = x_m \sqrt{k^2 + c^2 \omega^2} \quad (3.15)$$

x_m : Mesnetin genliği (m)

olarak (3.9) genlik bağıntısında yerine konulursa,

$$x = x_m \frac{\sqrt{k^2 + c^2 \omega^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (3.16)$$

x genliğinin denklemi elde edilir.

Mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim için (x/x_m) oranından R “Genlikler Oranı (Büyütme Katsayısı)” 3.17 eşitliği ile elde edilir:

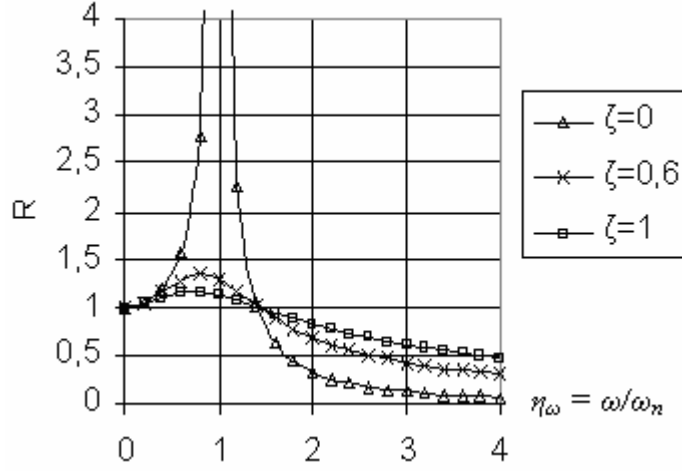
$$R = \frac{x}{x_m} = \frac{\sqrt{1 + 4\zeta^2 \eta_\omega^2}}{\sqrt{(1 - \eta_\omega^2)^2 + 4\zeta^2 \eta_\omega^2}} \quad (3.17)$$

ve (m) kütleinin hareketli mesnete göre görelî (x_g) hareketi için Genlikler Oranı,

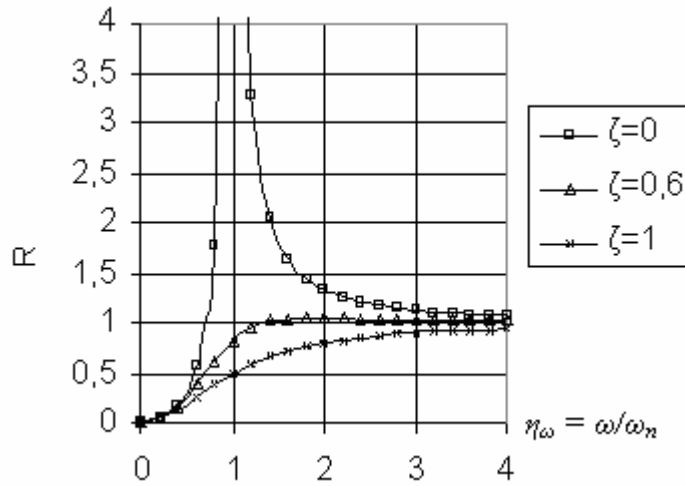
$$R = \frac{x_g}{x_m} = \frac{\eta_\omega^2}{\sqrt{(1-\eta_\omega^2)^2 + 4\zeta^2\eta_\omega^2}} \quad , \quad \eta_\omega = \frac{\omega}{\omega_n} \quad , \quad \zeta = \frac{c}{c_{kr}}$$

eşitliği elde edilir.

Şekil 3.8’de sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü titreşimde ($\zeta > 0$) Büyütme Katsayısı’nın frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi ve Şekil 3.9’da da sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşimde ($\zeta > 0$) Büyütme Katsayısı’nın frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta_\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi (Erel, 2003).



Şekil 3.9 Sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşimde büyütme katsayısının frekanslar oranı ($\eta\omega = \omega/\omega_n$) ile değişimi (Erel, 2003).

Dinamik sistemlerin yüksek hız ve elastiklik özelliğinden kaynaklanan titreşim potansiyeli tasarım esnasında incelenip gerekli tedbir alınmadığı takdirde, çalışma esnasında sistem elemanlarının erken yorulmasına ve kırılmasına sebep olur. Genelde bir sistemin titreşimlerini incelemek ve gerekli tasarım değişikliğini yaparak koruyucu tedbir almak, titreşim açısından kötü bir sistemin iyileştirilmesinden daha kolaydır. Dolayısıyla, sistemler henüz tasarım safhasında iken genel bir titreşim analizine tabi tutulmalı ve titreşimleri kabul edilebilecek ölçüler içinde tasarımları yapılmalıdır. Öte yandan imal edilmiş sistemlerin de sağlıklı bir titreşim analizi ile titreşim izolasyon ve kontrolünü yapmak mümkündür.

4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK ANALİZİ

Demiryolu yapısının dinamik davranışı tamamen titreşim olayı ile ilişkilidir. Taşıtların yol üzerinde hareketi esnasında oluşan gürültü ve titreşimi azaltmak ve titreşim sonucu taşıt ve yolda oluşacak hasarları en aza indirebilmek için, taşıt-yol sistemine ilişkin dinamik davranışın çok iyi bir şekilde tanımlanması gerekir. Bölüm 2.4'te bahsedildiği gibi demiryollarındaki titreşim analizi, diğer bir deyişle demiryolu yapısının dinamik analizi konusunda bugüne kadar çok sayıda model ve çözüm teknikleri geliştirilmiştir. Günümüzde de demiryollarının dinamik stabilitesi konusundaki çalışmalar sürdürülmektedir.

Dinamik analiz konusuna değinmeden önce demiryolu yapısının dinamik modellemesi ile yolun dinamik davranışında etkili olan farklı frekans aralıklarındaki taşıt-yol etkileşimi ve taşıt-yol etkileşimi sonucunda ortaya çıkabilecek problemlerle ilgili bir inceleme sunulacaktır.

4.1. Taşıt ve Yol Bileşenlerine İlişkin Dinamik Özellikler

Taşıt ve yol sistemine ilişkin dinamik davranışı tanımlamadan ve dinamik analiz için gerekli çözümleme teknik ve modellemelerine geçmeden önce taşıt ve yol bileşenlerine ilişkin dinamik özelliklere kısaca değinmek gerekir.

Demiryolu taşıtlarının dinamik davranışları, taşıtın eğilmesi ve dengelenmesi açısından düşünüldüğü zaman oldukça önemlidir. Eğer taşıt yolcu katariysa taşıtın dinamik davranışı aynı zamanda yolcu konforu açısından da önemlidir. Taşıt süspansiyonları; genellikle taşıt bojisinin rijit bir yapı şeklinde olmasını sağlayacak biçimde tasarlanırlar. Taşıt süspansiyonlarının bu yapısı özellikle 10 Hz civarında ve altındaki frekans değerlerinde oluşur. Bu durum bir yandan taşıtta oluşacak titreşimi izole ederek yolcuların konforunu sağlamayı amaçlarken, diğer yandan da özellikle yaylandırılmamış kütlelerin etkisini azaltarak tekerlek/ray temas yüzeyindeki dinamik yükleri minimuma indirmeyi amaçlamaktadır. Yaylandırılmamış kütleler; tekerlek takımı, yataklar, dingil aksına asılı motor ve aktarma sistemi/şanzıman/transmisyon kütleleridir. Gerçekte, 10 Hz civarındaki frekans değerlerinde yolun davranışı rijit bir yay gibidir. Bununla beraber, 20 Hz'in üzerindeki frekanslarda, taşıt amortisörü taşıtın yaylandırılmamış kütleleri dışında kalan diğer elemanlarını izole etmesine karşın, yaylandırılmamış kütleleri tam olarak izole edemediğinden, yolun ataletinin önemi artmaya başlar. Taşıt dinamiğinin daha az önemli olduğu ve yol dinamiğinin gittikçe önem kazandığı yerde, mevcut amaçları gerçekleştirmek doğrultusunda ilgilenilmesi gereken frekans değerleri pratikte 20 Hz'in üstündeki değerler olarak tanımlanır. Ayrıca, 0-500 Hz frekans aralığındaki titreşimler, boji ve yaylandırılmamış

kütlelerin dinamik özelliklerinden ötürü önem arz etmektedir. Bu aralıktaki frekans değerlerinde oluşan titreşimler dingillerde ve fren tertibatında yorulmadan kaynaklanan hasara yol açabilir (Yılmaz, 2004).

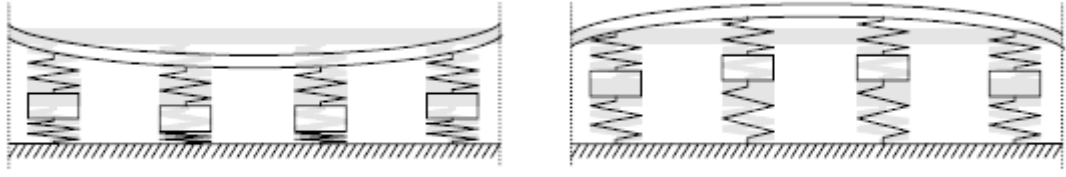
Yol bileşenlerine ilişkin dinamik özellikler yol bileşenlerinin doğal frekansları ile ifade edilebilir. Taşıt-yol dinamik etkileşimleri sonucu oluşan titreşim frekansları, yol ve altyapının doğal frekansları ile örtüştüğü durumda rezonans tehlikesi mevcuttur. Bu nedenle yol bileşenlerinin dinamik özellikleri, diğer bir deyişle titreşim özellikleri ve doğal frekansları çok iyi tanımlanmalıdır (Çizelge 4.1).

Düşey titreşim modlarına göre yol ve yol bileşenlerinin rezonans frekansları, yol yapısının dinamik davranış ve özelliklerini iyi bir şekilde anlamak ve tanımlamak açısından önemlidir. Düşey titreşim modları için rezonans frekansı değerleri balastlı üstyapı için 40-140 Hz arasında değişmektedir. Rijit üstyapı için ise yolun rezonans frekansı balastlı üstyapıya göre daha düşüktür. Ray için rezonans frekansı 250-1500 Hz arasında değişmektedir. Ray altı levhası için düşey titreşim modunda oluşan rezonans frekansı 100-400 Hz arasındadır. Mesnet (pin-pin) rezonans frekansı 400-1500 Hz arasında değişmektedir. Mesnet rezonans frekansı ray kütlesi ve rayın eğilme ve kayma özelliklerinden etkilenmektedir. Traversler titreşim sönümleyici elemanlar olup anti-rezonans frekansları yaklaşık 300 Hz civarındadır (De Man, 2002). Şekil 4.1’de yol ve yol bileşenleri için rezonans frekanslarına ilişkin düşey titreşim modları gösterilmiştir.

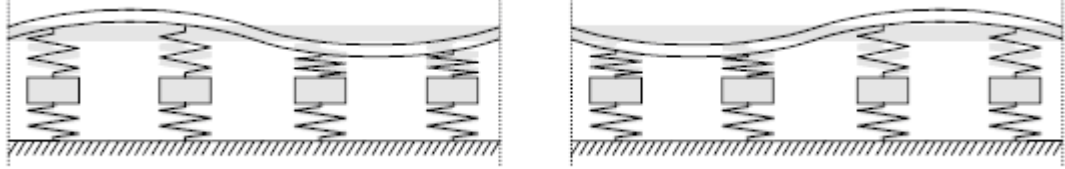
Özetlemek gerekirse, rezonans frekansındaki yol titreşimleri, yol bileşen özellikleri ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi açısından oldukça etkilidirler.

Çizelge 4.1 Üstyapı tipleri için ilgili rezonans frekansları (De Man, 2002).

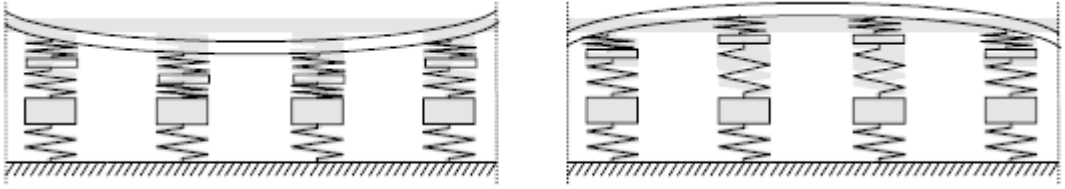
Rezonans Frekansları (Hz)	Balastlı Üstyapı	Rijit Üstyapı			
		İndirekt Bağlı Yol	Direkt Bağlı Blok Yol	İndirekt Bağlı Blok Yol	Gömülü Raylı Yol
f_t	40-140	100-400	40-140	40-140	-
f_s	-	<80	<80	<80	<80
f_r	250-1500	250-1500	250-1500	250-1500	100-450
f_{b-a}	80-300	180-1500	80-700	80-300	-
f_{pp}	500-1200	500-1200	500-1200	500-1200	-
f_t : Yol rezonans (doğal) frekansı f_s : Altyapı rezonans frekansı f_r : Ray rezonans frekansı f_{b-a} : Travers, blok ve ray altı levhası anti-rezonans frekansı f_{pp} : Mesnet rezonans frekansı					



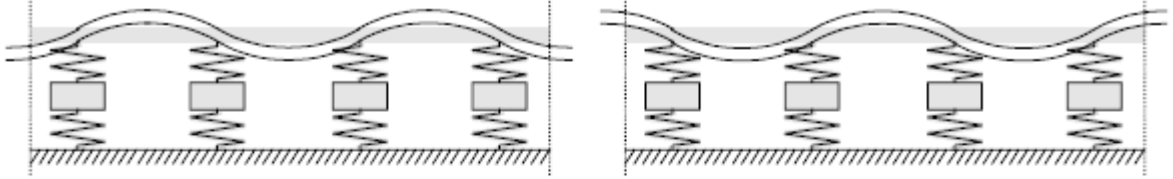
Yol rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu



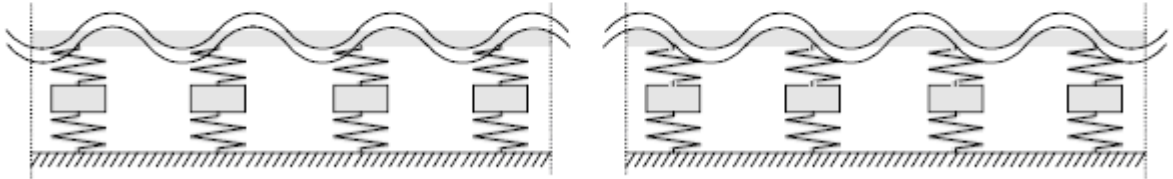
Ray rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu



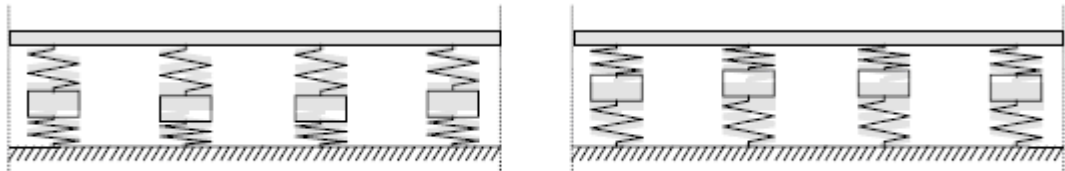
Ray altı levhası rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu



Birinci derece mesnet (pin-pin) rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu



İkinci derece mesnet (pin-pin) rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu



Travers anti-rezonans frekansına ilişkin düşey titreşim modu

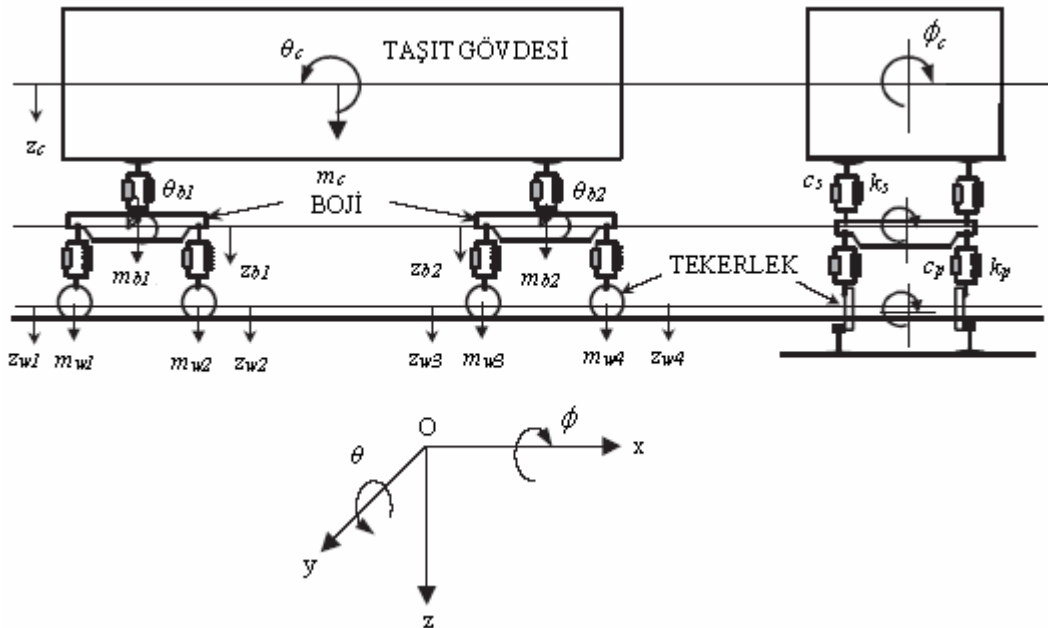
Şekil 4.1 Yol ve yol bileşenleri için rezonans frekanslarına ilişkin düşey titreşim modları
(De Man, 2002).

4.2. Taşıt - Yol Sisteminde Oluşabilecek Dinamik Problemler

Taşıt dinamik bir sistem olup, kendisine etkiyen iç ve dış kuvvetlerden dolayı titreşime maruz kalır. Taşıt titreşimlerine neden olan faktörler; yoldaki pürüzlülükler, tekerleklerdeki aplatilik gibi düzensizlikler, tekerleklerdeki rijitlik değişimi ile, güç ve moment ileten elemanlardaki (dingilin tahrik ve çekim motoru, dişliler, vb.) dengesizliklerdir. Taşıt titreşimlerini etkileyen faktörler ise; süspansiyon sistemine ilişkin özellikler, dingil mesafesi, dingil ağırlığı, yol ve tekerlek özellikleri şeklinde sıralanabilir.

Demiryolu taşıtının seyri sırasında ortaya çıkan ve zararlı olan üç tür hareket mevcuttur (Şekil 4.2) :

- Ruli hareketi: Ox eksenini etrafındaki dönme hareketidir. Yükselti (nivelman) bozuklukları, yanal şoklar (kurba geçişleri) ile oluşur. Bu hareket rezonans tehlikesi oluşturur.
- Galop hareketi: Oy eksenini etrafındaki dönme hareketidir. Rayların birleşim yerlerindeki geçişlerde (conta, kaynak geçişlerinde) ve yükselti (nivelman) bozukluğu bulunan kesimlerde oluşur. Ruli hareketi gibi bu hareket düzensizliği de rezonans oluşumuna sebep olabilir.
- Lase hareketi: Oz eksenini etrafındaki dönme hareketidir. Bandaj konikliği ve yoldaki düzensizlikler nedeniyle meydana gelen sinüsoidal harekettir.



Şekil 4.2 Demiryolu taşıt modeli ve demiryolu taşıtlarının parazit hareketleri (Kumaran ve diğ., 2002).

