

154321

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK DAVRANIŞI


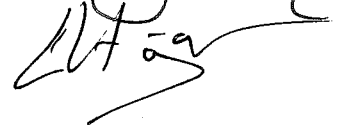
İnş Müh. Volkan Okur YILMAZ

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ



Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydın EREL

Prof. Dr. Tenzin BAYRAKDAR 
Prof. Dr. Emine AĞAR 

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI	2
2.1 Balastlı Üstyapı	13
2.2 Rijit Üstyapı Sistemleri	13
2.3 Gömülü Raylı Yol Yapıları	17
2.3.1 Sürekli Gömülü Raylı Rijit Üstyapı	17
2.3.2 Kama Sistemi İle Sıkıştırılmış Raylı Rijit Üstyapı	18
3. TİTREŞİM ANALİZİ	20
3.1 Serbest, Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler	20
3.2 Zorlanmış Sönümlü Titreşimler	24
3.2.1 Sabit Genlikli Harmonik Kuvvetle Zorlanmış Sistem	25
3.2.2 Mesnetin Hareketi İle Zorlanmış Sistem	27
4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK DAVRANIŞI	29
4.1 Demiryolunun Dinamik Davranışının Modellenmesine Giriş ve Tarihsel Gelişim	30
4.2 Taşıt/Yol Etkileşim Problemleri	31
4.2.1 Taşıt ve Yol Dinamiği Problemleri	31
4.2.2 Boji'nin Bileşenlerini ve Yaylandırılmamış Kütle'yi İçeren Problemler	33
4.2.3 Tekerlek ve Rayın Yuvarlanma Kontak Yorulması	33
4.2.3.1 Tekerlek Problemleri	33
4.2.3.2 Ray Problemleri	34
4.2.4 Yol Bileşenlerinin Bozulması	35
4.2.5 Gürültü	37
4.2.6 İlgilenilen Frekans Limitleri	38
4.3 Yol ve Taşıt/Yol Etkileşimi Modelleri	38
4.3.1 Yol –Taşıt Etkileşimi ve Yol Modellenmesi Problemlerinin Araştırılması	38
4.3.2 Fiziksel Yol Bileşenleri Modelleri	40
4.3.2.1 Ray Modelleme	40
4.3.2.2 Ray Bağlantı Sistemi Modelleri	44
4.3.2.3 Ayrık ve Sürekli Mesnetli Travers Modelleri	46
4.3.3 Yol Sisteminin Modellenmesi	50
4.3.3.1 Yol Modellerinin Hiyerarşisi	50
4.3.3.2 Yol Modellerinin Sonlu ve Sonsuz Uzunluktaki Yapıları	54

4.3.4	Uyarımın (Tahrik Kuvvetinin) Modellenmesi.....	54
4.3.5	Kontak Kuvvetinin Modellenmesi.....	55
4.4	Çözüm Teknikleri ve Tarihsel Araştırma	57
4.4.1	Hareketsiz Noktasal Yükler (HNY) İçin Frekans Tanım Alanı Tekniği.....	58
4.4.1.1	Sürekli Mesnetli Yollarda HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı.....	58
4.4.1.2	Ayrık Mesnetli Yollarda HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı	60
4.4.1.3	Bir Hareket Düzensizliğinde HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı.....	62
4.4.1.4	Yarı-Mekan Üzerindeki Yol Modellerinde HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı.....	64
4.4.2	Hareketli Noktasal Yükler (HY) İçin Frekans Tanım Alanı Teknikleri.....	65
4.4.2.1	Sürekli Mesnetli Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı.....	65
4.4.2.2	Ayrık Mesnetlenmiş Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı.....	67
4.4.2.3	Düzensiz Mesnetlenmiş Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı	68
4.4.2.4	Frekans Tanım Alan Çözümlerinin Cevaplanamayan Problemleri.....	69
4.4.3	Zaman Tanım Alanı Tekniği	69
4.4.3.1	Yarı-Analitik Teknikler	70
4.4.3.2	Nümerik Çözümleme Tekniği	71
4.4.4	Çözüm Teknikleri İle İlgili Araştırma Çalışmalarının Özetlenmesi.....	72
4.5	Seçilen Standart Yol Modellerinin Modellenmesi ve Çözümlemesi.....	74
4.5.1	Genel Hususlar	74
4.5.2	Yol Yükü ve Yol Deplasmanı Arasındaki Dinamik Büyütme Faktörü.....	74
4.5.3	Tek Kiriş Modeli (AI).....	75
4.5.4	Çift Kiriş Modeli (CI).....	83
4.5.5	AI ve CI Modellerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	86
5.	SONUÇ ve ÖNERİLER	90
	KAYNAKLAR.....	93
	EKLER	94
Ek 1	AI (tek kiriş) ve CI (çift kiriş) modellerinin çözümünden elde edilen grafik şekilleri.	95
Ek 2	Örnek ray elastik mesnetleri parametre tablosu (De Man, 2002).....	106
Ek 3	Tez hazırlanırken karşılaşılan yabancı kelimelerin kullanılan Türkçe karşılıkları (Sözlük).	107
	ÖZGEÇMİŞ.....	109

SİMGE LİSTESİ

A	Travers aralığı.
Al	Alüminyum.
B_{dn}	Dinamik büyütme faktörü (Transfer fonksiyonu).
b_t	Travers genişliği.
c	Yay sönümleme katsayısı.
C	Yatak Katsayısı.
c_1	Ray elastik mesnedi sönümleme oranı.
c_2	Zemin ve balast sönümleme oranı.
c_{kr}	Kritik sönüm katsayısı.
E	Elastisite modülü.
EI	Ray yatay rijitliği
f	Frekans.
Fe	Demir.
G	Ağırlık.
G	Geçirgenlik faktörü.
I	Atalet momenti.
I_x	X yönündeki atalet momenti.
k	Yay rijitlik katsayısı.
K	Kayma faktörü.
k_1	Ray elastik mesnedi rijitliği.
k_2	Zemin rijitliği.
KH	Hertz temas yay rijitliği.
L	Karakteristik uzunluk.
l_t	Travers taban uzunluğu.
m	Kütle.
m	Yol kütlesi.
m_1	Ray kütlesi.
m_2	Travers kütlesi.
m_t	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu.
M_w	Yaylandırılmamış tekerlek kütlesi
O	Oksijen.
P	Genlik.
R	Genlik oranı.
$R_{mak.}$	Maksimum genlik.
T	Periyot.
V_{krit}	Kritik hız.
W_x	Mukavemet momenti.
x	Sistemin genliği.
x_{dn}	Dinamik çökme.
x_m	Mesnedin genliği.
x_{st}	Statik çökme.
ζ	Sönüm faktörü.
η	Frekanslar oranı.
Φ	Faz açısı.
f_n	Doğal frekans.
f_s	Sönümlü serbest titreşimin doğal frekansı.
w	Çökme.

KISALTIMA LİSTESİ

AFP	Aufgestanderte Fahrbahnplatte: Kaldırılmış kaplama plakası.
ATD	Asfalt taşıma tabakası üzerine direkt döşeme.
ATD-G	ATD sistemin kentsel ulaşım için geliştirilmiş şekli.
BAM	Federal Institute for Materials Research and Testing (Germany).
BES	BTT mit Einzelstützpunkt.
BR	British Railway.
BTD	Beton taşıma tabakası içine direkt döşeme.
BTE	Betontragschicht mit Einzelstützpunkten.
BTT	Beton Taşıma Tabakası.
DB	Alman Demiryolları.
ERC	Edilon Corkelast Gömülü sistemi.
FE	Finite Element.
FFC	Feste Fahrbahn Crailsheim.
FGP	Fertigteile-Gleistragplatte:prefabrik yol taşıma plağı.
GETRAC	German track corporation.
HNY	Hareketsiz notasal yük.
HSP	Hesaplanan.
HY	Hareketli yük.
ICE	Alman yolcu vagonu.
KR	Kritik sönüm.
KR-ALTI	Kritik altı sönüm.
KR-ÜSTÜ	Kritik üstü sönüm.
LRT	Light Rail System.
LVT	Düşük vibrasyonlu yol.
NQ	Normal kaliteli ray.
PVC	Plastik boru.
SATO	Studiengesellschaft Asphalt Oberbau.
SDF	Single Degree of Freedom System.
SFF	Schwingungsgedaempfte Feste Fahrbahn.
SQ	Silisyum-Mangan ya da Krom-Mangan katkılı özel kaliteli ray.
TT	Taşıma tabakası.
UIC	Uluslar arası demiryolları birliği.
USA	Amerika Birleşik Devletleri.
VQ	Aşınmaya dayanıklı kalitedeki ray.
VRS	Varsayılan.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	19 yy. Başlarında kullanılan üstyapı şekilleri (Erkul, 2002).	2
Şekil 2.2	Vinyol tipi ve artık kullanılmayan çift mantarlı ray (Erkul, 2002).	4
Şekil 2.3	Oluklu ray.	4
Şekil 2.4	UIC 60 Ray Mantarı Kesiti (Esveld, 2003).	5
Şekil 2.5	Ahşap travers (Erkul, 2002).	6
Şekil 2.6	Çelik travers (Erkul, 2002).	6
Şekil 2.7	Betonarme travers uygulaması (Erkul, 2002).	7
Şekil 2.8	İki bloklu betonarme travers uygulaması (Erkul, 2002).	7
Şekil 2.9	Öngermeli tek-blok betonarme travers uygulaması (Erkul,2002).	8
Şekil 2.10	Krampon.	9
Şekil 2.11	Tirfon (www.railway.zonasa.com/chi/rail1.html).	9
Şekil 2.12	Vossloh-Clouth Tipi (Esveld, 2003).	10
Şekil 2.13	Vossloh Tipi (Esveld, 2003).	10
Şekil 2.14	DSA Bağlantı Klipi (Esveld, 2003).	10
Şekil 2.15	Pandrol Bağlantı Klipsi Tipi (Esveld, 2003).	10
Şekil 2.16	NABLA tipi bağlama malzemesi kesiti (Erkul, 2002).	10
Şekil 2.17	Conta yerleşimi.	11
Şekil 2.18	Cebire örneği (Esveld, 2003).	11
Şekil 2.19	Mobil Işık Kaynağı (Esveld, 2003).	12
Şekil 2.20	Işık Kaynağı (Esveld, 2003).	12
Şekil 2.21	Işık Kaynağı (Esveld, 2003).	12
Şekil 2.22	Termit Kaynak (Esveld, 2003).	12
Şekil 2.23	Balastlı Üstyapı.	13
Şekil 2.24	Rheda 2000 taşıma tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Esveld, 2003).	15
Şekil 2.25	PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	15
Şekil 2.26	LVT TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	16
Şekil 2.27	ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	16
Şekil 2.28	GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erk, 2002).	16
Şekil 2.29	Rasengleis monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	16
Şekil 2.30	Shinkansen prefabrik üstyapı sistemi (Erkul, 2002).	16
Şekil 2.31	Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı (tek ray) kesiti (Erel, 2002).	17
Şekil 2.32	Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).	18
Şekil 2.33	Gömülü Ray Yapısı (Erel,2002).	19
Şekil 2.34	Edilon ERC rijit üstyapı sistemi (Erel,2002).	19
Şekil 3.1	Çok genel bir bakışla titreşim sistemi (Erel,2003).	21
Şekil 3.2	Serbest titreşim (Erel, 2003).	21
Şekil 3.3	Sönümlü serbest titreşim (Erel,2003).	22
Şekil 3.4	Zorlanmış sönümlü titreşim (Erel, 2003).	24
Şekil 3.5	Sönümlü titreşim türleri grafiği zayıf, kritik ve aşırı sönümlü titreşimlerin aynı grafikte gösterilmesi (Erel, 2003).	25
Şekil 3.6	Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde dinamik büyütme katsayısının ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).	26
Şekil 3.7	Mesnedin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim (Erel, 2003).	27
Şekil 3.8	Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde genlik oranı (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).	28
Şekil 3.9	Sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde geçirgenlik faktörü (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).	28
Şekil 4.1	Taşıt ve yol bileşenleri.	39

Şekil 4.2	(a) Levha elemanı ile ve (b) kiriş elemanı ile rayın modellenmesi (Knothe ve Grassie, 1993).	41
Şekil 4.3	Dalga yayılma tipleri UIC 60 rayı için (A, C, D), yatay burulması (B) düşey yönde (Knothe ve Grassie, 1993).....	42
Şekil 4.4	Serbest UIC 60 rayı için basit kiriş modeli ve levha modelinin karşılaştırılması (Dağılım ilişkisi) (Knothe ve Grassie, 1993).	43
Şekil 4.5	Ray Bağlantı(fastening) Sistemi : (a) Fiziksel sistem., (b) Yay-sönümleyici-modeli, (c) temel modeli;(d) 2 parametrelili ve 3 parametrelili modeller (Knothe ve Grassie, 1993).	45
Şekil 4.6	Ölçülmüş ve hesaplanmış B58 traversinin doğal frekansı (Alman Demiryolları) (Knothe ve Grassie, 1993).	46
Şekil 4.7	Travers mesnet modelleri (Ayrık mesnet) (Knothe ve Grassie, 1993).	47
Şekil 4.8	Travers mesnet modelleri (Sürekli mesnet).	49
Şekil 4.9	Yol Modellerinin Hiyerarşisi (Knothe ve Grassie,1993).	51
Şekil 4.10	Tahrik Kuvveti Modellemesi (Knothe ve Grassie, 1993).	55
Şekil 4.11	Temas modelleri (Knothe ve Grassie, 1993).	56
Şekil 4.12	Beton traversler üstüne döşenmiş yolların direkt düşey dinamik tepki davranışı (Knothe ve Grassie, 1993).	59
Şekil 4.13	Yol dinamik tepki davranışının hesaplanma algoritması (Knothe ve Grassie, 1993).	61
Şekil 4.14	Tekerlek-ray gürültü oluşumunun analitik modeli (Knothe ve Grassie, 1993).63	
Şekil 4.15	Ray dalgalanma başlangıcının analitik modeli (Knothe ve Grassie, 1993).	64
Şekil 4.16	Hareketli yük problemleri için çözüm algoritması (Knothe ve Grassie, 1993).65	
Şekil 4.18	Yolun özelliklerinin dinamik olarak farklı tanımlandığı modellerden seçilen AI ve CI modeli (R54) (Esveld, 1997).	75
Şekil 4.19	Elastik temele oturmuş kiriş (Esveld,1997).	77
Şekil 4.20	Tek kiriş olarak modellenmiş yolun frekans-dinamik çökme değişimi.	83
Şekil 4.21	Çift Kiriş şeklinde modellenmiş yol için frekans-dinamik çökme değişimi.	85

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Yol Tipleri ve Bileşenlerine Genel Bir Bakış (De Man, 2002).....	3
Çizelge 2.2 Günümüzde yaygın olarak kullanılan rayların teknik özellikleri.....	5
Çizelge 2.3 Yapı Tipi ve Döşenme Şekline Göre Rijit Üstyapı Sistemleri (Erel, 2002).....	14
Çizelge 4.1 Taşıt/Yol Etkileşim Problemleri (Knothe ve Grassie, 1993).	32
Çizelge 4.2 Yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modeller (De Man, 2002).....	52
Çizelge 4.3 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan altı standart model (De Man, 2002).53	
Çizelge 4.4 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan altı standart model.	57
Çizelge 4.5 Frekans tanım alanı çözümleri ile ilgili araştırma çalışmaları (Knothe ve Grassie, 1993).	73
Çizelge 4.6 Zaman tanım alanı ile ilgili araştırma çalışmaları (Knothe ve Grassie, 1993).....	74
Çizelge 4.7 Esveld'in AI ve CI modellerinde kullandığı parametreler (R54) (Esveld, 1997). 75	



ÖNSÖZ

Demiryolu'nun dinamik davranışını araştırmak amacı ile yapılan bu çalışma sırasında yakın ilgi ve yardımlarını esirgemedi sürekli destek olan tez danışmanı Prof. Dr. Aydın Erel'e, ayrıca Matlab programının kullanımı aşamasında değerli yardımlarından dolayı arkadaşım İnş. Yük. Müh. Özgür zitak'a, yapılan çevirilerdeki son derece değerli yardımlarından dolayı da arkadaşlarım Maden Yük Mühendisi Bülent Koçak ve İnş. Müh. Aymin Yılmaz'a ve son olarak ta bu çalışmanın her evresinde bana verdikleri desteklerden dolayı eşim Tuğçe Yılmaz, annem Rabiye Yılmaz ve babam İnş. Müh. Ömer Yılmaz'a sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.



ÖZET

Demiryolu özellikle son 50 yıl içerisinde son derece hızlı bir gelişim göstermiştir. Bu gelişim yüksek işletim hızlarını ortaya çıkarmış olmasına rağmen, sönümlenme özelliği ahşaptan daha az olan, hafif ve esnek malzemelerin kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bu artan işletim hızları, trafik yükü ve ahşap olmayan malzemelerin kullanımı demiryolunun bakım ve onarım masraflarının artmasına neden olmaktadır. Demiryolunun dinamik davranışı sonucu oluşan rezonans titreşimi, demiryollarının bakım ve onarım masrafları arasında önemli bir yer tutmaktadır.

Özetle; günümüzde imal edilen sistemler yüksek hız ve elastik yapıları nedeniyle oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvete maruz kalmaktadır. Bu kuvvetlerin frekans spektrumu, özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmeye değerdir. Zira zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı sistemin doğal frekansı ile çakışırsa, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelir. Dolayısıyla rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik durumla karşılaşmamak için tasarım safhasında kapsamlı bir dinamik analizi yapılmalıdır.

Bu çalışmada öncelikle demiryolu üstyapısı bütün çeşitleriyle anlatılmış, genel olarak titreşim analizinden bahsedilmiştir. Demiryolunun dinamik davranışı başlığı altında ise, öncelikle demiryolunun dinamik davranışının modellenmesine bir giriş ve tarihsel gelişiminin anlatımı yapılmıştır. Bu aşamadan ileriye doğru sırasıyla taşıt/yol etkileşim problemleri, yol ve taşıt/yol etkileşimi modelleri, çözüm teknikleri ve tarihsel araştırma çalışmaları yapılmış, seçilen standart yol modellerinin modellenmesi ve çözümlenmesi başlığı altında da bahsi geçen modellerden en uygun 2 tanesi seçilmiş ve analitik olarak çözümlenmiştir. Sonuçlar bölümünde gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından genel tavsiyelerde ve bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler ışığında da birtakım önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu dinamiği, demiryolunun dinamik modellenmesi, demiryolu üstyapısı, Euler-Bernoulli, titreşim.

ABSTRACT

Especially in the last 50 years, railway systems have improved rapidly. This progress has exposed high velocity. Nevertheless, the usage of light and flexible material, having less damping property than wood, has become widespread. The increasing velocity, traffic load and usage of non-wooden material increased the maintenance and repair costs of the railway. Resonance vibration, created by the dynamic behavior of railway, feeds back to the railway as maintenance and repair cost.

Briefly, recently constructed systems are under high vibrating forces because of their high velocity and elastic properties. Frequency spectrums of these forces, especially from the side of resonance vibrations, are important to be known. Because, if one or more of the coercing forces frequency coincides with the natural frequency of the system, resonance vibrations, which are destructive because of their vibration, occur. Therefore, to prevent resonance vibration, comprehensive dynamic analysis should be performed during design stages.

In this work, first, all kinds of railway superstructures have been described and vibration analyses have been mentioned. Under the dynamic behavior of railway subject; an introduction to the modeling of railway dynamic behavior and its historical development is described. Furthermore, vehicle/railway interaction problems, railway and railway/vehicle interaction models, analyses techniques and their historical progress researches have been performed. Thereafter, under the subject of modeling and analysis of standard railway models, two of the defined suitable models have been chosen and analyzed analytically. As a conclusion, general recommendation has been given to give an idea and a suggestion for future researches.

Key Words; Railway dynamics, dynamic modeling of railway, superstructure of railway, Euler –Bernoulli, vibration.

1. GİRİŞ

Titreşim analizi açısından ulaştırma yapıları veya herhangi bir iskelete sahip yapılar titreşim sistemi olarak bilinirler. Sanayi devrimi öncesinde genelde sistemler oldukça büyük kütlelere sahip ahşap veya taş malzemeden oluşmaktaydı. Sistemlerin bu rijit özelliklerinin yanı sıra titreşim doğurucu dış kuvvetler yok denecek kadar az idi. Özellikle ahşap malzemedeki yüksek sönümlenme özelliği sistemlerde titreşimlerin oluşumuna engel oluyordu.

Son iki yüzyıl boyunca teknolojik gelişmelere paralel olarak demir ve alüminyum gibi oldukça dayanıklı ve elastik malzemelerin dinamik sistem sanayinde kullanılması, daha hafif ve daha hızlı çalışan sistemlerin geliştirilmesine izin verdi. Özellikle uzay çağı olan günümüzde hafiflik ve yüksek hız, hem fonksiyon bakımından hem de ekonomik açıdan sistemlerde aranan en önemli özellik olmuştur. Hafiflik, dinamik sistemlerin daha küçük kesitli olması, dolayısıyla da daha elastik olması demektir. Bundan dolayı da bu dinamik sistemler, maruz kaldıkları kuvvetlerin ve momentlerin etkisinde daha kolay deforme olabilirler ve bu durumda da daha kolay titreşen dinamik birer sistem olurlar. İşte bu dinamik sistemlerin elastik özelliklerine ve yüksek hızlardan kaynaklanan titreşim potansiyelleri, sistemlerin tasarımı esnasında incelenip gerekli tedbirler alınmalıdır. Bu tedbirler alınmadığı takdirde, sistemlerin işletilmesi esnasında sistemi oluşturan elemanlar erken yorulmalara ve kırılmalara maruz kalırlar. Genelde bir sistemin titreşimlerini tasarım aşamasında incelemek ve gerekli tasarım değişikliğini yaparak koruyucu tedbirler almak, titreşim açısından kötü tasarlanmış bir sistemin iyileştirilmesinden daha kolaydır. Dolayısıyla, sistemler henüz tasarım safhasında genel bir titreşim analizine tabi tutulur ve oluşturdukları titreşimler kabul edilebilecek sınırlar içinde kalacak şekilde tasarlanırlar. Öte yandan imal edilmiş sistemlerin de sağlıklı bir titreşim analizi ile titreşim izolasyon ve kontrolünü yapmak mümkündür.

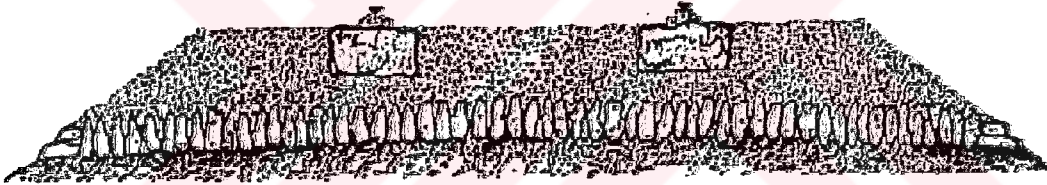
Özetlemek gerekirse, günümüzde imal edilen ulaştırma sistemleri (Hızlı demiryolu gibi) yüksek hızlardaki işletimi ve elastik yapıları itibariyle oldukça fazla titreşime zorlayıcı kuvvete maruzdurlar. Bu kuvvetlerin frekans spektrumu, özellikle rezonans titreşimleri açısından bilinmeye değer bir husustur. 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 genel titreşim analizi yapılmalıdır. Titreşim olayının demiryolu sistemi içindeki önemi çok yüksek seviyelerdedir. Demiryolu üst yapısının tipine göre, sistemin dinamik davranışı da değişeceğinden öncelikle kısaca demiryolu üst yapısı açıklanacaktır.

2. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI

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



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



1845: Liverpool-Manchester

Şekil 2.1 19 yy. Başlarında kullanılan üstyapı şekilleri (Erkul, 2002).

Alt yapı, üstüne demiryolunu oluşturabilmek için zeminde yapılması gerekli her yapıyı içerir (Sanat yapıları, yarma, dolgu gibi). Yani dolma ve yarmadaki esas platformun oluşturulması ile, demiryolunun sürekliliğinin sağlanması için yolların altında veya üstünde kalan bütün sanat yapılarını ihtiva eder.

Bir demiryolunda altyapı platformu üzerine oturan yapı kısmına 'üstyapı' denir. Demiryolu arabalarından gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya ve buradan altyapıya aktarılır. Ayrıca üstyapı dış etkilerden de doğrudan doğruya etkilenir. Şu halde bütün bunlara yeterince dayanabilecek bir yapıda olmalıdır.

Dünyada çok değişik demiryolu tipleri bulunmaktadır. Yol yapısının davranışı, önemli ölçüde yapı tipine, kullanılan yapı elemanlarına ve malzemelerine, yapım kalitesine ve bakım düzeyine bağlıdır.

Demiryolu yapı tipleri 3 ana grupta toplanabilir bunlar;

- Balastlı yol yapıları (Ballasted Track Structures),
- Plaklı (rijit) yol yapıları (Slab Track Structures),
- Gömülü raylı yol yapıları (Embedded Rail Structures)

Ayrıca Çizelge 2.1’de, demiryolu üstyapısı tipleri ve onları oluşturan bileşenler görülmektedir. Bu çizelge ile demiryolu üstyapı tiplerine ve oluştukları bileşenlere genel bir bakış yapılmış olur.

Çizelge 2.1 Yol Tipleri ve Bileşenlerine Genel Bir Bakış (De Man, 2002).

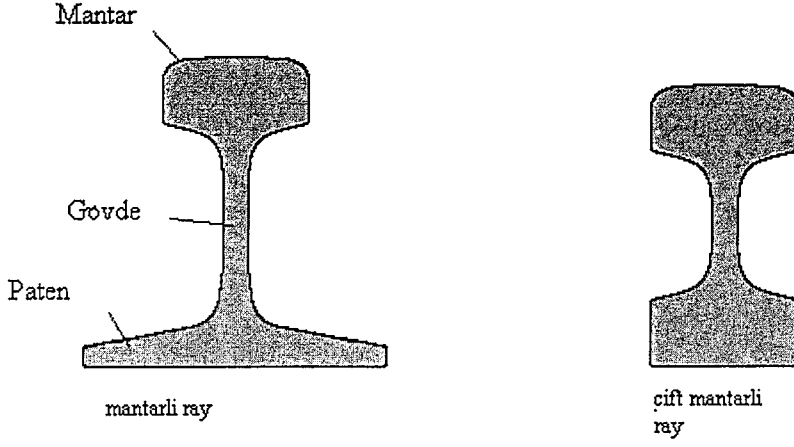
Yol Tipleri	Yol Bileşenleri												
	Raylar	Traversler	Bloklar	Ray Altı Levhası	Beton Plak	Kay Elastik Mesnedi	Gömülü Ray	Ray Altı Levhası Padi	Blok Kılıf / travers çizmesi	Balast Materyali	Zemin / Tabakalaşmış Ortam	Mühendislik Yapıları	Elastik Tabaka Sayısı
Balastlı Yol	X	X				X				X	O	X	2
İndirekt Bağlanmış 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 Yol	X				X		X				O	X	1-2

Not: X): Zorunlu, O):Kullanılır

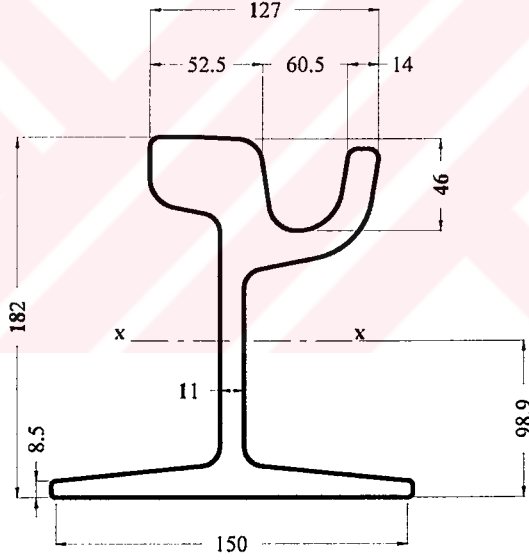
Şimdi bazı ana yol bileşenlerini kısaca açıklayalım.

Raylar, demiryolu arabalarının tekerleklerine az direnim gösteren bir yuvarlanma yüzeyi sağlar ve tekerlekleri kılavuzlarlar. Ayrıca dingillerden aktarılan etkileri, mesnet görevi yapan traversler aracılığıyla zemine iletirler.

Temelde iki ray tipi vardır; birçok demiryolunda halen kullanılan tek mantarlı vinyol tipi ray ve oluklu ray (Şekil 2.2, Şekil 2.3).



Şekil 2.2 Vinyol tipi ve artık kullanılmayan çift mantarlı ray (Erkul, 2002).



Şekil 2.3 Oluklu ray.

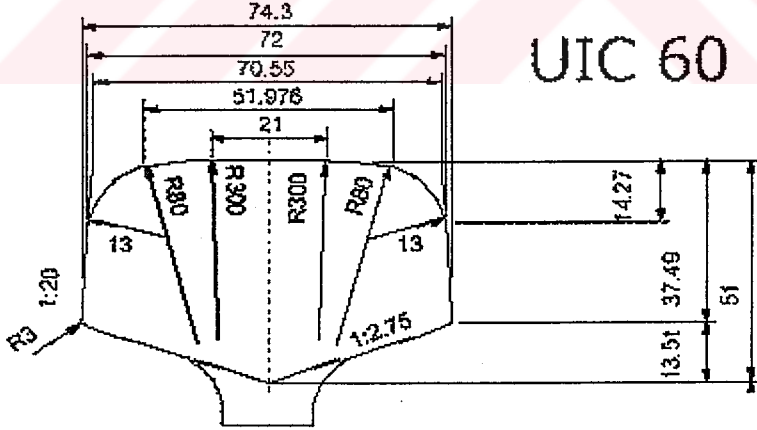
Günümüzde 3 değişik kalitede ray yapılmaktadır:

- Normal kaliteli raylar(NQ),
- Aşınmaya dayanıklı kalitedeki(VQ) raylar,
- Silisyum-Mangan ya da Krom-Mangan Katkılı Özel kaliteli(SQ) raylar.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan raylar ve teknik özellikleri Çizelge 2.2'de görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.4'de de UIC 60 rayının ray mantarı kesiti görülmektedir.

Çizelge 2.2 Günümüzde yaygın olarak kullanılan rayların teknik özellikleri.

ÖZELLİKLERİ	Birimi	R 46 (TCDD)	R 49 (Almanya)	UIC 60 (EU)	R159 (EU)	UIC 54 (EU)	AREA 136 (ABD)
Ağırlığı	Kg/m	46,3	49,43	60,34	59	54,43	67,56
Enkesit Alanı	mm ²	5906	6297	7687		6934	8606
Ray Yüksekliği	mm	145	149	172	180	159	185,74
Mantar Genişliği	mm	62	67	72	113	70	72,62
Mantar Yüksekliği	mm	36,3	39,8	37,5	56	49,4	39,89
Gövde Kalınlığı	mm	15	14	16,5	42		17,46
Taban Genişliği	mm	134	125	150	180	140	152,4
Atalet Momenti (I _x)	cm ⁴	1588	1819	3055	3268	2346	3949
Ağırlık Merkezi Yüksekliği	mm	67,2	73,3	80,9	92,63		85,01



Şekil 2.4 UIC 60 Ray Mantarı Kesiti (Esveld, 2003).

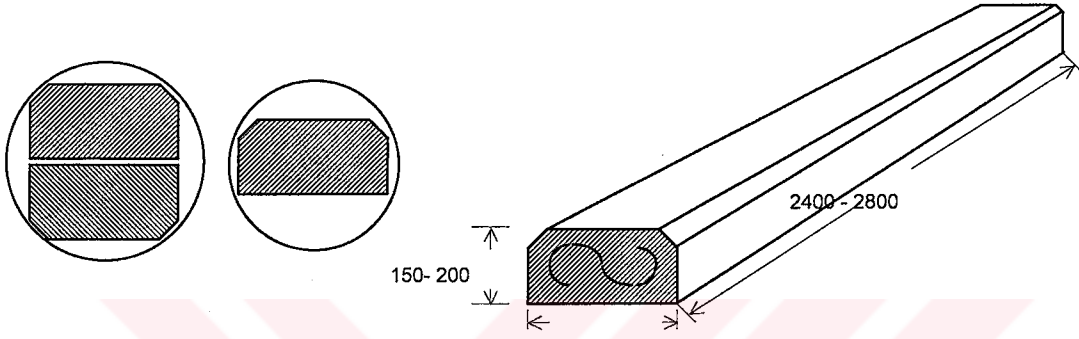
Raylar modellemede bir kiriş gibi düşünülürler ve dikey ve yatay doğrultuda esnek bir rijitliğe sahiptirler. Boyuna doğrultuda da yüksek bir rijitliğe sahiptirler. Rayların modellenmesi daha ayrıntılı olarak Bölüm 4'de açıklanacaktır.

Traversler, yol eksenine dik yönde ve belirli aralıklarla, rayların altına balast tabakası içine

gömülü olarak döşenen enine kirişler olup, raylara mesnet görevi yapmaktadırlar.

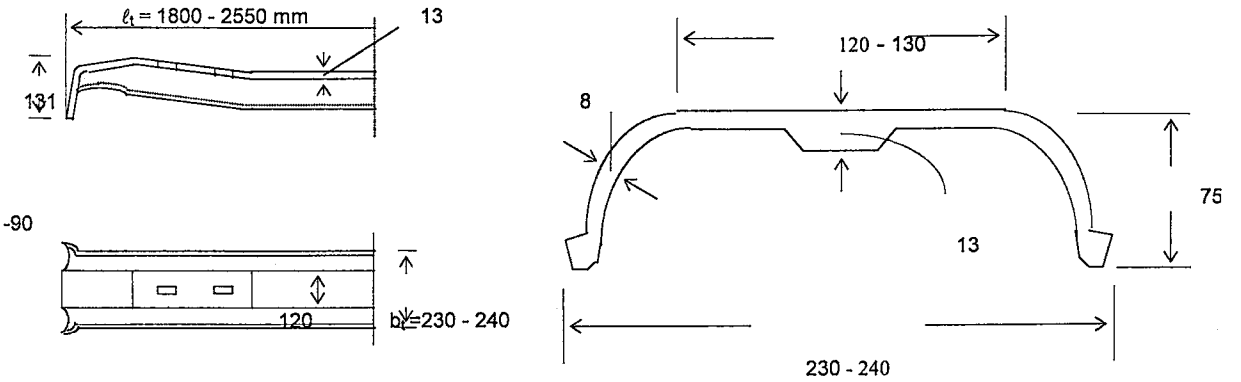
Günümüzde 3 tür travers kullanılmaktadır; ahşap, çelik, betonarme traversler. Bu türler hakkında aşağıda kısaca bilgi verilecektir.

Demiryolu tarihinde en eski geçmişe sahip olan ahşap traversler, yumuşak(çam ve karaçam) ve sert (kayın, meşe, okaliptüs) türdeki ağaçların gerekli boyutlarda kesilmesi, uygun şekilde kurutulması ve bazı işlemlerden geçirilmesi ile elde edilirler (Şekil 2.5). Ağırlıkları, boyutlarına ve kullanılan ağaç cinsine göre 50-90 Kg arasında değişir.



Şekil 2.5 Ahşap travers (Erkul, 2002).

Çelik traverslerin günümüzde kullanılan biçimi, 1888 yılında Heindl tarafından geliştirilmiştir (Şekil 2.6). Bu biçimin özelliği, yolun yanal ve boyuna yönde kaymasına karşı, “kucaklayarak” içine aldığı balast sayesinde gerçekleşen ve “travers-balast” sürtünmesinden çok daha yüksek olan “balast-balast” sürtünmesi ile direnç göstermesidir. Ancak bu şekil statik açıdan çok uygun değildir. Ağırlıkları, boyutlarına bağlı olarak 45-70 Kg arasında değişir.



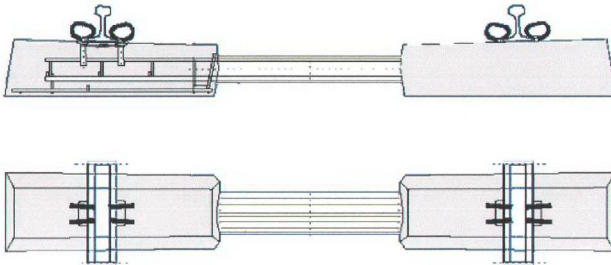
Şekil 2.6 Çelik travers (Erkul, 2002).

Betonarmenin yapılarda kullanılmaya başlamasından sonra, bu malzemenin demiryolu üstyapısında da kullanılması için araştırmalar yapılmıştır (Şekil 2.7). İlk yapılan betonarme traverslerde çatlamlar oluşmuş ve rayların traverse bağlanma konusu da memnun edici bir şekilde çözümlenememiştir. Fransızlar çatlak sorununu çözmek için iki bloklu (twin-blok) betonarme travers yaparak, beton içindeki eğilme momentinin önemli ölçüde düşürülmesini sağlamışlardır. Tek bloklu(mono-blok) betonarme travers için ise, ancak ön germe tekniğinin kullanılmasından sonra iyi sonuçlar alınabilmiştir (Şekil 2.9).