Bu hareketlerden ruli ve galop hareketleri taşıttaki asılı yükleri etkiler. Galop, ruli ve lase hareketleri yol ve taşıtta dinamik etkileşimlere neden olarak hasarlara yol açmaktadır. Ayrıca bu hareket düzensizlikleri, sürüş kalitesi ve yolcu konforunu da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu hareketler sonucu oluşan dinamik etkileşimleri minimuma indirmek için, yolun en iyi şekilde tasarlanması ve taşıtın yol ile uyumlu olması gerekir.

Demiryollarında titreşimin oluşma nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

- a) Tekerleklerin engellerde (conta gibi) sekerek sıçraması, lase hareketi, galop hareketi gibi düzgün olmayan hareketler. Bu hareketlerin oluşturduğu frekanslar 10 Hz'den küçük olup, azaltmak için fazla bir şey yapılamaz. Bunların titreşim enerjileri genellikle düşüktür,
- b) Dingil takımının düşey doğal eğilme titreşimleri: Bu titreşimlerin frekansları 45-90 Hz arasındadır,
- c) Tekerleklerdeki eksantriklik, balanssızlık ve aplatilik gibi düzensizlikler (0-1500 Hz),
- d) Yaylandırılmış tekerleklerin visko-elastik titreşimlerinin yola aktarılması (0-500 Hz),
- e) Periyodik tekerlek geçişlerinin visko-elastik tabana oturan yol çerçevesinde (raylar ve traverslerde) oluşturduğu sönümlü titreşimler (0-1500 Hz),
- f) Tekerleklerin contalar, kaynak yerleri, makaslar, hemzemin geçitler ve ondülasyonlu raylar üzerinden geçişleri ile uyarılan ve yola aktarılan titreşimler (0-1500 Hz).

Taşıt ve yol hatalarının, düzensizliklerin bulunmadığı durumlarda, frekansları 40-100 Hz arasında değişen titreşimler oluşur. Yolun ve altyapının doğal frekansları da bu değerlerde olduğundan, uygun sönümleyiciler kullanılmazsa rezonans olayı meydana gelebilir ki, bu da yolun ve altyapının aşırı zorlanmasına neden olabilir. 1500 Hz'e kadar ulaşabilen yüksek frekanslı titreşimler ise, daha çok taşıt ve yoldaki düzensizliklerden, aşınmalardan kaynaklanır. Bu titreşimlerin en büyük etkisi gürültü olarak ortaya çıkar. Yüksek frekanslardaki tekerlek/ray etkileşiminin en önemli sonucu gürültü olduğu için, ilgilenilen maksimum frekanslar insanın duyma limiti olan 5000 Hz civarındadır.

Mevcut yollarda seyir hızlarının, dingil yüklerinin, trafik miktarının ve çekim kuvvetinin artmasıyla birlikte, taşıt ve yol etkileşimi konusunda birçok yeni sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu sorunları anlayabilme ve çözüm üretebilme gereksinimi, araştırmaları taşıt ve yolun dinamik davranışları üzerine yönlendirmiştir. Çizelge 4.2'de, taşıt-yol etkileşimi sonucunda değişik dinamik problemlerin olduğu bölgeler ile frekans alanları özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Orta ve Yüksek Frekanslarda Taşıt-Yol Etkileşimi Problemleri (Knothe, 2001).

No	Problem Bölgesi	Frekans Bölgesi (Hz)
1	TAŞIT (a) Stabilité (b) Kurbada seyir-sürüş koşulları (c) Konfor	0 - 30
2	BOJİ VE YAYLANDIRILMAMIŞ KÜTLELER (a) Tekerlek yatakları (b) Dingillerin, yatakların ve fren elemanlarının işletme (yorulma) mukavemetleri (c) Dingillerin işletme (yorulma) mukavemeti (d) Boji çerçevelerinin işletme (yorulma) mukavemeti	0 - 200
3	TEKERLEK VE RAY YUVARLANMA YÜZEYİ PROBLEMLERİ (a) Aplatilikler (Tekerlek) ve patinaj-kayma yerleri (ray) (b) Yuvarlak olmayan tekerlekler (poligon şeklinde yuvarlanma yüzeyi) (c) Tekerlek poligonlaşma nedenleri (d) Tekerlek ondülasyonu (e) Uzun dalgalı ray ondülasyonu (f) Kısa dalgalı ray ondülasyonu (2 – 10 cm) (g) Conta yerleri, kötü taşlanmış kaynak yerleri (h) Yuvarlanma kontakt yorulması (Rolling contact fatigue) hasarları (i) Eş şekilli tekerlek ve ray aşınmaları	0 – 1500 50 - 200
4	HAT BİLEŞENLERİ (a) Rayların işletme (yorulma) mukavemeti (b) Ara mesnetler (c) Beton traversler (d) Balast çökmesi ve yol durumunun kötüleşmesi (e) Altyapıda çökmeler	0 - 1500
5	RAY – TEKERLEK GÜRÜLTÜSÜ (a) Yuvarlanma gürültüsü (b) Çarpma şeklindeki zorlanma gürültüleri (c) Kurbalarda sürtünme gürültüsü	0 - 5000
6	GÜRÜLTÜ VE TİTREŞİMLER (a) Altyapıda titreşim yayılması (b) Köprülerde titreşim ve gürültü yansıması (c) Gürültü emisyonu (d) Vagon kasalarında gürültü ve yansıma	0 - 500

Çizelge 4.2’de de görüldüğü gibi, taşıt-yol dinamik etkileşimleri sonucu oluşan başlıca problemler; aşınma, (abrasiv aşınma, adhesiv aşınma, kabuklanma, ondülasyon, plastik akma) balast çökmeleri ve balast hasarları sonucu yol bozukluklarının artması, tekerlek yassılaşması (aplatilik) ve gürültü şeklinde sıralanabilir. Şimdi bu problemleri kısaca açıklayalım.

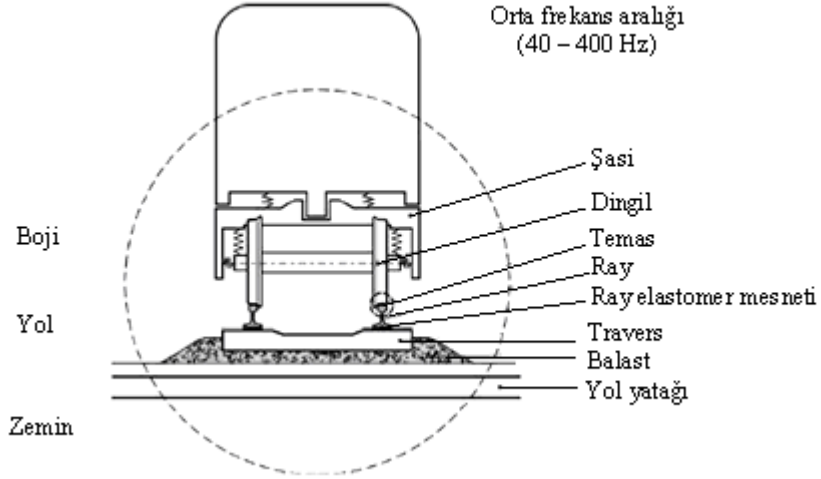
Aşınma, hem ray hem de tekerlek yuvarlanma yüzeyinde karşılaşılan bir problemdir. Taşıt-yol

dinamik etkileşimi sonucunda oluşan aşınma türleri; abrasiv aşınma, yuvarlanma kontakt yorulması sonucu oluşan; adhesiv aşınma, kabuklanma, ondülasyon (dalgalı aşınma) ve plastik akma şeklinde sıralanabilir. Abrasiv aşınma, tekerleğin ray üzerinde ideal yuvarlanma yapmaması sonucunda kayma sürtünmesi ile oluşmaktadır. Yuvarlanma yüzeyindeki aşınmalar, aşınma sonrası oluşan yeni profil şekilleri ve seyir özellikleri açısından önemlidir. Adhesiv aşınma ise kaynaklanma sonucu ortaya çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ray ve tekerleklerin kaynaklanması, diğer bir deyişle birbirine kenetlenmesi ve bunun sonucunda tekerleğin raydan levha kopartması şeklinde oluşur. Kabuklanma, kayma gerilmeleri etkisinde oluşan yorulma çataklarının sonucunda oluşmaktadır. Plastik akma, rayda oluşan gerilmelerin rayın akma mukavemetini aşması sonucunda karşılaşılan bir aşınma türüdür. Raylı sistemlerde karşılaşılan diğer bir aşınma türü olan ondülasyon (dalgalı aşınma) ise “ray üst yüzeyinde periyodik biçimlerde oluşan düzlemsel bozukluklar” olarak tanımlanabilir. Ray yuvarlanma yüzeyinde birbirini izleyen parlak tepeler ile koyu renkli mat vadiler şeklinde bir görünüm oluşturmaktadır. Bu aşınma türü trafik güvenliği açısından tehlikeli değildir ancak taşıt ve yol elemanlarında yüksek ivmeli titreşimlere yol açarak, ek dinamik zorlanmalar doğurmakta, yolun kısa sürede bozulmasına ve bakım masraflarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca ondülasyon oluşumu, yüksek frekanslı titreşimlerde gürültü oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum özellikle kentiçi raylı sistemlerde önem kazanmaktadır. Aşınma olayı quasi-statik ya da düşük frekanslı simülasyon modelleri ile araştırılmaktadır. Ancak aşınma sonrası profillerin incelendiği modeller orta ve yüksek frekanslara göre yapılmalıdır.

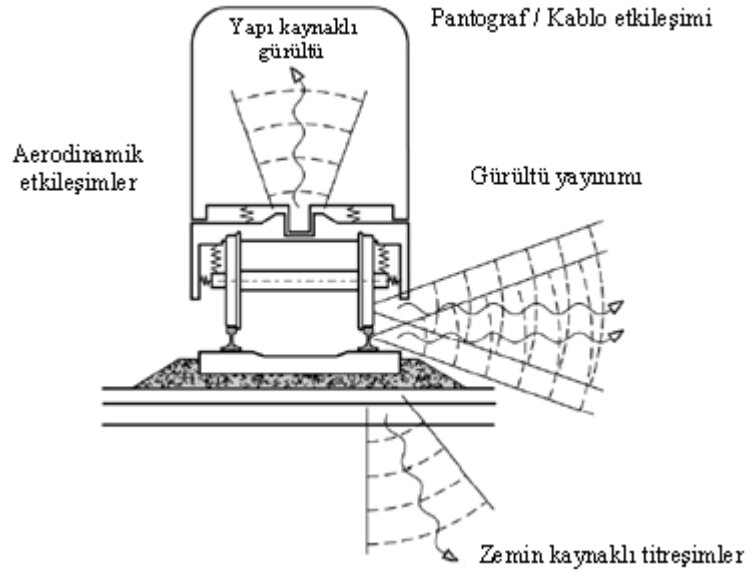
Üniform olmayan balast çökmeleri ve balast hasarları ve bunun sonucu olarak yol bozukluklarının artması, tüm demiryolu işletmelerinin sürekli yaşadıkları bir problemdir. Bu sorunun birincil nedeni, yollarda travers altı boşluklarının, üniform sıkıştırılmamış balast tabakasının, köprü geçişlerinin, conta ve kaynak yerlerinin ve ondülasyonlu yol kesimlerinin vb. neden olduğu homojensizliklerdir. Bu oluşum, orta ve yüksek frekanslı titreşimler oluşturarak çökmelerin ve hasarların daha da artmasına yol açar ve yoğun bakım gereksinimi doğurur. Balast çökmeleri de ray ondülasyonu gibi, dinamik olaylarla ve uzun sürede oluşan hasarların birbirlerini karşılıklı tetiklemesi sonucu oluşan karakteristik bir hasar şeklidir. Balast çökmelerinin oluşumu konusunda değişik araştırmalar yapılmaktadır. Bu konudaki en basit şekil, çökmeler ile üzerinden geçen tekerlek sayısı arasındaki fonksiyonel ilişkidir. Daha sonraları farklı yük genlikleri de modele katılmıştır. Bazı araştırmalarda balast bir granüler malzeme olarak, bazılarında bir kütle sistemi olarak kabul edilmiştir. Balast bakımı yol bakım maliyetlerinin önemli bir kalemini oluşturduğundan, bu konuda önemli çalışmalar yapılması ve kullanım ömrü için modeller geliştirilmesi beklenmektedir.

Taşıtın ve yolun dinamik davranışının modellenmesinde en çok ilgilenilen ve izlenen tekerlek düzensizliği, tekerlek yassılaştırmasıdır (aplatılık). Bu düzensizlik türü bir tür aşınma olup, frenleme esnasında tekerleklerin bloke olması ve aynı zamanda quasi-statik bir olguyla oluşur. Ancak bir yassılaştırılmış (aplati) tekerleğin etkilerini değerlendirebilmek için, taşıt ve yolun orta ve yüksek frekans bölgesindeki dinamik davranışlarının modellenmesi gerekir. Orta frekans bölgesindeki dinamik dingil ve yol davranışlarının modellenmesinde en kuvvetli tepkiler tekerlek aplatiliklerinden oluşur. Bu konudaki deneysel araştırmalar, dinamik zorlanmaların statik zorlanmalardan açıkça daha fazla olduğunu ve akma limitini aşan değerlere ulaştığını göstermiştir (Knothe 2001).

Raylı sistemlerde karşılaşılan diğer bir problem ise, tekerlek-ray etkileşimi sonucu oluşan ve dinamik bir olay olan gürültü oluşumudur (Şekil 4.4). Gürültü oluşumu tekerlek-ray yuvarlanma yüzeyindeki bozukluklardan ve özellikle dar kurplardaki yapışma-kayma (stick-slip) veya yuvarlanma-kayma (roll-slip) olaylarından kaynaklanır. Raylı sistemlerde gürültü oluşumu üzerine yapılan çalışmalarda, kurulan modellerde insanın duyma limiti olan 5000 Hz değeri dikkate alınarak, 0-5000 Hz frekans aralığı için çözümlemeler yapılmaktadır.



Şekil 4.3 Taşıt - yol bileşenleri ve ilgilenilen frekans aralıkları (Popp ve diğ., 2005).

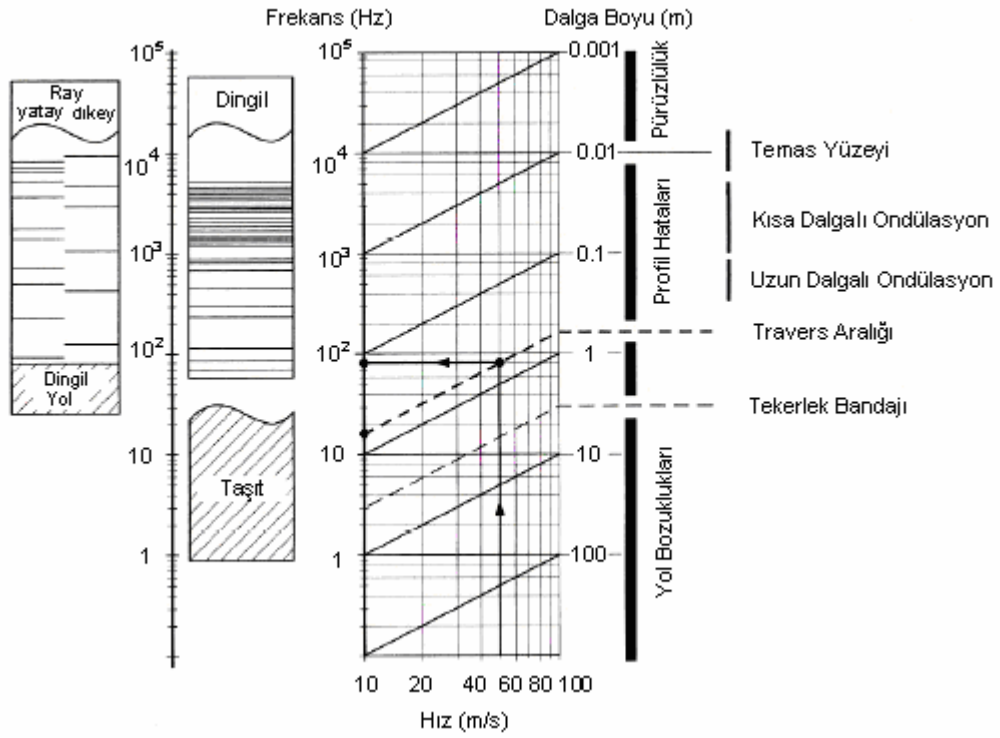


Şekil 4.4 Taşıt - yol etkileşimi sonucu gürültü ve titreşim oluşumu (Popp ve diğ., 2005).

Özetlemek gerekirse; taşıt ve yolun karşılıklı dinamik etkileşimleri sırasında ortaya çıkan dinamik yükler, bir yandan yolda yorulma hasarları oluştururken, aynı zamanda taşıt elemanlarına da zarar vermektedir. Olası problemlerin önlenmesi ya da en azından azaltılması, bakım masraflarında ve kullanım ömrü maliyetlerinde de önemli ölçüde azalma sağlamaktadır. Ayrıca dinamik zorlanmalar altyapı üzerinden yayılan gürültü ve titreşimlere neden olurlar. Gürültü ve titreşimlerin azaltılması çevre sağlığı açısından da zorunlu bir gereksinimdir. Dolayısıyla taşıt ve yol dinamiği açısından 5000 Hz (gürültü oluşumu) frekans değerine kadar güvenle kullanılabilecek, taşıt-yol etkileşimlerini tanımlayabilecek dinamik modellerin kurulması ve bu modeller doğrultusunda dinamik analizlerin yapılması oldukça önemlidir.

Şekil 4.5'te demiryollarında seyir hızı (m/s), frekans (Hz) ve dalga boyu (m) arasındaki ilişki gösterilmiştir. Eğik doğrular dalga uzunluğunu göstermektedir. Doğal ve rezonans frekansları şeklin solunda gösterilmiştir. Örneğin; travers aralığı 60 cm olan bir yolda 36 km/saat (10 m/s) hızla seyreden bir tren, 16.6 Hz frekansında bir titreşim oluşturur. Bu da taşıtın doğal frekansına karşıt gelir. Taşıt hızı 180 km/saat (50 m/s) ise tahrik frekansı 83 Hz olup, bu da rijit bir yolda dingil, ray ve traversin rezonansına karşıt gelmektedir (Knothe, 2001).

Taşıt - Yol Etkileşim Problemleri



Şekil 4.5 Demiryollarında seyir hızı (m/s), frekans (Hz) ve dalga boyu (m) arasındaki ilişki (Knothe, 2001).

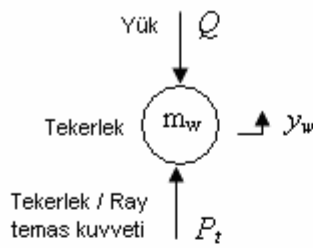
4.3. Taşıt için Dinamik Modeller

Dinamik çalışmalarda ele alınan taşıt modeli tipi; esas olarak problemde dikkate alınan ilgili frekans aralığına bağlıdır. Düşük frekans aralığı için (20 Hz'ten düşük frekanslar), sistemdeki esas problem taşıtların kurbalardaki hareketi, stabilite, yolcu ve yük için sürüş kalitesidir. 10 Hz gibi düşük frekans aralığında, yol oldukça rijit bir yay gibi davranarak taşıt davranışını düşey yönde fazla etkilememektedir.