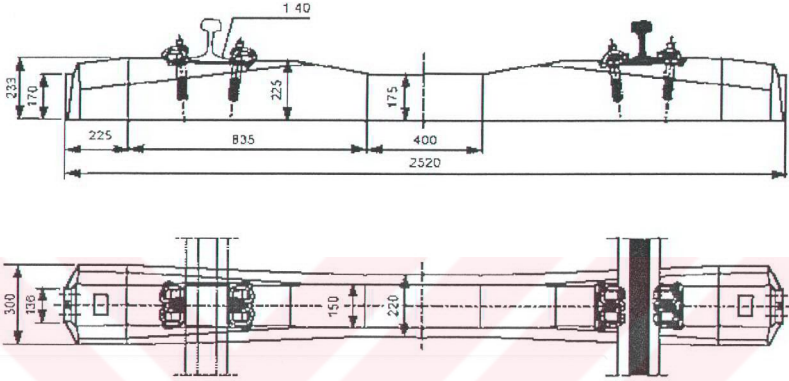
Şekil 2.7 Betonarme travers uygulaması (Erkul, 2002).

İki bloklu betonarme traverslerde beton miktarı ve ağırlıkları, tek bloklu betonarme traverslere göre çok daha az ve hafiftir. Maliyetleri ise diğerlerinden daha düşüktür. Bu çift bloklu traversler Fransa'dan başka, Amerika ve Afrika'da da kullanılmaktadır. Hat genişliğini korumak amacıyla yeterli dayanıma sahip olan "L" ya da "T" kesitli çelik çubuklar ya da eski ray parçalarıyla birbirlerine bağlanmış olan iki betonarme mesnet kütesinden oluşturulurlar. Ağırlıkları 140 Kg'dır. Betonarme blokların iç kısımlarındaki alın yüzeyleri sayesinde yanıl kayma direncinde sağlanan artış, orta kısmın balast tabakası ile temas etmemesinden kaynaklanan sürtünme kuvveti kaybı nedeniyle olan azalmanın çok üstündedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 İki bloklu betonarme travers uygulaması (Erkul, 2002).

Bu nedenle iki bloklu traversler özellikle sürekli kaynaklı rayların kullanıldığı üstyapılara çok uygundurlar. Cebire ile bağlı rayların kullanıldığı yollarda ise, taşıt geçişi sırasında ek yerlerinde oluşan kütleli kuvvetlerin şiddeti, betonarme traversin ağırlığının fazla olmasını nedeniyle çok artar; bu hem traverslerde hem de ray uçlarında büyük zararlara yol açar.



Şekil 2.9 Öngermeli tek-blok betonarme travers uygulaması (Erkul,2002).

Tek bloklu betonarme traverslerin mutlaka ön gerilmeli olarak üretilmeleri gerekmektedir. Bunların ağırlıkları 250 - 280 Kg'dır. Ön germe için ya 20-50 adet ya da 2-8 adet çelik çubuk kullanılır. Ön germe kuvveti ise 270-280 kN arasındadır. Rayların bağlanabilmesi için beton içine ahşap ya da plastik dübeller yerleştirilir.

Traversler hem kiriş gibi hem de rijit bir gövde gibi modellenirler. Traversler, yol yapısının bütünü içinde rayların da düşünüldüğü modellerde bir kiriş gibi modellenirler ve esnek rijitliğe ve kesme rijitliğine sahiptirler. Yol simetrik varsayıldığı zaman ve tek bir ray düşünüldüğü zaman, travers iki eşit parçaya ayrılır ve rijit bit gövde gibi modellenir. Traverslerin modellenmesi konusu daha detaylı olarak Bölüm 4'de anlatılacaktır.

Balast, raylarla traverslerin bağlantı elemanları ile birleştirilmesiyle oluşturulan yol çerçevesinin altına düşenen ve çapları genellikle 20 - 70 mm arasında olan taş danelerden oluşturulan balast malzemesi granit, bazalt gibi volkanik kayalar ile, silisli kireç taşı, sert kum taşı ve sert kalker taşlarının belirli dane çaplarında kırılmasıyla elde edilir. İri çakıl taşları da kırılarak balast malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak küresel, oval yüzeyle taşları kullanmaktan sakınılmalıdır. Taşların en az basınç dayanımları en az 180 - 200 N/mm² (1800

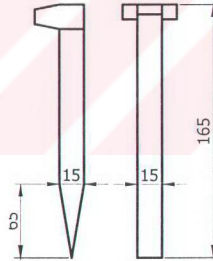
- 2000 Kg/cm²) olmalıdır. Kalınlıkları 20 mm'nin altında ve uzunlukları 90 mm'nin üzerinde olan dane miktarlarının toplam ağırlığa göre oranları % 15'in üzerine çıkmamalıdır.

Balast, modellenmesinde elastik mesnet ve sönümleyici olarak düşünülür. Balast genellikle ayrıntı veya sürekli olarak yay ve viskoz sönümleyicilerden oluşturularak modellenir. Balastın modellenmesi Bölüm 4'de daha ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır.

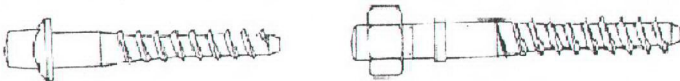
Bağlantı elemanları, demiryolu üstyapısında rayları birbirine bağlayan elemanlar ve ray travers bağlantı elemanları olmak üzere iki tür bağlantı elemanları kullanılır.

Bunların ilki ray travers bağlantı elemanlarıdır. Demiryolu arabalarından yola gelen dinamik etkiler biri düşey doğrultuda, diğer ikisi yatayda yol eksenine paralel ve dikey olmak üzere üç doğrultuda toplanabilir. Bu üç doğrultudaki kuvvetler altında rayların traverslere raptı icap etmekte ve bağlantı elemanlarının şekil ve cinslerinin de ona göre seçilmesi gerekmektedir.

Vinyol tipi rayların ahşap traverslere raptı eskiden 'krampon' adı verilen ve biçimi aşağıda görülen demir çivilerle yapıldı. Bugün daha ziyade, traverssten sökülmesi krampondan daha zor olan ve 'tirfon' adı verilen bir burgulu bağlantı elemanı kullanılmaktadır. Tirfonların ömrü 8-10 sene kadardır. Galvanize etmek suretiyle ömürlerini arttırmak mümkündür (Şekil 2.10, Şekil 2.11).

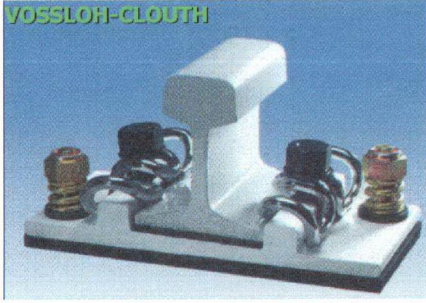


Şekil 2.10 Krampon.

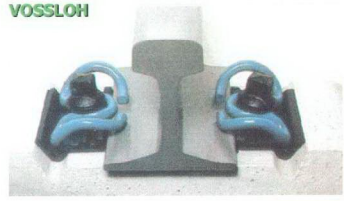


Şekil 2.11 Tirfon (www.railway.zonasa.com/chi/rail1.html).

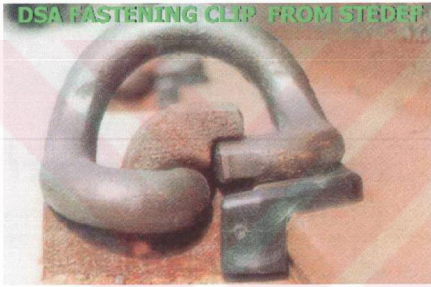
Günümüzde rayların traverslere zaptında değişik tipte birçok elastik bağlantı elemanı kullanılmaktadır, Şekil 2.12, 13, 14, 15'de bunlara ait örnekler verilmiştir.



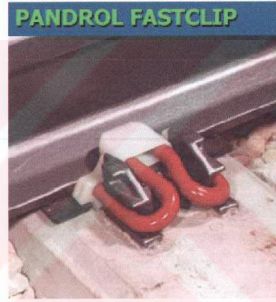
Şekil 2.12 Vossloh-Clouth Tipi (Esveld, 2003).



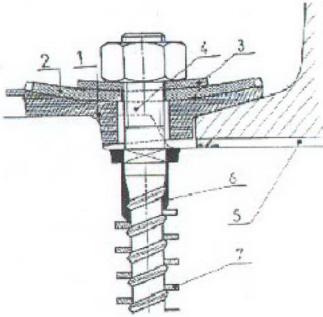
Şekil 2.13 Vossloh Tipi (Esveld, 2003).



Şekil 2.14 DSA Bağlantı Klipi (Esveld, 2003).

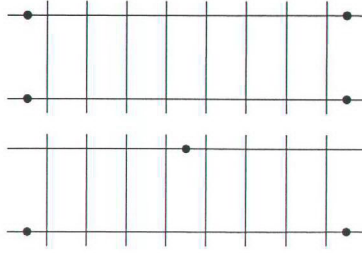


Şekil 2.15 Pandrol Bağlantı Klipsi Tipi (Esveld, 2003).



- 1- İzolatör.
- 2- Çelik başlık.
- 3- Pul.
- 4- Tirfon.
- 5- Elastik selet.
- 6- İzolasyon malzemesi.
- 7- Tirfonun yivlerine sarılı madeni helezoni dişler.

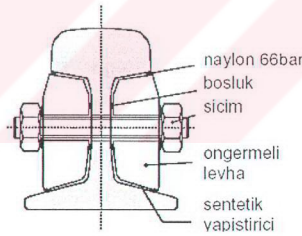
Şekil 2.16 NABLA tipi bağlama malzemesi kesiti (Erkul, 2002).



Şekil 2.17 Conta yerleşimi.

Bağlantı elemanlarının ikincisi ise, rayları birbirine bağlayan elemanlardır. Ray dizileri, belirli uzunluktaki rayları uç uca getirmek suretiyle oluştururlar. Böylece oluşan ek yerlerine ‘conta’ adı verilir. Bir hat boyunca conta yerleri iki şekilde düzenlenebilir. Bunlardan birinde her iki ray dizisindeki contalar, hat eksenine dikey bir kesit üzerinde bulunur. Diğerinde ise her iki ray dizisindeki contalar birbirine göre zikzak tertiplenmiştir.(Şekil 2.17)

Raylar contalarla ‘cebire’ adı verilen ve bir cins ek levhasından başka bir şey olmayan iki profilli levha ile bağlanır (Şekil 2.18).



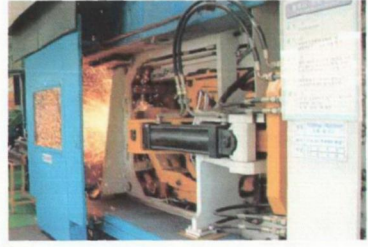
Şekil 2.18 Cebire örneği (Esveld, 2003).

Ayrıca günümüzde raylar özel bazı metotlarla da birbirlerine bağlanmaktadır (Şekil 2.19, 20, 21, 22);

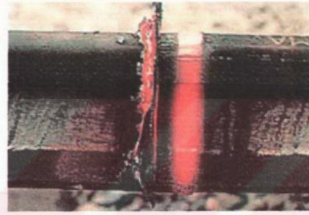
- Işık Kaynağı (Flash Butt Weld)
- Termit Kaynak (Thermit Weld)
- Elektrik Kaynağı (Electrical Weld)



Şekil 2.19 Mobil Işık Kaynağı (Esveld, 2003).



Şekil 2.20 Işık Kaynağı (Esveld, 2003).



Şekil 2.21 Işık Kaynağı (Esveld, 2003).

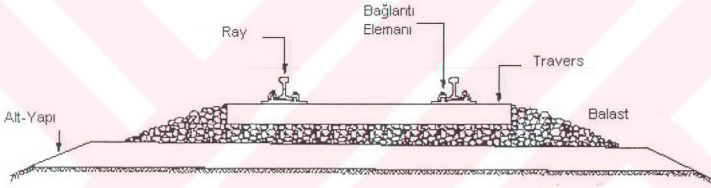


Şekil 2.22 Termit Kaynak (Esveld, 2003).

2.1 Balastlı Üstyapı

Bugün dünyada kullanılan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı balast üzerine döşenmiş ahşap veya beton traverslere bağlanmış raylardan meydana gelmektedir. Balastlı üstyapı elemanları balast tabakası, traversler, çelik ray ve bağlantı elemanlarından oluşur (Şekil 2.3).

Yapım, bakım, onarım kolaylıkları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle balastlı üstyapı sistemlerinin gelecekte de uzun bir süre kullanılacağı açıktır. Fakat rijit üstyapının maliyeti daha fazla ve kalifiye işçilik gerektirmesine karşın, kullanılabilirlik süresi klasik üstyapıdan daha fazla, bakımı için harcanan zaman ise daha azdır. Bu, günümüzün gittikçe artan trafik yoğunluğunda bakım ve yenileme işlemlerinin yapılabilmesi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.3 Balastlı Üstyapı.

2.2 Rijit Üstyapı Sistemleri

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

Rijit üstyapı Almanya'da 'Feste Fahrbahn', İngiltere ve USA'da 'Slab Track' ya da 'Ballastless Track' adlarıyla tanınmaktadır.

Yüksek yatırım maliyeti rijit üstyapı sistemlerinin yaygın kullanımını engellemiştir. Fakat yatırım maliyeti ve hizmet ömrü açısından yapılan araştırmalar sonucunda çıkan sonuç oldukça şaşırtıcıdır. Rijit üstyapıda, en büyük tasarruf tünel ve köprülerde elde edilmektedir. Daha etkili inşaat metodlarının kullanılmasıyla inşaat maliyetinin daha da düşürülmesi sağlanabilecektir.

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 2.24, 25, 26),
- Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı (ATD sistemi-Nant, GETRAC) (Şekil 2.27, 28),
- Monolitik rijit üstyapı sistemi (Rasengleis) (Şekil 2.29),
- Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (Shinkansen -Japonya, Güney Kore, IP İtalya) (Şekil 2.30),
- Gömülü Ray Yapısı (Embedded Rail Structure) (Infundo -Hollanda) (Şekil 2.32),
- Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı (Edilon b.t. ERC-Hollanda) (Şekil 2.34).

Rijit Üstyapının Sınıflandırılması ;

Rijit üstyapının sınıflandırılması değişik şekillerde yapılabilir. En genel sınıflandırmalar şunlardır.

- Demiryolu türüne göre,
- Yapı tipi ve döşeme şekline göre (Çizelge 2.3),
- Uygulama yerine göre,
- Ülkeye özgün gelişmeiere göre,
- Kronolojik gelişime göre,

Demiryolu türüne göre sınıflandırmada, kentler arası demiryollarında ve kent içi 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,

Çizelge 2.3 Yapı Tipi ve Döşeme Şekline Göre Rijit Üstyapı Sistemleri (Erel, 2002).

MESNETLİ DÖŞEME					SÜREKLİ	
TRAVERSLİ		TRAVERSSİZ			DÖŞEME	
		BAĞLAYICI HARÇ			RAY	RAY
GÖMÜLÜ	DÖŞELİ	MESNETLİ	MONOLİTİK	PREFABRİK	GÖMÜLÜ	KAMALI

Rijit üstyapıya özellikle tünel ve yüksek yapılarda gereksinim duyulmakta, ancak toprak gövde üzerinde balastlı üstyapıya sahip yüksek hızlı demiryollarında fazla bakım gerektirmeyen iyi bir seyir yolu sağlayabilmek için, kentler arası demiryollarındaki kullanımı da söz konusudur.

Yapı tipi ve döşeme şekline göre sınıflandırma ise en yaygın olanıdır.

Mesnetli döşeme, ray tabanının 0,50 ile 0,80 metre arasında 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.

Sürekli döşeme ise, rayların yapay elastik bir yastık sistemi içine gömülerek, sürekli olarak elastik mesnetlenmesi esasına dayanır. Fakat günümüzde sürekli döşeme şekli rijit bir üst yapı olmasının yanında çok farklı bir üst yapı tipi olduğundan rijit üst yapı tipinden ayrı tutularak Gömülü Raylı Yol Yapısı (Embedded Rail Structures) adını alarak sınıflandırılmaktadır ve Bölüm 2.3'ün içinde bahsedilecektir.



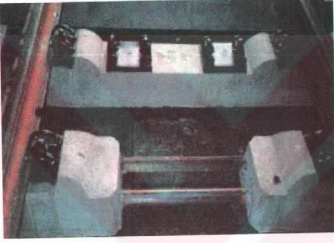
Şekil 2.24 Rheda 2000 taşıma tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Esveld, 2003).



Şekil 2.25 PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.26 LVT TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.27 ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.29 Rasengleis monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.28 GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.30 Shinkansen prefabrik üstyapı sistemi (Erkul, 2002).

2.3 Gömülü Raylı Yol Yapıları

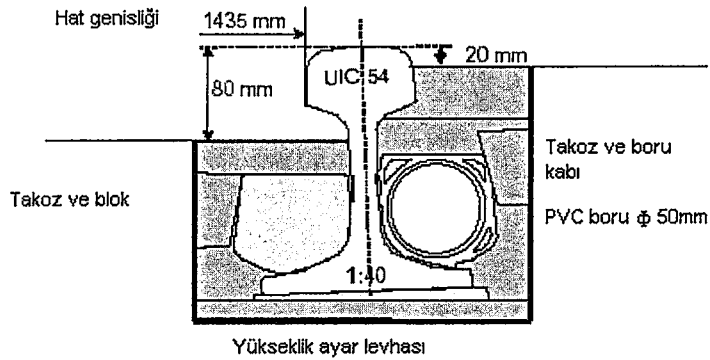
Gömülü raylı yol yapısı (Embedded Rail Structures) tipinin yapı prensibi, rayların sürekli olarak elastik mesnetlenmiş (yataklanmış) olmasıdır. Raylar, beton taşıma tabakası üzerinde yol ekseni doğrultusunda ve beton ya da istisnai durumlarda çelik malzemenen yapılı paralel iki kirişin (boyuna travers) içlerinde oluşturulan oluklarda, doğal ya da kauçuk yataklar içine dōşenmektedir.

Sürekli yataklandırma, ray mantarı yanakları ve tekerlek budeni için gerekli alan boş kalacak şekilde, ray tabanı ve gövde32si boyunca yapılır. Mesnetlerde noktasal elastiklik bulunmadığı için, ray sürekli olarak elastik mesnetlenmelidir. Bu yapı tiplerinde, bağlantı malzemesinin aynı zamanda sönümleme görevi yapması esastır. Daha sonra herhangi bir yanal ve düşey ayarlama mümkün olamayacağı için, bu tiplerde rayların yerleştirilmesi çok duyarlı yapılmalıdır. Rayların yol eksenine doğru enine eğimleri ile kurba kesimlerinde uygulanması gereken dever , rayların yatak içine yerleştirilmesi sırasında verilir

Bu rijit üst yapı tipinin, ‘gömülü raylı’ ve ‘kama sistemi ile sıkıştırılması raylı’ olmak üzere iki farklı uygulaması bulunmaktadır.

2.3.1 Sürekli Gömülü Raylı Rijit Üstyapı

Bu tipte, içine simetrik ve derzsiz dikdörtgen kesitli iki çukur açılan, yaklaşık 0,40 m kalınlığındaki donatılı beton taşıma tabakası kullanılmaktadır. Raylar bu çukurların içine, bir mantar taban levhası üzerine, PVC boruları ile birlikte yerleştirilir. Bu borular olası yanal deplasmanları önleyici ve azaltıcı görev yaparlar. Geriye kalan boş kısımlar dayanıklı elastik malzeme ile doldurulur (Şekil 2.31).

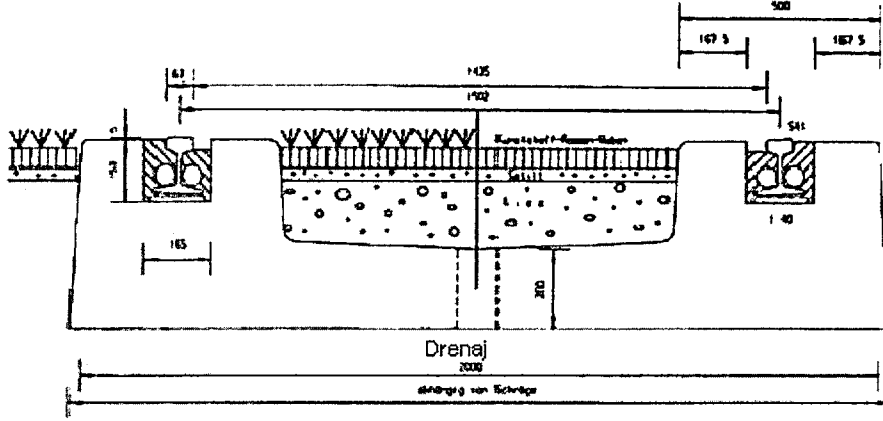


Şekil 2.31 Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı (tek ray) kesiti (Erel, 2002).

Bu yol tipi ilk kez Hollanda’da EDİLON adı ile 1973’te geliştirilmiş, hemzemin geçitlerde ve köprülerde başarıyla kullanılmıştır. Daha sonra geliştirilen yeni modelin adı INFUNDO olup,

demiryollarında ve kentlerarası demiryollarında başarılı olmuştur (Şekil 2.32).

İnfundo sistemi Hollanda devlet demiryollarında 1970'den beri kullanılmakta olup şimdiye kadar hiç bakım gerektirmemişlerdir. Hollanda'nın yanı sıra İngiltere, İspanya, Macaristan ve Hong Kong'da kullanılmaktadır. Almanya'da ise Münih ve Bremen'de kullanılmaktadır. Alman demiryolları yüksek hızlı bir test bölümü yapmayı planlamaktadırlar.



Şekil 2.32 Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).

2.3.2 Kama Sistemi İle Sıkıştırılmış Raylı Rijit Üstyapı

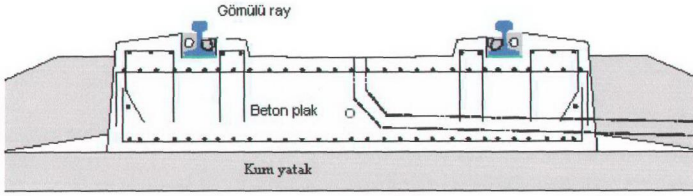
Bu tip raylar yine beton taşıma tabakası üzerinde olukların içine elastik yataklı olarak döşenmekte, ancak konumlarını koruyabilmeleri için gövdelerinin her iki yanından kamalarla sıkıştırılmaktadırlar. Günümüzde bu tipte gelişen rijit üstyapı tipleri SFF, Saargummi ve ERC'dir.

Ortec firması tarafından geliştirilen (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 kent içi 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 Metro'su'nun 100 km'lik bir kısmıdır.

Edilon Corkelast Gömülü sistemine de, geleneksel balast yatağının yerini, çelik veya beton

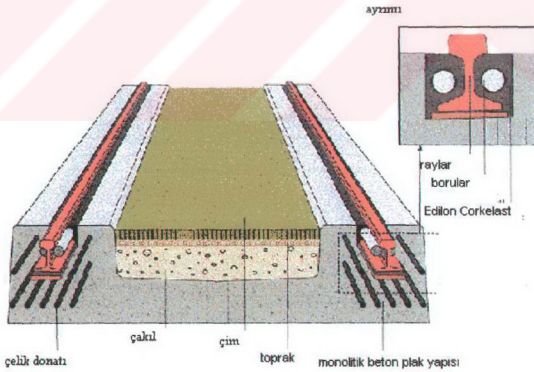
yaapılar alır. Bu temel, gömülü raya da yapılabildiği gibi otomatik olarak yerleştirilebilir. Raylar kaldırılır ve Edilon Corkelast maddesi etrafına dökülür. Edilon Corkelast maddesi akışkan olduğundan istenen şekli alabilir (Şekil 2.34).



Şekil 2.33 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 keştiştikleri karayolu sistemleri ile aynı seviyede olduklarından yardım araçlarına geçiş kolaylığı sağlar. Son olarak, sistem geleneksel traversli sistemlerden daha hafif olduğundan köprü inşaatlarında tercih edilir.



Şekil 2.34 Edilon ERC rijit üstyapı sistemi (Erel,2002).

3. TİTREŞİM ANALİZİ

Belirli zaman aralığıyla tekrarlanan her hareket titreşimdir. Diğer bir ifadeyle titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu hareketlerdir. Buna en basit örnek basit sarkacın salınım hareketidir.

Her titreşim bir genlik ve 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.

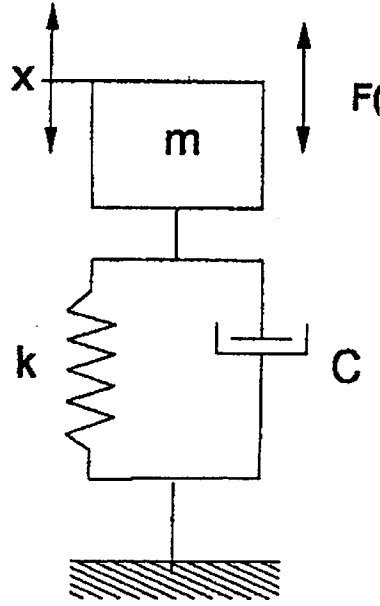
Buna göre periyod hareketin kendini tekrar etmesi yani bir tam salınım için geçen zaman, frekans ise saniyedeki titreşim sayısıdır. Frekans (titreşim/saniye) şeklinde gösterilebileceği gibi, kısaca Hertz (Hz) olarak da gösterilir.

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.

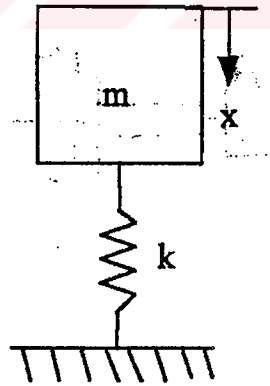
Bir sistemin titreşimi bu sistemin potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye, kinetik enerjisinin de potansiyel enerjiye dönüşümü ile olur. Eğer bu sistemde bir sönüm elemanı varsa titreşimin her periyodunda bir miktar enerji kaybı olacak ve bir süre sonra sistemdeki titreşim sönümlenecektir (Şekil 3.1). 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 yöndedir. Eğer zorlanmış titreşim durumu söz konusu ise kütleye bir de zorlayıcı kuvvet etki eder (Erel, 2003).

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 3.1 Çok genel bir bakışla titreşim sistemi (Erel,2003).

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

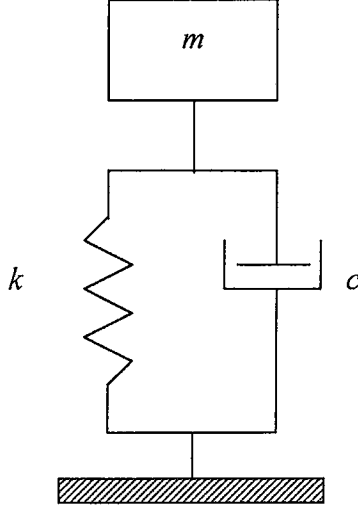


Şekil 3.2 Serbest titreşim (Erel, 2003).

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

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

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



Şekil 3.3 Sönümlü serbest titreşim (Erel,2003).

Sönümlü serbest titreşimlerin doğal frekansı ise,

$$f_s = \left[f_n^2 - \left(\frac{c}{2m} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{rad/sn}) \quad (3.2)$$

m :Kütle (kg.)

f_n :Doğal frekans (rad/sn).

f_s : Sönümlü serbest titreşimlerin doğal frekansı (rad/sn).

c :Sönümlleme katsayısı (Nsn/m)

ile tanımlanır.

Sönümlü serbest titreşimin hareket denklemi:

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

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

$$x = y. \exp\left(-\frac{c}{2m} t\right) \quad (3.4)$$

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

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

denklemini bulunur.

Bu denklemin çözümünde ise,

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

olmak üzere 3 farklı durum söz konusudur.

a) Kritik Sönüm Durumu $[f_s^2 = 0]$

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:

$$c = c_{kr} = 2mf_n$$

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

ζ : Sönüm Faktörü

b) Aşırı (kritik üstü) Sönüm Durumu $\left[f_s^2 < 0 \quad , \quad \left(\frac{c}{2m} \right)^2 - f_n^2 = \mu^2 > 0 \quad , \quad \zeta > 1 \right]$

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

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

c) Zayıf (kritik altı) Sönüm Durumu $[f_s^2 > 0 \quad , \quad \zeta < 1]$

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

$$f_s^2 = f_n^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2$$

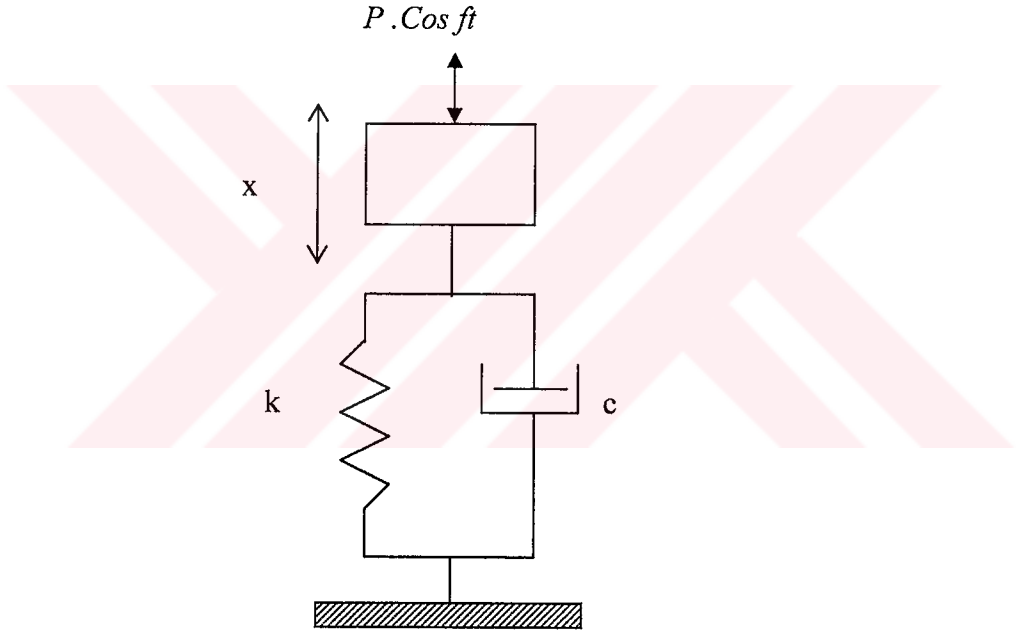
$$2m = \frac{c_{kr}}{f_n}$$

(3.9)

$$f_s^2 = f_n^2 - \left(\frac{c}{c_{kr}} \cdot f_n\right)^2 = f_{n0}^2 (1 - \zeta^2)$$

3.2 Zorlanmış Sönümlü Titreşimler

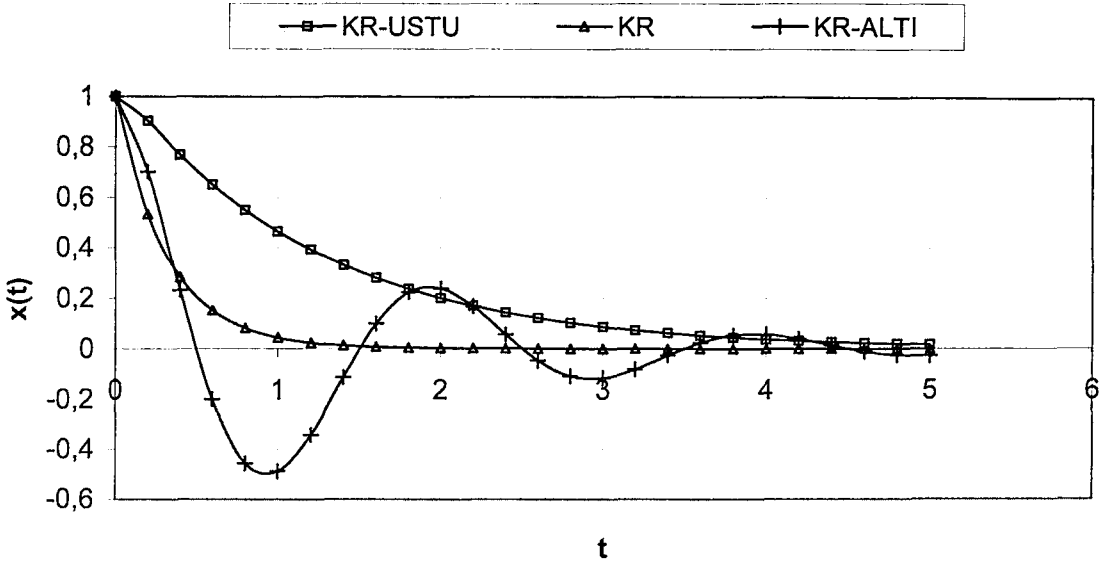
Eğer bir sistem dışarıdan tahrik eden zorlayıcı bir etki (kuvvet veya moment) altında titreşiyorsa bu titreşim hareketi “zorlanmış titreşim” adını alır. Bir dizel motorunun titreşimi bu tip titreşimlere örnek olarak verilebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Zorlanmış sönümlü titreşim (Erel, 2003).

Zorlanmış titreşimlerin frekansı, zorlayıcı kuvvet veya zorlayıcı momentin frekansına eşittir.

Şekil 3.5’de sönümlü titreşim türleri bir arada görülmektedir. Salınım yapmadan en kısa zamanda sönümlenen durum kritik sönüm durumudur ($\zeta=1$). En çok salınıma sahip ve zor sönümlenen sistemse kritik altı sistemdir ($\zeta<1$). Az bir salınım hareketi ile sönümlenen sistemse kritik üstü sistemdir ($\zeta>1$). Eğer bir sistemde sönüm yok ($\zeta=0$) ise bu sistem teorik olarak sonsuza kadar titreşecektir (Tahranlı vd., 2000)



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

Şekil 3.5 Sönümlü titreşim türleri grafiği zayıf, kritik ve aşırı sönümlü titreşimlerin aynı grafikte gösterilmesi (Erel, 2003).

3.2.1 Sabit Genlikli Harmonik Kuvvetle Zorlanmış Sistem

Genliği (P) ve frekansı (f) olan bir $P.Cos f t$ harmonik kuvveti ile zorlanmış titreşimin genliği,

$$x = P \frac{1}{\sqrt{(k - mf^2)^2 + (cf)^2}} \quad (3.10)$$

değerine eşittir. Bu bağıntıda,

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

η : Frekanslar oranı.

$$x_{st} = \frac{P}{k} , f_n^2 = \frac{k}{m} , \eta = \frac{f}{f_n} , k = mf_n^2 = \frac{2mf_n}{2} \cdot f_n = \frac{c_{kr} f_n}{2} , \zeta = \frac{c}{c_{kr}} \quad (3.11)$$

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

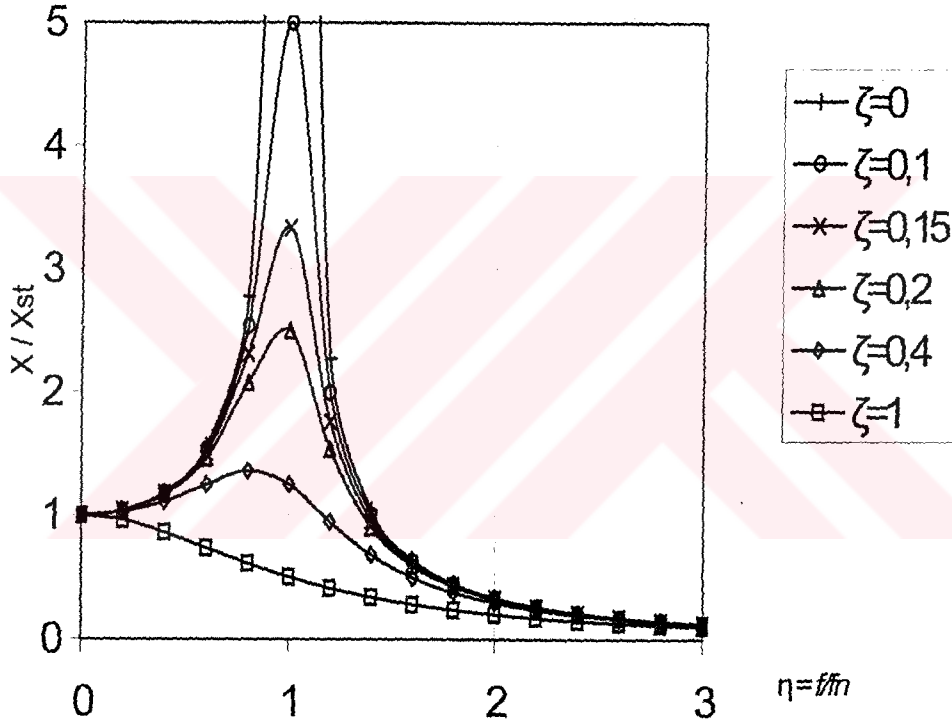
$$R = \frac{x}{x_{st}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\zeta^2\eta^2}} \quad (3.12)$$

Bu titreşimde maksimum genlik $\eta_0 = \frac{f}{f_n} = \sqrt{1-2\zeta^2}$ 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_0 değeri bire çok yakın olduğundan,

$$(R_{\max})_{\eta=1} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{c_{kr}}{2c} = \frac{mf_n}{c} = \frac{\sqrt{km}}{c} \text{ alınabilir.}$$



Şekil 3.6 Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde dinamik büyütme katsayısının ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).

$\eta=1$ 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:

$$x = \frac{P}{2mf_n} t \sin(f_n t) \quad (3.14)$$

3.2.2 Mesnetin Hareketi İle Zorlanmış Sistem

Mesnedin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim şekli genel olarak Şekil 3.7'deki gibidir. Mesneti hareket ettiren kuvvet,

x_m : Mesnedin genliği (m)

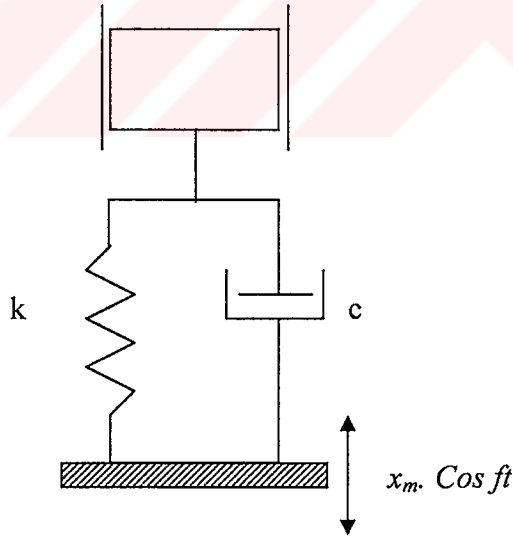
$$P = x_m \sqrt{k^2 + c^2 f^2} \quad (3.15)$$

olarak (3.09) genlik bağıntısında yerine konulursa,

$$x = x_m \frac{\sqrt{k^2 + c^2 f^2}}{\sqrt{(k - mf^2)^2 + (cf)^2}} \quad (3.16)$$

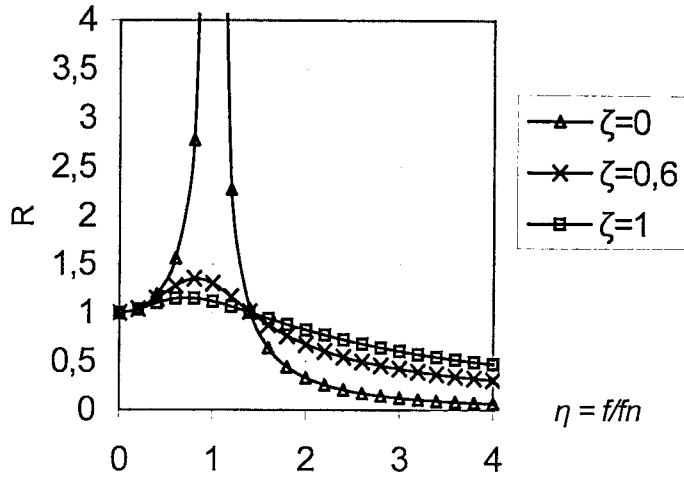
x genliğinin denklemi elde edilir ve (x/x_m) G ile gösterilen geçirgenlik faktörü olur (Büyütme faktörü). (3.10)'da yazılan gerekli yer değiştirmeler yapılırsa geçirgenlik faktörü (G) (3.17)'de ki şekli alır,

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

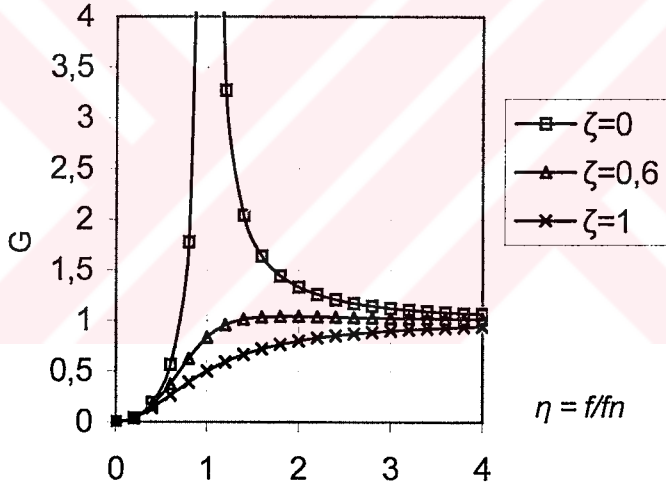


Şekil 3.7 Mesnedin hareketi ile zorlanmış sönümlü titreşim (Erel, 2003).

Şekil 3.8'de sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde genlik oranı (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi ve Şekil 3.9'da da Sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü ($\zeta > 0$) titreşimde geçirgenlik faktörü (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sönümlü ($\zeta>0$) titreşimde genlik oranı (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).



Şekil 3.9 Sabit genlikli mesnetin hareketi ile zorlanmış sönümlü ($\zeta>0$) titreşimde geçirgenlik faktörü (Büyütme katsayısı) ($\eta = f/f_n$) ile değişimi (Erel,2003).

4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK DAVRANIŞI

Demiryolu üstyapısının dinamik davranışı tamamen titreşim olayı ile ilgilidir, Demiryollarında titreşimin oluşma nedenleri şöyle sıralanabilir,

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

Bu nedenler iki farklı frekans grubunda titreşim oluştururlar. 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.

Demiryollarındaki titreşimlerin analizi amacıyla bugüne dek çok sayıda model geliştirilmiş ve çalışmalar günümüzde de sürdürülmektedir. Demiryollarındaki titreşim analizine yani dinamik analize girmeden önce bugüne dek kullanılmış ve halen kullanılmakta olan modelleme tekniklerinden ve bu konunun tarihçesinden bahsetmek gerekmektedir. Bundan dolayı demiryolunun dinamik modellenmesi ve yolun dinamik davranışında yeterince önemli olan farklı frekans aralıklarındaki taşıt-yol etkileşimi konusunda bir inceleme sunulacaktır. Yüksek frekanslardaki tekerlek/ray etkileşiminin en önemli sonucu ses olduğu için ,gürültü bakımından ilgilenilen maksimum frekanslar insanın duyma limiti olan 5000 Hz civarındadır. Bu konu altında, pratik problemlerin çözümü için uygulanan modellerin tarihsel gelişimi ve özellikle de araştırmacıları ile birlikte uygulanan modeller incelenmiştir. Günümüzde ray, travers ve tekerlek takımı için ilgilenilen bütün frekans aralıklarında yolun iyi temsil edildiği modeller elde edilebilmektedir, bunun yanında ray elastik mesnedi ve balastın dinamik

davranışının ve onların uzun süreli davranışlarının tahmini için çok iyi tanımlanmış modeller henüz elde edilememiştir (Knothe ve Grassie, 1993).

4.1 Demiryolunun Dinamik Davranışının Modellenmesine Giriş ve Tarihsel Gelişim

Bir asırdan önce, Schwedler, demiryolunda oluşacak tepki kuvvetlerini hesaplamak ve de bu hesaplar yardımıyla da, 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.' Schwedler Winkler'in sürekli, üniform ve elastik bir temel üzerine oturan kiriş modelini boyuna traversler üzerindeki demiryoluna uygulamıştır. Timoshenko'nun 1930'lu yıllarında kabul edilen çalışmasının sonucu olarak günümüzde yaygın olarak kullanılan enine traversli demiryolu da Winkler kirişi olarak modellenebilir. 1920'li yıllardan itibaren sürekli kaynaklı rayların kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan, sıcak havalardaki ray burkulmaları ve soğuk havalardaki ray kırılmaları problemleri yol stabilitesi analizini gerekli kılmıştır. Bu sebepten, pratik bir problemin çözümü ve anlaşılmasına duyulan ihtiyaçla, matematik modellemeye tekrar dönmüştür. Bununla beraber, bu problemlerin gerçeğe yakın ve tatmin edici çözümü ancak 50 yıl sonra (Çoğunlukla Prud'homme ve Kerr'in çalışmaları sonucunda.) gerçekleştirilmiştir.

1926'dan ileriye doğru, Timoshenko'nun tekerlek yassılaştırmasının (Aplati Tekerlek) etkilerini incelediği makalesi ile başlayarak, demiryolu yapısındaki dinamik yüklere karşı gelişen bir ilgi oluşmuştur. Belli başlı dinamik problemler, tekerlek yassılaştırması ve tekerlerin rayda oluşturduğu hasarlardan kaynaklanmıştır. 1943'den ileriye doğru ise, Dörr ve ekibi trenlerin artan hızları karşısında demiryolunun daha iyi temsil edildiği yol modellerine talep olacağı konusunu savunmuşlardır. Bununla beraber, bu konu oldukça yakın zamana kadar yerine getirilmemiştir. Gerçekten, 1970'lere kadar pratik problemleri çözmek için dinamik yol modellerinin kullanıldığı oldukça az sayıda makale yazılmıştır. Bu makalelerde, hareketli yük altındaki bir kirişin dinamik stabilite probleminde, hareketli yük hızının kirişteki dalga yayılma hızına eşit olduğu durumdaki bir 'kritik hız' durumu araştırılmıştır. Bölüm 4.4.2.2'de tartışıldığı gibi, aslında demiryolu için bu problem akademik ilgi alanlarından sadece biridir, çünkü kritik hız bugünkü trenlerin hızlarından çok daha yüksektir (Knothe ve Grassie, 1993).

Geçtiğimiz 20 yıl içerisinde, bu konuda pratik problemleri anlamak ve belki de çözmek için matematik model uygulamalarına çok daha fazla ilgi olmuştur. Bölüm 4.2'nin içinde de

gösterilmiştir ki, dinamik yüklerin yol ve taşıtlarda önemli hasarlara yol açtığına farkına varılmasıyla bu konu daha da önem kazanmıştır.

Dinamik etkiler, aynı zamanda gürültüye ve zemin titreşimlerine neden olmaktadır. Sonuç olarak, günümüzde taşıtın ve yolun etkileşimi için 5000 Hz civarındaki ve üstündeki frekans değerlerinde güvenilir olarak kullanılabilir dinamik modellere karşı artan bir talep bulunmaktadır. Yol modelleri ve çözüm tekniklerinin açıklanması ve günümüze kadar ki gelişimi sırasıyla Bölüm 4.3 ve 4.4'de açıklanmıştır. Bu tezin ilgilendiği ana tema, düşey kuvvetlerdeki dinamik davranışın modellenmesi olmasına karşın, ki çoğu problemin sebebi de bu düşey kuvvetlerdir, gürültü ve kısa dalga boylu ondülasyon oluşumundaki önemleri açısından yatay kuvvetlerden de kısaca bahsedilmiştir. Bölüm 4.5'de açıklanan yol modelleri ve bunların çözüm tekniklerinden uygun olanı seçilip bir yol kesimi için çözümlenmiş ve çıkan sonuçlar yorumlanmıştır. Bölüm 5'de ise yapılan çalışmalardan elde edilmiş bazı genel sonuçlara değinilmiş ve taşıtın ve yolun değişik frekans aralıklarındaki dinamik etkileşiminin modellenmesi ile ilgili gelecek çalışmalara ışık tutacak göze çarpan önemli sorular ve sonuçlar listelenmiştir.

4.2 Taşıt/Yol Etkileşim Problemleri

Yolun ve taşıtın dinamik modellenmesi ile ilgili son yapılan çalışmalar, hem Taşıt/Yol etkileşiminden dolayı artan pratik problemlerin nedenlerini anlamaya, hem de bu problemlerin önlenmelerinin veya çözümlerinin gelişmesine duyulan ihtiyaç nedeniyle geliştirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle bu problemlerin tartışılması uygun olur (Çizelge 4.1'de özetlendiği üzere). Bu çizelgede yukardan aşağı doğru, tekerlek/ray temas yüzeyinde doğan problemlerden başlanarak, yol bileşenleri ile ilgili problemler gösterilmiştir. Aynı zamanda farklı problem tipleri için özellikle ilgilenilen frekans aralıkları verilmiş ve en yüksek ve en düşük frekans değerleri arasındaki bu sınırlar Bölüm 4.2.1'in içinde tartışılmıştır.

4.2.1 Taşıt ve Yol Dinamiği Problemleri

Demiryolu taşıtlarının bizzat kendi dinamik davranışları, taşıtın eğilmesi ve dengelenmesi açısından düşünüldüğü zaman 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 tasarlanır. Taşıt süspansiyonlarının bu rijit 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 kütle; tekerlek takımı, yataklar, dingil aksına asılı motor ve aktarma sistemi/şanzıman/transmisyon olarak tanımlanır. Gerçekte, 10 Hz civarındaki bu frekans değerlerinde yolun davranışı rijit bir yay gibidir. Bununla beraber, 20 Hz'in üzerindeki frekanslarda, taşıt süspansiyonu 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 değerlerinin pratikteki tanımı 20 Hz'in üstündeki değerler olarak yapılabilir. Bunun yanında, bilinmelidir ki genelde 500 Hz'in üzerindeki frekans değerleri yüksek frekans, altındaki değerler ise düşük frekans değerleri olarak tanımlanır.

Çizelge 4.1 Taşıt/Yol Etkileşim Problemleri (Knothe ve Grassie, 1993).

Taşıt/Yol Etkileşim Problemleri		
	Düşünülen Alan	Frekans [Hz]
1	Taşıt	0-20
2	Boji ve Yaylandırılmamış Kütle	0-500
	(a) Tekerlek Mesnetleri	
	(b) Dingillerin, Fren Tertibatı Yorulması	
3	Teker ve Rayın Yüzey Bozuklukları	0-1500
	(a) Tekerlek Yassılığı (Aplatalık)	
	(b) Tekerlek Dalgalanması	
	(c) Ondülasyon Uzun Dalga Boylu	
	(d) Ondülasyon Kısa Dalga Boylu	
	(e) Kaynak ve Bağlantı Noktalarındaki Alçalmalar	
	(f) Kabuklanma, Oksitlenme	
4	Yol Bileşenleri	0-1500
	(a) Rayın Eğilme Yorulması	
	(b) Ray Elastik Mesnedi	
	(c) Beton Travers	
	(d) Balast ve Hat Geometrisi	
5	Tekerlek/Ray Sesi	0-5000
	(a) Yuvarlanma Sesi	
	(b) Çarpışma Sesi	
	(c) Uğuldayan, Çıgılık Atan Raylar	
6	Yapı Kaynaklı Gürültü ve Titreşim	0-500
	(a) Zemin Kaynaklı Titreşim	
	(b) Viyadükler	

4.2.2 Boji'nin Bileşenlerini ve Yaylandırılmamış Kütle'yi İçeren Problemler

Pratikte bojinin bileşenlerini ve yaylandırılmamış kütle'yi içeren ve özellikle de yüksek frekanslardaki dinamik yüklerden dolayı oluşan problemlerle sık sık karşılaşılır, fakat bu konu hakkında bugüne kadar çok az sayıda araştırma yapılmıştır ve ayrıca demiryolu taşıtlarının 10-50 Hz civarı frekans değerlerindeki davranışlarının tanımlandığı modellerin gelişimi de oldukça az olmuştur. Bu frekanslarda, tekerlek takımı dinamik olarak bojiden izole edilirken, aynı zamanda bir elastik yapı olarak kendi deformasyonu belirgin (dikkati çeken) değerlere ulaşır. Dinamik yüklerden kaynaklanmadığı halde şiddeti artabilen problemlere örnek olarak, dingil yataklarının, fren donanımının, dingile asılı çekim motorlarının ve bojiye eklenmiş diğer elemanların yorulmaları verilebilir. Ahlbeck ve ekibi dinamik yüklerin tekerlek yatakları üstündeki etkisi konusunda bir parça daha fazla ilgilenmişlerse de, bu alanda diğer araştırmacılar tarafından hazırlanmış ve yayınlanmış çok az sayıda çalışmalar da bulunmaktadır. 100-200 Hertz civarındaki frekansların oluşturduğu kuvvetler öncelikle tekerlek ataleti ile karşılandığından, uzun dalga boyuna sahip düzensizliklerin neden olduğu düşük frekanslı kuvvetler, özellikle yataklar için zararlıdır. Buna örnek verilirse, 300 kN'dan daha fazla tekerlek/ray kuvveti doğuran ve kullanımı önerilen frenleme tertibatları, dalga boyu bir kaç yüz mm olan düşük frekanslı kuvvetlerle beraber, tipik yük katarlarında tekerlek yatağının ömründe %50 azalmaya sebep olabilirler. Frenlemeden dolayı tekerlerdeki yorulma hasarı Lunden tarafından incelenmiştir (Knothe ve Grassie, 1993).

4.2.3 Tekerlek ve Rayın Yuvarlanma Kontak Yorulması

4.2.3.1 Tekerlek Problemleri

Taşıtın ve yolun dinamik davranışının modellenmesinde en çok ilgilenilen ve izlenen tekerlek düzensizliği, tekerlek yassılaştırmasıdır (Aplatiklik). Bu düzensizlik türü bir tür aşınma olup, kilitlenen frenlerden dolayı oluştuğu bilinmesine rağmen, tekerlek yassılaştırması'nın yoldaki etkilerini anlamak için taşıtın ve yolun yüksek frekanslardaki davranışını gösteren modelleri oluşturmak gerekmektedir. İngiliz Demiryolları (BR), tekerlek yassılaştırması'nı yol içinde iyi tasarlanmış mükemmel deneyler ile göstermiş ve bu deneylere uygun bir matematik modeli geçerli kılarak da bu alandaki işi üstlenmiştir. Bu konudaki son gelişmeler Tunna tarafından yapılırken, ilk yapılan çalışmalar Newton ve Clark tarafından tanımlanmıştır. İngiliz Demiryolları'nın yaptığı daha da önceki deney çalışmaları ise, rayda taşlama etkisi yapan tekerlek yassılaştırmasının, raydaki ondülasyonu ideal bir kosinüs eğrisine benzettiği yaklaşımı ile, yürütülmüştür. Bu yaklaşımın nedeni, yolun herhangi bir noktasına çarpma etkisi yapan bir tekerlekteki düzensizliğin etkilerinin ölçüm zorluğundan kaçınmaktır. Bu zorluklara

rağmen, Ahlbeck ve meslektaşları ile Grassie, gerçek tekerlek düzensizliklerinin neden olduğu yükleri ölçmeyi denemiş ve hesaplanan değerler ile bu ölçülmüş değerleri karşılaştırmışlardır. Tekerlek yassılaştırılması ve daha uzun dalga boyuna sahip düzensizliklerin her ikisi birden bu çalışmalarda dikkate alınmıştır. Dalgalı aşınma genellikle, tekerleklerin kısa dalga boylu, tipik olarak 30-100 mm'lik dalga boylarındaki aşınmaya maruz kalmış raylardaki hareketlerinde gözlenir. Bu hadisenin sebepleriyle ilgili olarak az sayıda çalışma yapılmış ve yayınlanmıştır. Bunlardan birisi, Kalousek ve Johnson tarafından Vancouver Skytrain sistemi için yapılan çalışma olup, burada bu tip dalgalanmaları engelleyecek bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, tekerlek ray arasındaki yapışma-kayma (stick-slip) düzensizliğini en aza indirmek için bir materyal kullanımını ve tekerlekler ile rayların enine profillerinin uyumunu azaltmaya yönelik değişikliği öngörmektedir. Bu yöntem aynı zamanda ray dalgalı aşınmasını azaltmada da başarılı olmuştur. Yapışma-Kayma düzensizliği, taşıtların elastik yol ve süspansiyon özelliklerinden dolayı zıplayarak yol aldıkları durumda oluşan, tekerleğin rayla temas durumundan oluşan düzensizliği olarak ifade edilir (Grassie, 1995).

Yuvarlanma kontak yorulması (akma ve kabuklanma gibi), hem tekerleklerde hem de raylarda gittikçe daha yaygın olmaktadır. Bu yorulma daha çok yüksek dingil yüklerine sahip yük treni hatlarında meydana gelmektedir. Yuvarlanma kontak yorulması ayrıca hem yük, hem de yolcu trenlerinin çalıştığı hatlarda, ray ve tekerlek arasındaki yüksek kontak gerilmelerine yol açan uyumsuzluktan dolayı oluşmaktadır. Bundan dolayı, yuvarlanma temas yorulması esas olarak yüksek frekans etkileşiminin bir problemi değildir. Fakat arzu edilen şey, yüksek frekanslarda dinamik davranışın güvenilir bir modeline sahip olmaktır. Bunun amacı da, öncelikle ray ve tekerlek bozukluklarının (kusurlarının) doğuracağı etkilerin hesabı ve mümkünse, tekerleklerdeki ve raylardaki düzensizliklerin yaptığı etkilerden dolayı oluşacak kusurların ne zaman ve nerede olacağını önceden tahmin edilebilmesidir (Knothe ve Grassie, 1993).

4.2.3.2 Ray Problemleri

Kısa dalga boylu (30, 100 mm) ondülasyon tipleri özellikle hızlı tren ana hatlarında meydana gelmektedir. Artan hızlar ile demiryolu mühendisleri bu ondülasyon tiplerinin nedenlerini ve etkilerini anlamaya ihtiyaç duymuşlardır. Bu durum sonuçta, taşıtın ve yolun yüksek frekanslardaki etkileşimini gösteren, güvenilir modellerdeki gelişimin ilerlemesinde ana bir etken olmuştur. Bu olayı, iyi tanımlanmış sebepleri ile oluşturulmuş bir modelle açıklamanın zor olduğu bilinmesine rağmen, yüksek frekanslardaki taşıt/yol etkileşimi için tatmin edici

birer modeli içeren bir kaç hipotez vardır ki, bu hipotezler ile bu olay kısmen açıklanabilmektedir.

Bu olayı tam olarak açıklanmanın zorluğuna rağmen, yüksek frekanslardaki taşıt/yol etkileşim modelleri hem bu olayın nedenlerinin açığa çıkmasında, hem de diğer ray dalgalı aşınma problemlerini engelleme yöntemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmede, başarılı olmuştur. Bu alandaki ilk başarılı çalışma Mair ve meslektaşları tarafından Avusturalya'da yapılmıştır. Bu çalışmada demir cevheri vagonlarının yaylandırılmamış kütlelerinin, ray kaynakları ve contaları tarafından tahrik edilen rezonanslarının, 200 mm dalga boylarındaki ondülasyonu artırdığı gösterilmiştir. Oldukça düşük frekanslı (20-50 Hz) olan bu dinamik yükler genellikle 'P2 kuvveti' olarak tanınırlar. Sözü edilen bu tabir ilk kez İngiliz Demiryolları tarafından kullanılmıştır. Bu kuvvetin aynı zamanda hafif raylardaki kötü kaynak yerlerinden sonra 300-1500 mm dalga boyuna sahip ondülasyonlardan sorumlu olduğu, ve en azından da Paris'deki RATP'de oluşmuş daha uzun dalga boyuna sahip ondülasyonlardan kısmen sorumlu olduğu, saptanmıştır. Artık günümüzde, bu mekanizmalar tarafından oluşacak hasarları engellemek için, tekerlek ray etkileşim dinamik modelleri, yolların dizayn metotlarına dahil edilebilmektedir (Knothe ve Grassie, 1993).

Rayın yuvarlanma yüzeyindeki (ray mantar kenarının tekerleğe temas yüzeyi) kaynaklanma, bozuk kaynaklar ve cebireler, yuvarlanma kontak yorulmasının kabuklanma, uğuldama gibi tepkileri ve diğer düzensizlikleri, yassılaştırmış tekerleğinkine benzer olup, bunların nedenlerini anlamak için dinamik bir modele gereksinim duyulmaz, ancak bunların ortaya çıkaracağı yükleri hesaplamak için dinamik bir model gereklidir.

4.2.4 Yol Bileşenlerinin Bozulması

Yüksek frekanslı dinamik yükler yolların bileşenlerinde birkaç farklı probleme neden olurlar. 1970'lerde Jenkins ve meslektaşlarının çalışmaları, İngiliz demiryollarında yaygın olarak ray bileşim yerlerindeki cebire deliklerinde oluşan yorulma çatlaklarının nedenlerinin anlaşılması ihtiyacı sonucunda ortaya çıkmıştır. Özellikle bu yorulma çatlakları İngiltere Demiryolları batı sahili ana hattında 160 km/saat hızın üstünde seyreden elektrikli lokomotiflerin kullanılması yaygınlaştıkça daha çok görülmüştür. Yüksek frekanslarda tekerlek/ray etkileşimi konusunda yapılmış bu çalışmalar kapsamlı ve ayrıntılı ilk teorik ve deney çalışmalarıdır. Ne var ki, geliştirilmiş bu matematik modelleri ve yapılmış ilgili deney çalışmaları ray tekerlek temasından dolayı oluşan etkileri açıklamaya yardım edememiştir. Bunun yanında açıklanamayan bu ray/tekerlek teması hadisesi, elastik tekerlekler kullanıp lokomotiflerin yaylandırılmamış kütlelerini azaltmak suretiyle yeterli bir şekilde engellenmiştir.

Eğilme probleminde bu tip yorulmalara karşı önlem alınması ihtiyacı, ray seçiminde kullanılan başlıca kriterlerden birisidir. Raylar, üstünden geçen tekerleklerin yarı-statik (quasi-static) yükü altında belirgin biçimde eğilirken, yorulma hadisesi tekerlek ve ray düzensizliklerinden ortaya çıkan etkiler ile daha da şiddetlenir. Canon ve Sharpe ise raydaki dalgalanmaların bir sonucu olarak kuvvetin etkime noktalarından değişik uzaklıklarda oluşan önemli boyuna gerilmelerin etkilerini incelemişlerdir.

Beton ve çelik traversler gerçekte, iki ray arasında tekerlek ve ray düzensizlikleri ile uyarılan frekans mertebelerinde farklı rezonans frekanslarına sahip, kötü sönümlü kirislerdir. Beton traversin çatlaması, özellikle ray oturma yerinde, bir çok demiryolu sisteminde yaygın olarak gözlenmiştir. Günümüzde bu tip bir problemin ray elastik mesnedi (elastomer mesnet) kullanarak iyileştirilebilir olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Bunun yanında, hepsinden önce traversler dinamik yüklerin oluşturduğu momentleri karşılayacak şekilde dizayn edilmiş olmalıdır.

Yüksek frekanslardaki dinamik yüklemelerin öncelikle beton traverslerde birkaç özel bölgede oluşturduğu iki ana problemden bahsedilebilir; öyle ki bunlar traverslerde oluşan yürüme ve çarpıklık problemleridir. İlk problem yürüme, traverslerin ray boyunca genellikle düzensizliklere doğru hareket eğilimi gösterdiği yerler olan ray kaynak ve bağlantı noktaları etrafında oluşur, çarpıklık ise tek taraflı olarak travers ucunun ray boyunca diğer raya göre rölatif olarak hareket etmek istediği zaman ortaya çıkar. Her iki konuda da yayınlanmış bir analiz bulunmamasına rağmen, yürüme problemi pratikte düzensizliklerin (kaynak ve bağlantı noktaları) genliği azaltılarak iyileştirilmektedir. Çarpıklık problemi ise bilinen tek yöntem olan ve Güney Afrika'da kullanılan omuzlama metodu ile engellenebilir. Bu metotta travers uçlarında balastı tutmak için kanatlar yapılması esasına dayanır. Aynı zamanda ray elastik mesnetleri de (elastomer mesnetler) bu tip problemleri engellemede yararlı olabilir.

Balastın kötüleşmesi ve yol geometrisinin bozulması her demiryolu sisteminde oluşması beklenen problemlerdir. Bu, yalnızca yüksek frekanslardaki dinamik yüklerden oluşan bir problem değildir, fakat açıkça bilinen bir gerçek vardır ki, kaynak ve bağlantı noktaları etrafındaki ve ray ondülasyon yerlerindeki bakım işleri çok daha fazla artmaktadır. Ayrıca dinamik yükler balastın kötüleşmesini daha da hızlandırmaktadırlar. Bu güne kadar, bu alanda dinamik modellerin kullanımıyla ilgili çok az araştırma yayınlanmıştır. Bu konuda Frederick ve Round, Meinke ve ekibi, Sato ve ekibi ve Shenton tarafından bazı dikkate değer raporlar sunulmuştur.

Aynı zamanda servis altındaki ray elastik mesnetlerinin de kötüleşebileceği bilinmelidir ve

istisnai derecede yüksek dinamik yüklerin olduğu yerlerde, daha da hızlı bozulacağı aşikardır. Bu konuyla alakalı olarak, ray elastik mesnedinin bozulmasının veya kötüleşmesinin önceden tahmini hakkında hiç bir yayın bulunmamaktadır (Knothe ve Grassie, 1993).

4.2.5 Gürültü

Gürültü gerçek bir dinamik olaydır. Tekerleğin ve rayın yüksek frekanslardaki titreşiminin modellenmesinde yapılan ilk çalışmaların hemen hemen hepsi gerçekte gürültü ile ilgili problemlerden dolayı ortaya çıkmıştır. Bu alanda özellikle, yuvarlanma sesi, vuruş sesi ve uğuldama problemleri içerisinde bir sınıflandırmayı benimseyen Remington ve ekibinin, gürültü konusuna gerçekten çok verimli katkıları olmuştur. Yuvarlanma ve vuruş sesi problemlerinin sebebi tekerlekteki ve raydaki düzensizliklerdir. Tekerlek uğuldama problemi ise, özellikle dar kurb geçişleri sırasında tekerlerin yaptığı yapışma-kayma hareketinden dolayı Adhezyonlu kayma durumunda ortaya çıkar (*Adhezyonlu kayma: Tekerlek takımlarının her iki tekerleğinin salınımlı boyuna kayması veya çekim kuvvetinin ani değişimi ile oluşur. Bu hareketin kurbalardaki sebebi tekerlek konikliğiyle kurb yarıçapının uyumsuzluğudur (Grassie, 1995)*). İngiliz demiryollarında son zamanlarda yapılan çalışmalar Thompson tarafından gerçekleştirilmiştir. Thompson bu çalışmaları ile ölçümler ve hesaplamalardan elde edilmiş gürültü değerlerinin inandırıcı bir korelasyonunu göstermiştir. Remington ve ekibinin yaptığı ilk çalışmalar, Thompson'nun yaptığı ray ve tekerlek modellerinin uygulanması ve gelişmesi konusundaki çalışmalarda dikkate değer bir ilerleme sağlamıştır. Remington, rayı her iki yönde yatay ve düşey titreşim davranışı için bir giriş gibi modellemiştir. Thompson ise rayın enine kesitteki deformasyonunu, yüksek frekanslarda sonlu elemanlar modeli kullanarak tanımlamıştır. Thompson aynı zamanda sonlu elemanlar modelini tekerlek takımı için de kullanmış, buradan tekerlek takımının rezonans davranışını güvenilir bir şekilde modellemiştir. Fingberg tarafından da, çığlık atma sesi benzer bir yaklaşımla modellenmiştir.

Yerleşim alanları içinde işletilen demiryolu sistemlerinde özellikle karşılaşılan sorunlar, zemin kaynaklı titreşimlerdir. Hesaplamalar ve ölçümler sonucunda elde edilmiş titreşim verilerinin korelasyonu ile oluşturulan zemin kaynaklı titreşimlerin tanımlandığı modellerin geçerliliğinin ispatı için bir çok çalışma yapılmıştır. İngiliz demiryolları ve Almanya'da bulunan BAM kuruluşu tarafından yapılan zemin kaynaklı titreşimlerin tanımlandığı çalışmalar bu alandaki en iyi çalışmalardır.

Demiryolu sistemlerinin güzergah tasarımında, sistemin diğer ulaşım sistemleri ile eş düzey olarak kesişmemesi için viyadükler üzerinden geçme yöntemi kullanılır. Bu yöntem genellikle

yerleşim bölgelerine transit sistemlerin kesintisiz erişimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip viyadük geçişlerinden oluşacak gürültünün tahmin edilebilmesi için matematik bir modelin kurulmasının gerektiği açıkça gözükmemektedir. Bunun yanında, böyle bir matematik modelin geliştirildiği ve doğrulandığı herhangi bir çalışma henüz yayınlanmamıştır. Frbya, Smith ve Wormley demiryolu viyadüklerinin dinamik davranışını inceleyen bir rapor üzerinde çalışmaktadırlar (Knothe ve Grassie, 1993).

4.2.6 İlgilenilen Frekans Limitleri

Kullanılan yüksek frekans değerleri tekerlek/ray gürültüsü ile bağlantılıdır. Bu konuda kurulan modellerde kullanılan frekansların en üst limiti insan duyma limiti olan 5000 Hz civarında olmalıdır. Tekerlek ve rayın yuvarlanma yüzeyleri ve yol bileşenleri ile ilgili problemlerin birincil nedeni düşey kuvvetlerdir. Bu düşey kuvvetler yüksek frekanslı yükler olup gerçekte kısa dalga boylu düzensizlikler sebebiyle ortaya çıkarlar ve en çok 1500 Hz'e kadar çıkan frekanslarda kritikleşirler. Bu kuvvetler tekerlek/ray arasındaki temas yüzeyinin sonlu boyutu ile zayıflarlar. Bu yüzeyin çapı ise genellikle 15 mm civarındadır. İletilen kuvvetler bir yandan akslara, bojiye ve taşıta tekerleğin atalet momenti doğrultusunda iletilirlerken, diğer yandan yol boyunca da zemin ve yol yapısına iletilirler. Bu iletilen kuvvetler 500 Hz'e varan frekanslarda kritik duruma gelirler. Taşıt dinamiğiyle ilgili problemler genellikle 20 Hz'den daha az olan frekanslarda oluşurlar. Yol dinamiğiyle ilgili problemler ise genelde 500 Hz'in altındaki frekanslarda oluşurlar ve araştırılırlar. 500 Hz'in altındaki frekanslar düşük frekanslar olarak adlandırılırlar.

4.3 Yol ve Taşıt/Yol Etkileşimi Modelleri

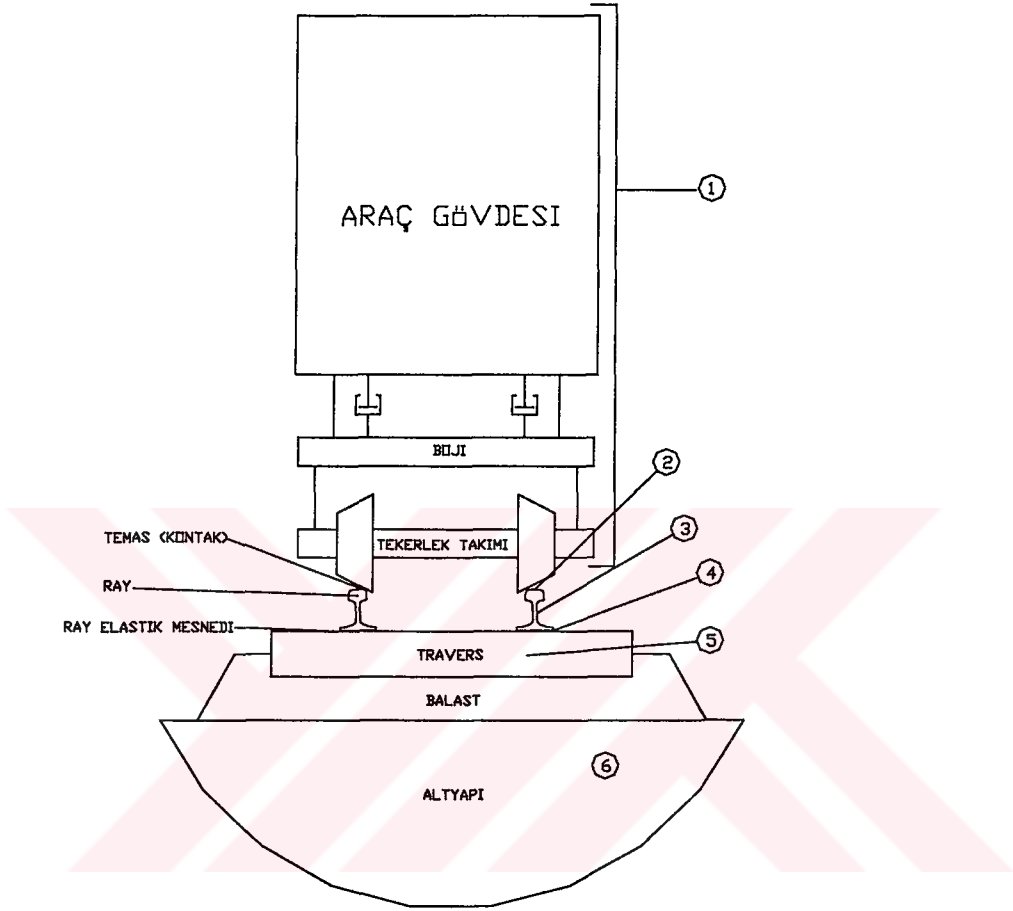
4.3.1 Yol –Taşıt Etkileşimi ve Yol Modellenmesi Problemlerinin Araştırılması

Yolun ve taşıt ile yol arasındaki etkileşimin dinamik davranışının modellenmesinde, 5 alt sistemin dikkate alınması uygun olmaktadır (Şekil 4.1).