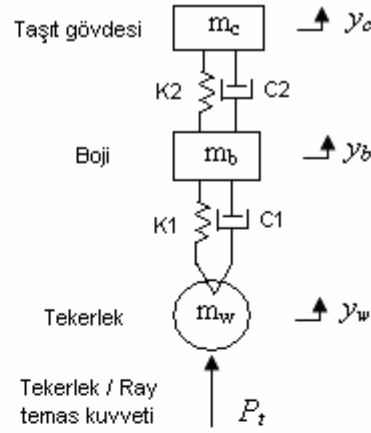
Genel olarak analizlerde taşıt, yaylandırılmış kütle ve yaylandırılmamış kütle olmak üzere iki kısımda incelenir. Yaylandırılmış kütle sistemi; taşıt gövdesi ve bojiyi içerir. Yaylandırılmamış kütleler; tekerlek takımı, dişliler, dingilin çekim ve tahrik motorunu içerir. Şekil 4.6'da dinamik analizler için kullanılabilecek taşıt modelleri gösterilmiştir. Model I'deki, bir serbestlik dereceli sistem sadece sabit bir yük etkisindedir. Model II üç serbestlik derecesine sahip olup, yaylandırılmamış ve yaylandırılmış kütleli tek tekerlekten oluşmaktadır. Model III'teki beş serbestlik dereceli taşıt sistem modeli ise; iki dingilli, yarı araç külesinden oluşmaktadır. Taşıttaki en etkin bileşen, dingil veya yaylandırılmamış

kütledir. Bu nedenle Newton ve Clark'ın kullanmış olduğu gibi; modelde sadece sabit bir kuvvetle yüklenmiş etkili tekerlek kütesini almak yeterli olacaktır (Şekil 4.6-a). Eğer mesnetlerdeki dinamik kuvvetler dikkate alınır, modele yaylandırılmış kütlenin katılması gerekir (Şekil 4.6-b). Tekerleklerin farklı dingiller üzerindeki etkileşimleri dikkate alınacaksa; birden fazla serbestlik dereceli, yarı-taşıt modelleri kullanılabilir (Şekil 4.6-c).

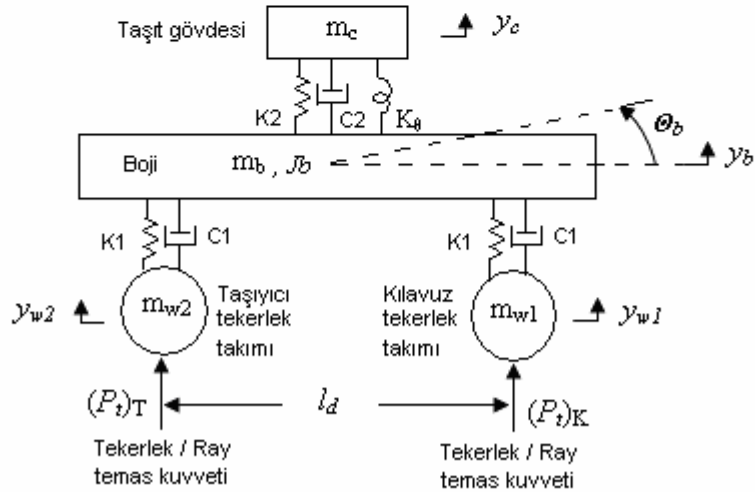
Taşıt davranışını incelemek üzere NUCARS, MEDYNA, VAMPIRE ve VOCO gibi paket programlar kullanılabilir.



(a) Model I : 1-DOF Taşıt Modeli.



(b) Model II : 3-DOF Taşıt Modeli.



c) Model III : 5-DOF Taşıt Modeli.

Şekil 4.6 Taşıt Modelleri (Dong, 1994).

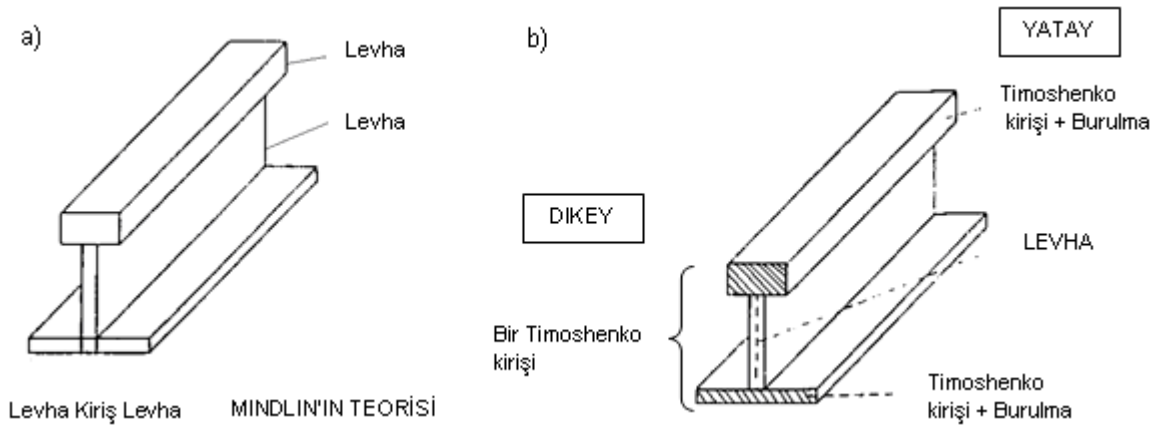
4.4. Yol Bileşenleri için Dinamik Modeller

Bu bölümde; ray, ray bağlantı sistemi, travers, balast ve yarımekan olmak üzere her bir yol bileşeni için kullanılabilecek dinamik modeller detaylı bir şekilde açıklanacaktır.

4.4.1. Ray Modelleri

Statik ve dinamik stabilite analizleri için ray çeşitli şekillerde modellenebilmektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda ray elemanı genellikle bir Bernoulli-Euler kirişi ya da Timoshenko kirişi olarak modellenmiştir. Modellemelerde hesaplamalar için dikkate alınan frekans aralıkları ray model tipini etkilemektedir. 500 Hz altındaki frekans değerleri için rayın düşey dinamik davranışını incelemek üzere, rayı bir Bernoulli-Euler kirişi olarak modellemek yeterlidir. Bu model, rayın kayma ve dönme deformasyonlarını dikkate almayarak, rayı oldukça rijit bir eleman olarak kabul etmektedir.

Timoshenko kirişi (ya da Timoshenko-Rayleigh kirişi), ray kaynak yerleri, tekerlek aplatılığı gibi tekerlek ve ray düzensizliklerinden kaynaklanan dinamik yüklerin tahmini için geliştirilen ray modeli için kullanılabilir. Timoshenko kiriş modelinde rayın kayma ve dönme deformasyonları da dikkate alınarak oldukça hassas çözümler elde edilir. Timoshenko kiriş modeli (Şekil 4.7) düşey tepkiler için yaklaşık 2500 Hz'e kadar olan frekanslar için etkilidir. Yanal ve burulma modları için, ray mantarı ve tabanı sürekli, dairesel yaylarla bağlı, bağımsız Timoshenko kirişleri olarak modellenmelidir. Bu çift kiriş modeli, ray ondülasyonları için Knothe tarafından kullanılmıştır (Knothe ve Grassie, 1993). Ayrıca gürültü çalışmaları için; 5000 Hz'e kadar frekans değerleri dikkate alınarak, ray çok detaylı bir biçimde modellenebilir.



Şekil 4.7 (a) Levha elemanı ile ve (b) kiriş elemanı ile rayın modellenmesi (Knothe ve Grassie, 1993).

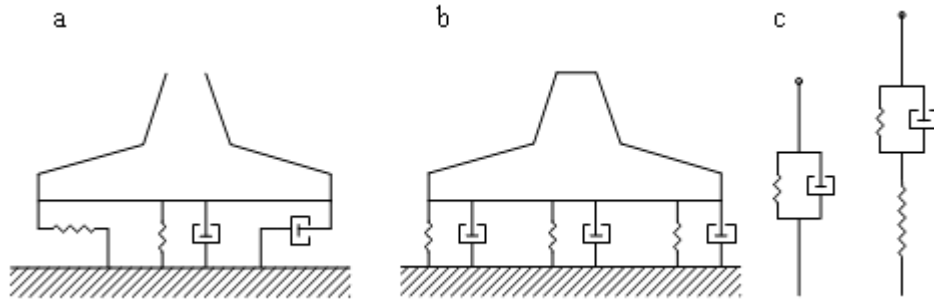
4.4.2. Ray Bağlantı Sistemi Modelleri

Genellikle beton traversler üzerinde kullanılan ray bağlantı sistemleri esnek bir yay bağlantısından oluşmaktadır. Bu bağlantı elemanları çoğu tasarımda kullanılabilmektedir ve esasen daha rijit olan ray elastomer mesnetleri ile paralellik içinde hareket etmektedirler (Şekil 4.8). Ray elastomer mesnetleri, kauçuk, plastik ya da kauçuk kaplı mantar gibi kompozit bir elemandan oluşup, rijitlikleri genellikle lineer değildir (yani, yük-deformasyon eğrileri doğrusal değildir). Genellikle üstyapı sistemi modellemesi için rijitlik özellikleri lineer olarak gösterilmekte, ray elastomer mesnetinin rijitliği sabit alınıp, yükleme durumundaki rijitlik değeri dikkate alınmaktadır.

Üstyapı dinamiği açısından ray elastomer mesnetleri tüm üstyapı rijitliğini etkiledikleri için, önemli role sahiptirler. Yumuşak ray elastik mesnetleri, trenin hareketi sonucunda oluşan dinamik ve statik yüklere karşı rayların elastik deformasyonuna izin vererek, dingil yüklerinin daha fazla sayıda traverse iletilmesini sağlarlar. Ayrıca ray elastik mesnetleri yüksek frekanslı titreşimleri sönümleyerek dinamik yüklemelerden kaynaklanan yol hasarlarının önlenmesinde etkilidirler.

Dinamik yol modellerinde, ray elastik mesnetleri ray tabanı boyunca birbirine paralel yay ve viskoz sönümleyiciler şeklinde modellenirler. Şekil 4.8’de ray bağlantı sistemi ve elastik mesnet modelleri gösterilmiştir.

Uygulamalardaki en büyük sorun, ray elastik mesneti parametreleri için uygun değerlerin bulunmasındaki zorluktur. Bu konuda laboratuvar ortamında çeşitli deneyler yapılabilmesine rağmen, gerekli parametreleri elde etmenin en iyi yolu, ilgilenilen ray elastomer mesnedinin kullanıldığı yollarda, taşıt hareketi sırasında ölçümler yapılmasıdır. Ayrıca, elektromanyetik uyarıcılarla ya da darbe çekiçleri ile yol üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin kullanılmasıyla gerekli parametreler sağlanabilir.



Şekil 4.8 Ray Bağlantı Sistemi : (a) Yay-sönümleyici-modeli, (b) Temel modeli, (c) 2 parametrelilik ve 3 parametrelilik modeller (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.3. Travers Modelleri

Traversler kiriş veya rijit bir gövde olarak modellenenirler. Stabilité analizinde dikkate alınan yol modeli için her iki ray da dikkate alındığı takdirde traversler kiriş olarak modellenirler. Yolun simetrik varsayıldığı ve tek bir rayın düşünüldüğü durumda, traversler iki eşit parçaya bölünerek rijit bir gövde (blok) olarak modellenirler (De Man, 2002). Ray mantarı üzerindeki dinamik tepkilerin iyi bir şekilde ifade edilebilmesi, 1000 Hz'e kadar frekans değerleri için; traverslerin rijit blok elemanlar olarak modellenmesi ile sağlanır (Knothe ve Grassie, 1993).

Dinamik modellemelerde traversler için başlıca iki kiriş modeli kullanılabilir. Bunlardan birincisi traversleri Bernoulli-Euler kirişi olarak modellemektir. Diğer yöntem ise traverslerin Timoshenko kirişi olarak modellenmesidir. Stabilité analizlerinde traverslerin Bernoulli-Euler kirişi olarak modellenmesi, 500 Hz'in altındaki frekans değerleri için olumlu sonuçlar vermiştir. Bu modelde dinamik çökme, frekans tanım alanlı çözüm yöntemiyle hesap edilir.

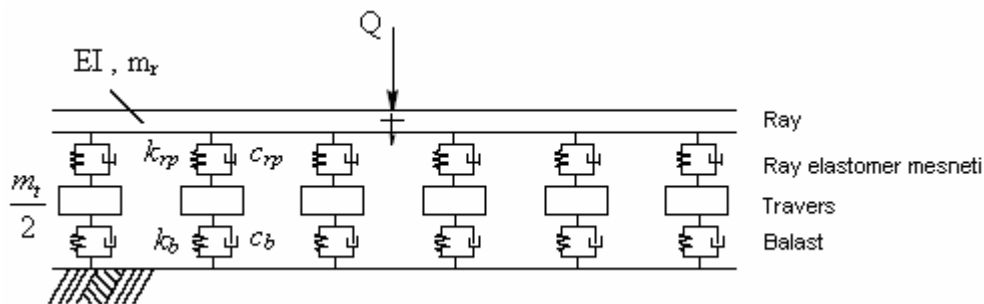
Timoshenko kiriş modeli, ilgilenilen bütün frekans aralıkları için olumlu sonuçlar vermektedir. Fakat çözüm için gerekli hesaplamalar oldukça karmaşıktır. Timoshenko kiriş modelinde dinamik çökme, sonlu elemanlar metodu yardımıyla hesap edilir. Bu metot farklı kalınlıktaki Timoshenko kirişi olarak modellenen beton traverslerin doğal frekanslarını belirlemek üzere kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda, sonlu elemanlar metodu ile elde edilen teorik sonuçlar ile test verileri arasında iyi bir korelasyon sağlandığı gözlenmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 B58 traversinin ölçülmüş ve hesaplanmış doğal frekansları (Alman Demiryolları) (Knothe ve Grassie, 1993).

Frekanslar	İlk Doğal Frekans (Hz)	İkinci Doğal Frekans (Hz)	Üçüncü Doğal Frekans (Hz)	Dördüncü Doğal Frekans (Hz)	Beşinci Doğal Frekans (Hz)
Ölçülmüş	140	395	765	1212	1695
Hesaplanmış (Timoshenko Kiriş elemanları)	140.1	396.4	759.7	1206	1719

4.4.4. Balast ve Zemin Modelleri

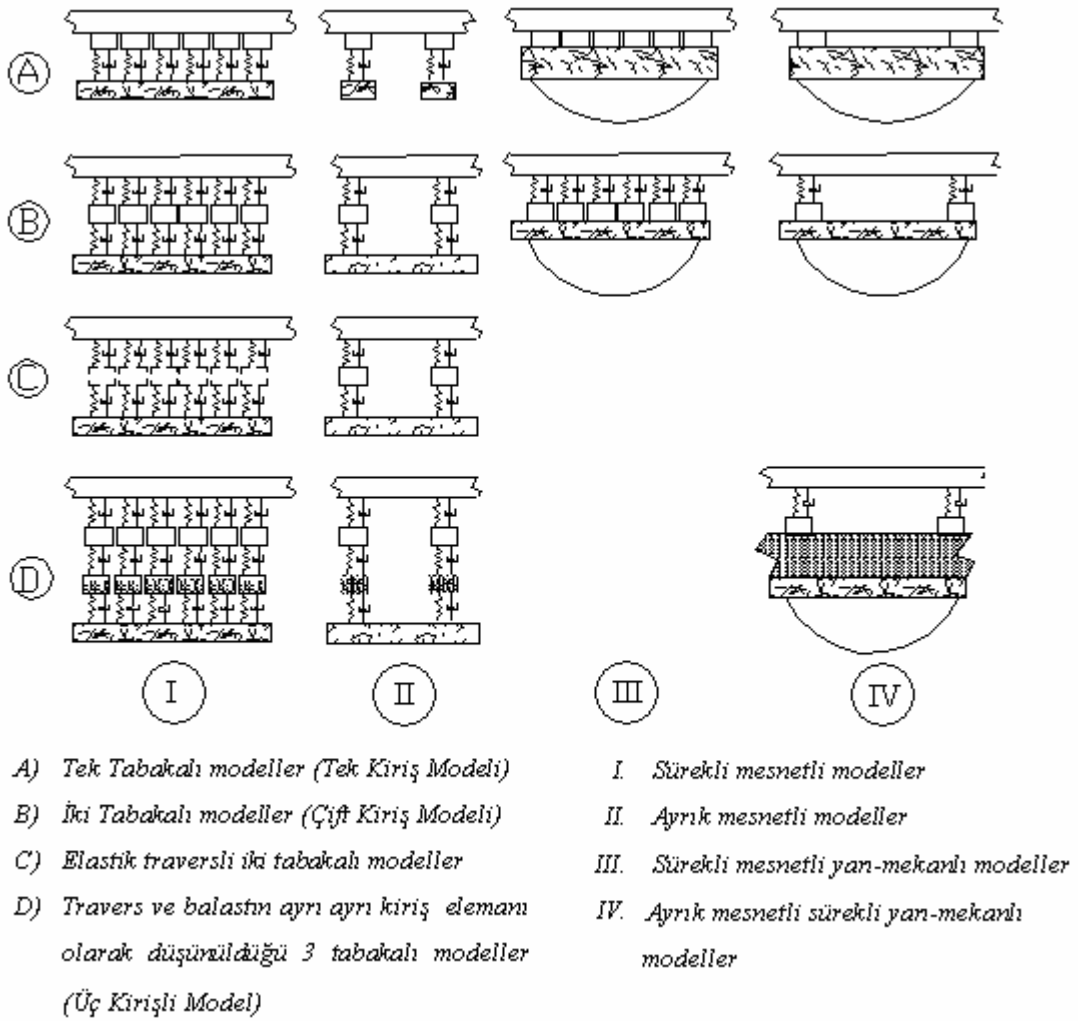
Balast ve zemin sistemleri oldukça karmaşık bir yapıya sahiptirler. Genellikle yük-deformasyon ilişkilerinde oldukça yüksek, lineer olmayan bir özellik gösterirler. Bundan dolayı uygulamalarda karşılaşılan en büyük zorluk, balast tabakası ve zemin için uygun sönümleme ve rijitlik değerlerinin bulunamamasıdır. Genellikle araştırmacılar, balast ve zemini birlikte düşünerek, traversler altında kütsüz, yay-sönümleyici elemanlar olarak modellemişlerdir. Bu modelleme şekli 500 Hz'ten düşük frekanstaki zeminde oluşan titreşimler için kullanışlıdır. Yüksek frekanslı titreşimlerdeki dinamik analiz çalışmaları için oldukça karmaşık, üç boyutlu sonlu eleman modellerine ihtiyaç duyulur. Şekil 4.9'da balast tabakası ve ray elastomer mesnetlerinin yay-sönümleyici elemanlar olarak ifade edildiği, yaygın kullanılan bir yol modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Viskoz Sönümlmeli Yol Modeli (Broeck, 2001).

4.5. Yol için Dinamik Modeller

Çeşitli yol modellerini oluşturmak için Bölüm 4.5'teki yol bileşen modelleri birleştirilebilir. Dinamik analizlerde kullanılan tüm yol modelleri için temel farklılık, yolun sürekli veya ayrık mesnetli şekilde ifade edilmesidir. Şekil 4.10'da analizler için kullanılabilecek yol modelleri detaylı bir şekilde gösterilmiştir. İlgilenilen bütün frekans aralıklarında, rayların ayrık traversler üzerine döşenmesi şekliyle oluşturulmuş yolların çoğu için, ayrık mesnetlenmiş model tipi gerçeğe daha uygun bir temsil gösterse de, sürekli mesnet tipi, ayrık mesnetlerin yol boyunca döndürülüp uç uca eklenmesi ile elde edilmektedir. Böylece modelde traversler kesintisiz ve sürekli bir boyuna kiriş şeklinde temsil edilirler. Bu sanal boyuna kiriş, rijit bir yapıymış gibi veya rijitliği ve kütlesi üniform dağıtılmış bir kiriş gibi modellenebilir (Şekil 4.10 CI).