1. Vagon gövdesi, boji ve tekerlek takımını kapsayan taşıt.,
2. Tekerlek/ray teması ve tahrik kuvvetinin gösterilmesi,
3. Ray,
4. Bağlantı elemanlarını ve ray elastik mesnedini kapsayan bağlantı sistemi,
5. Travers,
6. Balast ve altyapıyı kapsayan travers temeli.

Taşıt dinamiği problemlerinde (Bölüm 4.2.1) tartışılan sebeplere dayanarak taşıtın modellenmesinde ilgilenilen frekans aralığı içinde bazı yorumlamaların yapılması gereklidir.

Seyir konforuna, yolcu konforuna, taşıtın ve yolun stabilitesine dayalı dinamik davranış, sadece birkaç frekans değerinde önem kazanmaktadır. Gerçekten de teorik olarak, bazı bilgisayar programı paketleri taşıtın dinamik davranışının hesaplanmasında yararlı bir şekilde kullanılabilirler (örneğin MEDYNA, VAMPİRE, NUCARS ve VOCO).



Şekil 4.1 Taşıt ve yol bileşenleri.

Birkaç değişik frekans aralığında, taşıtın süspansiyonları, bojileri ve gövdeyi tekerlek takımından izole etmektedir. Bu nedenle, taşıtın “yaylandırılmamış kütlesi” (tekerlek takımı, yataklar, dingile asılı çekim motorları ve şanzıman), yüksek frekanslarda tekerlek takımı ile yol arasındaki düşey dinamik yükleri etkileyen tek bileşendir. Yaylandırılmamış kütle, düşey yöndeki tahrik için gerçekten rijit bir gövde gibi tanımlanmaktadır. Çoğu demiryolu kuruluşu bu davranışı bir avantaj olarak kullanmaktadır. Öyle ki bu avantaj, rutin olarak kullanılan ivme ölçer aks kutularının (aksa bağlı ivme ölçer) kullanımı esnasında kısa dalga boylu ray mantarı düzensizliklerinin izlenmesine kolaylık sağlamaktadır. Bununla beraber tekerlek takımının, elastik bir gövde gibi tanımlanması bazı problemler nedeniyle rijit bir gövde gibi tanımlanmaktadır.

Öte yandan, tekerlek-ray temas yüzeyi ve tekerleğin diğer kısımları üzerinde oluşan kuvvetler tarafından tahrik edilen tekerleğin yatay titreşiminin incelenmesi için ve tekerlek takımının yatay yöndeki esnekliğinden de ötürü, daha karmaşık bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Tatmin edici bir model, gürültü gibi durumların da temsil edilmesi için tekerlek takımının rezonans davranışını da içermelidir. Bu amaçla, birkaç basit, yarı analitik (Kısmen deney, kısmen matematik) model geliştirilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber, son zamanlarda yapılan çalışmaların çoğu bu konuda sonlu elemanlar modellerinin (nümerik modeller) gelişimi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

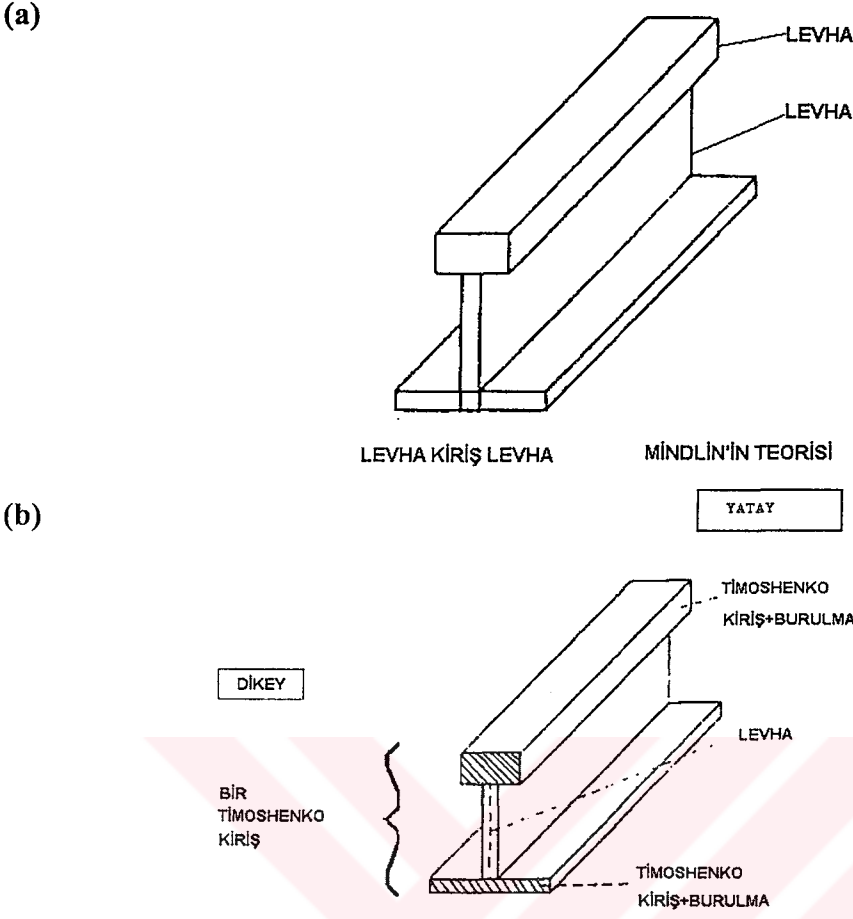
Yol problemlerinin davranışının modellenmesi ise 100 yılı aşkın bir süredir yapılmaktadır. Buna rağmen, yolların özellikle yüksek frekanslardaki davranışı, taşıtınkine nazaran daha az anlaşılmıştır. Bu konudaki bilgisizlik, yol dinamiği ve taşıt-yol etkileşimi problemlerinden daha çok, basit geleneksel taşıt dinamiği problemlerine önem verilmesine neden olmaktadır (Bölüm 4.2). Bununla beraber, balast gibi yol elemanlarının dinamik davranışları günümüzde genellikle ihmal edilmektedir.

Yolun modellenmesindeki daha kapsamlı tipteki bazı çalışmalar Fryba'nın kitabında görülmektedir (Knothe ve Grassie, 1993). Bu kitapta alfabetik olarak sıralanmış güncel bir literatür araştırması ve yeniden gözden geçirilerek yayınlanmış ve bir araya getirilmiş makaleler bulunmaktadır. Bu bölüm ilk olarak bir yol modeli için gerekli olan bilgilerin anlaşılmasının temelini açıklamaya çalışmıştır. İkinci olarak ise fiziksel yol bileşenleri için ilk kullanılan modeller açıklanacaktır (Bölüm 4.3.2), daha sonrada tüm yol sisteminin modellenmesi için şartları (Bölüm 4.3.3) ve en sonda ise tekerlek-ray temasının ve tahrik kuvvetinin modellenmesi açıklanacaktır (Sırasıyla Bölüm 4.3.4 ve Bölüm 4.3.5).

4.3.2 Fiziksel Yol Bileşenleri Modelleri

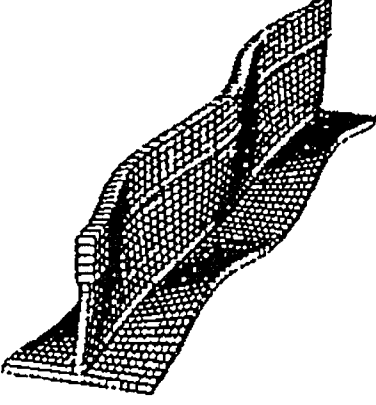
4.3.2.1 Ray Modelleme

Uzun yıllardan beri yapılan statik ve stabilite analizleri için, ray bir Bernoulli-Euler kirişi olarak modellenmektedir. Gerçekten de rayın 500 Hz'den daha düşük frekans değerlerinde, düşey dinamik tahrik kuvveti altındaki davranışının sunulması için yapılan bu modellerin yeterli olduğu görülmektedir. Rayın dinamik davranışının uygun olarak temsil edildiği farklı modeller için gerekli frekans aralıklarının belirlenmesine yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Bu tip bir çalışmada, ray birbirine bağlı levhalardan oluşan seriler şeklinde modellenmiştir (Şek 4.2a) ve hesaplanan tepkiler UIC 60 rayı için yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2 (a) Levha elemanı ile ve (b) kiriş elemanı ile rayın modellenmesi (Knothe ve Grassie, 1993).

İlgilenilen frekans değerleri ve dalga boyu aralıkları için, beş farklı dalga yayılma tipi oluşmaktadır. Şekil 4.3'de bunlardan dördü görülmektedir: yatay eğilme (A), düşey eğilme (B) ve iki burulma modeli (C, D). Basit kiriş modelleri (Şekil 4.2b) ile levha modellerinin en kolay yoldan karşılaştırılmanın yolu, dağılım ilişkisinin kullanılmasıdır. Bu ilişkide, frekans (f), dalga boyunun (L) bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir ve Şekil 4.4'de dört dalga yayılma tipi (A, B, C, D) için ve ilaveten de boyuna dalga yayılma tipi (F) için gösterilmiştir. Bu durumda rayın sadece düşey ve boyuna titreşimi dikkate alınır, ray tek Timoshenko kirişi olarak modellenebilmektedir. Burada frekans değeri 2500 Hz'e kadar ve dalga boyuda 0,4 m.'den daha büyük alınmaktadır. Yatay ve burulma dalga yayılma tiplerini elde etmek için, ray mantarı ve tabanları bağımsız Timoshenko kirişleri olarak modellenebilirler. Kirişlerin ara bağlantıları kesintisiz dönel yaylar tarafından sağlanmalıdır. Bu gibi benzer çift kirişli (double-beam) modellerin en kesitleri için gerekli veriler kolayca elde edilebilmektedir (Knothe ve Grassie, 1993).



Yatay eğilme tipi (A)

Dalga boyu:1.05 m

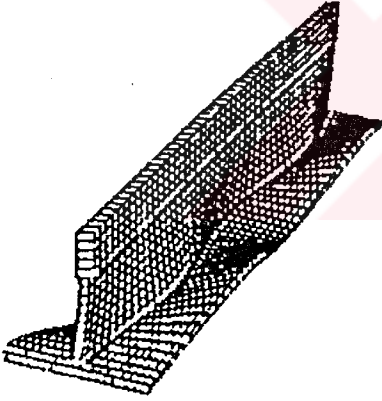
Frekans:0.7 kHz



Düşey eğilme tipi (B)

Dalga boyu:1.05 m

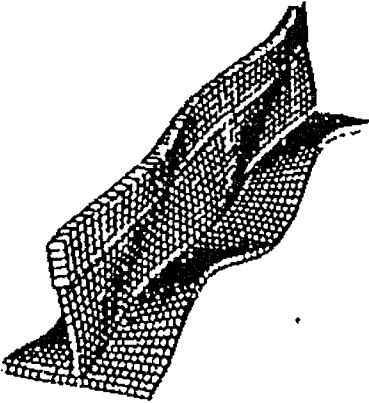
Frekans:1.1 kHz



İlk burulma tipi (C)

Dalga boyu:1.05 m

Frekans:1.0 kHz

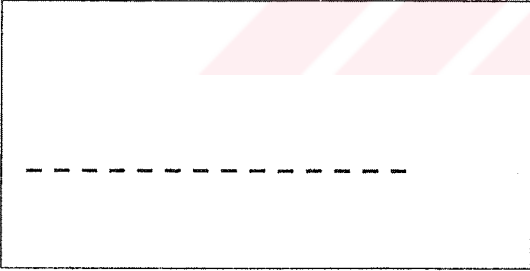
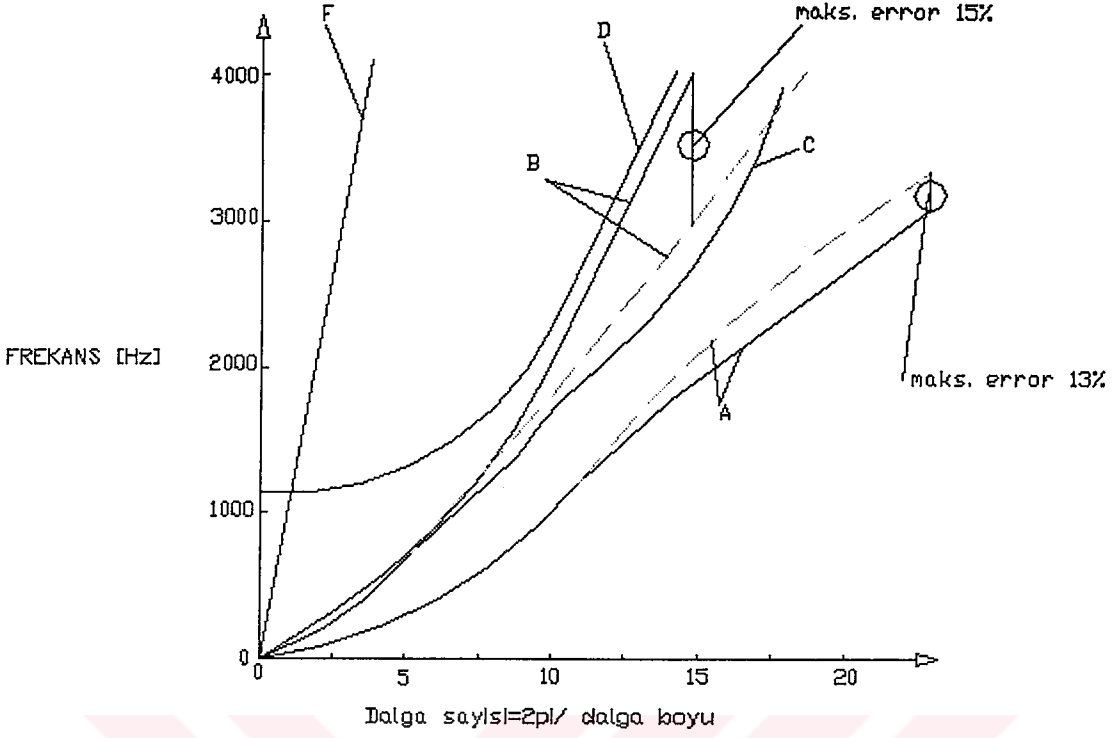


En yüksek burulma ve eğilme tipi (D)

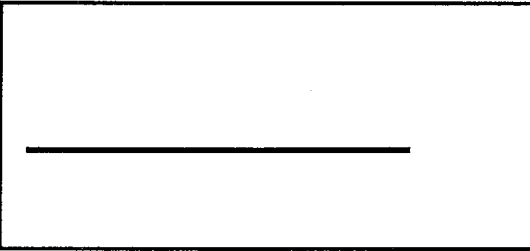
Dalga boyu:1.05 m

Frekans:1.8 kHz

Şekil 4.3 Dalga yayılma tipleri UIC 60 rayı için (A, C, D), yatay burulması (B) düşey yönde (Knothe ve Grassie, 1993).



Levha modeli



Basit kiriş model

Şekil 4.4 Serbest UIC 60 rayı için basit kiriş modeli ve levha modelinin karşılaştırılması (Dağılım ilişkisi) (Knothe ve Grassie, 1993).

4.3.2.2 Ray Bağlantı Sistemi Modelleri

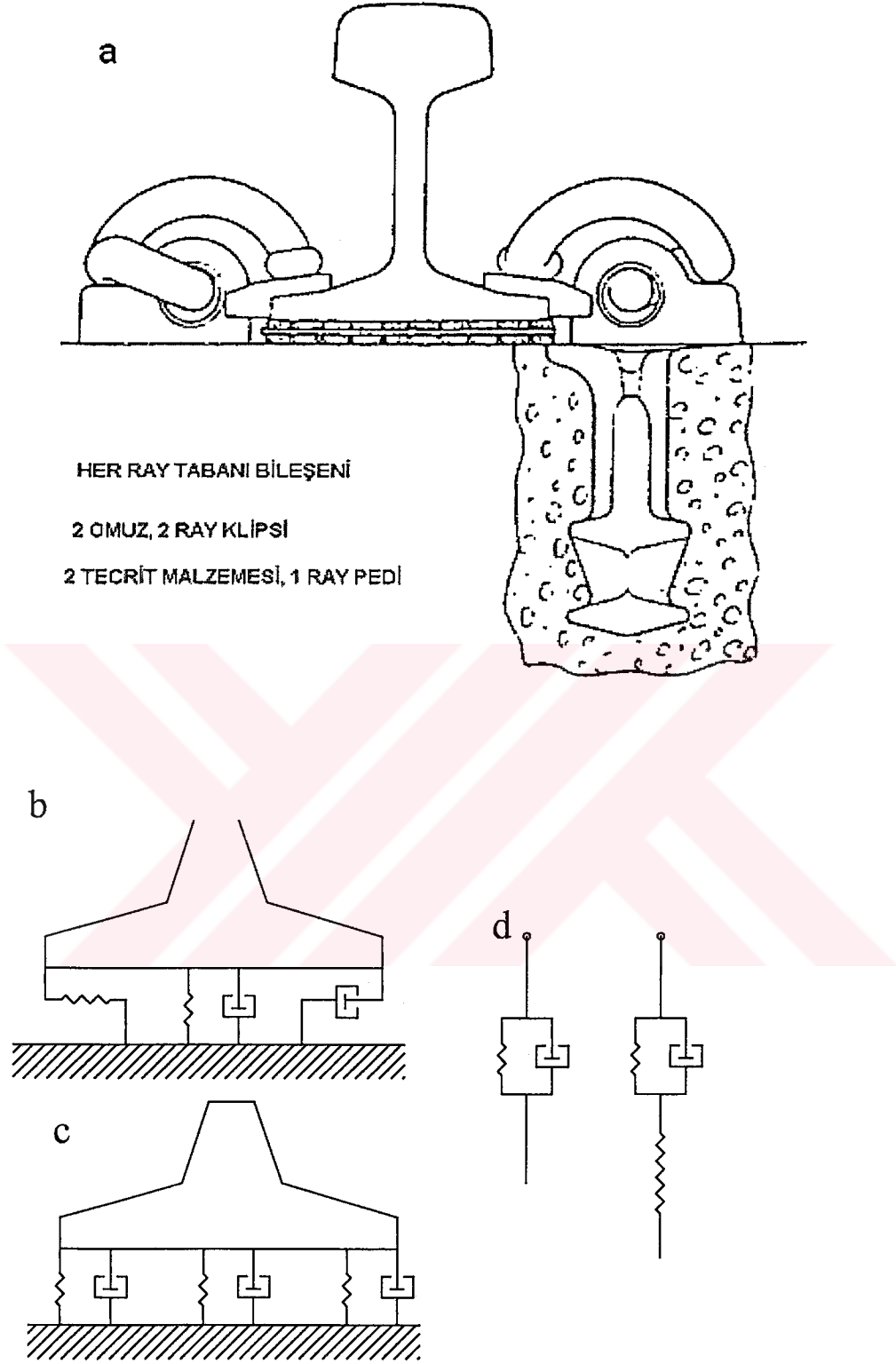
Daha çok beton traversler üzerinde kullanılan ray bağlantı sistemleri esnek bir yay bağlantısından oluşmaktadır. Bu bağlantı elemanları çoğu tasarımda kullanılabilir ve esasen daha rijit olan ray elastik mesnetleri ile paralellik içinde hareket etmektedirler (Şekil 4.5a). Genellikle ray elastik mesnedi, kauçuktan, plastikten ya da kauçuk kaplı mantar gibi kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Ray bağlantı sisteminin yük-yer değiştirme davranışı (eğrisi) doğrusal değildir. Fakat, yükleme esnasında tekerlekler traversin yakınında iken, yük-yer değiştirme davranışının doğrusal şekilde olabileceği savunulmaktadır.

Düşey titreşim için, elastik mesnetler genellikle birbirine paralel bir yay ve bir viskoz amortisör (sönümleyici-damper) olarak modellenmektedirler (Şekil 4.5b). Bir elastik mesnedin sönümlenme modelinin yapısı, sabit bir azaltma faktörü kullanılması ile oluşturulmuş ise, kauçuk gibi davranışı bilinen materyallerle daha tutarlı bir durum oluştururlar. Elastik mesnetler yolların yatay dinamik davranışının modelleri içinde de benzer şekilde tanımlanmaktadır. Gerçekte üç boyutlu olan yol ve ray modelleri için, elastik mesnetlerin ray tabanı ortasına visko-elastik tabakalar şeklinde dağıtılması uygundur (Şekil 4.5c). İki boyutlu modellerde ise, elastik mesnetler ray tabanındaki bir noktada gösterilmek suretiyle tanımlanabilmektedir. Rijitliğini ve sönümlenme katsayısını önceden önerebileceğimiz bir ray elastik mesnedinin dizaynı için kullanılabilir bir model henüz mevcut değildir.

Viskoz sönümlenmeli bir model için olup olmayacağına bakılmaksızın, uygulamadaki en büyük zorluk, ray elastik mesnedi parametreleri için uygun değerlerin bulunamamasıdır. Bu konuda laboratuvar ortamında çeşitli deneyler yapılabilmesine rağmen, gerekli parametreleri elde etmenin en iyi yolu, ilgilenilen ray elastik mesnedini içeren yollar üzerinde, taşıtın hareketi sırasında ölçümler yapmaktır. Bunun yanında, elektromanyetik uyarıcılarla ya da darbe çekiçleri ile yol üzerinde yapılan deney ölçümlerinden elde edilen verileri kullanarak, gerekli parametreleri elde etme yöntemi bilimsel çevreler tarafından kabul edilmektedir.

Sato, frekansın değişimi ile elastik mesnedin rijitliğinin artışı gösterebilmek için yüksek polimerli kauçuk bir elastik mesnedin 2 parametre yerine 3 parametre ile gösterilmesinin daha uygun olduğunu söylemiştir (Şekil 4.5d) (Knothe ve Grassie, 1993). Bu şekilde geliştirilmiş bir modelin bazı avantajları olduğu açıktır. Fakat aynı zamanda da gerekli olan parametrelerin elde edilmesinin daha da zor olacağı bilinmelidir.

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, gelecek birkaç yıl içinde, ray elastik mesnedinin gerçek parametrelerinin kolayca elde edilebileceği bir yöntem bulunacaktır.

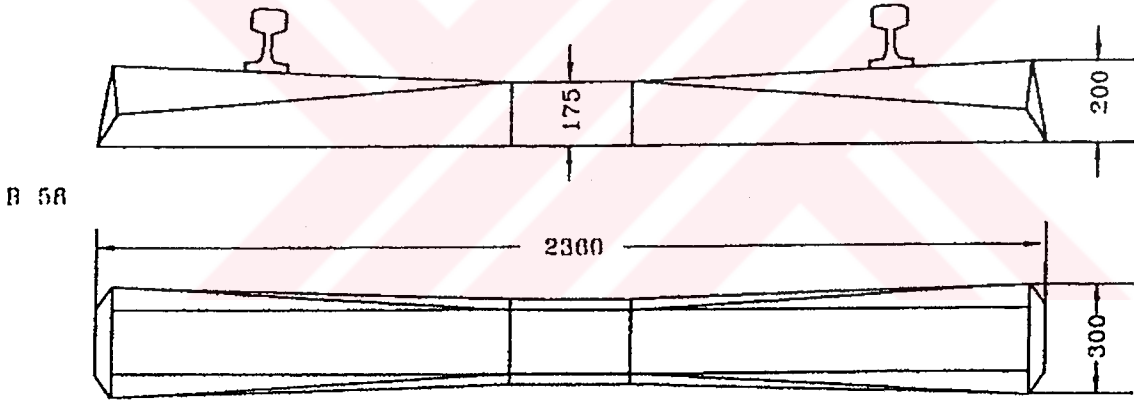


Şekil 4.5 Ray Bağlantı(fastening) Sistemi : (a) Fiziksel sistem., (b) Yay-sönümleyici-modeli, (c) temel modeli;(d) 2 parametrelı ve 3 parametrelı modeller (Knothe ve Grassie, 1993).

4.3.2.3 Ayrık ve Sürekli Mesnetli Travers Modelleri

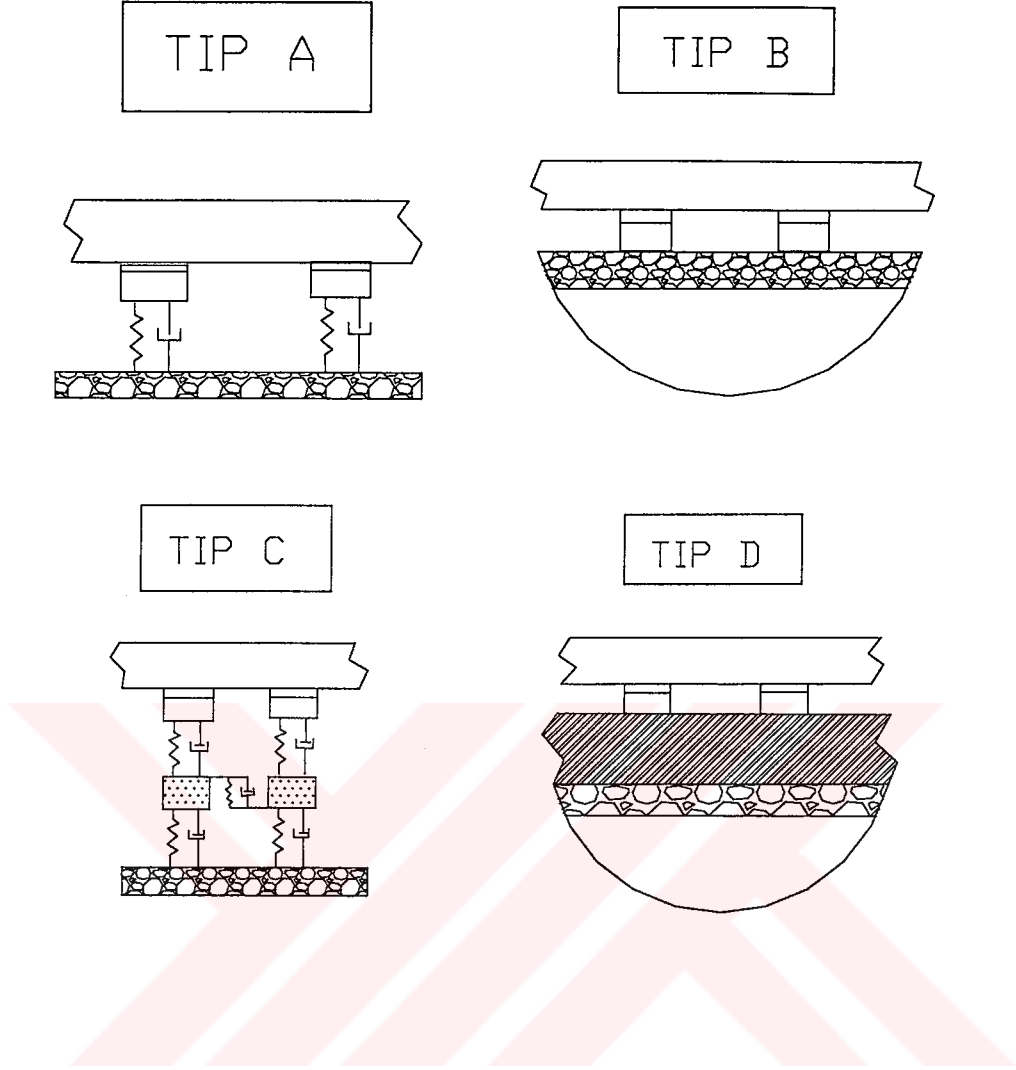
Modellerde traversler iki şekilde temsil edilebilir. Bunlarda birincisi traversin bir Bernoulli-Euler kirişi olarak modellenmesidir. İkincisi ise Timoshenko kirişi modelidir. İlgilenilen tüm frekans aralıklarında, traverslerin temsili için kullanılacak daha uygun, fakat çözümü karmaşık olan model, değişik kalınlıklardaki Timoshenko kirişi modelidir. Bu modelde dinamik çökme sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla hesap edilir. Bu tip bir çalışmada, traversin elastisite modülü, deneylerden ve hesaplamalardan elde edilmiş rezonans frekanslarının korelasyonundan bulunmalıdır. Bu yolla yapılan bir çalışmada, hesaplanan ilk 5 doğal frekans değerinin, deneylerden elde edilmiş doğal frekans değerleri civarında olduğu görülmüştür (Örneğin, Dahlberg ve Nielsen'nin çalışmaları ve bilgi çizelgesi (Şekil 4.6) (Knothe ve Grassie, 1993).

Traversleri Bernoulli-Euler kirişi olarak ifade etmek ise, 500 Hz'in altındaki frekanslarda yapılan çalışmalarda çok başarılı sonuçlar vermiştir. Bu modelde dinamik çökme frekans tanım alanı yöntemiyle hesap edilir.



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

Şekil 4.6 Ölçülmüş ve hesaplanmış B58 traversinin doğal frekansı (Alman Demiryolları) (Knothe ve Grassie, 1993).



TİP A:

- *Ayrık travers mesnedi*
- *Balast: yay ve sönümleyici*

TİP B:

- *Ayrık travers mesnedi*
- *Balastın ve zeminin Yarı-mekan (Half-space) modellenmesi*

TİP C:

- *Ayrık travers mesnedi*
- *Balast: yay ve sönümleyici*
- *Bağlantılı balast kütleleri*
- *Zemin: yay ve sönümleyici*

TİP D:

- *Ayrık travers mesnedi*
- *Sürekli balast tabakası*
- *Zemin: Yarı-mekan modeli.*

Şekil 4.7 Travers mesnet modelleri (Ayrık mesnet) (Knothe ve Grassie, 1993).

Rayların traversler ile balast ve zemin üzerine mesnetlenmesi temel olarak iki şekilde olmaktadır. Bunlardan ilki ayırık mesnetleme (Şekil 4.7), ikincisi ise sürekli mesnetleme (Şekil 4.8) şeklindedir. Ayrıca zemin de, tam elastik veya visko-elastik (yarı-mekan) olarak iki şekilde tanımlanmaktadır. Yarı mekanda; dinamik yükler altındaki zeminin davranışı, elastik ve plastik davranış arasındaki bir davranış olarak, yani visko-elastik davranış şeklinde düşünülür. Tam elastik zemin kabulü en çok kullanılan ve bilinen kabul ve hesap yöntemidir. Bu kabul de zeminin tam bir elastik davranış gösterdiği varsayılır.

İlk mesnet modeli olarak ayırık mesnetleme modelinin değişik tipleri vardır. Düşey doğrultudaki analiz yöntemlerinin çoğu basit bir ayırık mesnet modelini kullanırlar (Şekil 4.7 Tip A). Eğer dingil gözlenen traverse yakınken sadece yüksek frekanslı dinamik davranış ile ilgilenilirse, bu modelin (Tip A) kullanımı bir kez daha savunulur. Bir bojinin belirli tek bir traversin üzerinden geçtiği andaki yükleme ve boşalma durumları benzer bir model ile yaklaşık olarak analiz edilebilir. Bu modelde travers ray elastik mesnediyle beraber analiz edilir ve mevcut modeller için rijitlik ve sönümlenme katsayıları, günümüzde deney sonuçlarının ve hesaplanmış değerlerin korelasyonundan bulunur.

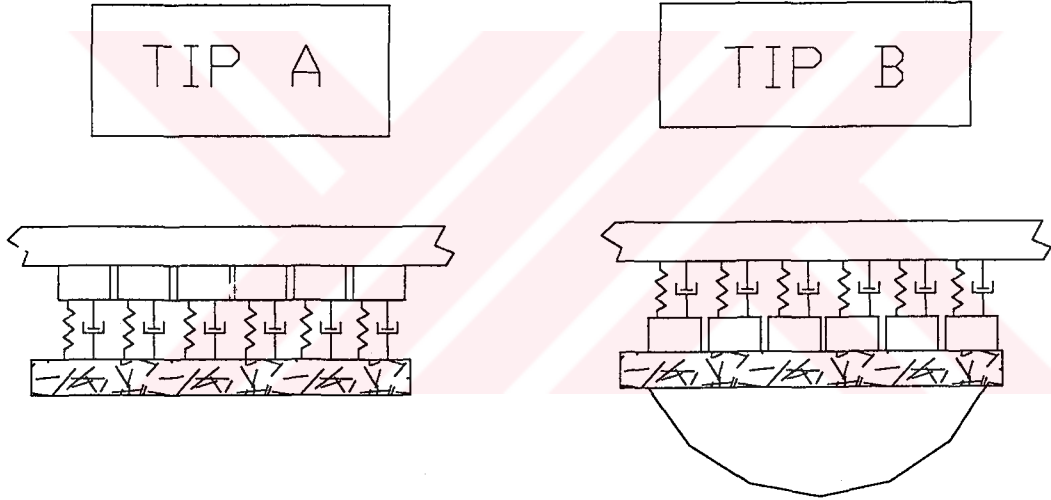
Bir başka olası model Şekil 4.7 Tip B' de gösterildiği gibidir. Balast ve zemin birlikte visko elastik davranışta yani yarı mekan (Half-space) olarak düşünülmüştür. Burada tek bir travers için rijitlik ve sönümlenme parametreleri önceden hesaplanmış diyagramlar ile bulunur. Bu diyagramlardaki parametreler, taşıtın yol üzerindeki hareketinden dolayı oluşan rezonans durumundan elde edilir. Bilindiği gibi demiryolu sistemi birden fazla travers ile mesnetlenir ve bunun için zeminde oluşan titreşimlerin modellenmesinde en az 5 travers dikkate alınması gerekmektedir. Bu durumda, yalnızca düşey titreşim için 5x5 boyutunda kompleks ifadeli ve frekansa bağlı bir rijitlik matrisi geliştirilir. Buraya kadar açıklanan modeller bağlantısız modellerdir, yani travers altındaki yay ve sönümleyiciler birbirinden bağımsızdırlar.

Sato ve Zhai tarafından kullanılan üçüncü bir olası travers mesnetli model ise, Şekil 4.7 Tip C'de gösterilmektedir. Bu model her bir travers altında, araları yaylar ve sönümleyicilerle bağlı ek balast kütleleri ve zemini içerir. Bunda balast ve zemin kütlelerinin birbirlerine yaylar ve sönümleyiciler ile bağlanarak beraber hareket ettikleri düşünülür. Bu modelin en çekici yönü ise hesaplanmış değerler ile deney değerleri arasında daha iyi bir korelasyon elde etme olasılığını sunmasıdır. Pratikte beş eklenebilir parametreyi elde etmek zordur. Çünkü bu tip bir modele uygun gerçekçi parametreleri elde etmek için gözlemlerden elde edilmiş verileri kullanmak zorluklar doğurabilir (Bu parametreler balast kütleleri ve zemin için kurulacak ara bağlantıların rijitlik ve sönümlenme parametreleridir). Zhai bu konuyla bağlantılı

olarak beş ayrı parametre değerini, teorik olarak elde etmeyi denemiştir.

Bir kaç görüş, modellerde bağlantısız balast kütlesi ve zemin şeklinin kullanılmasının daha doğru olduğunu belirtir. Zira; yapılan çalışmalar göstermiştir ki gerçekte 25-40 Hz ve 100 Hz civarı durumlarının her ikisinde de rezonans olabilmektedir. 100 Hz civarı rezonans durumu balastın kendi esnekliği boyunca ray ve traversin hareketinden oluşurken. 25-40 Hz civarı rezonans durumu ise elastik zeminin ve balastın her ikisinin de birbirinden bağımsız hareketinden oluşmaktadır. Bu da göstermektedir ki 50 Hz'den düşük frekanslarda bağlantısız balast kütlesi ve zemin şekli tercih edilebilir (Knothe ve Grassie, 1993).

Yaygın bir mesnet modeli de Şekil 4.7 Tip D'de gösterildiği gibidir. Balast katmanları üç tabakalı yarı-mekan şeklinde ifade edilmiştir. Rucker ve ekibi tarafından yapılmış çalışmalarda açıkça görülmüştür ki bu tip modellerin teorik olarak araştırılması çok çok zordur (Knothe ve Grassie, 1993).



TIP A:

- *Sürekli travers mesnedi*
- *Balast: yay ve sönümleyici*

TIP B:

- *Sürekli travers mesnedi*
- *Balastın ve zeminin Yarı-mekan (Half-space) modellenmesi*

Şekil 4.8 Travers mesnet modelleri (Sürekli mesnet).

İkinci bir mesnet modeli ise sürekli mesnetleme şeklindedir (Şekil 4.8). Bu modellerde travers altında balast ve zemin birbirine paralel bağlı yay ve sönümleyiciler ile temsil edilirler. Yayların k (N/m^2) birim boydaki rijitlik katsayıları ve c (Nsn/m^2) birim boydaki sönümlenme

katsayıları, balastın ve zeminin özelliklerine göre belirlenir. Sürekli mesnetleme şeklinde de ayırık mesnetleme şeklinde olduğu gibi zemin tam elastik veya yarı-mekan şeklinde düşünülür. (Şekil 4.8 A, B). Bu tip sürekli mesnetlenmiş modellerin çözümü daha önce belirtildiği gibi frekans tanım alanı yöntemiyle yapılır.

Şekil 4.8 Tip A modelinde yolun rijitlik ve sönümleme katsayıları, ayırık mesnetli Tip A modelinde olduğu gibi, deney sonuçlarının ve hesaplanmış değerlerin korelasyonundan elde edilir. Bu model tipi genelde 500 Hz'den daha düşük frekans aralığında gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Şekil 4.8 Tip B modelinde ise aynen ayırık mesnetli modelde olduğu gibi, balast ve zemin birlikte visko-elastik davranışta yani yarı mekan (Half-space) olarak düşünülmüştür. Traversler için rijitlik ve sönümleme parametreleri burada da (Şekil 4.7 Tip B'de olduğu gibi) önceden hesaplanmış diyagramlar ile bulunur.

Balast kütesinin travers altında nasıl tanımlanacağına cevabının bugüne kadar henüz açıkça cevaplanamamış olması bilinmelidir. Bununla beraber, balast tabakası için bugüne kadar yapılan çalışmalar vardır. Bu çalışmalarda, üzerindeki taşıt hareketinin etkileri karşısında, yolun dinamik davranışının önceden tahmin edilebildiği modeller (Sürekli mesnetli veya ayırık mesnetli) oluşturulmuştur.

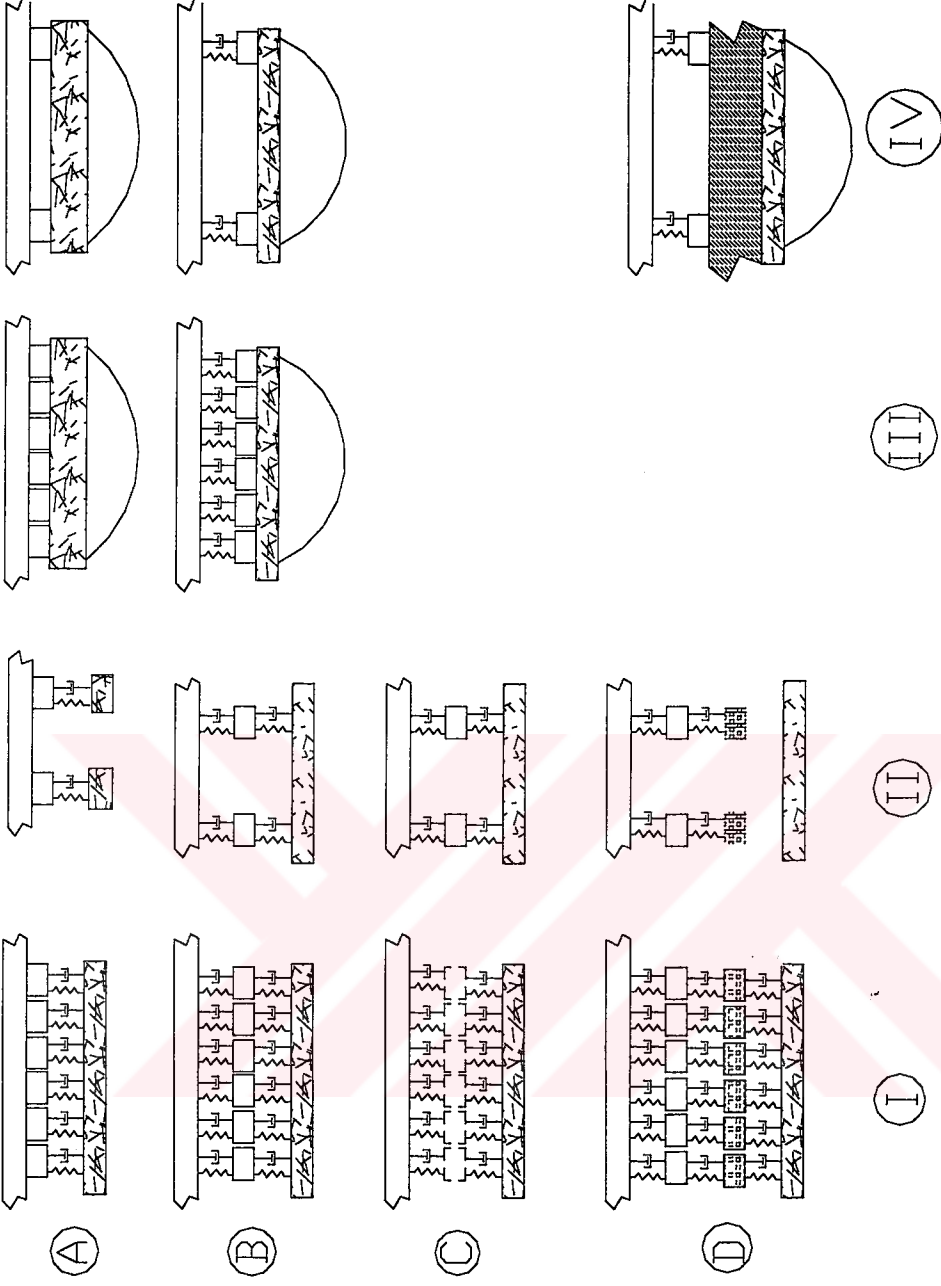
4.3.3 Yol Sisteminin Modellenmesi

4.3.3.1 Yol Modellerinin Hiyerarşisi

Çeşitli yol modellerini oluşturmak için Bölüm 4.3.2'nin yol bileşenleri modelleri birleştirilebilir (Bu modeller Şekil 4.9'da hiyerarşik olarak gösterilmiştir). Aslında modeller arasındaki prensip farklılık, rayın tamamen sürekli (continuous) mesnetlenmiş veya ayırık (discrete) mesnetlenmiş biçimde ifade edilmesidir (Sırasıyla Şekil 4.9 kolon I ve III ve kolon II ve IV). İlgilenilen bütün frekans aralıklarında, rayların ayırık traversler üstüne döşenmesi şekliyle oluşturulmuş yolların çoğu için ayırık mesnetlenmiş model tipi gerçeğe daha uygun bir temsil gösterse de, sürekli mesnet tipi, ayırık mesnetlerin yol boyunca döndürülüp uç uca eklenmesi ile elde edilmektedir. Böylece modelde traversler kesintisiz bir tabaka halinde ve sürekli bir boyuna kiriş şeklinde temsil edilmiştir. Bu sanal boyuna kiriş, rijit bir yapıymış gibi veya rijitliği ve kütlesi üniform dağıtılmış bir kiriş gibi modellenebilir (Şekil 4.9, CI) ve bu modellerle 500 Hz'den düşük frekans aralığında gayet uygun bir sonuç elde edilebilir. Yolların dinamik davranışının hesabı için kullanılacak bu tip sürekli mesnetli modeller, düşey tahrik kuvvetinde 500 Hz'in altındaki frekanslarda daha tutarlı sonuçlar vermektedir.

- A) 1 Tabakalı modeller (Tek Kiriş)
 B) 2 Tabakalı modeller (Çift Kiriş)(ÇK)
 C) Elastik traversli 2 tabakalı modeller (ÇK)
 D) Travers ve balastı ayrı ayrı kiriş olarak düşünen 3 tabakalı modeller (Üç Kirişli)

- I. Sürekli mesnetli modeller
 II. Ayrık mesnetli modeller
 III. Sürekli mesnetli yarı-mekanlı modeller
 IV. Ayrık mesnetli sürekli yarı-mekanlı modeller



Şekil 4.9 Yol Modellerinin Hiyerarşisi (Knothe ve Grassie, 1993).

Bilindiği gibi frekanslar 0 ile 1500 Hz arasında değişmektedir ve 500 Hz'in altındaki frekanslar düşük frekans olurken, 20-100 Hz frekans aralığı yol dinamiği açısından en kritik frekans aralığıdır.

Yüksek frekanslarda taşıt ve yol arasındaki dinamik etkileşimden dolayı oluşan bir çok problem bugün günümüzde çok iyi bir şekilde anlaşılmış ve başarıyla çözülmüştür. Bu doğrulukta açıkça bu kadar karmaşık olan yol modellerinin hepsine (Şekil 4.9) pratikte pek de ihtiyaç olmamaktadır. Genelde kullanılan sadece standart altı model vardır (Şekil 4.9 AI, BI, CI, AII, BII ve CII) (Knothe ve Grassie, 1993).

Düşük frekanslarda ise, genel bir tavsiye olarak, modeller ve çözüm teknikleri çok fazla karmaşık olmak zorunda değildirler ve yerine getirilmesi gereken ana şart, ilgilenilen davranışın doğru şekilde sunulmasıdır. Buna bağlı olarak bu tip düşey dinamik yüklerden dolayı taşıt ya da yol bozukluklarını kapsayan problemler için, taşıtı tek bir yaylandırılmamış kütle ve yolu da, sürekli mesnetlenmiş sonsuz bir kiriş olarak sunmak yeterli olmalıdır. Yolun özel bileşenlerinin sunulması için, probleme de bağlı olarak, daha detaylı bir modellemeye ihtiyaç duyulur. Örneğin taşıttaki bileşenlerin ayrı ayrı temsili için en az iki rijit gövde ile oluşturulmuş bir taşıt modeline gereksinim duyulur. Ayrıca, traverslerdeki hasar çalışmalarının çözümü için de esnek traversler ile bir yol modeline ihtiyaç duyulacaktır. Prensipde bu sunulanların dışında mevcut taşıt ve yol modellerinde sadece birazcık modifikasyona ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 4.2 Yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modeller (De Man, 2002).

Yol Yapı Tipleri	Analitik	Nümerik
Balastlı Yol	C I yada A I	A II
İndirekt Bağlı Balastlı Yol	C I	A II
Çizmeli Balastlı Yol	C I	A II
Çizmeli Beton Plak Yol	C I	A II
Rijit Üstyapı Direkt Bağlı Yol	A I	B II
Direkt Bağlı Blok Yol	C I	A II
İndirekt Bağlı Yol	C I	B II
İndirekt Bağlı Blok Yol	C I	A II
Rijit Üst Yapı (Gömülü Yol)	A I ya da B I	C I

Sonuç olarak genel bir şekilde Çizelge 4.2'de standart altı adet yol modeli (Şekil 4.9 AI, BI, CI, AII, BII ve CII) ve bunların kullanıldığı üstyapı tipleri gösterilmektedir. Çizelge 4.3'de

ise genelde kullanılan bu altı modelin temsil edebildikleri yol bileşenleri gösterilmektedir. Burada kullanılan standart 6 model anlaşılacağı gibi Şekil 4.9'da açıklanan yol modelleridir ve bu modellerin şekilleri Şekil 4.9'dan görülebilir. Burada AI modelinin balastlı üstyapıda kullanımı pek önerilmese de, böyle tip bir üstyapıda kullanıldığı bazı modellerde mevcuttur (Örneğin Esveld, 1997).

Bu tez çalışmasının sayısal uygulamasında ise analitik modellerden AI ve CI standart modelleri seçilmiş ve çözümlenmiştir. Bu modellerin kurulum şekilleri ve çözüm şekli Bölüm 4.5'de daha detaylı anlatılacağı gibi, frekans tanım alanı tekniği kullanılarak çözümlenmiştir.

Çizelge 4.3 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan altı standart model (De Man, 2002).

Yol Model Tipleri		Yol Bileşenleri											
		Raylar	Traversler	Bloklar	Ray Altı Levhası	Beton Plak	Ray Elastik Mesnedi	Gömmülü Ray	Ray Altı Levhası Padi	Blok Kılrf / travers çizmesi	Balast Materyali	İyi Zemin	Mühendislik Yapıları
Analitik Kullanılan Modeller													
A I	Tek Kiriş (Bernoulli-Euler, Timoshenko) Sürekli Mesnetli	X	3	3	3		1	X	1	1	1	1	2
B I	Çift Kiriş (Bernoulli-Euler, Timoshenko) Sürekli Mesnetli	X				X		X				X	X
C I	Çift Kiriş (Bernoulli-Euler, Timoshenko) Amortisörlü yaylar üzerinde Sürekli Mesnetli	X	1	1	1		1		1	1	1	1	2
Nümerik Kullanılan Modeller													
A II	Tek Kiriş (Timoshenko) Amortisörlü yaylar üzerinde Ayırık Mesnetli	X	X	X	X		X		X	X	X	X	2
B II	Çift Kiriş (Timoshenko) Ayırık Mesnetli	X	3	3	3	X	X		X	X	X	X	X
C II	Çift Kiriş (Timoshenko) Ayırık Mesnetli	X				X		X				X	X
1-Rijitliği ve kütlesi üniform dağıtılmışsa. 2-Sadece yapı rijit düşünülürse. 3-Sadece kütle beraber düşünülürse. Analitik Çözüm: Çözümde matematik eşitliklerin analizinden ulaşılan teknik. Nümerik Çözümler: Çözümde deney verilerinin iterasyonu ile ulaşılan teknik.													

4.3.3.2 Yol Modellerinin Sonlu ve Sonsuz Uzunluktaki Yapıları

Yol yapısı ya sonlu ya da sonsuz uzunlukta bir yapı tipi olmak üzere iki değişik şekilde modellenebilir. Yapı tipinin seçimi, modelin çözüm tekniğiyle yakından alakalıdır. Sonsuz uzunluktaki yol yapıları genelde frekansa bağlı (Frekans Tanım Alanı) çözümlerde kullanılırken, sonlu uzunluktaki yapı tipi ise zamana bağlı (Zaman Tanım Alanı) çözümler için daha uygundur. Sonlu yol modelleri için ana problem, sınır koşullarıdır. Bu sınırlarda, hareketli yüklerin tepkileri incelenirken, istenmeyen bazı sonuçlar ortaya çıkabilir. Bu durumdan Bölüm 4.4.3.2’de bahsedilmiştir.

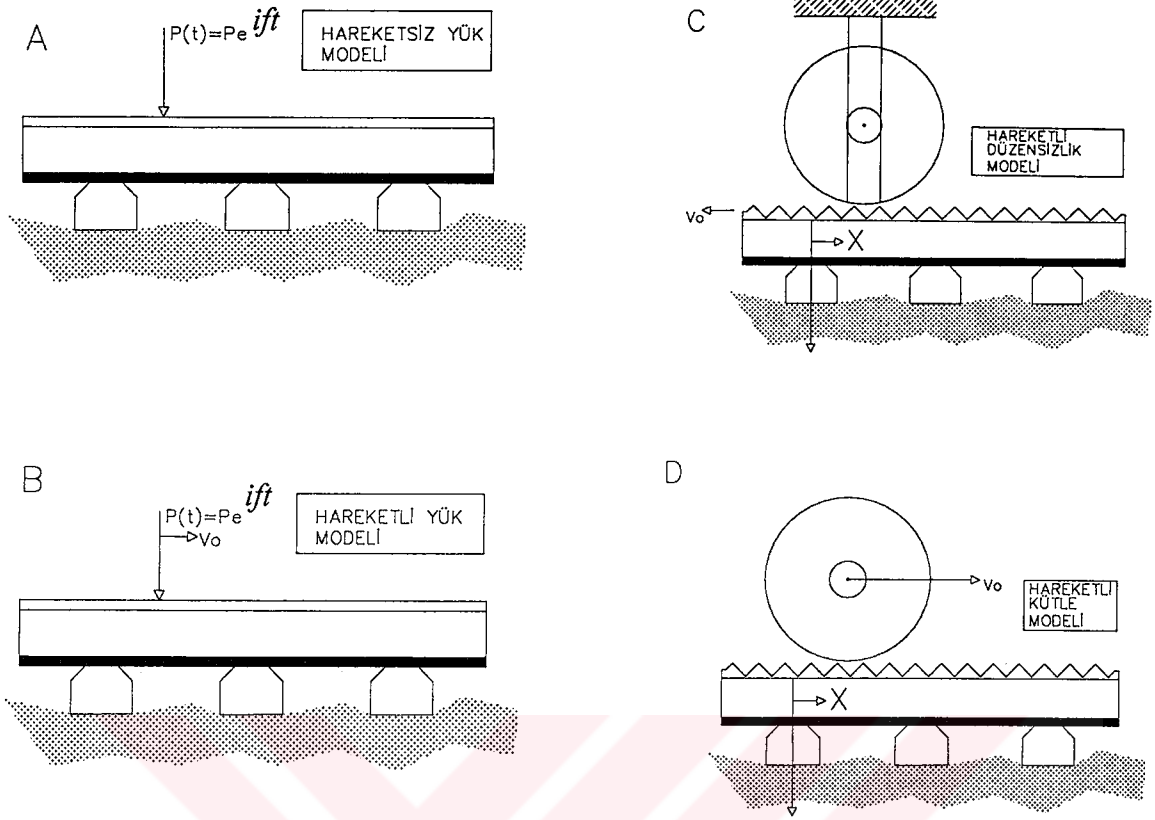
4.3.4 Uyarımın (Tahrik Kuvvetinin) Modellenmesi

Tekerlek/Ray teması sırasında oluşan düşey uyarımın gösterildiği en gerçekçi model, tekerleğin yol üzerindeki düzensizliklerde yuvarlandığı modellerdir (ya da tekerlek üzerindeki pürüzlülüklerde). Bu durumun bir örneği Şekil 4.10 D’de gösterilmektedir. Ancak bu tip modellerin kullanılması çok zor olup, daha basit tipteki modellerin kullanımı, belirli durumlarda daha iyi olmaktadır.

Sabit bir noktaya uygulanan periyodik veya kısa süreli bir kuvvet ile (örneğin sırasıyla vibratör veya darbe çekici) uyarılan yollardaki tahrik kuvvetlerinin, hesaplanmış ve ölçülmüş değerlerinin karşılaştırılması için en uygun model Şekil 4.10 A’da gösterilmektedir. Şekil 4.10 B’de ki hareketli yük uyarımı Dörr’ün makalelerinden (1944) bu yana birçok teorik araştırmada kullanılmıştır.

Şekil 4.10 C’de ki hareketli düzensizlik modeli fiziksel olarak şöyle tanımlanabilir. Tekerlek takımı ray üzerinde sabit bir pozisyonda kalırken, ray mantarı ve tekerlek bandajındaki düzensizlikleri içeren bir şerit, ray ve tekerlek arasından sabit bir hızla çekilir. Bu tip modeller, yolun sürekli mesnetli olarak düşünüldüğü modellerde, yol üzerinde hareket eden tekerlek takımının dinamik davranışının araştırılmasında kullanılır. Bununla bağlantılı olarak ta, bu modelin çözümü frekansa bağlı hesaplamalarla kolayca yapılabilir. Ayrıca bu model tipi, tekerlek/ray etkileşim problemlerinde en çok kullanılan model tipidir.

Uyarımın modellenmesiyle alakalı en genel soru, hareketli düzensizlik modelleri yerine, çözümü çok daha zor olan hareketli kütle modellenin hangi durumlarda gerekeceği sorusudur. Pratikte bu modeller arasındaki en önemli farklılık, mesnetleme şeklinin sürekli olması yerine ayırık yapıldığı zaman ortaya çıkar. Bu yüzden, bugüne kadar kısmen cevaplanabilen daha genel bir soru, hangi koşullar altında modelde sürekli yerine ayırık mesnetleme şekli kullanılması gerektiğidir (Knothe ve Grassie, 1993).



Şekil 4.10 Tahrik Kuvveti Modellemesi (Knothe ve Grassie, 1993).

4.3.5 Kontak Kuvvetinin Modellenmesi

Yol taşıt dinamik sisteminde modellenmesi gereken son bileşen tekerlek-ray kontağı (teması) dır. Tekerlek-ray kontağı iki şekilde ele alınır teğetsel kontak ve düşey yöndeki kontak problemleri. Son zamanlarda, Elkins tekerlek-ray kontağı konusunda bir çok araştırma çalışması yapmıştır.

Düşey yöndeki kontak davranışının ifadesinde doğrusal olmayan bir temas yayı (Şekil 4.11 A) kullanılır (Bu şekilde doğrusal olmayan düzensizlikler ifade edilir). Bu durumda, düşey yöndeki kontak problemi Hertz kontak teorisinin varsayımları ile geçerli kılınır. Bu model, kısa dalga boylu ondülasyon gibi düzensizliklerle beraber pek uygun değildir.

Teğetsel kontak problemleri daha da zordur (Şekil 4.11 B). Kalker'in programları olan CONTACT ya da FASTSIM programları, doğrusal düzensizlikler için hem durağan hem de durağan olmayan teğetsel kontak probleminin hesabında kullanılabilir. Bunun yanında teğetsel kontak problemlerinin araştırılmasında, pek çok düzensizlik koşulu için Shen, Hedrick ve Elkins'in yaptığı çalışmalar yeterince uygundur. Ayrıca CONTACT programı doğrusal olmayan düzensizlikler için hem durağan hem de durağan olmayan teğetsel kontak probleminin hesabında kullanılabilir (Knothe ve Grassie, 1993).

Doğrusal düzensizlik: Aynı genlik veya aynı dalga boyuna sahip şekilde devam eden düzensizlikler.

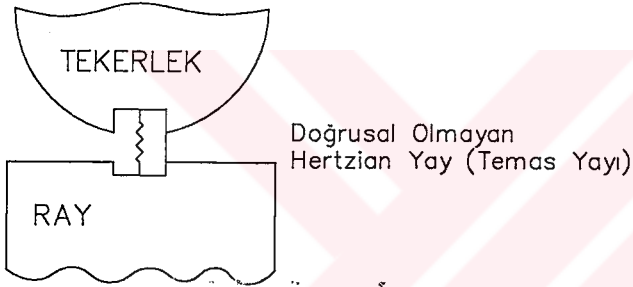
Doğrusal olmayan düzensizlik: Genliği veya dalga boyu sürekli şekilde değişen düzensizlikler.

Durağan durum: Kontak kuvvetinin hareketsiz olduğunun düşünülmesi.

Durağan olmayan durum: Kontak kuvvetinin hareketli olduğunun düşünülmesi.

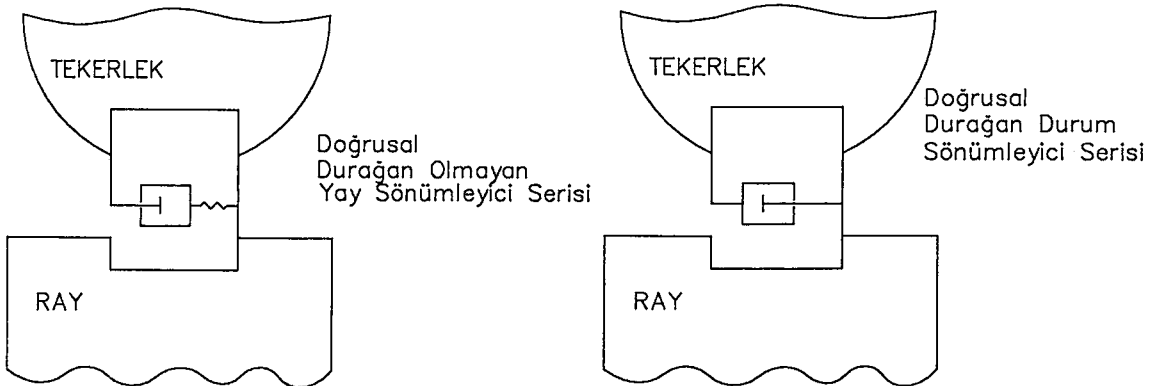
DÜŞEY

a)



TEĞETSEL

b)



Şekil 4.11 Temas modelleri (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4 Çözüm Teknikleri ve Tarihsel Araştırma

Yol-taşıt dinamik sisteminin davranışı, frekans veya zaman tanım alanı metotlarından herhangi biri ile hesap edilebilir. Frekans alanı tekniği içindeki ilk adım, sistem hareketsiz noktasal yükler tarafından tahrik edildiği anda, sistem için uygun dinamik tepki davranışını (Yani dinamik büyütme faktörünü) elde etmek olacaktır. (Bölüm 4.4.1.1 ve 4.4.1.2’de sırasıyla sürekli ve ayırık mesnetli yol için açıklanmaktadır). Burada özellikle literatürde önemli olduğu belirtilen metotlar tartışılmaktadır. Dinamik büyütme faktörü bilindiği zaman, hareketli düzensizlikler için taşıt/yol sisteminin davranışını çözmek gerçekten çok kolaydır; bu konudan Bölüm 4.4.1.3’de bahsedilmiştir. Bölüm 4.3.4’de açıklanan hareketli yük ve hareketli kütle problemlerinin çözümü için frekans tanım alanı (frekansa bağlı) teknikleri Bölüm 4.4.2’de tartışılmaktadır. zaman tanım alanı (zamana bağlı) çözüm tekniği ise Bölüm 4.4.3’de tartışılmaktadır. Çözüm tekniklerinin farklı araştırmalarda kullanılmasına ilişkin birtakım notlar da Bölüm 4.4.4’de verilmektedir.

Bu çözüm tekniklerinin anlatımına geçmeden önce; Demiryolunun dinamik davranışında kullanılan modelleri sürekli mesnetli ve ayırık mesnetli diye genellersek, model tiplerinin çözümü için kullanılan teknikleri ve yöntemleri Çizelge 4.4’deki şekilde özetleyebiliriz.

Çizelge 4.4 Analitik ve nümerik olmak üzere kullanılan aiti standart model.

Model Şekilleri	Çözüm Teknikleri	Frekans Tanım Alanı (Frequency Domain Techniques)		Zaman Tanım Alanı (Time Domain Techniques)	
		Analitik	Nümerik	Yarı-Analitik	Nümerik
Sürekli Mesnetli (Continuous Supported)	a) Fourier dönüşümü tekniği. (Fourier Transform) b) Sonlu elemanlar metodu. (Finite Element Method)		-	Modal Analiz (Modal Analysis)	Zaman Adımlı (Time History)
Ayrık Mesnetli (Discrete Supported)	Sonlu elemanlar metodu. (Finite Element Method)		Sonlu elemanlar metodu. (Finite Element Method)	Modal Analiz (Modal Analysis)	Zaman Adımlı (Time History)

4.4.1 Hareketsiz Noktasal Yükleler (HNY) İçin Frekans Tanım Alanı Tekniği

4.4.1.1 Sürekli Mesnetli Yollarda HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı

Demiryolunun ilk dinamik analizi; yolu harmonik olarak değişen hareketsiz yük veya hareketli düzensizlikler ile uyarılan (tahrik edilen) sürekli mesnetlenmiş bir Bernoulli-Euler kirişi şeklinde modelleyen, Timoshenko tarafından yapılmıştır. Sistemin tepkisi (değişen yükün etkime noktasındaki deplasman) yolun dinamik tepki davranışıdır.

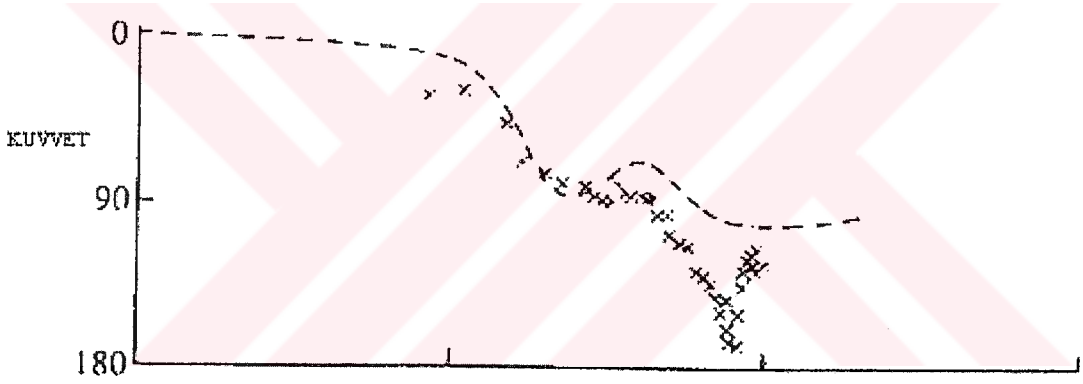
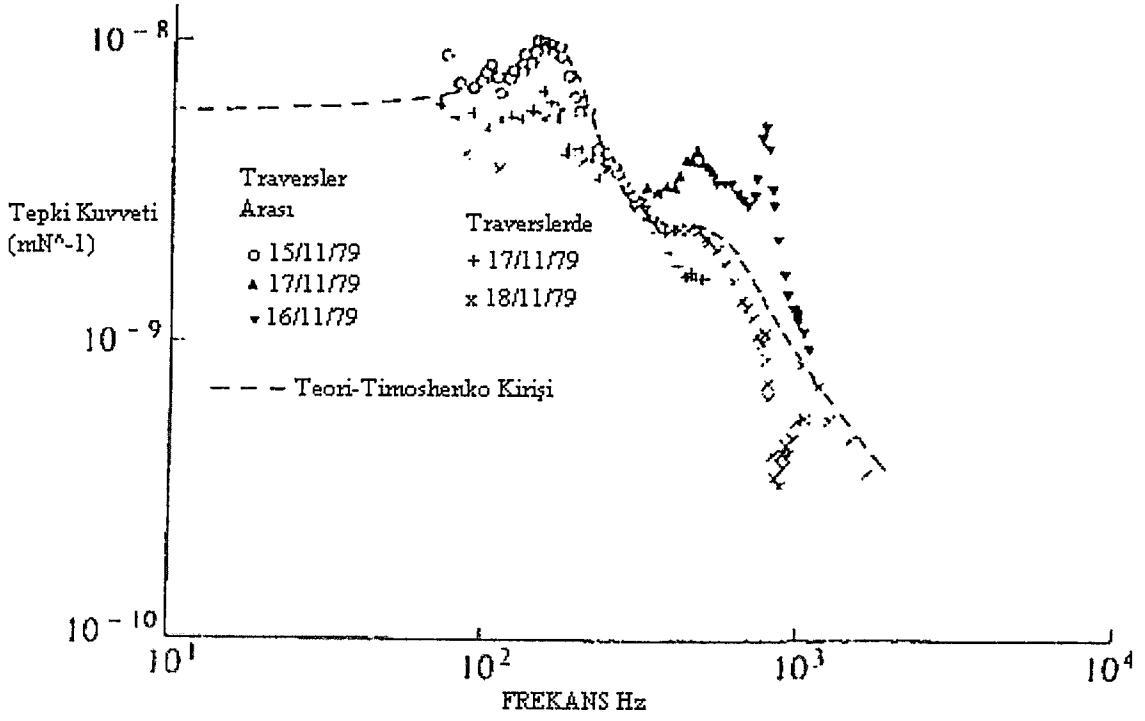
Bu, traversleri temsil eden ve ayrı bir tabakaya sahip olan, yol modelleri Şekil 4.9 b ve c’de gösterilmektedir. Sato traverslerin birbirinden bağımsız rijit gövdelerden oluşan bir tabaka olarak, raylarında sürekli mesnetlenmiş Bernoulli-Euler kirişi gibi temsil edildiği modeli kullanan ilk kişi olmuştur.

Rayın rijit ya da elastik traverslerin oluşturduğu sürekli bir tabaka üzerindeki, bir Timoshenko kirişi gibi sunulduğu model Grassie ve ekibi tarafından geliştirilmiştir ve daha sonra Tassilly, Vincent ve diğerleri tarafından kullanılmıştır. Yolun yatay ve boyuna yöndeki dinamik davranışı da benzer şekilde bir Timoshenko kirişi gibi ele alınmıştır. Aslında, bu araştırmacılar Bölüm 4.4.2’de sözü edilen Fourier dönüşüm çözümü tekniğini kullanmışlardır (Knothe ve Grassie, 1993).

Grassie vd., 1995 ‘den elde edilen ölçülmüş ve hesaplanmış düşey direkt tepkiler Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Şekil 4.12’deki bu model gözlemlerden elde edilen çoğu frekans aralıkları için kabul edilebilir sonuçlar vermektedir. Hesaplanan iki rezonanstan birincisi, traverslerin ve rayın, balast üzerinde hareket ettikleri 100 Hz frekansının biraz üstündedir, ikincisi ise rayın ray elastik mesnedi üzerinde traverslere göre rölatif hareket ettiği yaklaşık 400-500 Hz civarındadır.

Bu modelin başlıca eksikliği, yolların tutuna-tutuna “pinned-pinned” diye anılan rezonans frekansı etrafındaki davranışını gösterememesidir. *Tipik şekilde 750 Hz’in üzerinde olan bu frekanslarda, raylar traverslerin üzerinde görece küçük genliklerle, traverslerin arasındaki kesimlerde ise oldukça büyük genliklerle titreşirler* (Grassie, 1995).

Bu frekans bölgesinde, (Şekil 4.12’deki veriye göre 750 Hz civarında) traversler arasında yapılan uyarımda yol rezonansa geçmekte, traversin üstündeki uyarımda ise rezonansa geçmemektedir. Bu davranışın tepkisini doğru biçimde tahmin etmek için, ayrık mesnetli bir yol modeli kullanılmalıdır.



Teori İçin Parametreler

$$\begin{aligned}
 m_r &= 56 \text{ kgm}^{-1} & EI &= 4.86 \text{ MNm}^2 & K &= 0,34 \text{ (Kayma Faktörü)} \\
 k_p &= 280 \text{ MN}^{-1} & c_p &= 63 \text{ kNm}^{-1}\text{s} & l &= 0,698 \text{ m.} \\
 k_b &= 70 \text{ MNm}^{-1} & c_b &= 82 \text{ kNm}^{-1}\text{s} & M_s &= 110 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

Şekil 4.12 Beton traversler üstüne döşenmiş yolların direkt düşey dinamik tepki davranışı (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.1.2 Ayrık Mesnetli Yollarda HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı

İlgilenilen bütün frekans aralıklarında yol tepkilerinin hesaplanmış ve ölçülmüş değerlerinin karşılaştırma işleminin yeterli bir şekilde sağlanabilmesi için, yolun ayrık mesnetlenmiş olarak analiz edilmesi zorunludur. Bu gibi modellerde dinamik tepki davranışı hesaplamaları için bir algoritma Şekil 4.13'de örneklerle açıklanmıştır.

Bu analizin ilk adımı, karakteristik bir yol kesimini analitik veya nümerik olarak sonlu-elemanlar matrislerini (FE) , ya da onların eşdeğerlerini, kullanarak formüle etmektir. Daha sonra bazı cebrik eşitliklerin kullanılması ile çözüm Floquent teoremine uydurulur: Örneğin düşey deplasman $w(x,t)$,

$$w(x+kA,t)=w(x,t) \varepsilon^k \quad (4.1)$$

olur,

Burada ε bilinmeyen bir özdeğerdir ve A (cm) travers aralığıdır. Harmonik deplasman, $x=\pm\infty$ ve $x=0$ da ki sınır koşullarını sağlayacak şekilde $x=0$ uyarım noktasında ya da herhangi bir diğer noktada (dinamik tepki davranışı) hesaplanır ve düşey deplasman $w(x,t)$ aşağıdaki şekli alır.

$$w(x,t)=Q(x)\exp(2i\pi ft) \quad (4.2)$$

w : Çökme (mm)

Q : Yük (ton)

f : Frekans (Hz)

t : Zaman (s)

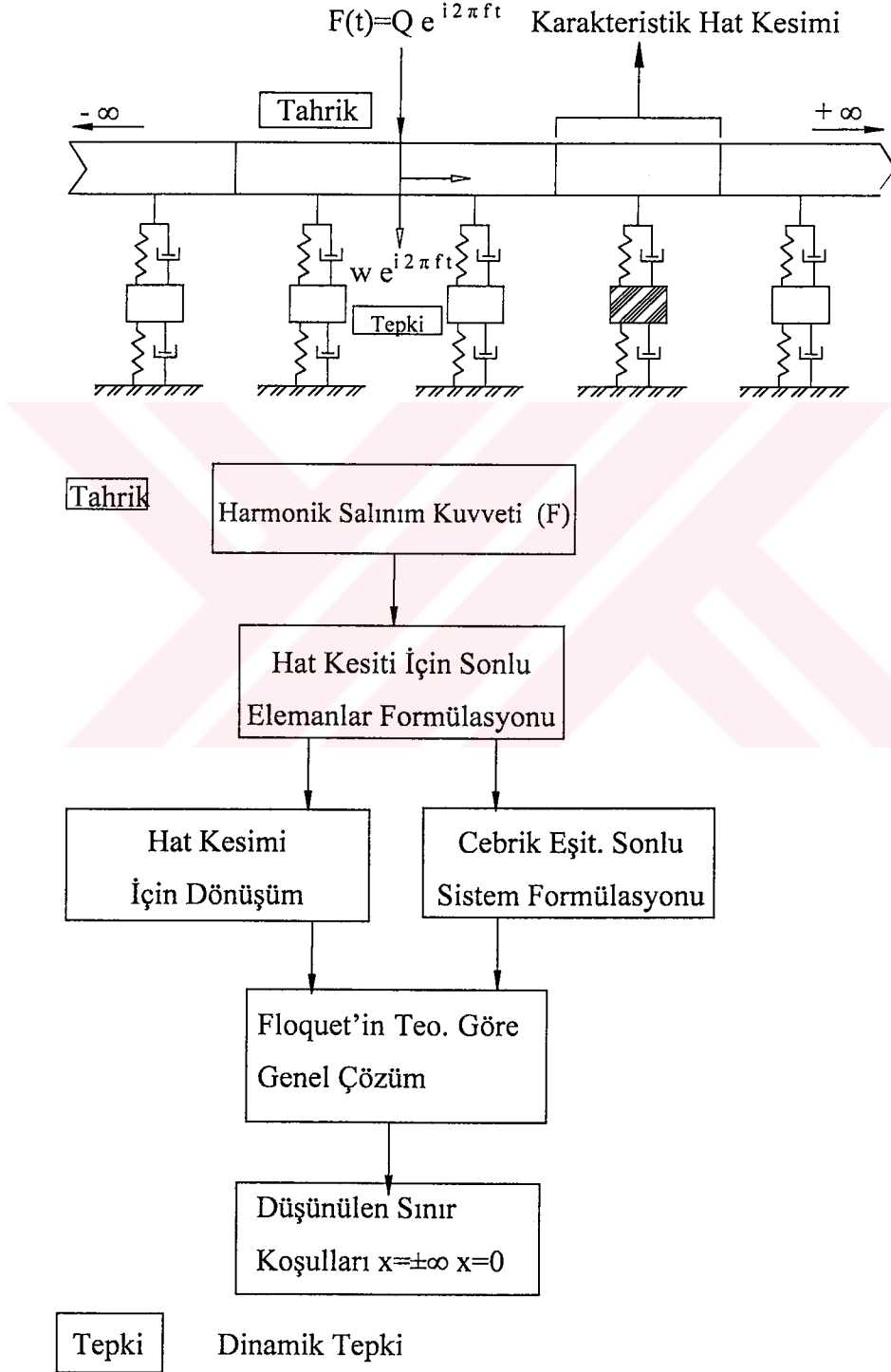
Bu teori, düşey ve yatay dinamik tepki davranışı için birkaç araştırmacı tarafından kullanılmıştır, Munjal ve Heckl, Grassie vd. , Nordborg, Nielsen ve Ripke vd. (Knothe ve Grassie, 1993).