Şekil 4.10 Yol Modellerinin Hiyerarşisi (Knothe, 2001).

Şimdi sırasıyla sürekli mesnetli ve ayrık mesnetli yol modellerini detaylı bir şekilde açıklayalım.

4.5.1. Sürekli Mesnetli Yol Modelleri

Sürekli mesnetli yol modeli, taşıt-yol etkileşimi için kurulan en yaygın model tipidir. Yol sistemini iyi bir şekilde ifade eden ve karmaşık çözümler içermeyen bir modelleme şeklidir. Bu tip modeller; elastik zemine oturan Euler kirişi (EBEF), elastik zemine oturan Timoshenko kirişi (TBEF) ve çok tabakalı sürekli temele oturan kirişler (BMLF) olarak sınıflandırılabilirler.

Sürekli elastik zemine oturan Euler kirişi (Şekil 4.10 AI); üstyapı tasarımında halen kullanılmakta olan ana modeldir. 1867’de ilk defa Winkler tarafından kullanılmıştır. Dinamik analizlerde sürekli mesnetlerdeki sönümler dikkate alınarak, bazı araştırmacılarca bu

model sönümlü Winkler temeli olarak da ifade edilir. Travers kütlesi ray kiriş elemanına dahil edilerek üstyapı boyunca düzgün yayılı olduğu varsayılır. Mair, model parametrelerinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapmıştır (Dong, 1994).

Yüksek frekans aralığındaki etkileşimleri belirlemek için ray elemanının Euler kirişi yerine Timoshenko kiriş olarak ifade edilmesi daha iyi bir yöntemdir; fakat çözümlerler daha karmaşıktır. Timoshenko kiriş teorisi için kayma katsayısı bazı araştırmacılarca incelenmiş olup, basit ve kesin formüller elde edilmiştir (Dong, 1994).

Sato, üstyapıyı sürekli tek tabakalı kütle üzerine oturan Euler kiriş olarak eğilme ve kayma rijitliklerini dikkate almayarak ilk defa incelemiştir (Şekil 4.10 BI). Ray elastomer mesneti ve balast tabakası sürekli elastik mesnetli viskoz sönümleyiciler olarak tanımlanmıştır. Grassie tarafından ray Timoshenko kiriş olarak modellenmiş ve rayın kayma ve dönme ataletleri dikkate alınmıştır. Ray ondülasyonu ile ilgili çalışmak üzere benzer bir model de Tassilly ve Vincent tarafından geliştirilmiştir. Aynı konu, tekerlek/ray etkileşimi sonucu ortaya çıkan gürültü çalışması için Thompson tarafından geliştirilmiştir (Dong, 1994).

Grassie ve Cox, kendi modellerini, travers elemanını eğilme rijitliğini dikkate alarak fakat boyuna rijitliği gözardı ederek, ayrı bir tabaka olarak Timoshenko kiriş şeklinde geliştirmişlerdir (Şekil 4.10 CI). Bu model yaklaşımı traverslerin dinamik davranışını ayrıntılı bir şekilde belirlemek için kullanılmıştır.

Patil, kurduğu modelde (Şekil 4.10 AIII); yolu, doğal frekansları belirlemek üzere yarımekan üzerinde yataklanmış kiriş elemanı olarak düşünmüştür (Dong, 1994).

Genellikle kullanılan sürekli mesnetli yol modelleri Şekil 4.10'da gösterilen AI, BI ve CI modelleridir. Sürekli mesnetli yol modelleri, 500 Hz altındaki frekans değerleri için uygun sonuçlar vermektedir. Sürekli mesnetli yol modellerinde yol için dinamik çökme değerleri frekans tanım alanlı çözüm metodu kullanılarak hesaplanmaktadır. Frekans tanım alanlı çözüm tekniğine detaylı olarak ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

4.5.2. Ayrık Mesnetli Yol Modelleri

Dinamik analiz çalışmalarında ayrık mesnetli yol modeli, 2500 Hz'e kadar ilgilenilen frekans aralıkları için olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrık mesnetli yol modellemelerinde çözüm için frekans tanım alanlı çözüm tekniği kullanılabildiği gibi, ayrıca Timoshenko kiriş modeli dikkate alınarak zaman tanım alanı ve sonlu elemanlar metotları da kullanılabilir.

Ayrık mesnetli yol modelinde, mesnet (pin-pin) frekansı dolaylarında (geleneksel üstyapı için

yaklaşık 750 Hz) yolun dinamik tepki davranışı, sürekli mesnetli modele göre farklılık göstermektedir. Fakat diğer frekans aralıkları için iki model arasında önemli bir fark mevcut değildir. Yolun dinamik davranışının en doğru şekilde tanımlanabilmesi için, mesnet (pin-pin) rezonans frekansı değerlerinin hesaplamalarda göz önünde bulundurulması gerekir. Bu da yolun ayırık mesnetli şekilde modellenmesi ile sağlanır. Şekil 4.10'da ayırık mesnetli yol modelleri detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Birmann, Şekil 4.10, AII modelini kullanarak ayırık mesnetlerin raydaki statik gerilmeler üzerine etkisini incelemiştir. Yolu modellemek üzere, bazı araştırmacılarca Şekil 4.10'da gösterilen rijit traverslerle ayırık mesnetlenmiş kiriş modeli (BII) kullanılmıştır. Bu üstyapı modelini Knothe, Ripke ve Hempelmann, ray ondülasyon oluşum ve mekanizmasını incelemek üzere kullanmışlardır. Şekil 4.10, CII modeli, Clark ve Lowndes tarafınca geliştirilmiş olup, travers tabakası da Euler kirişi olarak düşünülmüştür. Bu modeli Newton ve Clark tekerlek aplatılığından kaynaklanan ani yükleri belirlemek için ve ondülasyonlu rayların yol davranışına etkisini incelemek için kullanmışlardır. Tunna, bu modeli tekerlek aplatılığı ve ray ek yerleri gibi tekerlek ve ray düzensizliklerinden kaynaklanan dinamik yüklemeleri incelemek üzere kullanmıştır. Tunna bu model üzerinde modifikasyon yaparak beton traversi; her biri kütle, eğilme rijitliği ve mesnet rijitliğine sahip 12 elemana bölmüştür. Cai ve Raymond, Nielsen ve Abrahamsson ray ve traversi ayrı ayrı Timoshenko kirişi olarak modellemişlerdir (Dong, 1994).

4.5.3. Yarımekan Üzerindeki Yol Modelleri

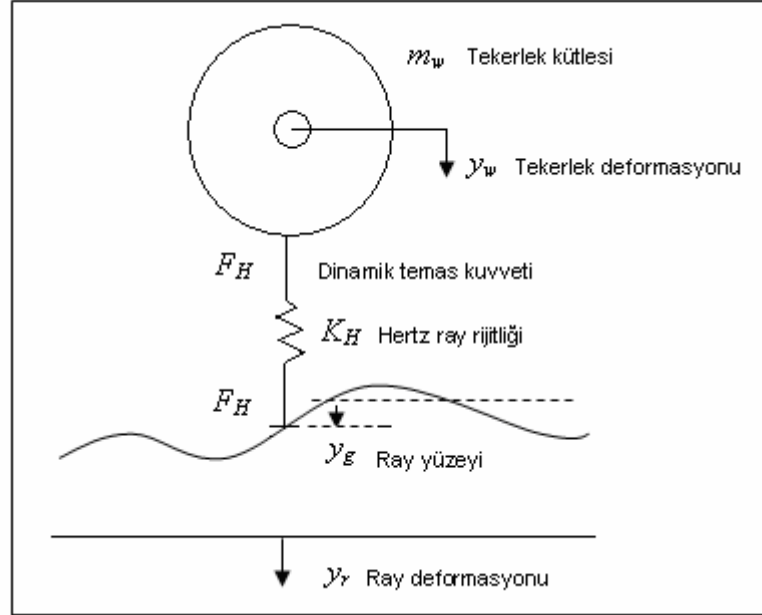
Yarımekan üzerindeki yol modeli (Şekil 4.10, AIV), zemin kaynaklı titreşimleri belirlemek üzere kullanışlı bir modeldir. Ono ve Yamada tarafından geliştirilen model bu kategori içinde sınıflandırılabilir. Bu modelde, yolun yataklığı balast/yarımekan tabakasına ilişkin elastik özellikler ve kütle ataleti dikkate alınarak, yol tabanı; düşey doğrultuda sıkıştırılabilir bir ortam olarak düşünülmüştür.

Yol ve taşıtın düşey dinamik etkileşimi konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar içerisinde, zeminin ve balastın yarımekan olarak tanımlandığı sadece bir çalışma bulunmaktadır. Ahlbeck D.R.'nin 1995 yılındaki çalışmasında ayırık mesnetli yol modelleme tekniği kullanılmıştır. Mevcut tek araştırma olan bu çalışmada, taşıt modeli (Alman ICE-yolcu vagonu) 4 ayrı kütle içermektedir. Bu kütleler, 2 tekerlek takımı, 1 boji ve bir araç gövdesinin yarısıdır. Bununla beraber bu çalışmada yol, her bir tekerlek takımının altında 7 adet ayırık travers üzerine mesnetlenmiş bir yol kesimi şeklinde temsil edilerek

modellenmiştir. Yarımekan davranışının hesap sonuçları dinamik tepkiler şeklinde elde edilebilmesine rağmen, analiz frekans tanım alanlı hesap yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Zemin kaynaklı titreşimlerin hesapları, ICE test aracı kullanılarak elde edilmiş ve çözüm sonuçları ölçümler ile iyi bir uyum göstermiştir (Knothe ve Grassie, 1993).

4.6. Taşıt - Yol Etkileşimi için Dinamik Modeller

Çoğu taşıt-yol hasarı, tekerlek-ray ara yüzeyinde oluşan dinamik kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Taşıt-yol etkileşimi esnasında oluşan kuvvetler tekerlek-ray temas alanı ile iletilirler. Tekerlek ile ray arasındaki temas alanının geometrisinden dolayı, dinamik tekerlek-ray etkileşimi için kuvvet ve çökme arasındaki ilişki Hertz temas yayı ile tanımlanır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Tekerlek-Ray temas modeli (Esveld, 2001).

Dinamik tekerlek-ray modellerinde sözü edilen Hertz yayı oldukça önemlidir. Modelde kullanılan Hertz Temas Yayı için, yay rijitliği “Hertz Teorisi” ile elde edilebilir. Bu teoriye göre temas alanının dairesel olduğu varsayıldığında “Hertz Ray Rijitliği (K_H)” aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir.

$$K_H = \sqrt[3]{\frac{3E^2 Q \sqrt{R_{tekerlek} R_{mantar}}}{2(1-\nu^2)^2}} \quad (N/m) \quad (4.1)$$

K_H : Hertz ray rijitliği (N/m).

ν : Poisson oranı.

E : Elastisite modülü (N/m^2).

Q : Düşey tekerlek yükü (N).

$R_{tekerlek}$: Tekerlek yarıçapı (mm).

R_{mantar} : Ray mantarının yarıçapı (mm).

Hertz temas yayı lineer olmayıp, temas kuvveti ile ray-tekerlek temas yüzeyinde oluşan çökme arasındaki ilişkiye bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$F = c_H \cdot y^{3/2} \quad (N) \quad (4.2)$$

Eşitlikte yer alan c_H ($\text{Nm}^{-3/2}$) değeri, yarıçap ve malzeme özelliklerine bağlı bir sabittir. Tekerlek-ray arasındaki ilişkiyi ifade etmek üzere tüm bileşenlerin lineer olması gerekir; dolayısıyla Hertz yayının da lineer bir şekilde tanımlanması gerekir. Hertz temas rijitliğinin lineer değeri, statik tekerlek yüküne bağlı olarak kuvvet-yer değiştirme ilişkisinden elde edilebilir (Eşitlik 4.3).

$$K_H = \frac{dF}{dy} = \frac{3}{2} c_H^{2/3} F^{1/3} \quad (N/m) \quad (4.3)$$

Jenkins k_H değerini, eski ve yeni tekerlekler için tekerlek çapının bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır. 75 kN statik tekerlek yükü ve 1 m tekerlek çapı için K_H değeri aşınmamış yeni tekerlekler için $1,4 \cdot 10^9$ N/m, aşınmış eski tekerlekler için $1,6 \cdot 10^9$ N/m olarak hesaplanmıştır (Esveld, 2001).

4.7. Yol Dinamiği için Kullanılabilecek Çözüm Teknikleri

Taşıt-yol sistemine ilişkin dinamik analizler için, başlıca iki çözüm yöntemi olan frekans tanım alanlı ve zaman tanım alanlı çözüm teknikleri kullanılır. Frekans tanım alanlı çözüm metodu ile yol yapısına etki eden dinamik tepkiler frekansa bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bu metot 500 Hz frekans değerine kadar oldukça kullanışlıdır. Frekans tanım alanlı çözüm metodu ile yol sürekli mesnetli bir kiriş şeklinde modellenir ve yol için elde edilen rezonans frekanslarına bağlı olarak uygun yol parametreleri seçilir. Zaman tanım alanlı çözüm metodu ile zamana bağlı olarak yoldaki dinamik etkileşimler incelenir. Zaman tanım alanlı çözüm metodunda tahrik kuvvetleri zamanın bir fonksiyonu şeklinde tanımlanarak, yola ilişkin olası dinamik tepkiler hesaplanır. Bu metot, 500 Hz üzerindeki frekans değerleri için oldukça

kullanışlıdır. Sürekli mesnetli dinamik yol modelleri için genellikle frekans tanım alanlı çözüm metodu kullanılır. Ayırık mesnetli yol modellerinde ise dinamik analiz için gerekli çözümlemeler daha karmaşık olup, zaman tanım alanlı çözüm metodu ve sonlu elemanlar metodunun birlikte kullanılmasıyla basite indirgenirler. Şimdi sırasıyla dinamik analizlerde kullanılabilen bu iki çözüm yöntemini açıklayalım.

4.7.1. Frekans Tanım Alanlı Çözüm Teknikleri

Frekans tanım alanlı çözüm metodu ile yoldaki dinamik çökme değerleri, belirli yükleme durumlarında oluşabilecek titreşimler sonucu mevcut frekans değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu yöntemde yol için elde edilen rezonans frekans değerlerine bağlı olarak uygun yol parametreleri seçilir. Frekans tanım alanlı çözüm metodu ile yola ilişkin dinamik tepki değerleri, diğer bir deyişle birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri frekansa bağlı olarak hesaplanabilir. Frekans tanım alanlı çözümleri, hareketli ve hareketsiz noktasal yükler için farklı şekillerde uygulanabilir. Şimdi, bu her iki noktasal yükleme durumu için frekans tanım alanlı çözüm metodunun kullanım şeklini açıklayalım.

4.7.1.1. Hareketsiz Noktasal Yükler için Frekans Tanım Alanlı Çözüm Tekniği

Hareketsiz noktasal yükten kaynaklanan tepki, sistemin dinamik tepkisini (birim yük etkisi altındaki çökme miktarını) bulmak ve taşıt-yol etkileşimini hesaplamak üzere kullanılır. Tahrik noktasındaki birim yük etkisi altındaki yerdeğiştirme “Dinamik Tepki (Direct Receptance)” olarak ifade edilir.

Sürekli mesnetli yol modelleri için dinamik tepki değerleri, integral dönüşüm teknikleri kullanılarak elde edilir. Sürekli mesnetli Euler kiriş elemanı için dinamik tepki değeri, ilk olarak Timoshenko tarafından elde edilmiştir. Grassie, rijit veya elastik traversler üzerinde yataklanmış Timoshenko kirişi için, dinamik tepki değerlerini hesaplamak üzere bir yaklaşım öne sürmüştür. Grassie ayrıca, yol için yanal ve boyuna doğrultudaki dinamik tepki değerlerini de hesaplamıştır.

Ayırık mesnetli yol modeli için dinamik tepki değerini hesaplamak üzere bir algoritma geliştirilmiş ve birçok araştırmacı tarafından bu çözüm yöntemi kullanılmıştır.

Algoritma için ilk aşama, karakteristik bir yol kesiti için sonlu eleman matrislerinin veya eşdeğerlerinin analitik veya nümerik olarak hesaplanmasıdır. Daha sonra Floquet teoremi periyodik sistemdeki farklı kesitlerdeki yerdeğiştirmeleri birleştirmek üzere kullanılır. Sınır koşulları girilerek, bilinmeyen özdeğerler (eigenvalue) belirlenebilir ve herhangi bir noktadaki harmonik yerdeğiştirme hesaplanabilir. Kompleks, periyodik yapılarda nümerik çözüm için

kullanılan algoritmada genellikle transfer matris metodu kullanılır.

Ayrık mesnetli yol modelinde, mesnet (pin-pin) frekansı dolaylarında (geleneksel üstyapı için yaklaşık 750 Hz) dinamik tepki değeri, sürekli mesnetli modele göre farklılık göstermektedir. Fakat diğer frekans aralıkları için iki model arasında önemli bir fark mevcut değildir. Mesnet (pin-pin) rezonans modunda ray, iki travers açıklığına eşit uzunlukta bir dalga boyu ile titreşim yapar. Bu mod, tekerlek aplatılığı ve ray birleşim yerlerinden kaynaklanan ani tepkilerde tahrik durumuna geçebilir. Genel olarak modellemelerde, yolun ayrık mesnetleme şekli modele dahil edilmelidir (Dong, 1994).

Taşıt için dinamik tepki değerleri de, teorik veya deneylerle elde edilebilir. Dinamik tepki değerleri hesaplandıktan sonra, taşıt ve yol arasındaki etkileşim, girdi ve çıktılar arasında uygun bir transfer fonksiyonu oluşturmak üzere, dinamik tepki değerlerinin birleştirilmesiyle (dinamik temas tepkisini de ilave ederek) elde edilir. Örneğin, gürültü çalışmalarında, transfer fonksiyonu gerekli son çözümleme olabilir veya transfer fonksiyonu, ray ve tekerlek düzensizliklerinden kaynaklanan dinamik kuvvetleri hesaplamak üzere zaman tanım alanına dönüştürülebilir. Düzensizliğin sinüs eğrisi şeklinde olması durumunda tepki değeri transfer fonksiyonu ile doğrudan elde edilebilir. Sinusoidal olmayan düzensizlik eğrileri için ise ilk olarak Fourier dönüşümlerinin bulunması gerekir. Taşıt-yol etkileşimi için dinamik tepki metodu oldukça kullanışlı bir yöntem olup, ondülasyon problemleri, tekerlek/ray gürültü problemleri ve tekerlek, ray düzensizliklerinden kaynaklanan dinamik kuvvetleri belirlemek için yaygın bir şekilde kullanılır (Dong, 1994).

4.7.1.2. Hareketli Noktasal Yükler için Frekans Tanım Alanlı Çözüm Tekniği

Sabit veya salınım yapan hareketli bir yük etkisi altındaki sürekli mesnetli bir yol modeli için tepkileri hesaplamak üzere Fourier ve Laplace-Carson integral dönüşüm teknikleri yaygın olarak kullanılır. Hareketli yüklerle birlikte bir koordinat sistemi dikkate alınarak durağan koşuldaki sistem tepkileri elde edilebilir. Bu yöntem “hareketli yük problemleri” için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. 1933’te bu çözüm yöntemi sürekli mesnetli Bernoulli-Euler kirişine etki eden hareketli sabit yük için Hovey tarafından kullanılmıştır. 1965’te ilk kez Timoshenko kiriş elemanı üzerinde etki eden hareketli sabit yük için çözüm yöntemi Achenbach ve Sun tarafından geliştirilmiştir (Dong, 1994).