Bu teoriyi kullanan araştırmacıların çalışmaları sonucunda, yolların yatay davranışının bütün yönleriyle anlaşılması için 500 Hz'in üstündeki frekans değerlerinde ayrık mesnetlenmiş yol modellerini kullanmanın uygun olduğu görülmüştür. Bununla beraber, ayrık mesnetli modellerde hareketli yüklerin yanal etkisinin, gerçekte düşey etkisinden daha az olduğu da ortaya çıkmıştır.

Bu model tipleri ile, dinamik tepki kuvvetlerinin hesaplanmış değerleri ile ölçülmüş değerlerini birbirine uydurarak, balast ve ray elastik mesnedinin sönüm ve rijitlik

parametrelerini bulmakta kullanılırlar. Yapılan değişik çalışmalarda görülmüştür ki, balasttaki rezonans frekansı yaklaşık 110 Hz, traversin ve rayın rezonans frekansı ray elastik mesnedi üzerinde 450-500 Hz, ve tutuna-tutuna rezonansı da 870 Hz civarındadır.

Bu gibi modeller için yapılan testlerde, yükün uygulandığı nokta ölçüm pozisyonuna mümkün olduğunca yakın yere uygulanmalıdır ve taşıt modele dahil edilmelidir.



Şekil 4.13 Yol dinamik tepki davranışının hesaplanma algoritması (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.1.3 Bir Hareket Düzensizliğinde HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı

Bir hareket düzensizliğindeki dinamik davranışın hesabında, sürekli mesnetli model tipini kullanmak, ayırık mesnetli yol model tipini kullanmaktan daha kolaydır. Aynı anda frekans tanım alanı çözüm tekniğini kullanmakta tavsiye edilir (Şekil 4.14'de bir hareket düzensizliği HNY durumu için gürültü hesabına ait tekerlek-ray gürültü oluşumunun analitik modeli görülmektedir).

Eğer düzensizlikler sinüsoidal (sinüs eğrisi şeklinde) ise, dinamik tepki Bölüm 4.4.1.1 ya da 4.4.1.2'deki açıklamalara uygun olarak bulunur. Tekerlek yassılaştırmasının ya da tekerlek ve ray pürüzsüzlüklerinin oluşturduğu ray dalgalanması gibi sinüsoidal olmayan düzensizliklerde rasgele tepkiyi hesaplamak için ilk olarak Fourier dönüşümü kullanılmalıdır.

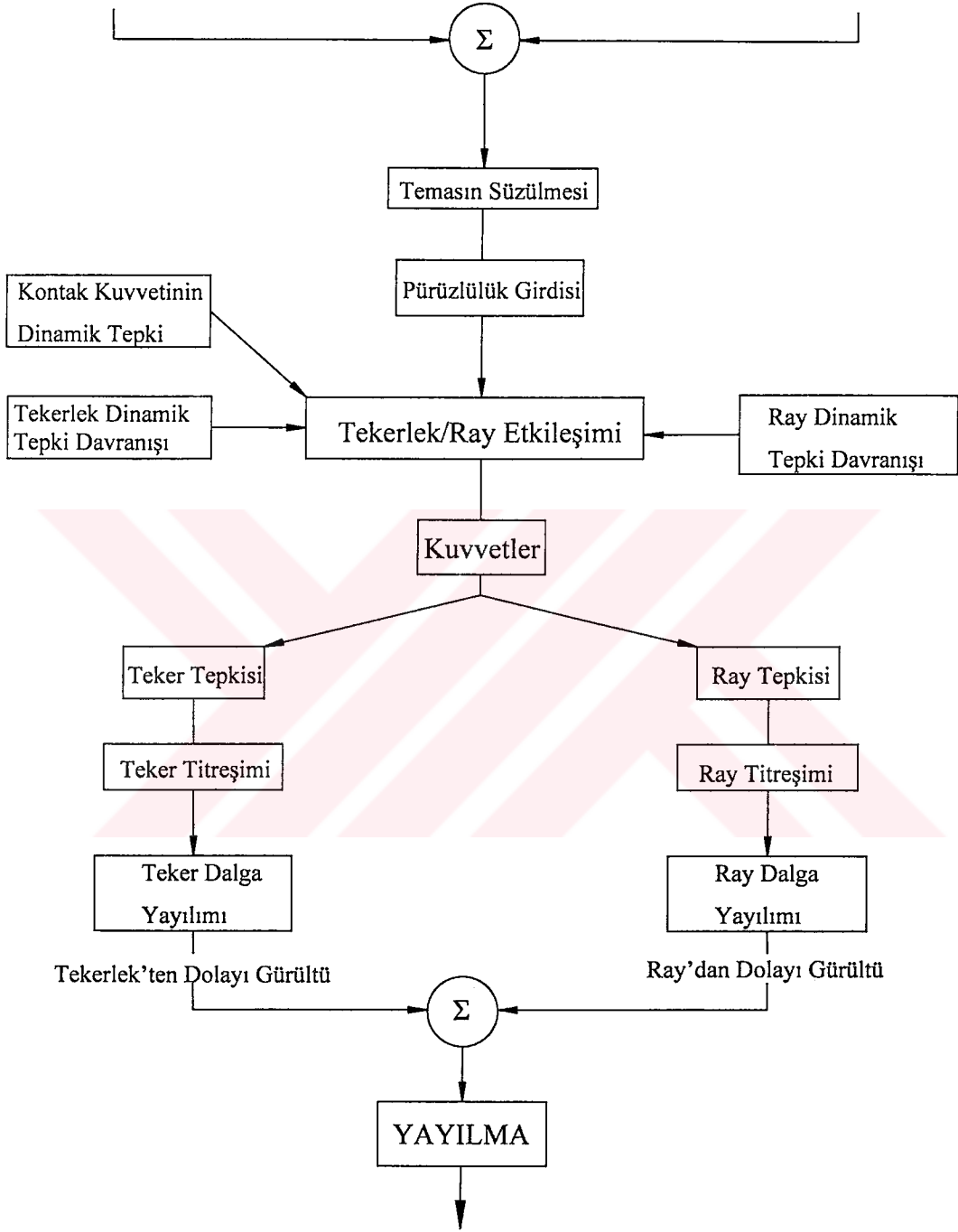
Yol tepki ve tekerlek takımı tepki kuvvetleri ile temas rijitliği, uygun bir transfer fonksiyonu (büyütme faktörü) oluşturmak için birleştirilir (Ray mantarı ve tekerlek bondajındaki birim düzensizlik başına temas kuvveti). Bu dinamik tepki davranışının Fourier dönüşümünü elde etmek için, düzensizliğin Fourier dönüşümü ile tepkilerin ve temasın Fourier dönüşümü çarpılır. Bu çarpım, zamanın bir fonksiyonu olan dinamik tepki davranışını elde etmemizi sağlar. Yolun diğer noktalarındaki dinamik yükler (Örneğin beton traversteki eğilme momenti), birim düzensizlik başına yük için uygun bir büyütmeye faktörü kullanılarak zamanın fonksiyonu olarak basit bir şekilde hesaplanabilir. Gürültünün etkinlik alanı (Yayıma), rayın ve tekerleklerin titreşim genliklerinden ve dalga yayılımının etkinliğinden hesaplanır.

Remington ve ekibi, Sato, Tassilly, ve Thompson tekerlek/ray gürültü oluşumunu araştırmak için harmonik tepkiyi kullanmışlardır. Fryba, Albeck ve ekibi, Grassie ve ekibi ve diğerleri taşıt/yol etkileşimi nedeniyle oluşan dinamik yükleri hesaplamak için benzer yöntemler kullanmışlardır (Knothe ve Grassie, 1993).

Bölüm 4.3.4'deki hareketli düzensizlik modelini (Ayırık mesnetlenmiş) kullanarak, tekerlek takımlarının traversler arasındaki konumları için taşıtın ve yolun tepkisi, basitçe hesaplanabilir. Bu yöntem ile, bir travers alanı içindeki kısa dalga boyuna sahip ondülasyonların şekli Frederick, Valdivia, Knothe ve ekibi ve Tassily ve Vincent tarafından analiz edilmiştir. Yatay ve düşey titreşimler ve temas mekaniğini içeren ondülasyon formasyonu için önerilen mekanizma, Şekil 4.15' de gösterilmiştir. Kalousek ve Johnson son zamanlarda, bu gibi ondülasyonların formasyonu için zaman tanım alanı yöntemiyle yapılan çalışmalarda kullanılabilecek alternatif bir yuvarlanma-kayma (roll-slip) mekanizmasını önermişlerdir. (Bölüm 4.4.3).

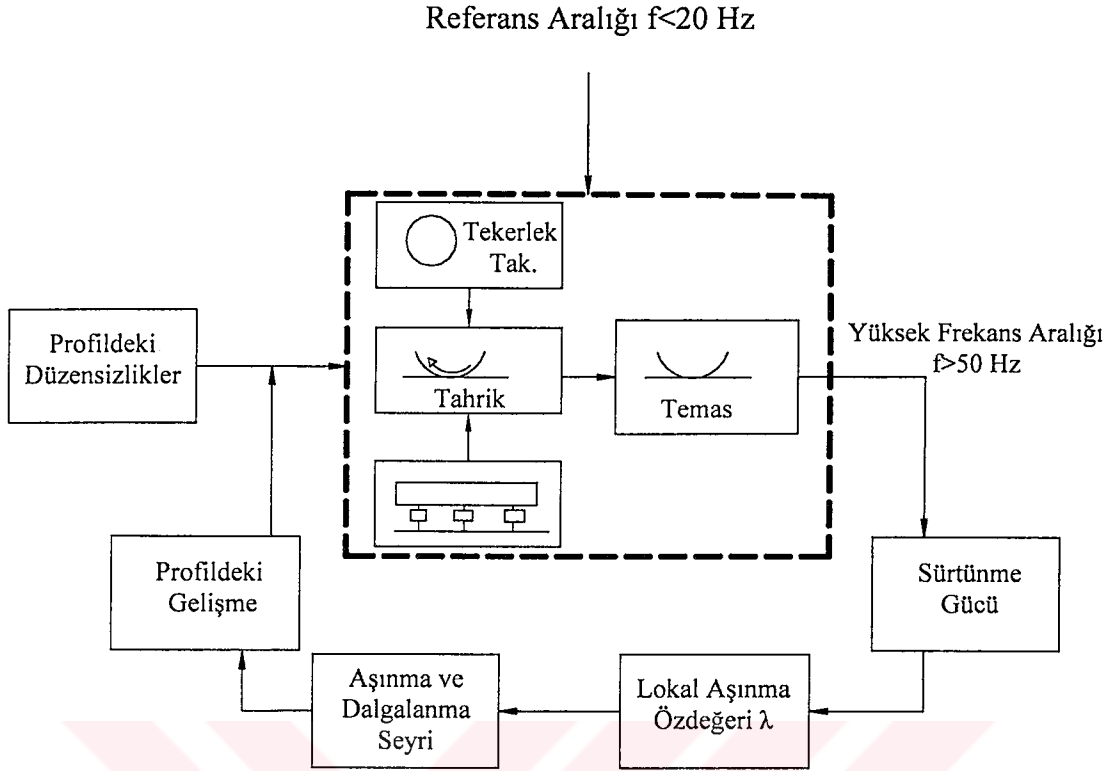
Teker Pürüzlülüğü

Ray Pürüzlülüğü



Oluşum Sahasında Ölçülmüş Gürültü Değerleri

Şekil 4.14 Tekerlek-ray gürültü oluşumunun analitik modeli (Knothe ve Grassie, 1993).



Şekil 4.15 Ray dalgalanma başlangıcının analitik modeli (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.1.4 Yarı-Mekan Üzerindeki Yol Modellerinde HNY İçin Dinamik Tepki Davranışı

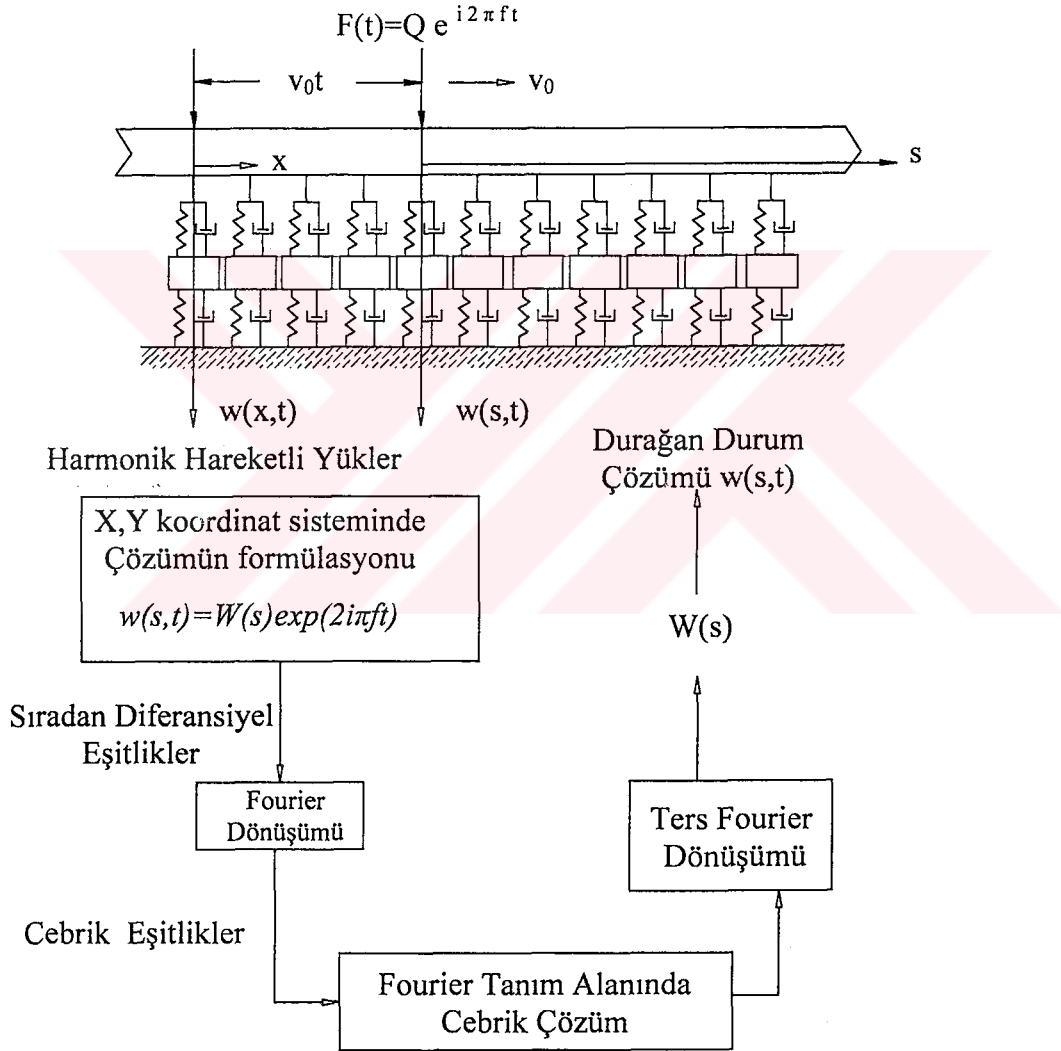
Yol ve taşıtın düşey dinamik etkileşimi konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar içerisinde, zeminin ve balastın yarı-mekan olarak tanımlandığı sadece bir çalışma bulunmaktadır. Ahlbeck D.R.'nin 1995 yılındaki bu çalışmasında ayırık mesnetli yol modelleme tekniği kullanılmıştır. Mevcut tek araştırma 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. Dinamik tepkiler de Şekil 4.10 C'deki hareketli düzensizlik modeli şekli kullanılarak hesaplanmıştır (Knothe ve Grassie, 1993).

Yarı-mekan davranışının hesap sonuçları (Bölüm 4.3.2.3) tepkiler şeklinde elde edilebilmesine rağmen, analiz frekans tanım alanı ile gerçekleştirilmiştir. Zemin kaynaklı titreşimlerin hesapları, ICE test aracı kullanılarak elde edilmiş ölçümler ile iyi bir uyum göstermektedir.

4.4.2 Hareketli Noktasal Yükler (HY) İçin Frekans Tanım Alanı Teknikleri

4.4.2.1 Sürekli Mesnetli Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı

Fourier dönüşümü veya benzer integral dönüşüm teknikleri (Laplace-Carson dönüşümü, gibi), sürekli mesnetlenmiş sistemlerin (Şekil 4.9 I) dinamik tepki davranışını bulmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Benzer bir Fourier dönüşüm çözümü için bir algoritma şematik olarak Şekil 4.16'da sunulmaktadır. Sistem harmonik olarak değişen hareketli yüklerle tahrik edilmektedir. X,Y koordinat sistemi içinde aşağıdaki biçimde durağan durum çözümünün olduğu varsayılır:



Şekil 4.16 Hareketli yük problemleri için çözüm algoritması (Knothe ve Grassie, 1993).

$$w(s,t) = Q(s) \exp(2i\pi ft) \quad (4.3)$$

w : Çökme (mm)

Q : Yük (ton)

f : Frekans (Hz)

t : Zaman (s)

Burada s ve t sırasıyla mekan ve zaman değişkenleridir. Diferansiyel eşitliklerden oluşan sisteme Fourier dönüşümü uygulanarak cebrik eşitliklerden oluşan bir sistem elde edilir. Çözüm, bu cebrik eşitliklerden bulunur. Çözüm işi kalanlar (artıklar) metodu ve sınırlandırılmış integrasyon ile en iyi şekilde yapılmaktadır.

Bu çözüm tipi, biraz farklı biçimde, “hareketli yük problemi” çözümü için bir çok bildiride kullanılmıştır. Bu alandaki ilk çalışmayı Hovey, yükü sabit ve hareketli olarak düşünerek yapmıştır. Hovey’in doktora tezi 1933’de basılmıştır ve açıkçası 30 yılı aşkın süredir kullanılmamıştır. Hovey’in tezi hareketli yükler altındaki sürekli mesnetlenmiş Bernoulli-Euler kirişi ile ilgilidir. Bu problem, 1944 ve 1948’de Dörr tarafından ve 1954’de de Kenney tarafından tekrar çözülmüştür. Mathews ise Bernoulli-Euler kirişi üzerinde hareket eden değişken yükleri araştıran ilk kişidir. Araştırılmış bir diğer problem, Timoshenko kirişi üzerinde hareket eden sabit yük ile ilgilidir. Ek bir eksenel kuvvetin etkileri ise Kerr tarafından araştırılmıştır. Torby ‘de balastın sadece sıkışma şeklinde tepki gösterdiğini hesaba katmıştır. Timoshenko kirişi üzerinde hareket eden değişken yük ile ilgili problemin çözümü Grassie vd., 1995’in içeriğinde vardır ve bu daha sonraları Bogacz ve ekibi tarafından ayrıntılı olarak çözülmüştür. Frybra’nın 1970 yılında basılan kitabında da hareketli yük problemiyle ilgili yapılan çalışmaların tümü için mükemmel bir araştırma sunulmaktadır. Literatürdeki bu konuyla ilgili araştırmaların bir çoğunun içinde hareketli yük problemlerinin tekerlek/ray etkileşiminin pratik durumuyla ilişkisi pek fazla incelenmemiştir (Knothe ve Grassie, 1993).

Sürekli mesnetlenmiş şekilde oluşturulmuş yol modelleri aynı zamanda yol stabilitesi problemleri çalışmalarında da kullanılmıştır. Fryba’nın kitabında ve Bogacz’ın bazı yayınlarında, “stabilite” sözcüğü, durağan durum çözümündeki genliğin artan hızla birlikte artarak, belirli bir kritik hızda rezonans durumu gibi sonsuz bir değere ulaştığı bir durumu göstermek için kullanılmıştır (Knothe ve Grassie, 1993).

Elastik zemine oturan Bernoulli-Euler kirişinin kritik hız denklemi;

$$V_{krit} = 2(k_m^1 / 4EI)^{0,25} (EI/m)^{0,5} \quad (4.4)$$

V_{krit} : Kritik Hız (m/s)

k_m^1 : Birim uzunluktaki mesnet rijitliği ($N.m^{-2}$)

Burada EI rayın eğilme rijitliği, k_m ' (N.m⁻²) birim uzunluktaki mesnet rijitliği ve m birim uzunluktaki toplam yol kütesidir (ray ve traversleri içermek üzere). Timoshenko göstermiştir ki, raylarda artan basınç yükleri ile kritik hız azalmaktadır. Daha yakın bir zamanda ise bu konu Labra tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada Labra yarı-mekan üzerindeki bir giriş için kritik hızın, artan dingil basınç yükleri ile azaldığını göstermiştir.

Brommundt sürekli mesnetlenmiş bir ray üzerinde yuvarlanan esnek bir tekerlek takımının yanal titreşimini araştırmıştır. Brommundt gerçekçi bazı parametre kombinasyonları için, tekerlek takımının tahrik edilmesinden oluşan yanal titreşimlerinin özel bir kritik hızda oluşabileceğini bulmuştur (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.2.2 Ayrık Mesnetlenmiş Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı

Ayrık mesnetlenmiş bir yol kesimi üzerinde hareket eden yüklerin etkilerinin statik ve dinamik analizini yapan ilk araştırmacı Inglis'dir. Inglis, bir tekerleğin traversler arasında ray açıklığı boyunca hareketi esnasında, rayın şekil değiştirmesindeki değişimin, balastın esnekliğinin artmasıyla azaldığı sonucuna varmıştır.

Hareketli yük problemlerinde, Bölüm 4.4.1.2'de açıklandığı gibi tutuna-tutuna (Pinned-Pinned, 750 Hz civarında oluşan) rezonansının etkilerinin de çözümün içine katılabilmesi için, ayrık mesnetlenmiş raylar ile oluşturulmuş yol modellerini kullanmak daha doğrudur. Literatürde, frekans tanım alanında, periyodik yapıdaki yüklerin hesaplanması için iki genel teknik bulunmaktadır. Bunlardan biri dalga yayılım tipine bağlı çözüm olup, bunda Floquent'in teoreminden yararlanılmıştır (Bölüm 4.4.1.2). Mead'in yayınları bu konuda görünen ilk çalışmalardır, bunu Smith ve Wormley ve daha sonra da Bogacz ve ekibinin çalışmaları izler. Mead, Bogacz ve ekibinin çalışmaları ise bu konuya teorik olarak bir giriş yaparken, Smith ve Wormley'in çalışmaları periyodik olarak mesnetlenmiş yollara uygulanmıştır (Knothe ve Grassie,1993).

Yol problemleri için daha umut verici olarak görünen ikinci bir yaklaşım ilk olarak Jequel tarafından önerilmiş ve sonra Kisilowski, İlias ve Sibaei tarafından kullanılmıştır. Bu yaklaşım Şekil 4.16'daki çözüm tekniğinin bir miktar değişimi sonucu oluşmuştur. Rayın diferansiyel eşitliği, yüklerle birlikte hareket eden bir x,y koordinat sistemi içinde formüle edilmiştir. Ray elastik mesnedi boyunca ray üzerine etkiyen bu reaksiyon kuvvetleri Fourier serilerine ve böylece sürekli yayılı kuvvetlere dönüştürülmüştür (üniform olmayan). Davranış, örneğin "P" genliğiyle harmonik olarak değişen ve "V" sabit hızıyla hareket eden bir kuvvet için ray deplasmanı eşitlik 4.5 ile ifade edilmiştir.

$$w(s, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Q_k(s) \exp(2i\pi k_l^1 (s + Vt) / A) \exp(2i\pi f t) \quad (4.5)$$

w : Çökme (mm)

Q : Yük (ton)

f : Frekans (Hz)

t : Zaman (s)

A : Travers aralığı (cm)

V : Hız (m/sn)

k_l^1 : Birim uzunluktaki yol rijitliği (N.m⁻²)

Bu eşitliğin ilk kısmı, mekan değişkeni s 'nin bir fonksiyonu olan genliktir. İkinci ve üçüncü kısımları tahrik frekansı f ve travers aralığı A için bu davranışın periyodikliğini yansıtır.

Rijit bir gövde olarak kabul edilen hareketli tekerlek takımına, ayrıık mesnetlenmiş yolun göstereceği dinamik tepki davranışının hesabında bir üçüncü metodu ise Grassie ve ekibi kullanmışlardır (Grassie vd., 1982). Burada bir hareketli düzensizliğin genliği, yükün, traversler arasındaki pozisyonuna göre simetrik olarak değişir. Yükün traversler arasındaki pozisyonu ile değişen geçici bir bileşenin, hareketin genliğini oluşturduğu varsayılmıştır. Grassie vd., 1995'de bu metot hakkında daha geniş bilgi bulunabilir.

Geçtiğimiz 50-60 yıldan daha fazla süredir, hareketli yük problemi daha da önem kazanmıştır. Bununla beraber, yol üzerindeki demiryolu taşıtının dinamik davranışına dair pratik öneme sahip etkiler konusunda oldukça az bilgi bulunmaktadır. Mevcut örnekler kısa dalgalı ondülasyon problemi ile ilgilidir. Grassie ve ekibi, travers aralığındaki ondülasyon genliğinin periyodikliğinin, hareketli tekerlek takımının pinned-pinned rezonansının tahriki ile arttığını göstermiştir (Grassie vd., 1982). Sibaei ise, raylardaki ondülasyonun oluşum şekillerini karşılaştırmak açısından, hareketli düzensizlikler ve hareketli kütle modellerini kullanmıştır.

4.4.2.3 Düzensiz Mesnetlenmiş Yollarda HY İçin Dinamik Tepki Davranışı

Şekil 4.10'daki hareketli kütle ve Şekil 4.9'da gösterilen sürekli ve ayrıık mesnetli yol modellerinde yol yapısının düzgün olduğu varsayılmıştır ancak pratikte durum böyle değildir. Travers altı boşlukları, gevşek bağlantı elemanları ya da çıkmış bağlantı elemanları gibi çok sayıda düzensizlik örneğine rastlanır. Grassie ve Cox mesnetlemesi düzensiz veya zayıf traversleri olan bir yoldaki problemleri incelemişleridir. Burada roort-locus diye adlandırılan bir dinamik tepki davranışı hesap tekniği kullanmışlardır. Root-locus tekniğini

kullanmalarının amacı, zayıf mesnetlenmiş kesimde hareket eden yaylandırılmamış kütlelerin kısa süreli tepkisini hesaplamaktır (Grassie vd., 1982). Bölüm 4.4.3'de açıklanacağı gibi bir FE yol modeli varsa, bu model yol mesnetlenmesindeki düzensizliklerin etkilerini incelemek için zaman-tanım tekniği ile oldukça kolay biçimde kullanılabilir.

4.4.2.4 Frekans Tanım Alan Çözümlerinin Cevaplanamayan Problemleri

Frekans tanım alanı (frekansa bağlı) teknikleri ile ilgili sadece kısmi olarak yanıtlanmış 3 soru bulunmaktadır:

1. Her zaman bir durağan durum çözümünün bulunduğu varsayılmıştır. Bu gerçekten doğrudur ve en azından bu tip modellerde tekerlek takımının yanal (hunting) hareketi için bir kritik hız limiti var mıdır?
2. Frekans tanım alanı metotlarını kullanarak yapılan bütün hesaplamalar modelin doğrusal olduğunu varsayar. Bununla beraber, sistem içinde birkaç doğrusal olmayan durumlar da vardır. Bunların en önemlisi büyük olasılıkla tekerlek-ray arasındaki yüksüz (kuvvet aktarımı olmayan) temastır (örneğin tekerleğin havalanması). Temas rijitliğinin kendisi doğrusal değildir ve periyodik yuvarlanma ve kayma gibi diğer olaylar da doğuştan doğrusal değildirler. Bu doğrusal olmayan durumlar modellere kolayca katılabilirler mi?
3. Pratikte demiryolu yapısında bir çok düzensizlik vardır, örneğin kötü mesnetlenmiş traversler, bulunmayan ya da bozuk ray elastik mesnetleri ve bağlantı elemanları, üniform olmayan travers aralıkları ve bunun gibi. Bu gibi yapısal düzensizliklerin etkilerinin incelenmesine başlanmış olunmasına rağmen, (Bölüm 4.4.2.3'ün içinde tartışıldığı gibi), daha yapılacak çok iş vardır. En azından, yapıdaki düzensizliklerin sonuçlarından biri, muhtemelen tutuna-tutuna rezonansı Frekans tanım alanı yöntemiyle tam olarak hesaplanabilecek midir (Bölüm 4.4.2.1 ve 4.4.2.2) ?

4.4.3 Zaman Tanım Alanı Tekniği

Ray ve tekerlek arasındaki dinamik yükler, zamana ve frekansa bağlı olarak yapılan yaklaşımların her ikisini de kullanarak hesaplanmıştır. Zaman tanım alanındaki temel teknikler, yarı analitik teknikler (Modal Analysis, Modal Analiz) ve nümerik tekniklerdir (Time History, Zaman Adımlı). Bazen de her iki tekniğin kombinasyonundan tek bir teknik de olabilmektedir (Modal Time History). Bölüm 4.4.3.2'de teknikler bütünüyle nümerik olarak hesaba katılırken, Bölüm 4.4.3.1'de, modal analiz tekniğinin esas temeli olarak, yarı analitik teknikler ele alınmıştır.

4.4.3.1 Yarı-Analitik Teknikler

Bu çözüm tekniğinin en uç noktasındaki çalışma Cai ve ekibinin çalışmasıdır. Cai rijit tekerlekler üzerinde sonsuz bir Bernoulli-Euler kirişinin kesin doğrulukta bir modal analizini (Modal Analysis) yapmıştır. Bu tekniğin en kötü yanı, kirişlerin ve mesnetlerin daha karışık modellerinin genellenmesindeki zorluktur. Bunun yanında bu tekniğin en çekici yanı, demiryolu için yapısal düzensizlikler ile yolu münferit olarak ele almaya izin verir olmasıdır.

Büyük bir çalışma alanı olan zaman tanım alanı çözümlerinin kullanıldığı tekerlek/yol etkileşimi çalışmaları, düzenli dalgalı raylar üzerinde yuvarlanan tekerlekler için ve elastik zemine oturmuş kiriş üzerinde tekerlek-yassılığı ile yuvarlanan tekerlekler için İngiliz Ray araştırma enstitüsünden Newton ve ekibi ile Clark tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaya daha sonra Tunna tarafından devam edilmiştir. Taşıt ve yol sisteminin modal analizi son olarak, İngiliz demiryolları tarafından, balast ve ray elastik mesnediyle beraber, rijit traverslerde ayırık mesnetlenmiş rayın altında, 20 açıklık ile sunulmuş bir araştırma içinde yapılmıştır. Bu çalışmada dinamik tepki davranışı zaman tanım alanı tekniği ile bulunmuştur ve doğrusal olmayan bir temas rijitliği kullanılmıştır diyebiliriz. Sönümlenme, her mod için sabit bir sönümlenme faktörü varsaymak sureti ile modele dahil edilmiştir. Yollarda yapılmış okumaların ve hesapların korelasyonu ile olan uyumu sebebiyle İngiliz demiryollarının yaptığı çalışmalar bu konuda ayrı bir yere sahiptir.

Modal analiz tekniği aynı zamanda tekerlek-ray uğuldama sesi hakkındaki çalışmalar için Fingberg tarafından da kullanılmıştır. Fingberg dinamik tepki davranışını Ripke'nin yol modelinden bulduğu şekli ile kabul etmiş ve bu sayede analizine uygun bir modal serbestlik derecesi sayısı yerleştirmiştir.

Bu yöntemde yol, doğrusal olmayan temas koşullarıyla birlikte, zamana bağlı bir fonksiyon olarak (Zaman tanım alanı) çözülebilecek bir diferansiyel eşitlikler takımı tarafından sunulur. Fingberg bu çalışması sayesinde düşey ve yatay dinamik davranışın her ikisiyle de ilgilenmiştir.

Aynı zamanda Ahlbeck ve ekibi de dinamik yüklerin hesabı için gerçekçi bir zaman tanım alanı yaklaşımını kullanmışlardır. Ahlbeck ve ekibi yüksek ve düşük frekans problemlerinde oluşan dinamik davranışı incelemiştir. Bu çalışmaları yapmak için, bir yol kesimi için hesaplanmış ve bunların yerinde okunmuş verilerinin korelasyonu ile yol parametrelerini belirlenmiştir. Bu sayede de, parametreleri belirlenmiş bu yolun basitleştirilmiş kütle-yay-sönümleyici modelini kullanmaya yönelmişlerdir.

Yarı analitik bir modelin en önemli dezavantajı yapısal düzensizlikler hakkında çalışma

yapmanın oldukça zor olmasıdır, örneğin balast ve travers arasındaki bağlantı noktaları ve travers açıklığı üzerindeki değişim miktarı gibi (Knothe ve Grassie, 1993).