Hareketli yük problemlerinde en önemli nokta, kiriş boyunca hareket eden yükün stabilitesidir. Hareketli yük hızının, kirişteki dalga yayılımına eşit olduğu bir “kritik hız” mevcuttur. Bu kritik hız mevcut maksimum tren hızlarından oldukça yüksek olup, sadece

Şekil 4.13 Sonlu uzunluktaki yolun sonsuz uzunluğa dönüştürülmesi; kesme-birleştirme metodu (Dong, 1994).

Taşıt-yol sistemine ilişkin hareket denklemini çözümlmek üzere; doğrudan nümerik integrasyon tekniği kullanılır. Ondülasyonlardan kaynaklanan ve tekerlek-ray temas bölgesinde oluşan normal kuvvetleri hesaplamak için, çok noktalı tekerlek-ray temas modeli önerilir ve kullanılır. Beton blokların doğal frekansları, tekerlek-ray temas kuvvetleri, ray elastomer mesnet kuvvetleri ve rayda oluşan dinamik gerilmeler gibi birtakım sonlu eleman çözüm sonuçları ile test verileri arasında genel olarak iyi bir korelasyon sağlanmaktadır. Taşıt-yol sistemine ilişkin sonlu elemanlar modeli, tekerlek-ray teması ile oluşan tekerlek aplatiliği, kabuklanma ve ray kaynak yeri, contalar gibi bozukluklardan ötürü meydana gelen ani yüklerin karakterini incelemek üzere kullanılabilir. Taşıt-yol etkileşimi ve ray ondülasyonlarından kaynaklanan dinamik kuvvetler, yüksek işletim koşulları için de ayrıca değerlendirilebilmektedir (Dong, 1994).

Çalışma sonuçları göstermektedir ki; maksimum ani yük mesnetlerde oluşmakta ve oluşan bu yük, özellikle dingil yüklerinden, taşıt hızından, bozukluk şekillerinden ve ray eşdeğer kütesinden etkilenmektedir. Taşıt-yol etkileşimi sırasında sistemde oluşan rezonans kuvvetinin şiddeti; büyük ölçüde yaylandırılmamış kütleyle, mesnet aralığına, taşıtın birincil süspansiyonuna, üstyapıya ilişkin balast tabakasının sönümlemesine ve ray rijitliğine bağlıdır. Ray ondülasyonları mevcut olması durumunda, normal kuvvetlerden kaynaklanan enerji tüketimi ray ondülasyon derinliğine bağlı olarak artmaktadır.

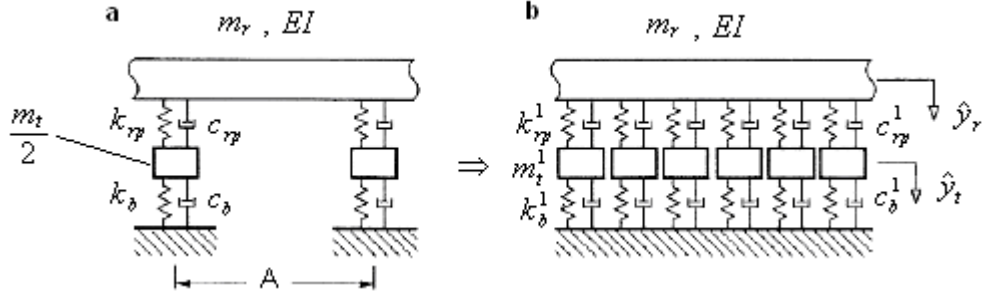
Sonlu elemanlar metodu (FEM), sınır koşulları ile birlikte karmaşık modeller için kullanılarak, taşıt-yol sistemi yüksek frekanslarda bile gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmektedir.

4.8. Seçilen Standart Yol Modeli için Dinamik Analiz ve Uygulamaları

4.8.1. Seçilen Standart Yol Modelinin Frekans Tanım Alanlı Çözüm Metodu ile Analizi

Bu tez çalışmasında sayısal uygulama olarak, Şekil 4.10'da verilmiş olan ayırık mesnetli çift kiriş modeli (CII), sürekli mesnetli çift kiriş modeline (Şekil 4.10, CI) dönüştürülerek, frekans tanım alanlı çözüm metodu ile yola ilişkin dinamik analiz çözümlmeleri 0-5000 Hz aralığındaki frekans değerleri için yapılmıştır. 0-5000 Hz aralığındaki frekans değerlerinde yola ilişkin dinamik tepki değerleri (birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri) farklı yol bileşenlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yer alan sayısal uygulamada kullanılan frekans tanım alanlı çözüm tekniğine ilişkin hesap yöntemleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Çözümlemelerde dikkate alınan iki tabakalı ayırık mesnetli yol modeli için, frekans tanım alanında çözüm yapabilmek için, öncelikle ayırık mesnetli yol model parametreleri sürekli mesnetli yol model parametrelerine dönüştürülür (Şekil 4.14).



Şekil. 4.14 Ayırık mesnetli yol modelinin sürekli mesnetli modele dönüştürülmesi a) Ayırık mesnetli yol modeli, b) Sürekli mesnetli yol modeli (Knothe, 2001).

Travers tabanında mesnet olması durumunda; mesnetin esneklik ve sönümlenme katsayısı (k_{sp} ve c_{sp}) değerleri de dikkate alınmalıdır. Sürekli mesnetli üstyapı modeli için rijitlik, sönümlenme ve travers kütlesi değerleri travers aralığına bağlı olarak;

$$k_{rp}^1 = \frac{k_{rp}}{A} \quad c_{rp}^1 = \frac{c_{rp}}{A} \quad m_t^1 = \frac{m_t}{2A} \quad k_b^1 = \frac{k_b}{A} \quad c_b^1 = \frac{c_b}{A} \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitliklerde ve modelde gösterilen semboller aşağıda verilmiştir;

EI : Rayın eğilme rijitliği (Nm^2)

m_r : Birim uzunluktaki ray kütlesi (Kg/m)

k_{rp} : Ray elastomer mesnet (ara mesnet) rijitlik (esneklik) katsayısı (N/m)

k_{rp}^1 : Birim uzunluktaki ara mesnet rijitlik (esneklik) katsayısı (N/m^2)

c_{rp} : Ray elastomer mesneti (ara mesnet) sönümlenme katsayısı (Ns/m)

c_{rp}^1 : Birim uzunluktaki ara mesnet sönümlenme katsayısı (Ns/m^2)

m_t : Travers kütlesi (Kg)

m_t^1 : Birim uzunluktaki travers kütlesi (Kg/m)

k_b : Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı (N/m)

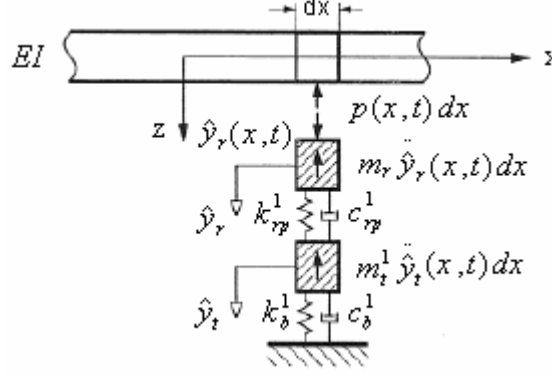
k_b^1 : Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki rijitlik (esneklik) katsayısı (N/m^2)

c_b : Balast tabakası ve zeminin sönümlenme katsayısı (Ns/m)

c_b^1 : Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki sönümlenme katsayısı (Ns/m^2)

A : Travers aralığı (m)

İki tabakalı model için dinamik formülasyonlar Şekil 4.15'e bağlı olarak aşağıdaki şekilde geliştirilebilir;



Şekil 4.15 İki tabakalı üstyapı modeli (Knothe, 2001).

İki tabakalı model için Şekil. 4.15'te gösterilen model, dinamik yatak katsayısının hesaplanması için kullanılabilir. Elde edilecek olan dinamik yatak katsayısı değeri, birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değeri (dinamik tepki değeri) için kullanılacaktır.

Rayın elastik davranışından ötürü “dx” kalınlığındaki ray elemanına etkiyen kuvvet (fiktif yük) $p(x,t)$ olarak tanımlanır.

Dinamik hesaplamalarda, statik Q tekerlek kuvvetinin yerine, kirişe $x = 0$ noktasında harmonik olarak değişen $\Delta Q.e^{i\omega t}$ kadar bir münferit kuvvetin etki ettiği varsayılmaktadır. Burada sistemin öz titreşimi (doğal frekansı) dikkate alınacaktır. Böylece tüm etkilerin harmonik olarak değiştiği varsayılır.

Harmonik olarak değişen dinamik çökme, moment ve fiktif yük değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$\begin{aligned}\hat{y}_r(x,t) &= \Delta \hat{y}_r(x).e^{i\omega t} \quad (m) \\ M(x,t) &= \Delta \hat{M}(x).e^{i\omega t} \quad (Nm) \\ p(x,t) &= \Delta \hat{p}(x).e^{i\omega t} \quad (N/m) \\ \omega &= 2\pi f \quad (\text{rad/s})\end{aligned}\tag{4.5}$$

ω : Dairesel (Açısal) frekans (rad/s).

f : Frekans (Hz).

Statik çözümlemelerde kullanılan yatak katsayısı β yerine, β_{dyn} yatak katsayısı kullanılarak dinamik çözüm yapılabilir. β_{dyn} 'in hesaplanması için Şekil 4.15'ten yararlanılır. Şekil 4.15'teki kesit için iki ayrı hareket denklemi yazılabilir;

$$\left\{ -\omega^2 \begin{bmatrix} m_r & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} c_{rp}^1 & -c_{rp}^1 \\ -c_{rp}^1 & c_{rp}^1 + c_b^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{rp}^1 & -k_{rp}^1 \\ -k_{rp}^1 & k_{rp}^1 + k_b^1 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \Delta \hat{y}_r \\ \Delta \hat{y}_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \hat{p} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_r + i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1 & -i\omega c_{rp}^1 - k_{rp}^1 \\ -i\omega c_{rp}^1 - k_{rp}^1 & -\omega^2 m_t + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \hat{y}_r \\ \Delta \hat{y}_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \hat{p} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Eşitliklerdeki $\Delta \hat{p}$ çizgisel yükü bir fiktif yük olup, ray ile ray elemanının kütlesi arasında etkir. $\Delta \hat{p}$ ve $\Delta \hat{y}_r$ 'ye bağlı olarak dinamik yatak katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\beta_{dyn} = \frac{\Delta \hat{p}}{\Delta \hat{y}_r} \quad (N / m^2) \quad (4.8)$$

$$\beta_{dyn} = \frac{[-\omega^2 m_t + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1)]^* [-\omega^2 m_r + i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1] - [i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1]^2}{-\omega^2 m_t + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1)} \quad (4.9)$$

Harmonik değişen $\Delta Q.e^{i\omega t}$ etkisindeki raydaki dinamik çökmenin genliği $\Delta \hat{y}_r(0) = \Delta \hat{y}_r(x=0)$ aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\Delta \hat{y}_r(0) = \frac{1}{\sqrt[4]{64EI\beta_{dyn}^3}} \Delta Q \quad (m) \quad (4.10)$$

Aynı zamanda, harmonik değişen eğilme momentinin değeri de 4.11 eşitliği ile elde edilir.

$$\Delta \hat{M}(0) = \sqrt[4]{\frac{EI}{64\beta_{dyn}}} \Delta Q \quad (N.m) \quad (4.11)$$

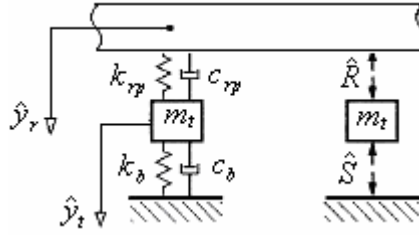
$\Delta \hat{y}_r$ ve $\Delta \hat{M}(0)$, kompleks büyüklüklerdir. Reel büyüklüklere dönüşüm yapılırsa tahrik durumundaki genlikler ve faz durumları bulunur.

Birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değeri " $H_r(i\omega)$ " diğer bir deyişle dinamik tepki değeri ise; " $\Delta \hat{y}_r$ " harmonik değişen yük etkisi altındaki ray deformasyonunun, " ΔQ " yük değişimine oranı olarak ifade edilir (Eşitlik 4.12).

$$H_r(i\omega) = \frac{1}{\sqrt[4]{64\beta_{dyn}^3 EI}} \quad (m / N) \quad (4.12)$$

4.9 eşitliğinde verilmiş olan β_{dyn} değeri, sayısal uygulamalarda seçilen standart yol modeli için, değişik parametrelere (travers aralığı, kullanılan ray tipi ve ray elastomer mesnet tipi vb.) bağlı olarak hesaplanmış ve böylece yoldaki dinamik çökme değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır.

Rayın çökmesi ve eğilme momentinin yanısıra, traversin çökmesi ve ray mesneti ile balasta etkiyen kuvvetler de önemlidir. Bu kuvvetler ile birlikte gerekli parametreler Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Ray ara mesnetine ve balast tabakasına etki eden kuvvetler (Knothe, 2001).

Enine yöndeki travers kütlelerinin boyuna yönde yerleştirildiği varsayıldığı için, elastik mesnetli kirişteki travers çökmeleri, sürekli bir büyüklük olur (bkz. Şekil. 4.14b).

Ray ara mesnetine gelen “ $\hat{R}$ ” kuvveti ve balasta gelen “ $\hat{S}$ ” kuvveti; traversin bulunduğu noktada oluşan $\Delta\hat{y}_r$ ve $\Delta\hat{y}_t$ çökmelerinden elde edilen münferit ve ayırık kuvvetler yardımıyla bulunur.

Travers çökmesinin değeri ($\Delta\hat{y}_t$), 4.7 eşitliğinin ikinci sütunu ile rayın çökme değeri ($\Delta\hat{y}_r$) yardımıyla ifade edilir. $\Delta\hat{y}_r$ değeri ise daha önce verilmiş olan 4.10 eşitliği ile bulunur.

$$\Delta\hat{y}_t = \frac{i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1}{-\omega^2 m_t^1 + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1)} \Delta\hat{y}_r \quad (m) \quad (4.13)$$

Balasta etkiyen kuvvetin genliği de hesaplanabilir. Bu kuvvet, travers çökmesi ($\Delta\hat{y}_t$) ile yatak katsayısı (balast ve zeminin kompleks yay katsayısı) değerlerinin çarpımına eşittir.

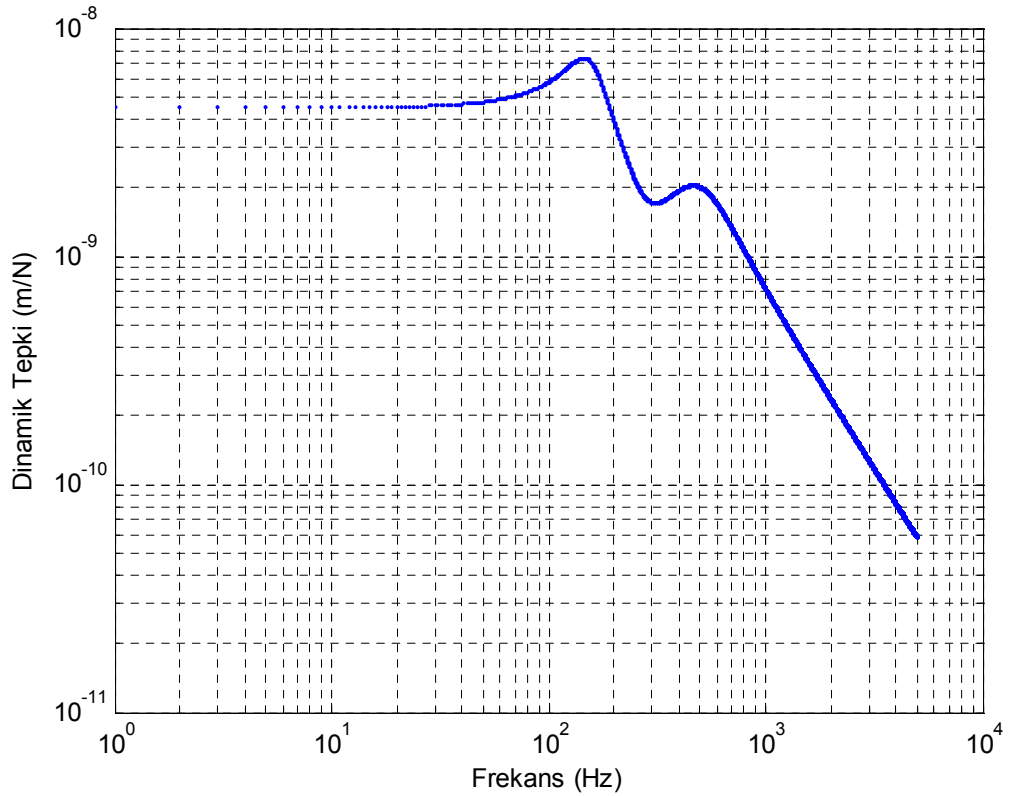
$$\Delta\hat{S} = \frac{A(i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1)(i\omega c_b^1 + k_b^1)}{-\omega^2 m_t^1 + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1)} \Delta\hat{y}_t \quad (N) \quad (4.14)$$

Ray mesnetine etkiyen kuvvetin genliğini ($\Delta\hat{R}$) bulmak için ise, ray mesnetinin çökmesi ile mesnetin kompleks yay katsayısı çarpılır.

$$\Delta\hat{R} = \frac{A(i\omega c_{rp}^1 + k_{rp}^1)(-\omega^2 m_t^1 + i\omega c_b^1 + k_b^1)}{-\omega^2 m_t^1 + i\omega(c_{rp}^1 + c_b^1) + (k_{rp}^1 + k_b^1)} \Delta\hat{y}_r \quad (N) \quad (4.15)$$

4.14 ve 4.15 eşitliklerindeki kesirli ifadeler transfer fonksiyonlarıdır. “ $\hat{S}$ ” ve “ $\hat{R}$ ” kuvvetleri, traversin kütle ve atalet kuvveti ile dengededirler.

Şekil 4.17’de, anlatılan hesap yöntemi ile MATLAB ortamında hazırlanan Dinamik Tepki Fonksiyonu-Frekans grafiği verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere 0-5000 Hz frekans aralığında verilmiş olan yol parametreleri için birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri “ $H_r(i\omega)$ ” hesaplanmıştır. Bu grafik yardımıyla rezonans frekanslarında yoldaki rijitlik özellikleri ve dinamik çökme değerleri belirlenmiştir.



$$(EI = 6,41 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2, \quad m_r = 60,3 \text{ Kg/m}; \quad m_t = 290 \text{ Kg} \quad m_t^1 = \frac{m_t}{2A}, \quad A = 0,6 \text{ m}; \\ k_{rp} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}, \quad k_b = 1,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}, \quad c_{rp} = 6,3 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}, \quad c_b = 8,22 \cdot 10^4 \text{ Ns/m})$$

Şekil 4.17 Sürekli mesnetli yol için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

4.9. Seçilen Yol Modeli için Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Seçilen standart yol modeli (CII) için, farklı yol bileşenlerine (travers aralığı, ray tipi, ray elastomer mesnet tipi, yatak malzemesi tipi (balast-zemin) vb.) bağlı olarak, 0-5000 Hz frekans aralığındaki yola ilişkin dinamik tepki değerleri (birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri) MATLAB programı aracılığıyla hesaplanarak, çözümlemeler sonucunda elde edilen grafikler Ek 1'de verilmiştir. Elde edilen grafikler bu bölümde tek tek yorumlanacaktır. Çözümlemelerde kullanılan parametreler, tablolar halinde Ek 1'de ayrıca verilmiştir.