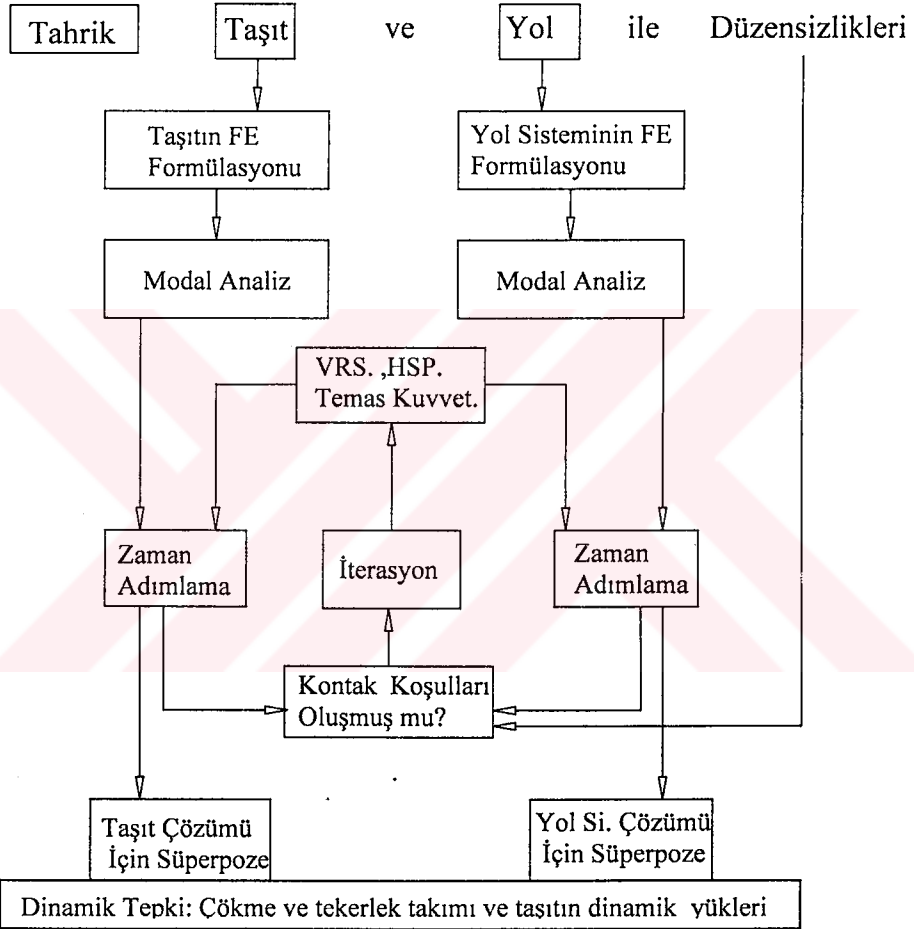
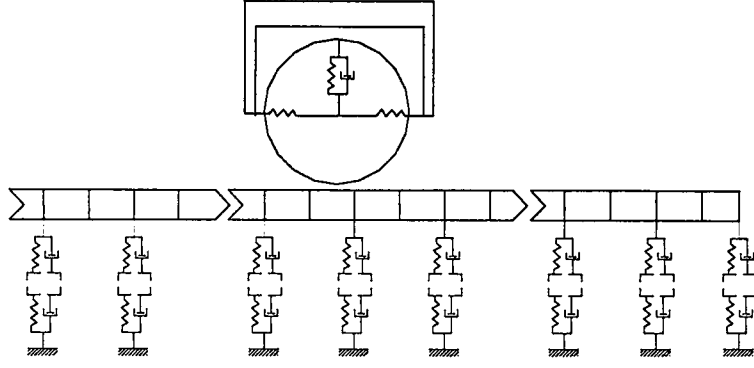
4.4.3.2 Nümerik Çözümleme Tekniği

Yol yapısı modelleri için sonlu elemanlar prosedürleri ile bağlantılı nümerik algoritmalar ve zaman adımlı (Time History) çözümü, dinamik tepki davranışının hesabında yaygın olarak kullanılmışlardır. Modal analiz ise bazen bu çözüm tekniklerinin bir parçası olarak kullanılmıştır. Bu tip bir metot sadece tekerlek/ray etkileşimi problemlerinde kullanılabilirdiği gibi aynı zamanda, yol yapısı ile taşıtın etkileşimi problemlerini içeren diğer demiryolu problemlerinde de kullanılmışlardır. Örneğin trenin köprü, viyadük üzerindeki hareketi esnasında oluşan etkileşimler söylenebilir (Diana ve ekibi). Aynı zamanda, ayrık mesnetlenmiş yolların dinamik davranışı için İngiliz demiryollarının çalışması taşıt ve yolun etkileşimi üzerine yapılmış çok iyi bir çalışma olarak ortaya çıkmıştır. İngiliz demiryollarının son yaptıkları çalışmalarda ise sürekli mesnetlenmiş yol modelleri ile zaman adımlama tekniğini kullanmışlardır.

Şekil 4.17'de zaman tanım alanı tekniğinin kullanımı için örnek bir çözüm algoritması gösterilmektedir. Bu tip bir algoritma Link ve Novak, Diana ve ekibi ile Ripke tarafından kullanılmıştır. Taşıtın ve yolun hareketinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak hesaplandığı benzer bir algoritma da, Clark, Newton ve ekibi, Nielsen ve ekibi, Olsson, Schwab ve ekibi ve Zhai tarafından kullanılmıştır (Şekil 4.17'de HSP:Hesaplanan, VRS:Varsayılan).

Yolun hesap uzunluğu, özellikle hareketli yüklerde, sınır koşulları ile doğrudan bağlantılıdır. Bu tip modeller için 15 travers açıklığı tavsiye edilen bir uzunluktur ve bu da tercihen 20 m. olmalıdır. Her bir zaman adımı için temas kuvveti ileri bir düzeyde bilinmemektedir, bu yüzden çözümü bulmak için bir iterasyon prosedürüne gereksinim duyulur.

Zaman tanım alanı tekniği nerdeyse demiryolunun tüm problemlerinde dinamik davranışı bulmak için kullanılmıştır. Örneğin taşıtın ray bağlantı noktası üzerindeyken ki yolun dinamik davranışı, aplatı tekerlek üstünde ve ayrıca dalgalanmış bir ray ve tekerlek üzerindeki pürüzlülükler gibi diğer düzensizlikler üzerindeki taşıtın ve yolun dinamik davranışı ve son olarak ta taşıtın rast gele seçilmiş bir ray profili üzerinden geçerken ki taşıtın ve yolun dinamik davranışı çalışmalarında kullanılmıştır. Yalnız, bu tarihe kadar gözüken şudur ki, zaman tanım alanı tekniğinin kullanıldığı, traverslerdeki dinamik yükler ve bu dinamik yükler altında balastın çökmesi konusunda sadece düşey dinamik davranış düşünülmüştür (Knothe ve Grassie, 1993).



Şekil 4.17 Zaman tanım alanı çözümü için örnek bir algoritma (Knothe ve Grassie, 1993).

4.4.4 Çözüm Teknikleri İle İlgili Araştırma Çalışmalarının Özetlenmesi

Farklı çözüm tekniklerinin uygulamaları Bölüm 4.4.1 ve 4.4.3’de açıklanmıştır. Bu konudaki çalışmaların tarihsel gelişimi, özet olarak kronolojik bir düzende ve referanslarıyla beraber çizelgeleme yoluyla gösterilebilir. Bu işlem, frekans tanım alanı (Bölüm 4.4.1 ve 4.4.2) çözümleri için Çizelge 4.5’de yapılmıştır, ve zaman tanım alanı (Bölüm 4.4.3) çözümleri için de Çizelge 4.6’de yapılmıştır. Bu çizelgelerde açıkça iki şey anlaşılmaktadır.

- 20 yıl öncesine kadar bu konu bütünüyle teorik bir durumdaydı. Yüksek frekanslarda tatminkar tekerlek/ray etkileşim modellerine duyulan ihtiyaç, dinamik yüklerde gürültünün, ondülasyon formasyonunun ve diğer tip taşıt ve yol hasarlarının artmasına paralel olarak gelişmiştir.
- Bu konuda frekans tanım alanı çözümlerinin uzun bir geçmişi bulunurken, zaman tanım alanı çözümleri sadece son 20 yıldır yaygınlaşmıştır. Bunun nedeni yeterli deneylerin ve ölçümlerin yapılabilirliğinin son 20 yılda gelişmesidir. Ayrıca bazı frekans aralıklarında çözümü tutarlı sonuçlar vermeyen frekans tanım alanı çözümlerinin analizine duyulan ihtiyaç ile, sadece son zamanlarda kullanımı gelişmiştir.

Çizelge 4.5 Frekans tanım alanı çözümleri ile ilgili araştırma çalışmaları (Knothe ve Grassie, 1993).

FREKANS TANIM ALANI ÇÖZÜMLERİ		
Yolun dinamik davranışının genel olarak hesabı.	Yol problemlerinde dinamik davranışının hesabı.	Hareketli yük problemlerinin yolun dinamik davranışında incelenmesi.
<p>Sürekli Mesnetlenmiş Raylar diğerleri arasında: Timoshenko, 1926 Heteny, 1946 Sato, 1977 Grassie, 1980 Tassily, 1988</p>	<p>Dinamik Yüklerin Hesabı Fryba 1960 - Ahlbeck, 1969 - Grassie, 1982</p> <p>Yuvarlanma Sesi Remington ve ekibi, 1974 - Sato, 1977 - Tassily, 1989 - Thompson, 1989</p>	<p>Sürekli Mesnetlenmiş Raylar Hovey, 1933 - Dörr, 1943 - Kenney 1954 - Mathews, 1959 - Achenbach, 1965 - Kerr, 1972 - Frybra, 1972 - Torby, 1975 - Bogacz ve ekibi, 1983</p>
<p>Ayrık mesnetlenmiş Raylar (Teori). Inglis, 1938 Munjai ve Heckl, 1982 Grassie ve ekibi, 1982 Nielsen, 1990 Ripke, 1991 Nordborg, 1992</p>	<p>Ray Dalgalanması (Ondülasyon) Mair, 1977 - Grassie ve ekibi, 1982, 1989 - Frederick, 1986 - Valdiva, 1987 - Knothe ve ekibi, 1990 - Tassily, 1991</p> <p>Zemin Kaynaklı Titreşimler Auersch, 1990</p>	<p>Ayrık mesnetlenmiş Raylar (Teori). Mead, 1970 - Smith Wormley, 1975 - Krzyzynski ve ekibi, 1989 - Jezequel, 1981 - Kisilowski ve ekibi, 1988 - Sibaei, 1992 - Ilias, 1992</p>
<p>Yarı-Mekan Teorisi Rücker ve ekb., 1982</p>		<p>Stabilite Problemleri (teorik) Frybra, 1972 - Bogacz ve ekibi, 1981 - Brommundt, 1991</p>
<p>Teorinin Kabulü Grassie, 1980 Ripke, 1992 Rücker ve erk., 1982</p>		<p>Uygulamalar Smith Wormley, 1975 - Grassie ve ekibi, 1982, 1984 - Sibaei 1992</p>

Çizelge 4.6 Zaman tanım alanı ile ilgili araştırma çalışmaları (Knothe ve Grassie, 1993).

ZAMAN TANIM ALANI ÇÖZÜMLERİ	
Yarı Analitik Çözümler	Nümerik Çözümler
Sonsuz Periyodik Yapıların Modal Analizleri Cai,Cheung, Cahn ,1988 -	Pantograf/Katenar Link, 1986
Temel Zaman Tanım Alanı Çözümleri-Dinamik tepki davranışı Fingberg, 1990	Köprü Üzerinde Taşıt Diana, 1988 Fryba, 1992
	Yol Yapısı (Uygulamaları İçeren) Jenkins ve ekb., 1974 - Clark, Newton ve ekibi, 1979 - Olsson, 1985 - Schwab ve ekibi 1989 - Nielsen ve ekibi , 1991 - Zhai, 1992 - Ripke, 1993

4.5 Seçilen Standart Yol Modellerinin Modellenmesi ve Çözümlemesi

4.5.1 Genel Hususlar

Buraya kadar, demiryolu sisteminin için sunulan tüm modeller ve bunların çözüm teknikleri literatürde kullanıldığı yerler ile açıklandı.Tanımlanan etkileşim olayının türü, modeli ve çözüm tekniğini geniş ölçüde etkilemektedir.

Şekil 4.9’da yol sistemi modelleri hiyerarşik olarak gösterilmişti. Burada, gösterilen bu modellerde AI ve CI modeli seçilmiştir. Seçtiğimiz bu AI ve CI modelleri frekans tanım alanı içerisinde fourier dönüşümü yaparak çözümlenecektir (Çizelge 4.4).

Kullanılan bu AI modeli genelde rijit üstyapı tipi için kullanılmakta iken, CI modeli genelde balastlı üst yapı tiplerinde kullanılmaktadır (Çizelge 4.2).

4.5.2 Yol Yüğü ve Yol Deplasmanı Arasındaki Dinamik Büyütme Faktörü

Demiryolu inşaatı, rayların, sabit aralıklı traverslerin ve ray elastomer mesnetlerinin oluşturduğu bir sistem olarak görülebilir. Traversler, elastik bir temel oluşturan balast tarafından mesnetlenmektedir.

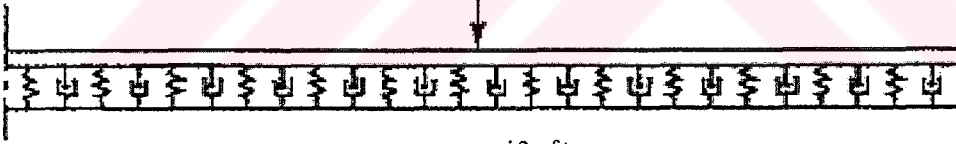
Şekil 4.18’le ilgili iki model (AI, CI), yol yapısını açıklayabilecek şekilde yukarıda bulunmaktadır. Bu modelde kullanılan parametre değerleri Çizelge 4.7’de görülmektedir.

Çizelge 4.7 Esveld'in AI ve CI modellerinde kullandığı parametreler (R54) (Esveld, 1997).

EI	N.m ²	4.5 10 ⁶	Ray yatay rijitliği	
M_w	kg/m	350	Yaylandırılmamış tekerlek kütlesi	
K_H	N/m	1.4 10 ⁹	Hertz temas yay rijitliği	
m	kg/m	119	Birim uzunluktaki toplam yol kütlesi	(Tek kiriş)
m_1	kg/m	54.43	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.	(Çift kiriş)
m_2	kg/m	157	Travers birim kütlesi	(Çift kiriş)
k^l	N.m ⁻²	4 10 ⁷	Birim uzunluktaki yol rijitliği.	(Tek kiriş)
k_1^l	N.m ⁻²	2.5 10 ⁸	Birim uzunluktaki ray elastik mesnedi rijitliği	(Çift kiriş)
k_2^l	N.m ⁻²	4 10 ⁷	Birim uzunluktaki zemin ve balast rijitliği.	(Çift kiriş)
c^l	Ns.m ⁻²	1.2 10 ⁵	Birim uzunluktaki yol sönümleme oranı.	(Tek kiriş)
c_1^l	Ns.m ⁻²	9 10 ⁴	Birim uzunluktaki ray elst. mes. sönüm. oranı	(Çift kiriş)
c_2^l	Ns.m ⁻²	1.2 10 ⁵	Birim uzunluktaki zemin ve balast sönüm. oranı	(Çift kiriş)

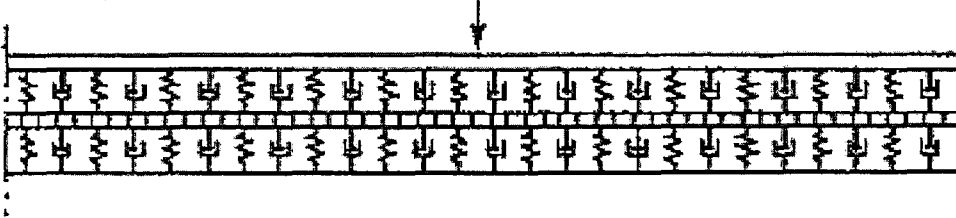
a) TEK KİRİŞ MODELİ (AI)

$$F(t) = Q e^{i2\pi ft}$$



b) ÇİFT KİRİŞ MODELİ (CI)

$$F(t) = Q e^{i2\pi ft}$$



Şekil 4.18 Yolun özelliklerinin dinamik olarak farklı tanımlandığı modellerden seçilen AI ve CI modeli (R54) (Esveld, 1997).

4.5.3 Tek Kiriş Modeli (AI)

Sürekli elastik temele oturan kiriş ile ilgili en basit model Şekil 4.18 a'da gösterilmektedir (Şekil 4.9 AI modeli). Kiriş, bir Bernoulli-Euler kirişi gibi modellenmiştir, böylece dönme rijitliği ve kesme kuvveti deformasyonları dikkate alınmamaktadır. Bu analitik modelin

çözümü frekans tanım alanı çözüm tekniği kullanılarak yapılacaktır.

Yoğun yükler için $x=0$ 'da kuvvetin büyüklüğü:

$$F(t) = Q.e^{i2\pi ft} \quad (4.8)$$

Q : Yük (ton).

olur,

Bunu izleyen adımda aşağıdaki diferansiyel denklem kullanılır:

$$EI\ddot{w}(x,t) + m\ddot{w}(x,t) + c^1\dot{w}(x,t) + k^1w(x,t) = 0 \quad (4.9)$$

w : Çökme (mm).

Burada öncelikle uzaysal türevler ve noktasal zaman türevleri belirlenmektedir. Sınır koşulları şunlardır:

$$EI\ddot{w}(0,t) = 0.5Qe^{i2\pi ft} \quad (4.10)$$

$$\dot{w}(0,t) = 0 \quad (4.11)$$

$$w(\infty,t) = 0 \quad (4.12)$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü için aşağıdaki eşitlik kabulü yapılırsa,

$$w(x,t) = w(x)e^{i2\pi ft} \quad (4.13)$$

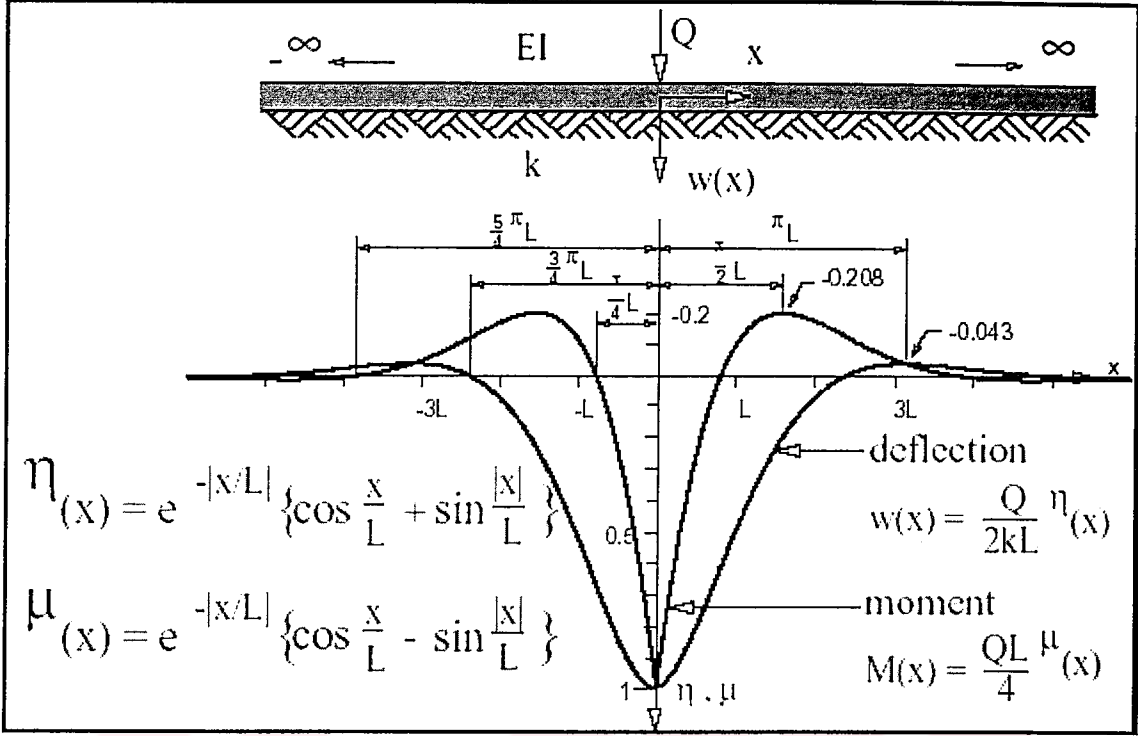
(4.9) tekrar yazılabilir,

$$EI\ddot{w}(x) + [k^1 - 4\pi^2 f^2 m + i2\pi fc^1]w(x) = 0 \quad (4.14)$$

Bu diferansiyel denklem, Şekil 4.19'da gösterilen statik yüklenmiş ve elastik mesnetlenmiş kirişin, denklemine çok benzerdir buradan yola çıkarsak, $x=0$ için, $w(0)$ çökme 4.15'deki şekli alır.

$$w(0) = \frac{Q}{2k^1L} \quad (4.15)$$

Böylece dinamik büyütme faktörünün (B_{dn}) bulumun da kullanılacak statik çökme x_{st} 4.16'daki eşitlikle bulunur. B_{dn} 'nin elde edilmesinde, yapılacak oranlamadan dolayı Q (ton) yükü sadeleşeceğinden 1 (ton) olarak düşünülür (Statik ve dinamik çökmenin her ikisinde de.)



Şekil 4.19 Elastik temele oturmuş kiriş (Esveld,1997).

$$x_{st}(f) = \left(\frac{1}{2k^1 L} \right) 10^9 = \left(\frac{L^3}{8EI} \right) 10 \quad (4.16)$$

L : Karakteristik uzunluk (cm).

EI : Rayın yatay rijitliği (N.m²).

k^1 : Birim uzunluktaki yol rijitliği (N.m⁻²).

4.16 eşitliği içinde kullanılan parametrelerin birimleri yukarıda verildiği şekilde kullanıldığı takdirde, statik çökme (x_{st}) sonuçta (mm) cinsinden elde edilebilmesi için 4.16 eşitliğinde 10^9 ve 10 çarpanları kullanılmaktadır.

Burada, AI modelinin çözümünde kullanılan ve CI modelinin çözümünde de kullanılacak olan, yolun karakteristik uzunluğu L 'yi (cm) açıklamak gerekir. L (cm) ZIMMERMANN tarafından geliştirilen ve taban karakteristiklerinin sabit olduğu varsayımıyla, demiryolu çerçevesini, elastik zemine sürekli oturan kirişe dönüştürerek, WINKLER hipotezi yardımıyla çözüm yapan hesap yönteminden alınarak, aşağıdaki analitik eşitlikler ile elde edilir.

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{BC}} = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k^1}} \quad (4.17)$$

$$k^1 = (B \cdot C) \cdot 10^7 \text{ (N.m}^{-2}\text{)} \quad (4.18)$$

C : Elastik tabanın yatak katsayısı. (N/mm³).

k^1 : Birim uzunluktaki yol rijitliği (N.m⁻²).

B : Sanal kirişin genişliği (cm) (Eşitlik 4.19)

AI modelinde dinamik çökmenin hesabında, L 'nin bulunuşu için, k^1 temel rijitlik katsayısı yerine, kompleks katsayı k^* kullanılmalıdır. Kompleks katsayı k^* 'ın bulunuşu ileride anlatılacaktır.

B (cm) ise yine ZIMMERMANN'nın teorisine göre;

$$B = \frac{2u \cdot b_t}{A} \quad (4.19)$$

A : Travers aralığı (cm),

b_t : Travers taban genişliğidir (cm),

eşitliğinden elde edilir.

$2u$ (cm) ise;

$$2u = \frac{l_t - m_t}{2} \quad (4.20)$$

l_t : Travers taban uzunluğu (cm),

m_t : Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu (cm),

ZIMMERMANN'nın (4.20) eşitliğinden bulunur.

Birim uzunluktaki yol rijitliği k^1 'in (N.m⁻²) bulunuşu ve temsil ettiği yol bileşeni, kullanılan model tipine ve modelde düşünölen üstyapıya göre değışir ve aslında her durumda 4.18 eşitliği ile bulunmaz. Bunun nedeni, AI modelinde eğer üstyapı tipi rijit üstyapı olarak düşünölürse, k^1 yol rijitliği yatak katsayısından bağımsız bir hal alır ve ray elastomer mesnedinin birim uzunluktaki rijitliği (k_1^1 (N.m⁻²)) olarak sunulur. Bunun yanında, AI modelinde üstyapı, balastlı üstyapı olarak düşünölürse k^1 birim uzunluktaki yol rijitliği 4.18 eşitliğinden elde edilir ve zemin ve balastın birim uzunluktaki rijitliği (k_2^1 (N.m⁻²)) olarak, kabul edilir.

Eğer CI modeliyle balastlı bir üstyapı tipinde çözüm yapılacaksa, Çizelge 4.7 ve Şekil 4.18'de gösterildiği gibi iki rijitlik katsayısı olacaktır. Bu durumda, k^1 birim uzunluktaki yol rijitliği,

k_1^l ray elastik mesnedinin ve k_2^l zemin ve balastın birim uzunluklarındaki rijitlikleri olarak ikiye ayrılır ve modelde kullanılır. Bu durumda ray elastik mesnedinin rijitlik katsayısı (k_1 (N.m^{-1})) laboratuvar testlerinden, zemin ve balastın birim uzunluktaki rijitliği de yine 4.18 eşitliğinden elde edilir. Ray elastik mesnedinin rijitlik katsayısının birim uzunluktaki değeri,

$$k_1^l = \frac{k_1}{(A/100)} \quad (4.21)$$

k_1^l : Ray elastik mesnedinin birim uzunluktaki rijitliği (N.m^{-2}),

k_1 : Ray elastik mesnedinin rijitliği (N.m^{-1}),

A : Travers aralığı (cm),

eşitliğinden elde edilir.

Yolun birim uzunluğundaki sönümlenme oranının (c^l (Ns.m^{-2})) değeri, temsil ettiği yol bileşenine, kullanılan model tipine ve modelde düşünülen üstyapıya göre değişir ve rijitlik için açıklanan durumlar burada da aynen geçerlidir. Birim uzunluktaki yol sönümlenme oranı (c^l (Ns.m^{-2})), daha önce rijitlik için açıklanan koşullarda olduğu gibi, sadece ray elastik mesnedinin sönümlenme oranına eşit olabildiği gibi (c_1^l (Ns.m^{-2})), model tipine göre, ray elastomer mesnedi için ve zemin ile balast için ayrı ayrı düşünülür. Bununla beraber, birim uzunluktaki yolun sönümlenme katsayısının (c^l (Ns.m^{-2})) hesabında kullanılacak ray elastomer mesnedi ve zemin ile balastın sönümlenme oranı, rijitlik için yukarıda açıklananlardan biraz farklı olur.

Ray elastik mesnedinin sönümlenme oranının (c_1 (Ns.m^{-1})) değeri, aynen ray elastik mesnedinin rijitlik katsayısının bulunuşunda olduğu gibi laboratuvar testlerinden elde edilirken, c_2 zemin ve balastın sönümlenme oranı da herhangi bir eşitlikle değil, zeminin ve balastın özelliklerine göre yine laboratuvar testlerinden elde edilir.

Ray elastik mesnedinin sönümlenme oranı c_1 'in (Ns.m^{-1}) birim uzunluktaki değeri c_1^l (Ns.m^{-2}) ise,

$$c_1^l = \frac{c_1}{(A/100)} \quad (4.22)$$

c_1^l : Ray elastik mesnedinin birim uzunluktaki sönümlenme oranı (N.m^{-2}),

c_1 : Ray elastik mesnedinin sönümlenme oranı (N.m^{-1}),

A : Travers aralığı (cm),

elde edilir.

Zemin ve balastın birim uzunluktaki rijitliğinin, eşitlik 4.18 ile bulunuşundan farklı olarak, zemin ve balastın sönümlleme oranı c_2 'nin (Ns.m^{-1}) birim uzunluktaki değeri c_2^l (Ns.m^{-2}),

$$c_2^l = \frac{(c_2/2)}{(A/100)} \quad (4.23)$$

c_2^l : Zemin ve balastın birim uzunluktaki sönümlleme oranı (N.m^{-2}),

c_2 : Zemin ve balastın sönümlleme oranı (N.m^{-1}),

A : Travers aralığı (cm),

eşitliği ile elde edilir.

Daha önce belirtildiği gibi AI modelinin dinamik çökmesinin hesabında ise, dikkat edilmesi gereken en önemli husus, L karakteristik uzunluğun hesabında, temel katsayısı k^l yerine kompleks katsayı k^* kullanılmasıdır. Bunun nedeni dinamik çökme kompleks bir nicelik olmasıdır. Böylece, L karakteristik uzunluk denkleminde k^l yerine k^* koyulursa 4.24 eşitliği bulunur.

$$L^* = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k^*}} \quad (4.24)$$

Böylece, dinamik çökmenin hesabında kullanılacak olan, L^* karakteristik uzunluğu da kompleks bir nicelik kazanmıştır.

Esveld, 1997' ye göre k^* aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$k^* = \sqrt{\left[k^l - 4\pi^2 f^2 m \right]^2 + 4\pi^2 f^2 (c^l)^2} e^{i \arctan \frac{2\pi f c^l}{k^l - 4\pi^2 f^2 m}} \quad (4.25)$$

k^l : Birim uzunluktaki yol rijitliği (N.m^{-2}).

m : Birim uzunluktaki toplam yol kütlesi (kg/m).

c^l : Birim uzunluktaki yol sönümlleme oranı (Ns.m^{-2}).

AI modelinde dinamik çökmenin eşitliğini vermeden önce bazı tanımlamalar yapılması gerekir. Esveld,1997'ye göre L^* (cm) karakteristik uzunluk,

$$\beta = \frac{1}{L^*} \quad (4.26)$$

olur. 4.24 eşitliğini 4.26 eşitliği içine koyarsak, β için,

$$\beta^4 = \frac{k^*}{4EI} \quad (4.27)$$

$E I$: Rayın yatay rijitliği (N.m²).

eşitliği elde edilir. Bu durumda 4.15'deki $x=0$ için çökme eşitliği içine, 4.25 ve 4.27 eşitlikleri sokular gerekli yer değiştirmeler yapılırsa dinamik çökme denklemi,

$$w(0) = \frac{Q}{8EI\beta^3} \quad (4.28)$$

olur ve böylece (4.28) eşitliği 4.29'daki şekliyle kullanılır.

$$x_{dn}(f) = \frac{1}{8EI\beta^3} 10^9 \text{ (mm)} \quad (4.29)$$

$E I$: Rayın yatay rijitliği (N.m²).

Aynen statik çökme (x_{st}) hesabında olduğu gibi, sonuçta x_{dn} 'ği (mm) cinsinden elde edilebilmesi için 4.29 eşitliği 10^9 ile çarpılmalıdır.

Aşağıdaki titreşim analizinin temel (4.30) ve (4.31) eşitlikleri (Sırasıyla doğal frekans (Hz) ve sönümlenme oranı) 4.25 k^* 'in içerisinde yerine koyulur ve x_{dn} eşitliği içerisinde gerekli yer değiştirmeler ve sadeleştirmeler yapılırsa,

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^1}{m}} \quad (4.30)$$

$$\zeta = \frac{c^1}{2\sqrt{k^1 m}} \quad (4.31)$$

ζ : Sönümlenme oranı.

f_n : Doğal frekans (Hz).

dinamik çökme x_{dn} (mm) şu şekilde yazılabilir;

$$x_{dn}(f) = \frac{1}{2kL^*} \left\{ \left[1 - \frac{f^2}{f_n^2} \right]^2 + 4\zeta^2 \frac{f^2}{f_n^2} \right\}^{-\frac{3}{8}} e^{i\phi} \quad (4.32)$$

$$\phi = -\frac{3}{4} a \tan \left[\frac{2\zeta \frac{f}{f_n}}{1 - \frac{f^2}{f_n^2}} \right] \quad (4.33)$$

L^* :Dinamik karakteristik uzunluk (cm)

f : Frekans (Hz).

f_n : Doğal frekans (Hz).

ζ : Sönümlenme oranı.

k : Yol rijitliği ($N.m^{-2}$).

ϕ : Faz açısı.

4.34'deki dinamik çökme (x_{dn}) eşitliği de 4.16'da olduğu gibi, 10^9 ile çarpılarak (mm) cinsinden ifade edilir.

Sonuç olarak Dinamik büyütme katsayısı B_{dn} bulunan bu dinamik çökme ve statik çökmenin birbirine oranından aşağıdaki şekilde birimsiz olarak bulunur.

$$B_{dn} = \frac{x_{dn}}{x_{st}} \quad (4.34)$$

x_{dn} : Dinamik çökme (mm).

x_{st} : Statik çökme (mm).

AI tek kiriş modellerinde bilinmesi, gereken bir diğer önemli husus ise; Modelde kullanılan m (kg/m) birim uzunluktaki toplam yol kütlesi, M_t (kg) travers kütlesi, A (cm) travers aralığına ve m_2 (kg/m) birim uzunluktaki toplam ray kütlesine bağlı olarak değişir ve,

$$m_1 = (M_t/2)/(A/100) \quad (4.35)$$

$$m = m_1 + m_2 \quad (4.36)$$

m_1 : Traversin birim kütlesi (kg/m).

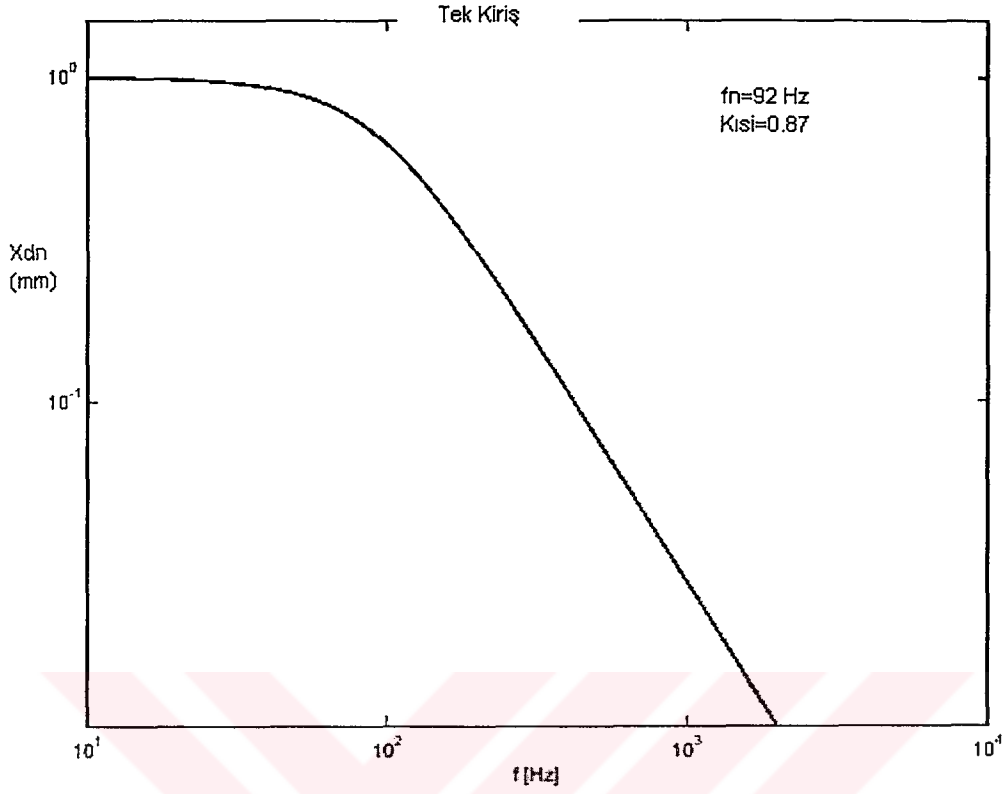
m_2 : Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi (kg/m).

M_t : Traversin kütlesi (kg).

A : Travers aralığı (cm).

eşitliği ile ifade edilir.

Şekil 4.20'de Çizelge 4.7'de verilen parametrelere göre, AI modelinin balastlı üstyapı için çözülmesi sonucu elde edilen, dinamik çökmenin frekansa bağlı değişimi grafiğini görmekteyiz (Bu grafik Matlab programı yardımıyla çizilmiştir, değerler ve sonuçlar Esveld, 1997'ile aynıdır).



Şekil 4.20 Tek kiriş olarak modellenmiş yolun frekans-dinamik çökme değişimi.

4.5.4 Çift Kiriş Modeli (CI)

Eğer yol yapısı, üstteki kirişin rayı, alttaki kirişin de traversi simgelendiği Şekil 4.18 b'deki gibi, çift kirişli olarak modellenir ise, rayı simgeleyen üstteki kiriş m_1 kütlelerine ve EI rijitliğine sahiptir. Traversler ise, birim kütleleri m_2 (kg/m) olarak ve sürekli mesnetli olarak simgelenmektedirler ve rijitliği sıfırdır. İki kiriş arasındaki bağlantı k_1 rijitliğine ve c_1 sönümlemesine sahip ray elastomer mesnetleri tarafından sağlanmaktadır. Modeldeki en alt tabaka olan yay-sönümleyici sistemi olarak balastın ve zeminin beraber rijitliği k_2 ve sönümlemesi c_2 olarak ifade edilir (Esveld, 1997,1989).

Hesaplamalar, modelin dört bölüm halinde bölünmesi ile oluşur, ray, ray elastomer mesnetleri, traversler ve balast tabakaları. Her bir tabaka için farklı bir diferansiyel denklem oluşturulmaktadır. Tek kirişlide olduğu gibi aynı sınırlayıcı şartlar altında birleştirildiği zaman, aşağıdaki x_{dn} (mm) dinamik çökme eşitliği elde edilir:

$$x_{dn}(f) = \frac{w(0)}{Q} = \frac{1}{8EI\beta^3} 10^9 \text{ (mm)} \quad (4.37)$$

burada:

$$\beta^4 = \frac{k_t - 4\pi^2 f^2 m_1}{16EI} \quad (4.38)$$

olmaktadır, ayrıca burada,

$$k_t = \frac{A \cdot B}{A + B} \quad (4.39)$$

$$A = k_1^1 + i2\pi f c_1^1 \quad (4.40)$$

$$B = -4\pi^2 f^2 m_2 + k_2^1 + i2\pi f c_2^1 \quad (4.41)$$

k_1^1 : Birim uzunluktaki ray elastik mesnedinin rijitlik katsayısı (N.m⁻²).

k_2^1 : Birim uzunluktaki zemin ve balastın rijitlik katsayısı (N.m⁻²).