Şekil E1.1'de, travers aralığının değişmesi durumunda, frekansa bağlı olarak dinamik tepki değerlerindeki değişim incelenmiştir. Travers aralığının 0.60 m - 1.10 m değerleri arasında değiştiği düşünülmüştür. Şekil E1.1'deki Dinamik Tepki-Frekans grafiğine bağlı olarak travers aralığının artması durumunda, dinamik tepki değerlerinde diğer bir deyişle, birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerlerinde artış gözlenmektedir. Dolayısıyla yolda oluşacak dinamik tepkileri azaltmak için travers aralığının da azaltılması gerekmektedir. Fakat travers sayısının artması aynı zamanda yol yapım maliyetinin artmasına sebep olacaktır. Sadece maliyet açısından düşünüldüğünde bile, yol tasarımı için dinamik analizlerin önemi gözardı edilemez. Dolayısıyla tasarım aşamasında alternatif yol tipleri için tüm üstyapı bileşenleri dikkate alınarak, uygun dinamik modeller kurulmalı ve dinamik analizler yapılmalıdır.

Şekil E1.2'de, kullanılan ray tipinin değişmesi durumunda, yola ilişkin dinamik tepki değerlerindeki değişim incelenmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi, ray kütlesi ve eğilme rijitliğindeki artış, dinamik tepki değerlerinin azalmasında etkili faktörlerdir. Şekil E1.2'deki Dinamik Tepki-Frekans grafiğine bağlı olarak ray tipinin değişiminin dinamik çökme değerlerinin değişimine etkisinin fazla olmadığı gözlenmektedir.

Farklı ray elastomer mesnet tiplerine bağlı olarak, Şekil E1.3 ve Şekil E1.5'te Dinamik Tepki-Frekans grafiği verilmiştir. Bu grafiklere göre, ray elastomer mesnetinin farklı parametreler alması, demiryolu üstyapısındaki dinamik çökme değerlerini farklı şekillerde etkilemektedir. Ray elastomer mesnetlerinin yeni ve yıpranmamış olması, yolda oluşabilecek dinamik çökmelerin azalmasına, titreşimlerin güvenli bir şekilde sönümlenmesine katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla ray elastomer mesnetlerinin her zaman bakımı yapılmış ve yenilenmiş olması gerekmektedir.

Şekil E1.4'te ise yine farklı ray elastomer mesnet tiplerine bağlı olarak, dinamik yatak katsayısının frekansa bağlı olarak değişimi görülmektedir. Ray elastomer mesnet tipi, dinamik

hesaplamada, yolun önemli bir parametresini oluşturan dinamik yatak katsayısı değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi ray elastomer mesnetlerinin yeni ve yıpranmamış olması, yolda oluşabilecek dinamik çökmelerin azalmasına, titreşimlerin güvenli bir şekilde sönümlenmesine katkı sağlayacaktır. Dolayısıyla elastomer mesnetlere ilişkin rijitlik ve sönümleme değerlerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve yol tasarımı esnasında uygun sönümleyici elemanların seçilmesi gerekir.

Şekil E1.6'da farklı yatak malzemesine (balast ve zemine) bağlı olarak Dinamik Tepki-Frekans grafiği verilmiştir. Bu grafikte, balast ve zeminin rijitlik ve sönümleme değerlerine göre, dinamik tepki değerindeki değişimler, frekansa bağlı olarak incelenmiştir. Açıkça görülmektedir ki, balast ve zeminin rijitlik ve sönümleme değerleri, dinamik tepki değerleri ile yolun rezonans frekansını önemli ölçüde etkilemektedir. Grafikten de görüldüğü gibi balast ve zeminin sönümleme ve rijitlik değerlerinin düşük olması durumunda, diğer bir ifadeyle balast ve zemin kalitesinin düşük olması durumunda, yolda daha fazla dinamik tepkiler oluşmaktadır. Bu durum taşıt ve yol güvenliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca kötü balast ve zemin koşulları yolun bakım ve onarım masraflarını artıracaktır ki, bu da ekonomik açıdan ve yolun işletimi açısından istenilmeyen bir durumdur. Dolayısıyla günümüzde halen araştırılmakta olan balast ve zemin parametrelerinin (rijitlik ve sönümleme özellikleri vs.) doğru bir şekilde tanımlanabilmesi yol stabilitesi ve dinamiği açısından oldukça önemlidir.

Son olarak Şekil E1.7'de travers ve ray için Dinamik Tepki-Frekans grafiği verilmiştir. Bu grafikte 0-2500 Hz frekans aralığındaki frekans değerleri için travers ve rayda oluşacak dinamik tepki değerleri hesaplanmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere raydaki dinamik tepki değerleri traversteki dinamik tepki değerlerine göre daha fazladır. Daha önceki bölümlerde yolun ayırık ya da sürekli mesnetli olarak modellenmesi durumunda birtakım önemli noktalara değinilmişti. Rayın traverslere mesnetlendiği yol kesimleri ile travers aralığı boyunca yeralan yol kesiminde farklı çökmeler oluşacak ve buna bağlı olarak dinamik etkiler bu farklı yol kesimlerinde değişecektir. Dolayısıyla yolun sürekli mesnetlenmesi durumunda, mesnet rezonans frekansları dikkate alınmamakta ve bu farklı çökme değerleri gözardı edilmektedir. Ayırık mesnetli yol modeli ise demiryolu yapısı için daha gerçekçi bir model olup, bu modelde mesnet rezonans frekansları ve belirtilen her iki yol kesimi için dinamik tepkiler ve deplasmanlar dikkate alınabilmektedir. Bu grafik sonucunda da alternatif yol tipleri için tasarım esnasında tanımlanan yol modelinin dinamik davranış açısından oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Raylı sistemler elastik yapıları nedeniyle yüksek hız ve artan dingil yükleri altında oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvetlere maruz kalmaktadırlar. Bu kuvvetlerin frekans bölgeleri, özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmeye değerdir. Zira zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı, sistemin doğal frekansı ile çakıştığı takdirde, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelmektedir. Dolayısıyla rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik problemlerle karşılaşılmasını için taşıt ve yol bileşenlerinin dinamik davranışları çok iyi tanımlanmalı, alternatif yol tipleri için uygun dinamik modeller kurulmalı ve tasarım safhasında kapsamlı bir dinamik analiz yapılmalıdır.

Uluslararası platformda, demiryolunun dinamik davranışı konusunda birçok araştırma mevcuttur ve günümüzde de halen bu konudaki çalışmalar sürdürülmektedir. Bunun yanı sıra demiryolu üstyapısının dinamik davranışı konusunda, halen araştırılmayı bekleyen birçok konu mevcuttur. Örneğin, yaklaşık 0-100 Hz arasında değişen frekans değerlerinde, boji ve tekerlek takımının dinamik davranışı ile ilgili olarak çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca, ilgilenilen frekans aralıklarında taşıtın ve yolun dinamik davranışının modellenmesinde halen çözümlenememiş bir problem de, ray elastik mesnetlerinin ve balast ile zeminin gerekli parametrelerinin (sönümleme ve rijitlik özellikleri vb.) belirlenmesi ile ilgilidir. Balast ve zemin ile ray elastik mesnetlerinin doğru parametrelerinin elde edilmesi yol stabilitesi ve dinamiği açısından oldukça önemlidir. Bu parametrelerin belirlenebilmesi ise, test trenleri kullanılarak, ray elastik mesnetleri ve balast için daha fazla deney ve ölçümlerin yapılabilmesi ile mümkün olacaktır.

Uluslararası platformda demiryolu yapısının dinamik davranışı ve stabilitesine yönelik önemli çalışmalar yapılmasına rağmen, ülkemizde ne yazık ki bu konuda yapılan çalışmaların sayısı yok denebilecek kadar azdır ve bu konu hakkında yapılabilecek her türlü çalışma ülkemiz ekonomisi için oldukça faydalı olacaktır. Ülkemizde gelişen kentiçi demiryolu sistemlerinde de, demiryolunun dinamik davranışı konusunda birçok problemle karşılaşılmaktadır. Örneğin, İstanbul gibi tarihi mirası çok olan bir kentte yapılacak kentiçi demiryolu sistemi, doğurduğu titreşimler ile tarihi eserlere çok büyük hasarlar verebilmektedir. Oysa, demiryolu yapısının hesabı aşamasında iyi yapılmış bir dinamik analize göre tasarım, bu gibi titreşimlerin etkisini minimuma indirebilmektedir. Ayrıca, demiryolu sistemleri için yetersiz yapılan tasarım ve boyutlandırma sonucunda, yanlış seçilen yol elemanları ve/veya yol tipleri ile, yolun işletmeye açılmasından sonraki bakım ve onarım masrafları da artmaktadır. Bu durumun önlenmesi için demiryolu yapısının tasarımı aşamasında doğru tanımlanmış dinamik

modellerin kullanılması ve bu modeller doğrultusunda dinamik analizlerin yapılması gerekir. Ne var ki; ülkemizde çoğu zaman tasarım aşamasında, demiryolu yapısının dinamik analizi bir yana, statik analizi bile yapılmamaktadır ve sonuç olarak, karşılaşılan problemler doğrultusunda maliyeti yüksek çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle demiryolu işletmeleri, demiryolu sistemlerindeki ondülasyon, gürültü ve titreşim oluşumu, yolcu konforunun bozulması, bakım masraflarının artması ve yolun stabilitesinin bozulması gibi problemlerle, olması gerekenden çok daha kısa zamanda karşılaşmaktadırlar. Bu problemler ile olduğunca geç karşılaşmak, etkilerini minimuma indirmek ve en iyi şekilde verim sağlayabilmek adına alternatif yol tipleri için uygun dinamik modeller kurulmalı ve dinamik analizler yapılmalıdır.

Bu çalışmada demiryolu yapısının ve demiryolu taşıtlarının dinamik özelliklerine değinilmiş, yolun düşey yöndeki dinamik stabilitesi için taşıtların ve yol yapısının dinamik olarak nasıl modellenmeleri gerektiği incelenmiştir. Kurulabilecek dinamik modeller doğrultusunda kullanılabilecek hesap yöntemleri araştırılmış ve dinamik analizlerde kullanılan başlıca yöntemlerden birisi olan frekans tanım alanlı çözüm metodu ile belirli frekans aralıkları için yolda oluşabilecek dinamik tepkiler hesaplanmıştır. Farklı frekans aralıklarında balastlı üstyapı tipi için çeşitli üstyapı bileşenlerinin kullanılması durumunda, yolun dinamik davranışında ne gibi değişimlerin olabileceği, her bir bileşenin dinamik davranışına ba □□

doğru yol modelleri kullanılarak gerekli analizlerin yapılabilmesine yönelik çalışmalara katkı sağlamak ve ileride bu konuda yapılacak araştırmalara ışık tutulması amaçlanmıştır. Son olarak özellikle belirtmek gerekir ki, dinamik tasarım için gerekli çalışmalar sonucunda yapım şeklinin belirlenmesinde esas alınacak teorik koşullar tanımlandıktan sonra hipotezin ve modelin doğruluğu gerçek değerlerle de test edilmelidir.

KAYNAKLAR

Broeck, P. V., (2001) “A Prediction Model for Ground-borne Vibrations due to Railway Traffic”, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Cai, Z., (1992) “Modelling of Rail Track Dynamics and Wheel/Rail Interaction”, Department of Civil Engineering, Queen’s University, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Canada.

De Man, A. P., (2002) “Dynatrack A Survey of Dynamic Railway Track Properties and Their Quality”, Ph.D. Thesis, TU Delft University, Netherlands.

Dong, R., (1994), “Vertical Dynamics of Railway Vehicle-Track System”, Concordia University, Canada.

Esveld, C., (2003) “Conventional Track Structures”, TU Delft University Lesson Notes, Netherlands.

Esveld, C., (1997) “Track Structures In An Urban Environment”, Symposium K.U.Leuven, Netherlands.

Esveld, C., (2001), “Modern Railway Track”, Second Edition, TU Delf University, Netherlands.

Erel, A., (2003) “Ankara Metrosu 3. Aşama İşleri Travers Aralıklarının Dinamik Analizle Tahkiki”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Erel, A., (2002) “Ankara Metrosu 3. Aşama İşleri İçin Rijit Üstyapı Seçeneklerinin Araştırılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Erel, A., (1989) “Demiryollarında Üstyapı Testi ve Boyutlandırması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Erel A., (1981) “Belirli İşletme Koşullarında Uygun Ray Tipinin Araştırılması”, İstanbul D. M. M. Akademisi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.

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

Knothe, K., Grassie, S.L., (1993) “Modeling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies”, *Vehicle System Dynamics* 22, 209-262, Netherlands.

Knothe, K., (2001) “Gleisdynamik” Technische Universität, Berlin.

Kumaran, G., Menon, D., Nair, K., (2002) “Dynamic studies of railtrack sleepers in a track structure system”, *Journal of Sound and Vibration*, India.

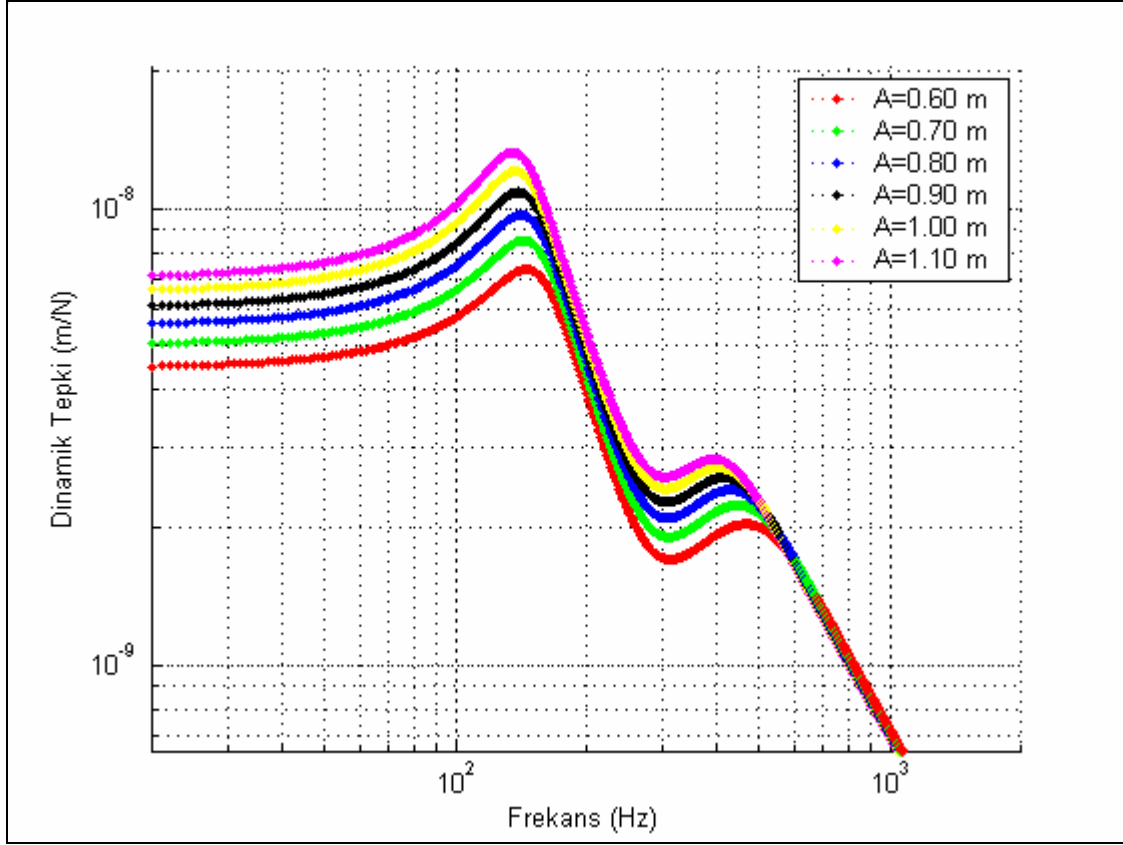
Popp, K., Knothe, K., Pöpper, C., (2005) “System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade: report on the DFG priority programme in Germany and subsequent research”, *Vehicle System Dynamics*, Berlin.

Yılmaz, V. O., (2004), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Davranışı”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.

EKLER

- Ek 1 Seçilen standart yol modeli (CII) için elde edilen grafikler ve çözümlemelerde kullanılan parametrelere ilişkin çizelgeler.
- Ek 2 Demiryolu Üstyapısının Basit Kiriş Modeli ile SAP 2000 Programında Çözümü ve Winkler Hipotezi ile Karşılaştırılması.
- Ek 3 Tez hazırlanırken karşılaşılan yabancı kelimelerin kullanılan Türkçe karşılıkları (Sözlük).

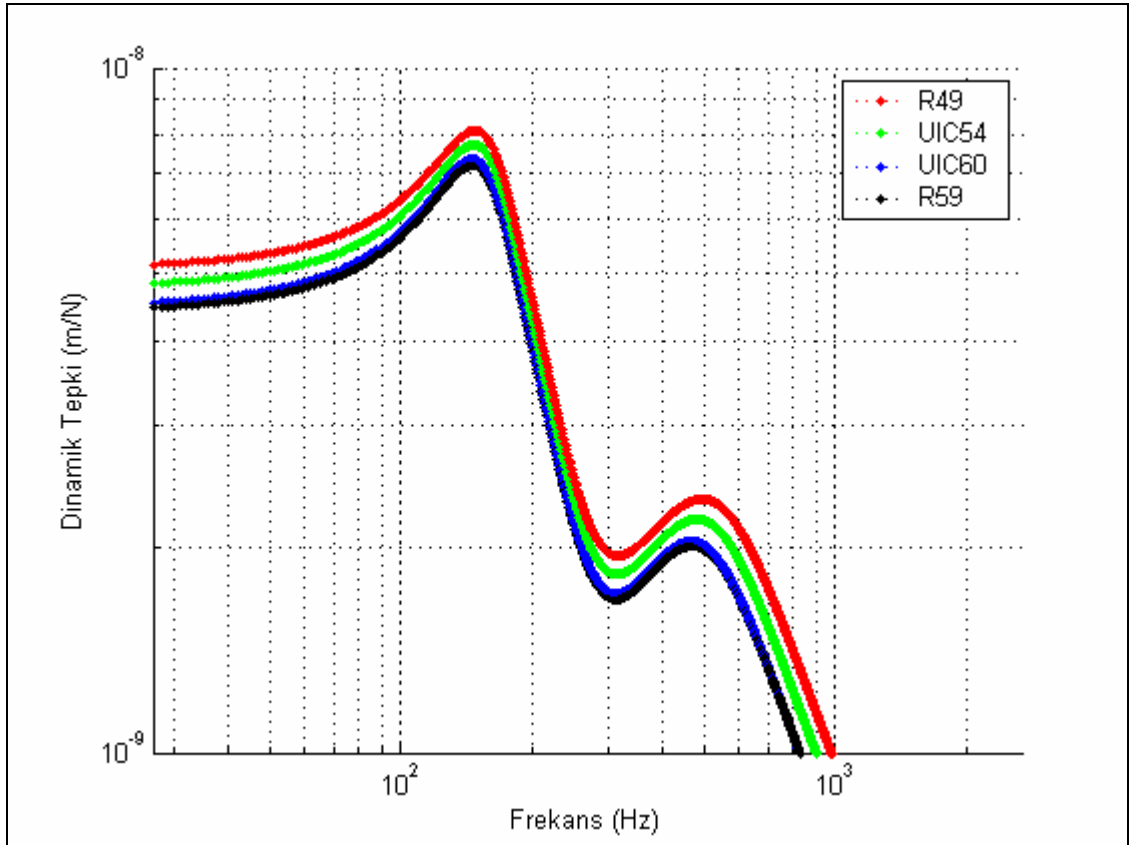
Ek 1 Seçilen standart yol modeli (CII) için elde edilen grafikler ve çözümlemelerde kullanılan parametrelere ilişkin çizelgeler



Şekil E1.1. Farklı travers aralıklarına sahip yollara ilişkin Dinamik Tepki - Frekans grafiği.