$E I$: Rayın yatay rijitliği (N.m²).

c_1^1 : Birim uzunluktaki ray elastik mesnedinin sönümlenme oranı (Ns.m⁻²).

c_2^1 : Birim uzunluktaki zemin ve balastın sönümlenme oranı (Ns.m⁻²).

m_1 : Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi (kg/m).

m_2 : Traversin birim kütlesi (kg/m).

olmaktadır.

CI çift kiriş modelini AI tek kiriş modelinde olduğu gibi ZIMMERMANN'ın teorisi ile ilişkilendirirsek. Demiryolunun travers aralığı A (cm) gibi geometrik büyüklüklerini modelin içine sokmuş oluruz. CI modelinde genelde, k_1^1 ve c_1^1 sırasıyla, ray elastik mesnedinin birim uzunluktaki rijitliği ve sönümlenme katsayısı olur. k_1^1 4.21 eşitliği, c_1^1 4.22 eşitliği ile hesaplanır. Yine CI modelinde genelde, k_2^1 , c_2^1 sırasıyla, zemin ve balastın birim uzunluktaki rijitliği ve sönümlenme katsayısı olur. k_2^1 4.18 eşitliği, c_2^1 4.23 eşitliği ile hesaplanır.

Bu CI modelindeki ilk önemli husus, çift kiriş modelinde statik çökme (x_{st} (mm)), 4.37 dinamik çökme eşitliğinde, f (Hz) frekans yerine 0 (sıfır) koyarak elde edilir.

İkinci olarak ta CI çift kiriş modelinde eğer A (cm) travers aralığı ve ray tipi modele dahil ediliyor ise m_1 (kg/m) traversin birim kütlesi M_t (kg) travers kütlesi ve A (cm) travers aralığına bağlı olarak, m_2 (kg/m) birim uzunluktaki toplam ray kütlesi de ray tipine bağlı olarak değişir ve,

$$m_1 = (M_t/2)/(A/100) \quad (4.42)$$

M_t : Traversin kütlesi (kg).

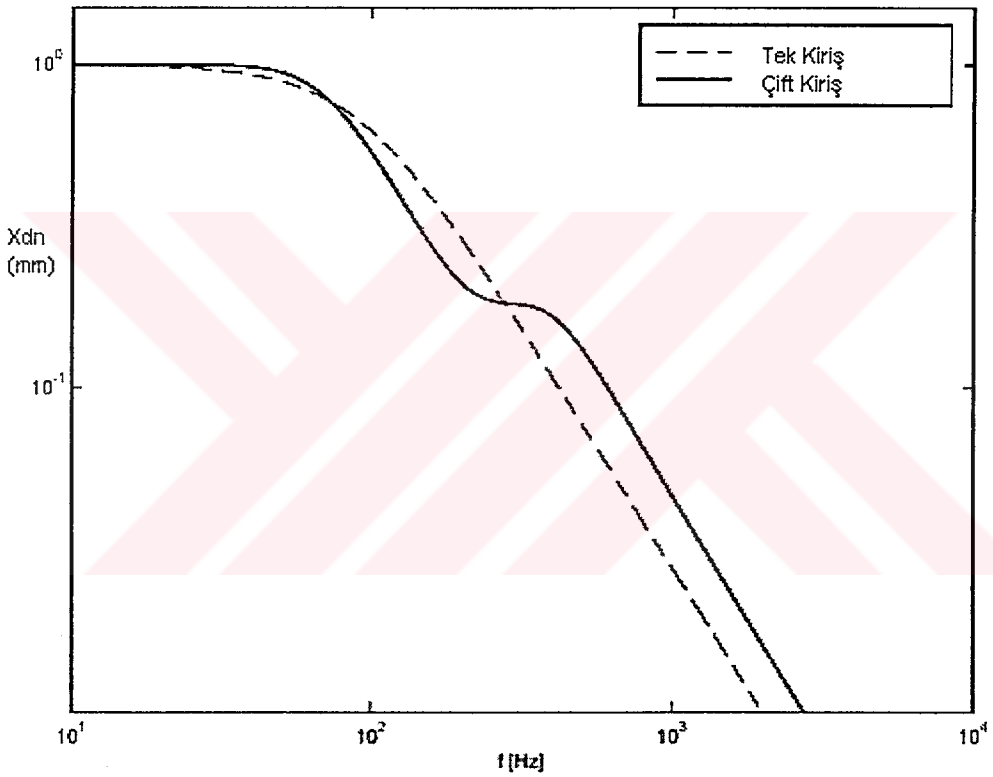
A : Travers aralığı (cm).

olur.

Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi m_2 (kg/m) ray tiplerinin fabrika verilerinden elde edilebilir (Çizelge 2.2).

Sonuç olarak dinamik büyütme katsayısı B_{dn} bulunan bu dinamik çökme ve statik çökmenin birbirine oranından aşağıdaki şekilde birimsiz olarak bulunur.

$$B_{dn} = \frac{x_{dn}}{x_{st}} \quad (4.43)$$



Şekil 4.21 Çift Kiriş şeklinde modellenmiş yol için frekans-dinamik çökme değişimi.

Şekil 4.21'de Çizelge 4.7'de verilen parametrelere göre, CI modelinin balastlı üstyapı için çözülmesi sonucu elde edilen, dinamik çökmenin frekansa bağlı değişimi grafiğini görmekteyiz. Kesik çizgi olarak ifade edilen parabol ise tek kiriş modelinin aynı parametrelerle elde edilmiş Şekil 4.20'nin kendisidir (Bu grafik Matlab programı yardımıyla çizilmiştir, değerler ve sonuçlar Esveld, 1997 ile aynıdır).

Seçilmiş olan bu iki modelin (AI, CI) kullanıldığı ve değişik yol bileşenleri parametreleri ve yol geometrik büyüklükleri verilerek üretildiği grafikleri Ek-1 de görebilirsiniz. Bu grafikler MATLAB R12 programı yardımıyla elde edilmiştir. AI modelinin rijit üstyapı olarak ve CI

modeli de balastlı üstyapı olarak düşünülmüştür ve yukarda açıklanan analitik eşitliklerle çözülmüştür. Çözüm, MATLAB R12 programı yardımıyla yapılmıştır. Eşitlikler ve çözüm algoritması, MATLAB R12 programının yazılım dilini kullanarak yazılmıştır. Elde edilen bu yazılımı içerisinde çeşitli yol bileşenleri ve geometrik parametreleri (Ray tipi, ray elastik mesnedi, travers aralığı, yatak katsayısı gibi) değiştirilerek farklı grafikler elde edilmiştir. Elde edilen bu grafikler daha önce belirtildiği gibi Ek-1'de görülebilir. Bu grafiklerin yorumları da Bölüm 4.5.5'de yapılacaktır.

4.5.5 AI ve CI Modellerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Çözömlenen AI ve CI modelleri sonucunda Ek-1'de verilen grafikler elde edilmiştir. Öncelikle elde edilen grafikler tek tek yorumlanacaktır, daha sonrada birbirleri arasındaki farklılıklar değerlendirilecektir. Ek-1 Şekil 1, 2, 3 ve 4'deki çözümler, R54 rayı için yapılmıştır. Şekil 5 ve 6'daki çözümlerde ise, $A=65$ cm travers aralığı sabit tutulmuştur. Ayrıca Şekil 2 hariç bütün şekillerde ray elastik mesnedi Fc9-1 (Ek-2) kullanılmıştır.

Şekil 1 AI modeli (Tek giriş) için farklı travers aralıklarına sahip yolların, frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi, ray elastik mesnedi Fc9-1 için gösterilmektedir. AI modeli, yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modellerin gösterildiği Çizelge 4.2'den görülebileceği gibi, genellikle rijit üst yapı (Balastsız üstyapı) tiplerinde kullanılmaktadır. Burada kurulan modelde de Rijit üstyapı tipi tanımlanmaktadır. Burada kullanılan yol parametreleri, Ek-1'de verilen Çizelge 1'de görülebilir. Travers aralığının $A=65\sim 115$ cm arasında değiştiği düşünülmüştür. Grafikten görüldüğü gibi, rezonans frekansı 400 Hz civarında olmaktadır. Rezonans frekansına kadar, travers aralığı (A cm) azaldıkça, dinamik büyütme faktörü de (B_{dn}) azalmaktadır. Bu nedenle, dinamik büyütme faktörünü düşürmek için travers aralığını azaltmak gerekmektedir, bu da yolun daha fazla travers kullanılarak yapılmasını gerektirecektir. Sonuçta da, kullanılan travers sayısının artması yol yapım maliyetinin artmasına sebep olacaktır. Sadece maliyet açısından bakıldığı zaman bile, demiryollarında çok dikkatli ve iyi bir dinamik analiz yapılması gereklidir.

Şekil 1'de 400 Hz rezonans frekansından sonra travers aralığının artmasının, dinamik büyütme faktörünü azalttığı görülmektedir. Demiryollarının dizayn aşamasında yapılan dinamik analizlerde rezonans frekansına kadar olan davranışın incelenmesi gerektiğinden, rezonans olayından sonraki sistemin davranışı göz önüne alınmaz. Zaten bilindiği gibi dinamik analizdeki ana amaç sistemin rezonansa geçmemesidir.

Ayrıca Şekil 1'de görülmektedir ki, travers aralığı azaldıkça rezonans frekansı artmaktadır, $A=65$ cm'de rezonans frekansı 380 Hz civarında iken, $A=115$ cm'de 410 Hz civarında

olmaktadır.

Şekil 2 AI modelinde ise farklı ray elastomer mesnetlerine sahip yolların, frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi ($A=65$ cm), gösterilmiştir. Burada kullanılan yol parametreleri Ek-1'de verilen Çizelge 2'de gösterilmektedir. Burada Fc9-1, Fc9-2, Fc9-3, Fc9-4 tipindeki değişik rijitlik ve sönümlenme oranlarına sahip ray elastomer mesnetleri için dinamik büyütme faktörünün değişimi incelenmiştir. Ray elastik mesnetlerinin parametreleri Ek-2'de görülebilir. Bu grafikte açıkça görülmektedir ki ray elastik mesnedinin farklı parametreler alması dinamik büyütme katsayısını oldukça etkilemektedir. Fc9-2 ve Fc9-3 tipleri aşınmış, yıpranmış ray elastik mesnedini ifade etmektedir. Görülmektedir ki Rijit üstyapıda ray elastik mesnedinin yeni ve yıpranmamış olması dinamik büyütme faktörünü oldukça düşürmektedir. Buda şu demektir ray elastomer mesnetlerinin, her zaman bakımı yapılmış ve yenilenmiş olması gerekmektedir.

Şekil 3 CI modelinde farklı travers aralıklarına sahip yolların, frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi, yatak katsayısı $C=0,1$ N/mm³ için gösterilmiştir. CI modeli, yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modellerin gösterildiği Çizelge 4.2'den görülebileceği gibi, hemen hemen bütün üstyapı tiplerinde ve özellikle balastlı üst yapı tiplerinde kullanılmaktadır ve modelin içinde balast tabakası tanımlanmaktadır. Bu modelde kullanılan yol parametreleri, Ek-1'de verilen Çizelge 3'de gösterilmektedir. CI modelinde kullanılan parametreler, Şekil 1'deki AI modeli için kullanılan parametreler ile tamamen aynıdır. Fakat AI modelinden farklı olarak, CI modelindeki parametreler yol bileşenlerine göre dağıtılmıştır. Örneğin, AI modelindeki yol kütlesi, rijitliği ve sönümlenme oranı CI modelinde ray kütlesi, travers kütlesi, ray elastik mesnedi ve zemin ile balastın rijitliği ve sönümlenme oranı olmak üzere sınıflandırılarak kullanılmaktadır (Çift kiriş olduğu için). CI modelinde (Şekil 3), rijit bir üstyapı tipinin tanımlandığı AI modelinde (Şekil 1) olduğu gibi, CI modelinde de travers aralığı A (cm) azaldıkça, dinamik büyütme faktörü B_{dn} azalmaktadır. Bunun sonucunda da, daha önce belirtildiği dinamik büyütme faktörünü azaltmak için yolda daha fazla travers kullanılması gerekecektir ve yapım maliyet artacaktır. Ayrıca CI çift kiriş modelinde (Şekil 3) travers aralığının değişiminin rezonans frekansını önemli derce de etkilemediği görülmektedir. Demek ki balastlı üstyapı tipinde travers aralığının değişimi sadece dinamik büyütme faktörünü değiştirmektedir. Bu noktada dikkat edilecek durum, AI ve CI modellerinin rezonans frekansları (Sırasıyla 400Hz ve 50 Hz) birbirinden oldukça farklıdır. Demek ki ortak kullanılan yol parametreleri aynı olduğu sürece, üst yapı tipinin değişimi rezonans frekansı değerini değiştirmektedir. Tabi ki rezonans durumunun hiçbir

zaman oluşmaması istenir.

Bunun yanında AI (Şekil 1) ve CI modellerinde (Şekil 3) elde edilen B_{dn} dinamik büyütme faktörleri, karşılaştırılırsa görülmektedir ki, AI rijit üst yapı modelinde bulunan B_{dn} dinamik büyütme faktörü, balastlı üstyapı tipinin temsil edildiği CI modelinde bulunan B_{dn} dinamik büyütme faktöründen oldukça büyüktür. Örneğin ilgilenilen frekans aralıklarında, AI modelinde dinamik büyütme faktörü $B_{dn} = 2$ civarına kadar çıkarken, CI modelinde ise dinamik büyütme faktörü en fazla $B_{dn} = 1.26$ olduğu görülmektedir. Bu durumda diyebiliriz ki; Balastlı üstyapı tipi, demiryolunun dinamik analizi açısından, rijit üstyapı (balastsız üstyapı) tipine göre daha avantajlıdır.

Şekil 4'deki CI modelinde ise farklı travers aralıklarına sahip yolların, frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi gösterilmektedir ($C=0,05$ N/mm³). Şekil 4'deki CI modelinin Şekil 3'deki CI modelinden tek farkı, kullanılan C (N/mm³) yatak katsayısının değerinin 0,1 N/mm³ yerine 0,05 N/mm³ olmasıdır. Travers aralığının değişiminin dinamik büyütme faktörüne ve rezonans frekansına etkisi Şekil 3'deki CI modeli ile aynıdır ve aynı yorumlar geçerlidir. Burada da dikkat edilmesi gereken husus da, C (N/mm³) yatak katsayısının azalmasının, B_{dn} dinamik büyütme faktörünün ve rezonans frekanslarının azalmasına neden olmasıdır. Demek ki, yatak katsayısının daha düşük değerlerde olması, B_{dn} dinamik büyütme faktörünün ve rezonans frekansının daha düşük değerler almasını sağlamaktadır.

Son olarak Şekil 5 ve 6'da, sırasıyla AI ve CI modelleri, farklı ray tipleri için (Çizelge 2.2), dinamik büyütme faktörü-frekans değişimini görülmektedir. Her iki durumda da ortak yol parametreleri aynıdır (Ray için olan parametreler hariç). Şekil 5 ve 6'daki grafiklerin incelenmesinden anlaşılmıştır ki, rayın tipinin değişiminin dinamik büyütme faktörüne ve rezonans frekansına etkisi oldukça azdır. Yalnızca, rezonans frekansında, dinamik büyütme faktörü ray tipine göre bir miktar değişim göstermektedir. Ray tipi iyileştikçe (Örneğin UIC 60 R49'dan daha iyidir) B_{dn} dinamik büyütme faktörü artmaktadır (yalnızca rezonans frekansında).

Özetlemek gerekirse, her türlü demiryolu üst yapısında A (cm) travers aralığı azaldıkça, B_{dn} dinamik büyütme faktörü de azalmaktadır. Balastlı üstyapı tipinde, yatak katsayısı C (N/mm³) azaldıkça, B_{dn} dinamik büyütme faktörü ve rezonans frekansı azalmaktadır. Demiryolu üst yapısının farklı olmasının, rezonans frekanslarında etkili olduğu söylenebilir ve bundan dolayı da üstyapı tipine göre, ilgilenilen frekans aralıkları değiştirmektedir. Bunun yanında rijit üst yapı tipinin, balastlı üst yapı tipine göre aynı koşullarda daha yüksek (B_{dn}) dinamik büyütme

faktörü verdiği görülmüştür. Son olarak ta ray tipinin değişiminin, B_{dn} dinamik büyütme faktörüne ve rezonans frekansına dikkate değer herhangi bir etkide bulunmadığı gözlenmiştir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada değişik frekans aralıklarında rayların, betonarme traverslerin, tekerlek takımlarının ve demiryolu sistemlerinin dinamik olarak nasıl modellenmeleri gerektiği incelenmiştir.

Demiryolu sistemini etkileyen zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı sistemin doğal frekansı ile çakışırsa, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelmektedir. Dolayısıyla rezonans titreşimleri ve istenmeyen dinamik durumla karşılaşmamak için tasarım aşamasında kapsamlı bir dinamik analiz yapılmalıdır.

Uluslararası platformda, demiryolunun dinamik davranışı hakkında bir çok araştırma çalışması mevcuttur ve günümüzde halen devam eden sayısız araştırma çalışması da vardır (Örneğin De Man, A.P.'nin 2002 yılında ilk kısmı yayınlanan çalışması). Bunun yanında demiryolu üstyapısının dinamik davranışı konusunda, halen araştırılmayı bekleyen bir çok konu da mevcuttur. Örneğin, yaklaşık 0 - 100 Hz arasında değişen frekans değerlerinde, bojidaki tekerlek takımının dinamik davranışı ile ilgili olarak çok az çalışma yapılmıştır ve bu konu araştırılmayı beklemektedir. Ayrıca, ilgilenilen frekans aralıklarında taşıtın ve rayın dinamik davranışının modellenmesinde çözülmemiş bir problem, ray elastik mesnetlerinin ve balastın gerekli parametrelerinin belirlenmesi ile ilgilidir. Burada, balast ile ray elastik mesnetlerinin doğru parametrelerinin bulunmasının gerekliliği önemli bir konudur. Bu sorunun cevabı da, test trenleri kullanılarak ray elastik mesnetleri ve balast için daha fazla deney yapılması ile mümkün olabilecektir. Bu yol bileşenlerinin, kütlelerinin, sönüm katsayılarının ve rijitliklerinin tahmin edilmesinde kullanılacak modellerin geliştirilmesi gerçekten yararlı olacaktır.

Türkiye'de ise demiryolu dinamik davranışı hakkında henüz bir araştırma çalışması bulunmamaktadır ve bu konu hakkında yapılacak her türlü çalışma gerçekten ülkemiz ekonomisi için de çok değerli olacaktır. Çünkü, ülkemizde gelişen kent içi demiryolu sistemleri ile beraber, demiryolunun dinamik davranışı konusunda bir çok problemle karşılaşılmaktadır. Örneğin, İstanbul gibi tarihi mirası çok olan bir kentte yapılacak kent içi demiryolu sistemi, doğurduğu titreşimler ile tarihi eserlere çok büyük hasarlar verebilmektedir. Oysa ki, demiryolu üstyapısının hesabı aşamasında iyi yapılmış bir dinamik analiz, bu gibi titreşimlerin etkisini minimuma indirebilmektedir.

Ayrıca, demiryolu sisteminin iyi ve doğru yapılmamış dinamik analizi sonucunda, yanlış seçilen yol elemanları veya yol tipi ile yolun işletmeye açıldıktan sonraki bakım ve onarım

masrafları oldukça artmaktadır. Bunun önlenmesi için demiryolu üstyapısının hesabında iyi tasarlanmış dinamik modeller kullanılmalı ve buna göre dinamik analiz yapılmalıdır. Ülkemizde çoğu zaman bu tür hesaplamalarda demiryolunun dinamik analizi bir yana, statik analizi bile yapılmamaktadır ve daha sonra karşılaşılan problemler doğrultusunda da maliyeti yüksek çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Bu yüzden demiryolu işletmeleri, demiryolu sistemlerindeki ondülasyon ve gürültü problemi, yolcu konforunun bozulması gibi problemlerle, olması gerekenden çok daha kısa zamanda karşılaşmaktadırlar. İşte bu problemler ile olduğunca geç karşılaşmak ve etkilerini minimuma indirmek için bu çalışmada anlatıldığı gibi, demiryolu üstyapı tipleri için uygun dinamik modeller kurulmalı ve dinamik analizler yapılmalıdır.

Bu çalışmada verilen modelleme teknikleri gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından son derece faydalı olacaktır. Bununla beraber, bu tez çalışmasında seçilen modellerin analizi sonucunda elde edilen en temel sonuç, dinamik davranış bakımından, balastlı üstyapı tipinin, rijit üstyapı tipine göre üstün olduğudur. Ayrıca, rijit üst yapıda doğru ray elastomer mesnedinin seçiminin dinamik etkileri oldukça azalttığı da görülmüştür.

Biz bu tezde demiryolu üstyapısını sadece dinamik davranış bakımından inceledik. Oysa ki, bir yol kesimi için üstyapı tipinin belirlenmesinde değişik bir çok etken göz önüne alınmalı ve ona göre bir analiz yapılması gerekmektedir (Örneğin, yapım ve bakım maliyeti, hizmet tipi ve ömrü, çevre yapıların konumu ve durumu gibi etkenler bunlardan bir kaçısıdır.). Üstyapı tipine karar verildikten sonra seçilen üstyapı tipine uygun olarak iyi bir dinamik analiz yapmak gerekir. Bugün dünyada gelişen teknoloji ile artan hızlarla beraber, balastlı üstyapıya göre rijit üstyapı tipi daha çok tercih edilen bir üst yapı tipidir. Bunun bir çok teknik nedeni vardır, örneğin bakım masrafları balastlı üstyapıya göre çok daha düşüktür ayrıca hizmet ömrü de gene balastlı üstyapı tipine göre çok daha uzundur. Ayrıca rijit üstyapı tipi viyadük, köprü geçişleri metro gibi yapılarda çok daha kolay ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bir çok bakımdan balastlı üstyapı tipine göre üstün olan rijit üstyapı tipinin demiryolu üstyapısında daha yaygın olarak uygulanacağı aşikardır. Bunun içindir ki özellikle dinamik bakımdan balastlı üstyapıya göre zayıf olan rijit üstyapı tipinin uygulanacağı yollarda, tasarım safhasında mutlaka iyi bir dinamik analiz yapılması gereklidir.

Sonuç olarak, bu tür bir çalışmanın amacı, öncelikle iyi ve doğru bir yol modeli kurarak, demiryolu üstyapısının dinamik davranışının modellenmesinin gösterilmesidir. İkincil olarak da, yol ve taşıtla ilgili modellerin gelişmesine yardımcı olarak, gelecekte yapılacak olan çalışmaların ihtiyaç duyulan alanlarda yapılmasının ve yapılan bu çalışmaların sonuçlarının

da mümkün olduğunca kolay uygulanabilir olmasının sağlanmasıdır. Aynı zamanda Schwedler'in bir yzyıl önce verdiği tavsiyeye de uymak gereklidir; buna göre geliştirilen modeller, mutlaka gözlemlerin yapılması ile test edilmelidir.



KAYNAKLAR

De Man, A.P., (2002) "Dynatrack Asurvey of Dynamic Railway Track Properties and Their Quality", TU Delft Pres, 1-46, Netherlands.

Esveld, C., (2003) "CT4870_08_Conventional_Track_Structures_", TU Delft Univercty Lesson Notes, Netherlands.

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

Esveld, C., (1989) Modern Railway Track, Graphics Department of Thyssen Stahl AG, Germany.

Erel A., (2003) "Titreşim Olayı", YTÜ Ders notları, İstanbul.

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

Erel, A., (1989) "Demiryolu Üstyapı Testi ve Boyutlandırması", Yıldız Teknik Üniversitesi, 11, İstanbul.

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

Grassie, S.L., Gregory, R.W., Harrison, D., Johnson, K.L., (1982) "The Dynamic Response of Railway Track to High Frequency Vertical/Lateral/Longitudinal Excitation.", *Journal Mechanical Engineering Sc.* 24, 77-102, Netherlands.

Grassie, S.L., (1995) *Der Eisenbahn Ingenieur*, S10, Germany.

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

Tahranlı, N., Kaya, F., Yüksek, İ., Güçlü, R., (2000) Makina Dinamiği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi, İstanbul.

Tunay, C., (2002) "Titreşim", Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi, İstanbul.

www.corusrail.com/docs/Grooved%20Rails.pdf

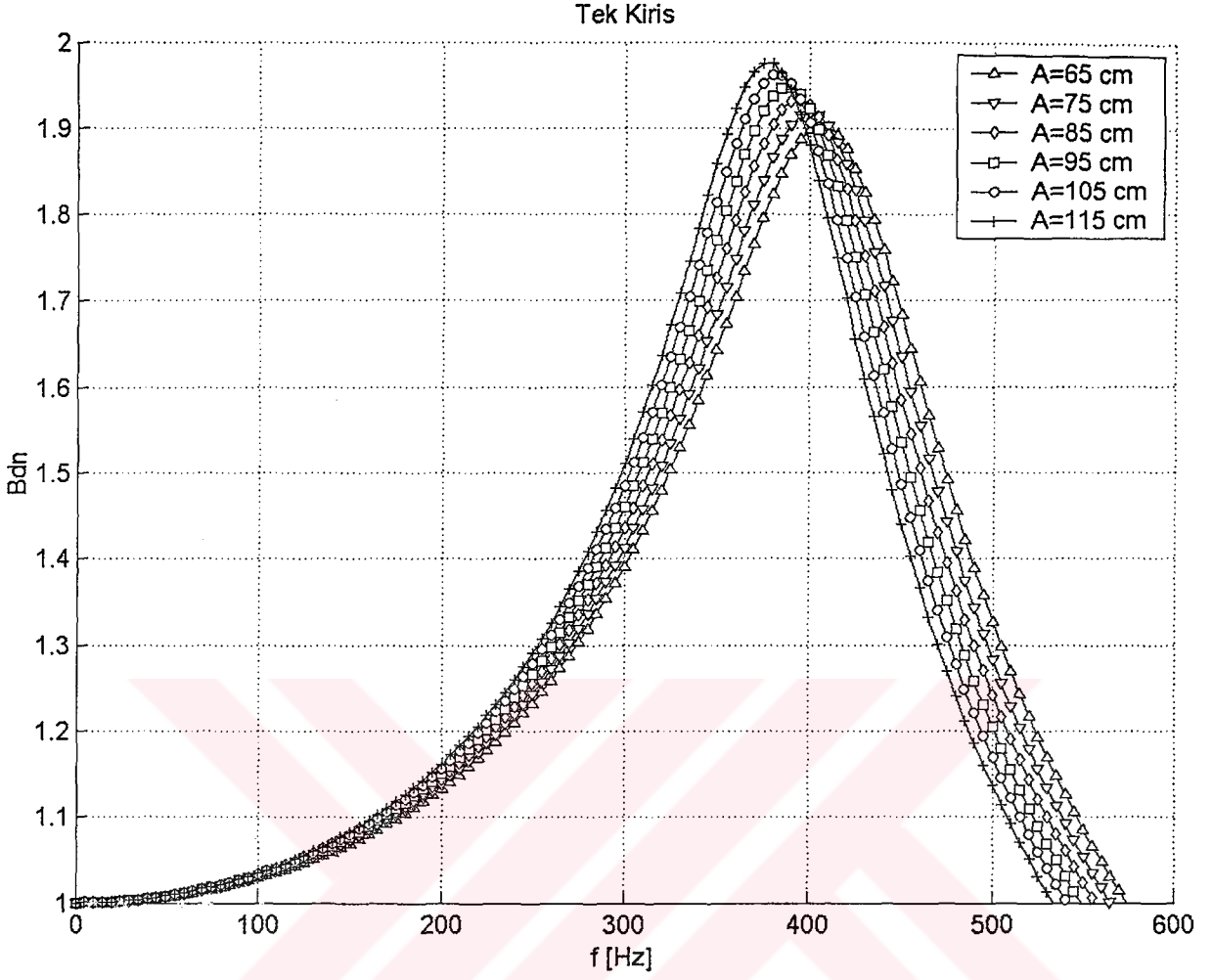
www.railway.zonasa.com/chi/rail1.html

EKLER

- Ek 1 AI ve CI modellerinin çözümünden elde edilen grafik şekilleri.
Ek 2 Örnek ray elastik mesnetleri parametre tablosu.
Ek 3 Tez hazırlanırken karşılaşılan yabancı kelimelerin kullanılan Türkçe karşılıkları (sözlük).



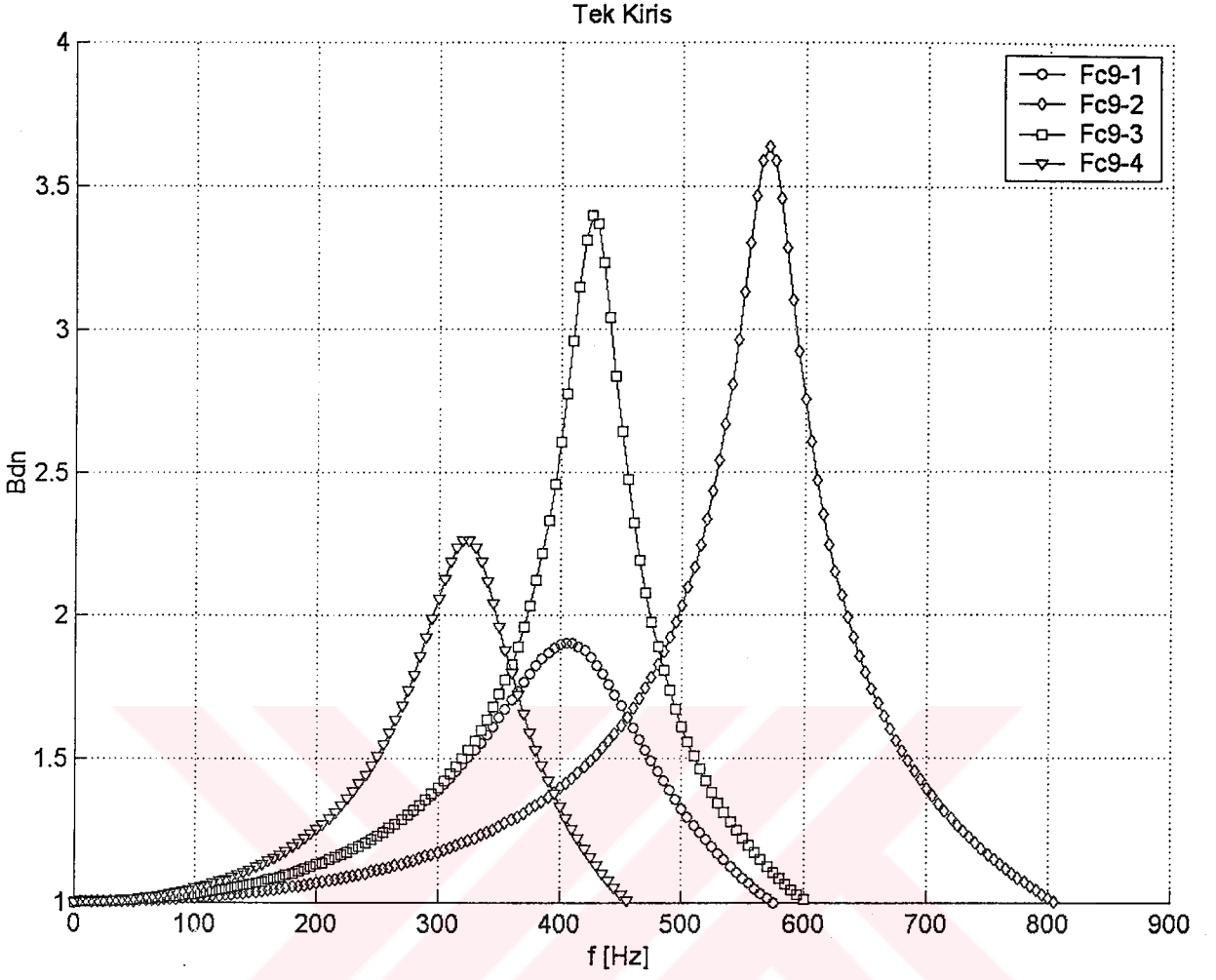
Ek 1 AI (tek kiriş) ve CI (çift kiriş) modellerinin çözümünden elde edilen grafik şekilleri.



Şekil 1. AI (Tek kiriş) modelinde farklı travers aralıklarına sahip yolların frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi (Fc9-1) (R54).

Çizelge 1. AI (Şekil 1.) modelinde kullanılan parametreler.

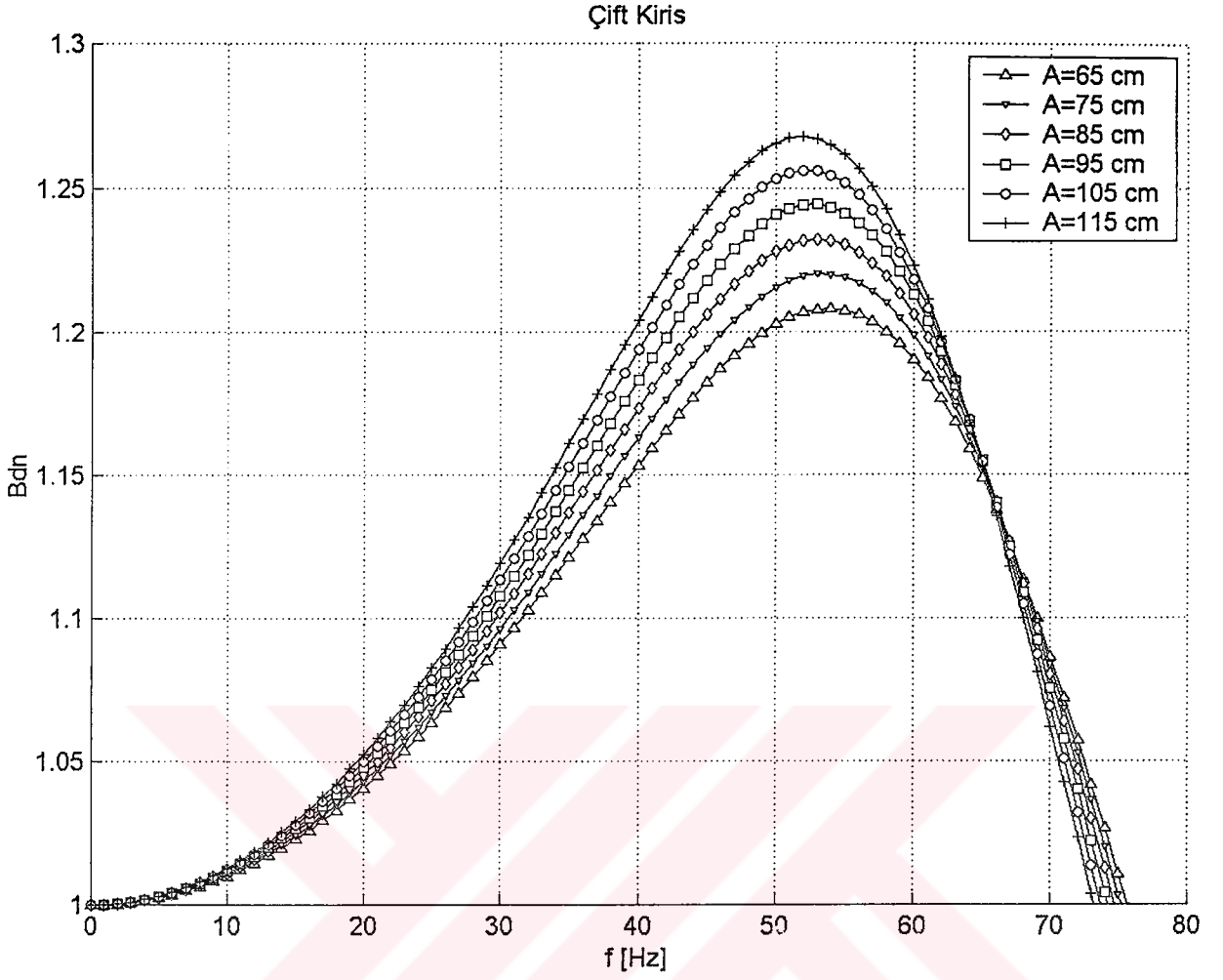
EI	N.m ²	$4.5 \cdot 10^6$	Ray yatay rijitliği
m_1	kg/m	54.43	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlik (4.35)	Traversin birim kütlesi. $(M_t/2)/(A/100)$
m	kg/m	$m_1 + m_2$	Birim uzunluktaki toplam yol kütlesi.
k_1	N.m ⁻¹	$1120 \cdot 10^6$	Ray els.mesn. rijitliği
k^l	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki yol rijitliği.
c_1	Ns.m ⁻¹	$120 \cdot 10^3$	Ray els.mesn. sönümlenme oranı.
c^l	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki yol sönümlenme oranı.



Şekil 2. AI (Tek kiriş) modelinde farklı ray elastomer mesnet tiplerine göre, frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi.

Çizelge 2. AI (Şekil 2.) modelinde kullanılan parametreler.