Çizelge E1.1. Şekil E1.1 için kullanılan parametreler.

EI	Nm^2	$6,41 \cdot 10^6$	Ray eğilme rijitliği
m_r	Kg/m	60,3	Birim uzunluktaki ray kütlesi
m_t	Kg	290	Travers kütlesi
k_{rp}	N/m	$2,8 \cdot 10^8$	Ray elastomer mesneti rijitlik (esneklik) katsayısı
c_{rp}	Ns/m	$6,3 \cdot 10^4$	Ray elastomer mesneti sönümlleme katsayısı
k_b	N/m	$1,8 \cdot 10^8$	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı
c_b	Ns/m	$8,22 \cdot 10^4$	Balast tabakası ve zeminin sönümlleme katsayısı
A	m	0,60-0,70-0,80-0,90-1,00-1,10	Travers aralığı



Şekil E1.2. Farklı ray tiplerine sahip yollara ilişkin Dinamik Tepki - Frekans grafiği.

Çizelge E1.2. Şekil E1.2 için kullanılan parametreler.

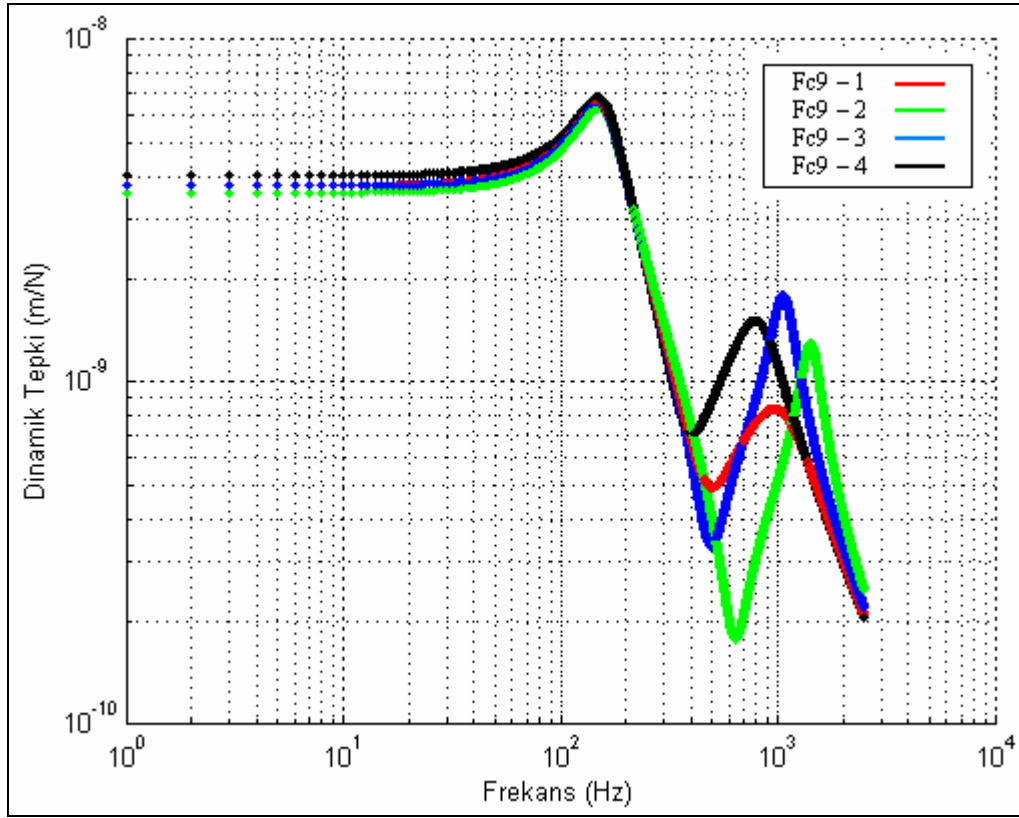
EI	Nm^2	Bkz. Çizelge E1.3	Ray eğilme rijitliği
m_r	Kg/m	Bkz. Çizelge E1.3	Birim uzunluktaki ray kütlesi
m_t	Kg	290	Travers kütlesi
k_{rp}	N/m	$2,8 \cdot 10^8$	Ray elastomer mesneti rijitlik (esneklik) katsayısı
c_{rp}	Ns/m	$6,3 \cdot 10^4$	Ray elastomer mesneti sönümlleme katsayısı
k_b	N/m	$1,8 \cdot 10^8$	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı
c_b	Ns/m	$8,22 \cdot 10^4$	Balast tabakası ve zeminin sönümlleme katsayısı
A	m	0,60	Travers aralığı

Çizelge E1.3. Şekil E1.2 için hesaplamalarda kullanılan rayların teknik özellikleri
(Esveld, 2001).

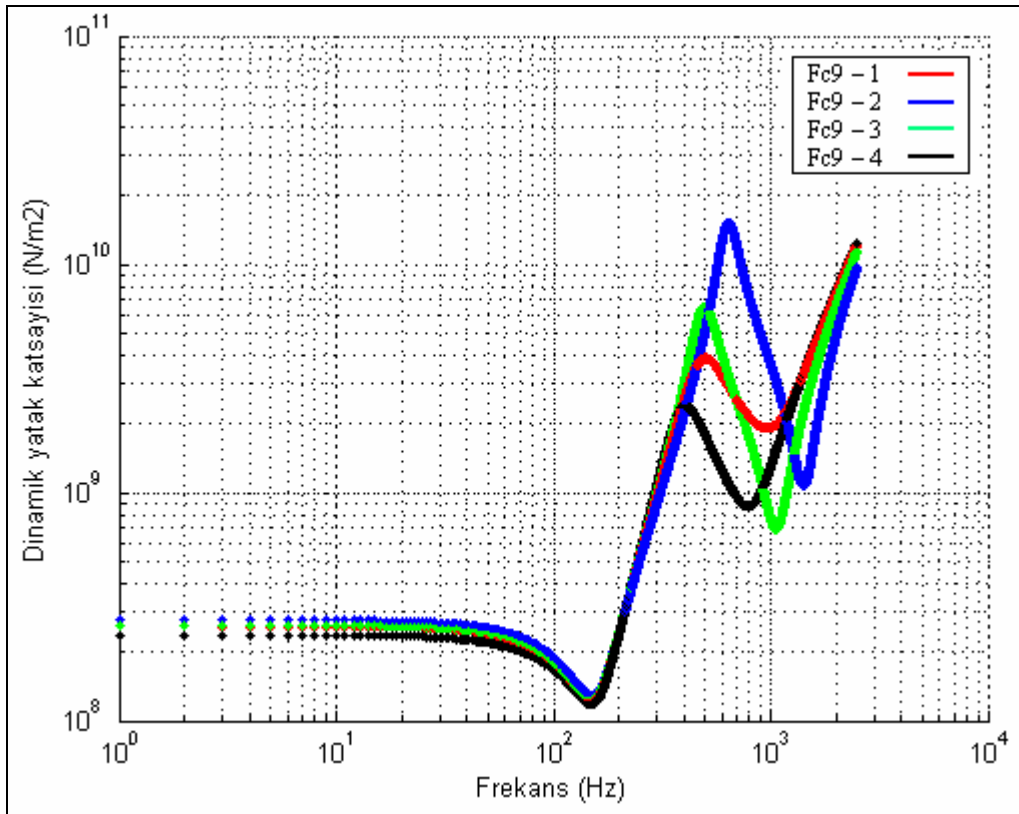
ÖZELLİKLERİ	Birimi	R 49	UIC 60	R 59	UIC 54
		(Almanya)	(EU)	(EU)	(EU)
Birim uzunluktaki ray kütlesi	Kg/m	49,43	60,34	59	54,43
Enkesit Alanı	mm ²	6297	7687	7700	6934
Ray Yüksekliği	mm	149	172	180	159
Mantar Genişliği	mm	67	72	113	70
Mantar Yüksekliği	mm	39,80	37,50	56	49,40
Gövde Kalınlığı	mm	14	16,50	42	16
Taban Genişliği	mm	125	150	180	140
Atalet Momenti (I _x)	cm ⁴	1819	3055	3268	2346
Ağırlık Merkezi Yüksekliği	mm	73,30	80,90	92,63	74,97
Eğilme Rijitliği (EI)	Nm ²	3,82.10 ⁶	6,41.10 ⁶	6,86.10 ⁶	4,92.10 ⁶

Çizelge E1.4. Şekil E1.3 ve Şekil E1.4 için kullanılan örnek ray elastomer mesnet tiplerine ilişkin parametreler (De Man, 2002).

Kodu	Tipi	k_{rp} (N/m)	c_{rp} (Ns/m)
Fc9-1	Ray Elastomer Mesneti 4.5 mm R54 için (Yeni)	1120.10 ⁶	120.10 ³
Fc9-2	Ray Elastomer Mesneti 4.5 mm R54 için (Aşınmış)	2127.10 ⁶	44,9.10 ³
Fc9-3	Ray Elastomer Mesneti 8.0 mm R54 için (Aşınmış)	1191.10 ⁶	38,4.10 ³
Fc9-4	Ray Elastomer Mesneti 4.5 mm R54 için (Yeni)	693.10 ⁶	66.2.10 ³



Şekil E1.3. Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Tepki - Frekans grafiği.



Şekil E1.4. Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Yatak Katsayısı - Frekans grafiği.

Çizelge E1.5. Şekil E1.3 ve Şekil E1.4 için kullanılan parametreler.

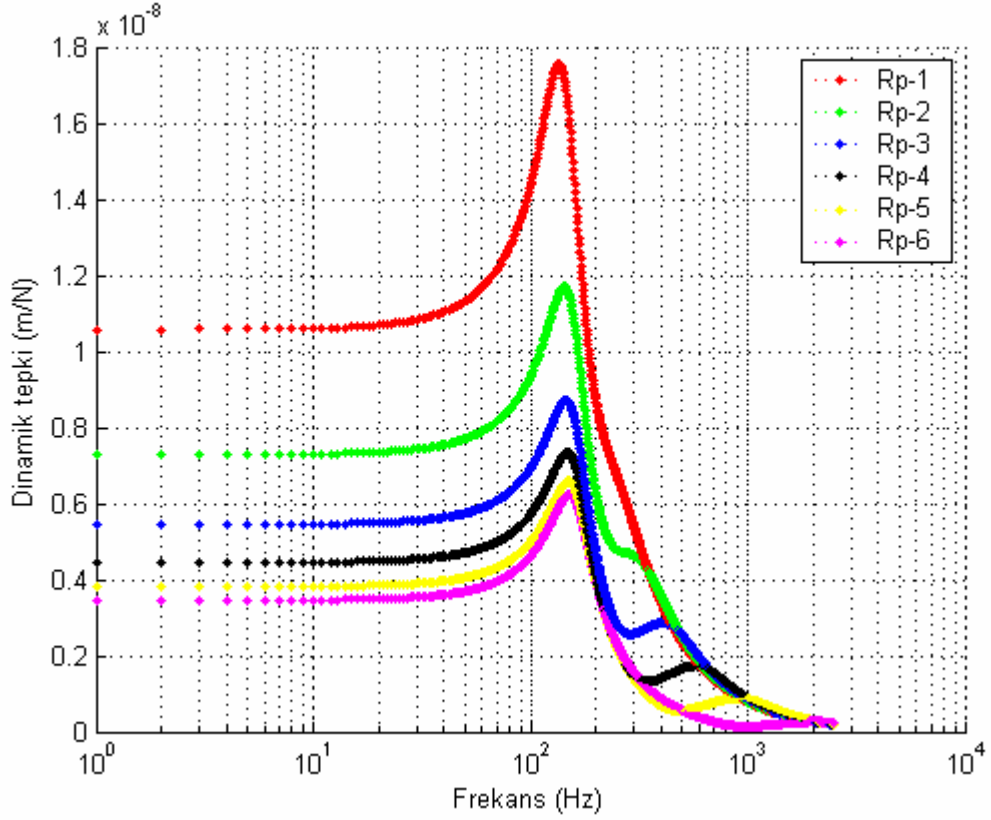
EI	Nm^2	Bkz. Çizelge E1.3 (UIC 54)	Ray eğilme rijitliği
m_r	Kg/m	54,43	Birim uzunluktaki ray kütlesi
m_t	Kg	290	Travers kütlesi
k_{rp}	N/m	Bkz. Çizelge E1.4	Ray elastomer mesneti rijitlik (esneklik) katsayısı
c_{rp}	Ns/m	Bkz. Çizelge E1.4	Ray elastomer mesneti sönümlleme katsayısı
k_b	N/m	$1,8.10^8$	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı
c_b	Ns/m	$8,22.10^4$	Balast tabakası ve zeminin sönümlleme katsayısı
A	m	0,60	Travers aralığı

Çizelge E1.6. Şekil E1.5 için kullanılan ray elastomer mesnet tiplerine ilişkin parametreler (Cai, 1992).

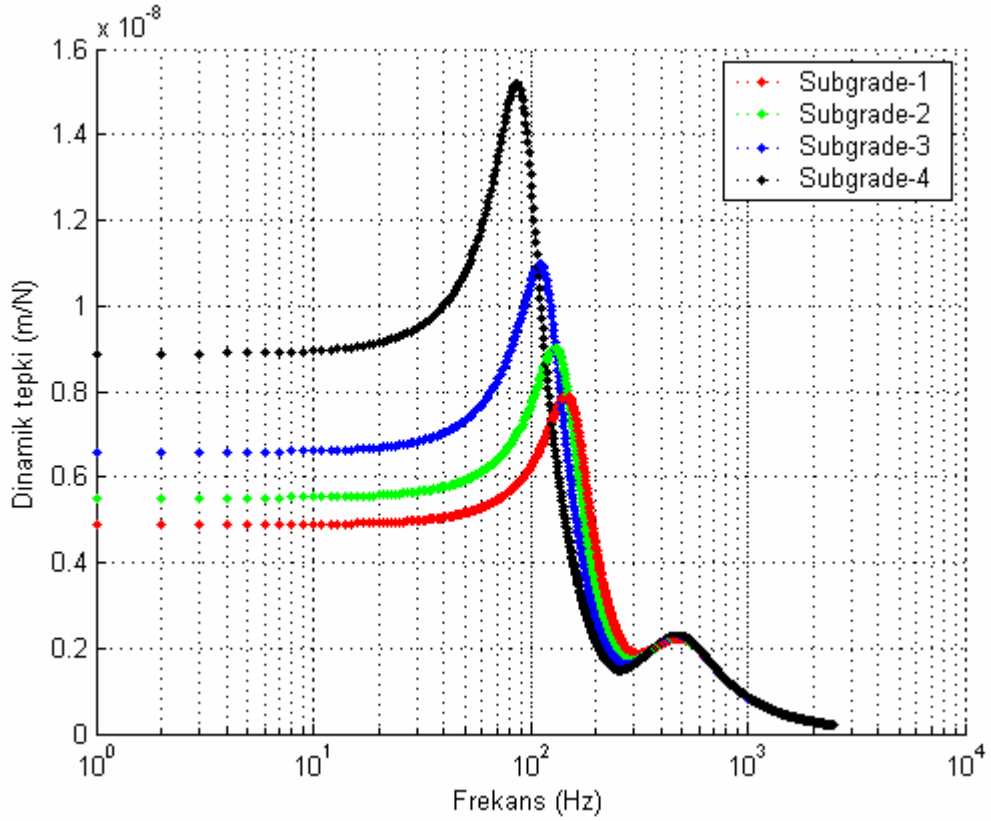
Ray Elastomer Mesneti	$k_{rp} (N/m)$	$c_{rp} (Ns/m)$
Rp-1	50.10^6	$26,5.10^3$
Rp-2	100.10^6	$37,4.10^3$
Rp-3	200.10^6	$52,9.10^3$
Rp-4	400.10^6	$74,8.10^3$
Rp-5	1000.10^6	$118,3.10^3$
Rp-6	5000.10^6	$264,6.10^3$

Çizelge E1.7. Şekil E1.6 için balast ve zemine ilişkin parametreler (Cai, 1992).

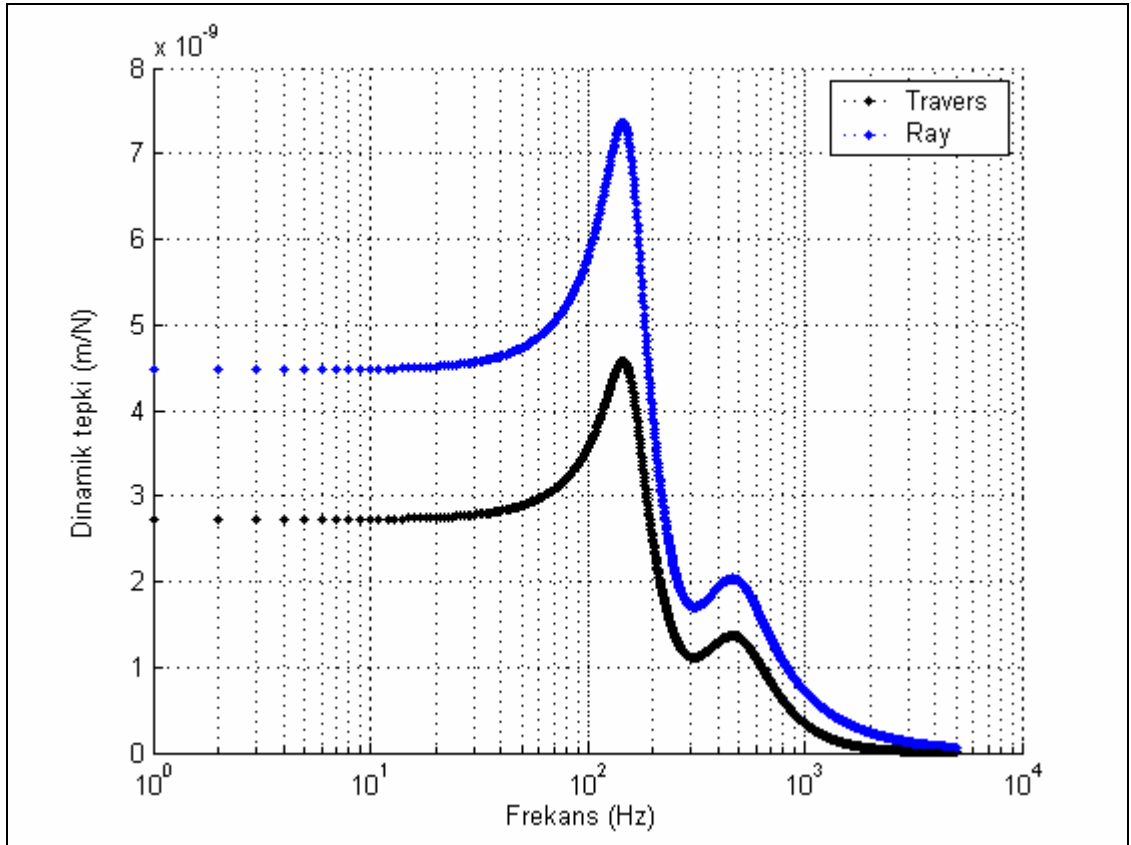
YatakMalzemesi (Balast-Zemin)	$k_b (N/m)$	$c_b (Ns/m)$
Subgrade-1	180.10^6	$82,2.10^3$
Subgrade-2	140.10^6	$72,6.10^3$
Subgrade-3	100.10^6	$61,3.10^3$
Subgrade-4	60.10^6	$47,5.10^3$



Şekil E1.5. Farklı ray elastomer mesnetleri için Dinamik Tepki- Frekans grafiği.



Şekil E1.6. Farklı yatak malzemesi (balast-zemin) için Dinamik Tepki- Frekans grafiği.



Şekil E1.7. Travers ve ray için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

Çizelge E1.8. Şekil E1.7 için kullanılan parametreler.

EI	Nm^2	$6,41.10^6$	Ray eğilme rijitliği
m_r	Kg/m	60,3	Birim uzunluktaki ray kütlesi
m_t	Kg	290	Travers kütlesi
k_{rp}	N/m	$2,8.10^8$	Ray elastomer mesneti rijitlik (esneklik) katsayısı
c_{rp}	Ns/m	$6,3.10^4$	Ray elastomer mesneti sönümlleme katsayısı
k_b	N/m	$1,8.10^8$	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı
c_b	Ns/m	$8,22.10^4$	Balast tabakası ve zeminin sönümlleme katsayısı
A	m	0,60	Travers aralığı

Ek 2 Demiryolu üstyapısının basit kiriş modeli ile SAP 2000 programında çözümü ve Winkler Hipotezi ile karşılaştırılması

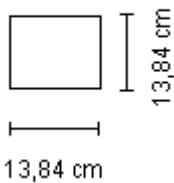
Bu bölümde basit kiriş modeli ile demiryolu üstyapısı SAP 2000 programında modellenerek gerekli çözümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar grafikler şeklinde Winkler Hipotezi ile karşılaştırılmıştır. Modelde dikkate alınan ray ve yol özellikleri ile birlikte ilgili parametreler ve çözüme ilişkin kabuller aşağıda verilmiştir.

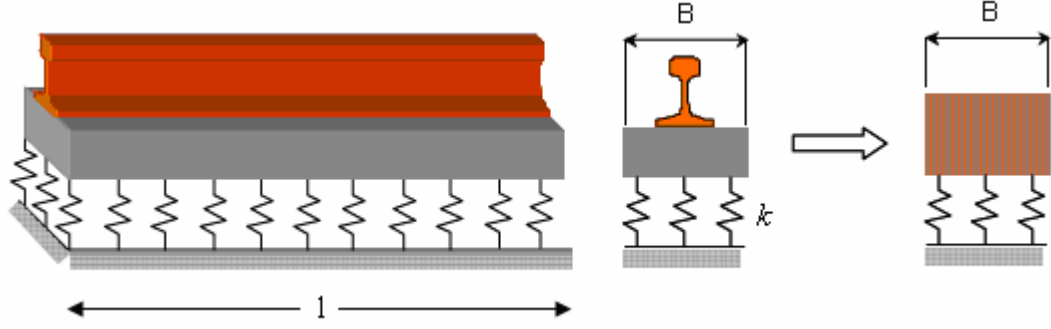
Çizelge E2.1. UIC 60 Rayına ilişkin özellikler.

RAY ÖZELLİKLERİ (UIC 60)	Birimi	Değeri
Elastisite Modülü (E)	N/m ²	2,1.10 ¹¹
Atalet Momenti (I _x)	cm ⁴	3055
Akma Dayanımı (σ _a)	N/m ²	172
Poisson Oranı (ν)	-	0,3
Rayın Sıcaklıkla Uzama Katsayısı (α)	1/°C	1,15.10 ⁻⁵

SAP 2000 programında modellenen kiriş (ray/yol) uzunluğu $l = 10$ m olarak kabul edilmiştir. Raya etkiyen statik düşey tekerlik yükü (Q) 10 ton olarak kabul edilmiştir. Kirişe ilişkin özellikler UIC 60 rayına ilişkin özellikler olup, hesaplamalar için gereken parametreler Çizelge E2.1’de verilmiştir. Rayın birim hacim ağırlığı (ρ) ve kütlesi (m), sıfır alınarak hesaplamalarda ihmal edilmiştir. Hesap kolaylığı açısından ray kesiti, atalet momenti ($I_x = 3055 \text{ cm}^4$) eşdeğer olacak şekilde (13,84x13,84) cm kare kesit olarak kabul edilmiştir.

Kare Kesit Kabulü ile Ray Kesiti





Şekil E2.1. Demiryolu üstyapısı için basit kiriş modeli.

SAP 2000 programı ile modelde tanımlanan 10 m uzunluğundaki kiriş elemanı, her biri 2 cm uzunluğunda (L_i , L_j), 500 sonlu elemana bölünmüştür ve her eleman yaylarla elastik olarak mesnetlenmiştir. Yay katsayısı ise balast ve zeminin sönümlleme özelliklerini ifade etmek üzere, yatak katsayısı değerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu yay katsayısına bağlı olarak ise birim uzunluktaki yay katsayısı (k^l) belirlenmiştir. Bu hesaplamalar için gerekli eşitlikler ile hesaplanan yay katsayısı ve birim uzunluktaki yay katsayısı değerleri aşağıda verilmiştir;

$$k = B \cdot C = 7.38,46 = 269,22 \text{ Kg/cm}^2 = 262220 \text{ N/m} \quad (1)$$

$$k^l = C \cdot B \cdot \frac{(L_i + L_j)}{2} = 269,22 \cdot \frac{(2 + 2)}{2} = 538,44 \text{ Kg/cm} = 538440 \text{ N/m} \quad (2)$$

k :Yay katsayısı (Kg/cm^2).

k^l : Birim uzunluktaki yay katsayısı (Kg/cm).

B : Sanal (Hayali) kiriş genişliği (cm).

C : Yatak Katsayısı (Kg/cm^3).

L_i : i. elemanın uzunluğu (2 cm).

L_j : j. elemanın uzunluğu (2 cm).

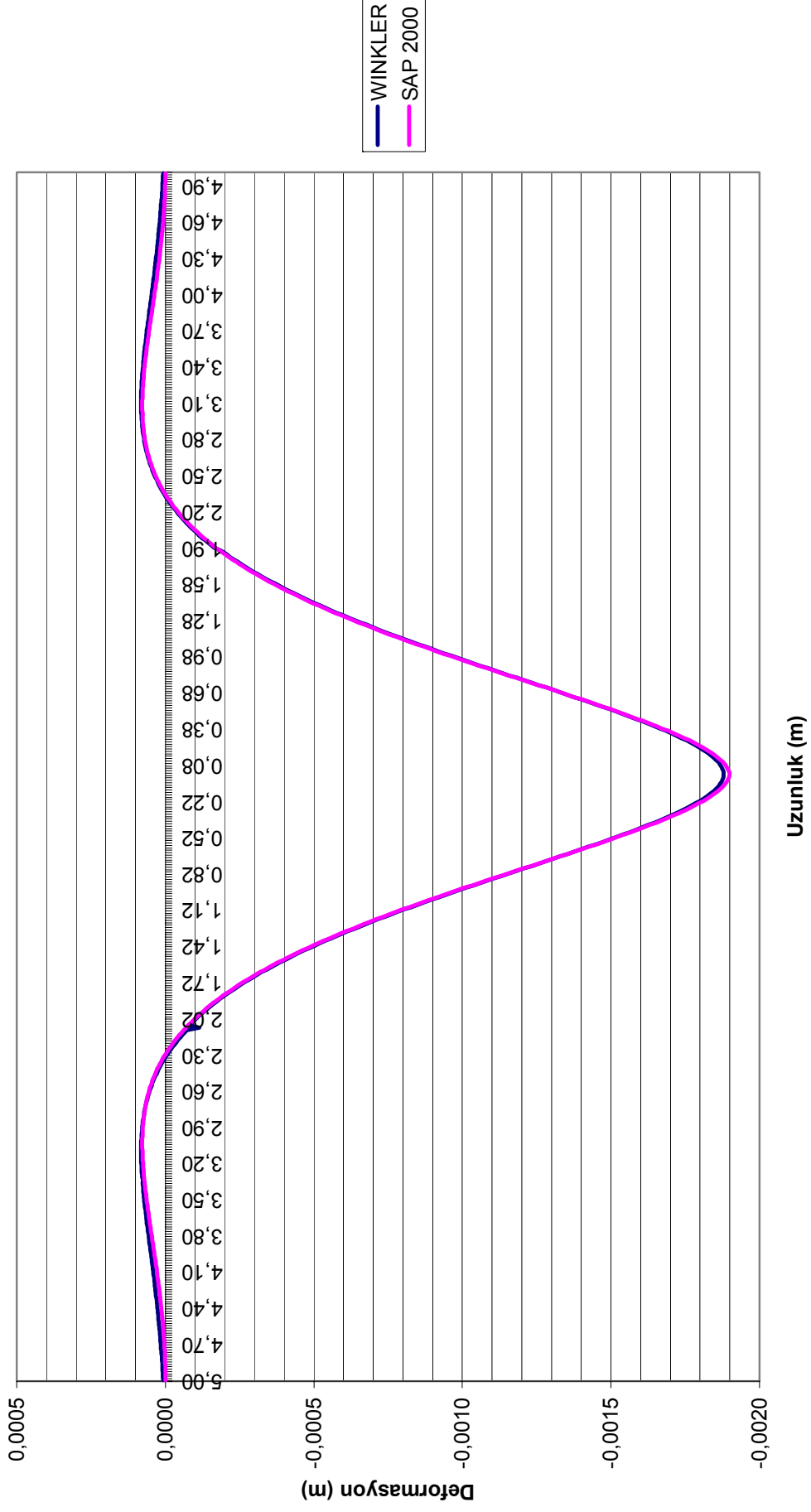
Çizelge E2.2. SAP 2000 ve Winkler model parametreleri.

Özellikler	Birimi	Değeri
Traversin yük ileten uzunluğu (2u)	cm	100
Travers genişliği (b_t)	cm	25
Sanal (Hayali) Kiriş Genişliği (B)	cm	38,46
Yatak Katsayısı (C)	Kg/cm ³	7
Travers Aralığı (A)	cm	65
Elastik (Karakteristik) Uzunluk (L)	cm	98,81
UIC 60 Rayı	-	Bkz. Çizelge E2.1

Çizelge E2.2’de verilen değerlere göre Winkler eşitlikleri ile çözüm yapıldığında $x = 0$ noktası için, diğer bir deyişle statik tekil tekerlek yükünün yolun tam orta noktasında etki ettiği durumda; düşey elastik çökme değeri $y = 0,18796 \cong 0,19$ cm ve eğilme momenti değeri $M = 24702,5$ N.m olarak bulunmuştur. SAP 2000 Programında yapılan analiz sonucunda ise, düşey doğrultudaki çökme (deformasyon) değeri $y = 0,19$ cm ve eğilme momenti değeri 24574,11 N.m olarak bulunmuştur.

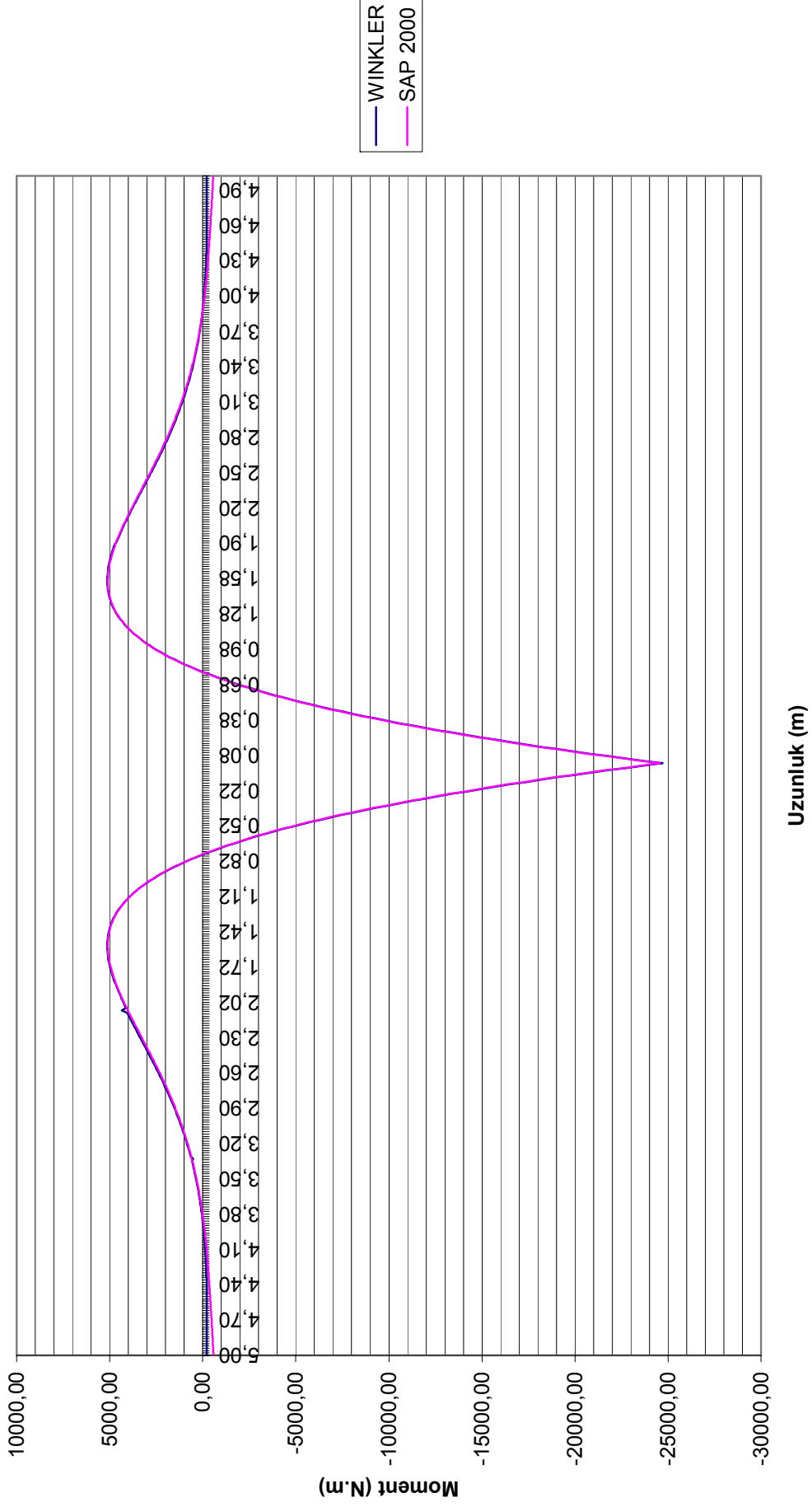
Şekil E2.2’de Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin deformasyon grafiği verilmiştir. Şekil E2.3’te ise Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin eğilme momenti grafiği verilmiştir. Şekil E2.2 ve Şekil E2.3’teki grafiklere bağlı olarak SAP 2000 modeli ve Winkler modelinin birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

WINKLER - SAP 2000 DEFORMASYON GRAFİKLERİ



Şekil E2.2 Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin deformasyon grafiği.

WINKLER - SAP 2000 MOMENT GRAFİKLERİ



Şekil E2.3 Winkler Hipotezi ve SAP 2000 Programı ile elde edilen yola ilişkin eğilme momenti grafiği.

Ek 3 Tez hazırlanırken karşılaşılan yabancı kelimelerin kullanılan Türkçe karşılıkları (Sözlük)

İngilizce - Türkçe

Corrugation	: Ondülasyon
Coupled frequency	: Kombine frekans
Cross receptance	: Geçişli tepki davranışı
Dashpot	: Amortisör
Direct receptance	: Direkt tepki davranışı
Eigenvalue	: Özdeğer
Fourier Transform	: Fourier Dönüşümü
Frequency-Domain	: Frekans Tanım Alanı
Half space	: Yarı-mekan
Impact noise	: Çarpma sesi
Impulse-hammer	: Darbe çekici
Lumped parameter	: Toplu parametre
Non steady-state	: Durağan olmayan durum
Out-of-round wheel	: Tekerlek yassılaşması
Pantograph	: Pantograf
Pinned-pinned	: mesnetten mesnete rezonans frekansı
Pitting	: Oksitlenme
Quasi-static	: Yarı statik
Rail end	: Ray bileşim yeri
Rail Fastening	: Ray bağlantı elemanı
Rail foot	: Ray tabanı
Rail Joint Hole	: Cebire deliği, Ray bağlantı deliği
Railhead	: Ray mantarı
Rail pad	: Ray elastomer mesneti
Rail seat	: Ray oturma yeri
Rear end	: Taşıtın arkası
Receptance	: Rayların gelen tahrik noktası altında yaptıkları deplasman, tepki davranışı / Birim yük etkisi altındaki çökme
Reciprocity method	: Karşılıklı etkileşim metodu
Rolling contact fatigue	: Yuvarlanma kontakt yorulması
Rolling noise	: Yuvarlanma sesi
Roll-slip	: Yuvarlanma-kayma
Roughness	: Pürüzlülük
Running surface of the rail	: Rayın yuvarlanma yüzeyindeki ray mantar kenarının tekerleğe temas yüzeyi
Shear factor	: Kayma Faktörü
Shear waves	: Kayma titreşimi doğuran dalga
Shelling	: Kabuklanma
Skewing	: Rayın rölatif dönmesi
Sleeper span	: Travers aralığı
Sleeper	: Travers
Squat	: Uğuldama
Stationary point load	: Hareketsiz noktasal yük
Steady-state	: Durağan durum
Stick-Slip	: Yapışma kayma
Substrate	: Altyapı

Time-step integration : Zaman adımlı integrasyon
 Tread : Dingil açıklığı
 Torsional mode : Burulma modu
 Transfer function : Büyütme faktörü / Transfer fonksiyonu
 Transient component : Süreksiz bileşen
 Unsprung mass : Yaylandırılmamış kütle
 Wheel tread : Tekerlek üzerindeki pürüzlülükler
 Wheel flat : Tekerlek aplatiliği
 Wheelset : Tekerlek takımı

Almanca - Türkçe

Balken (m) : Kiriş
 Berechnung (f) : Hesaplama
 Bettung (f) : Yataklanma
 Bezeichnung (f) : Notasyon
 Biegemoment (n) : Eğilme momenti
 Biegesteifigkeit (f) : Eğilme rijitliği
 Drehgestell (n) : Boji
 Eckfrequenz (f) : Köşe frekansı
 Gleichung (f) : Eşitlik
 Gleis (n) : Ray
 Nachgiebigkeit (f) : Esneklik
 Randbedingung (f) : Sınır koşulları
 Rechnung (f) : Hesaplama
 Rezeptanz : Birim yük etkisi altındaki deformasyon
 Schiene (f) : Ray
 Steifigkeit (f) : Rijitlik
 Unbestimmte : Hiperstatik
 Verschiebung (f) : Deplasman, çökme
 Verschmieren : Ayrık mesnetlemenin sürekliye dönüştürülmesi
 Winkelgeschwindigkeit (f) : Açısal hız

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.09.1980	
Doğum yeri	Kahramanmaraş	
Lise	1991-1998	Kahramanmaraş Çukurova Elektrik Anadolu Lisesi
Lisans	1998-2003	Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Programı

Çalıştığı kurumlar

2005	Prota – Beca Ortak Girişimi Prota Mühendislik ve Müşavirlik Hizmetleri
2005-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı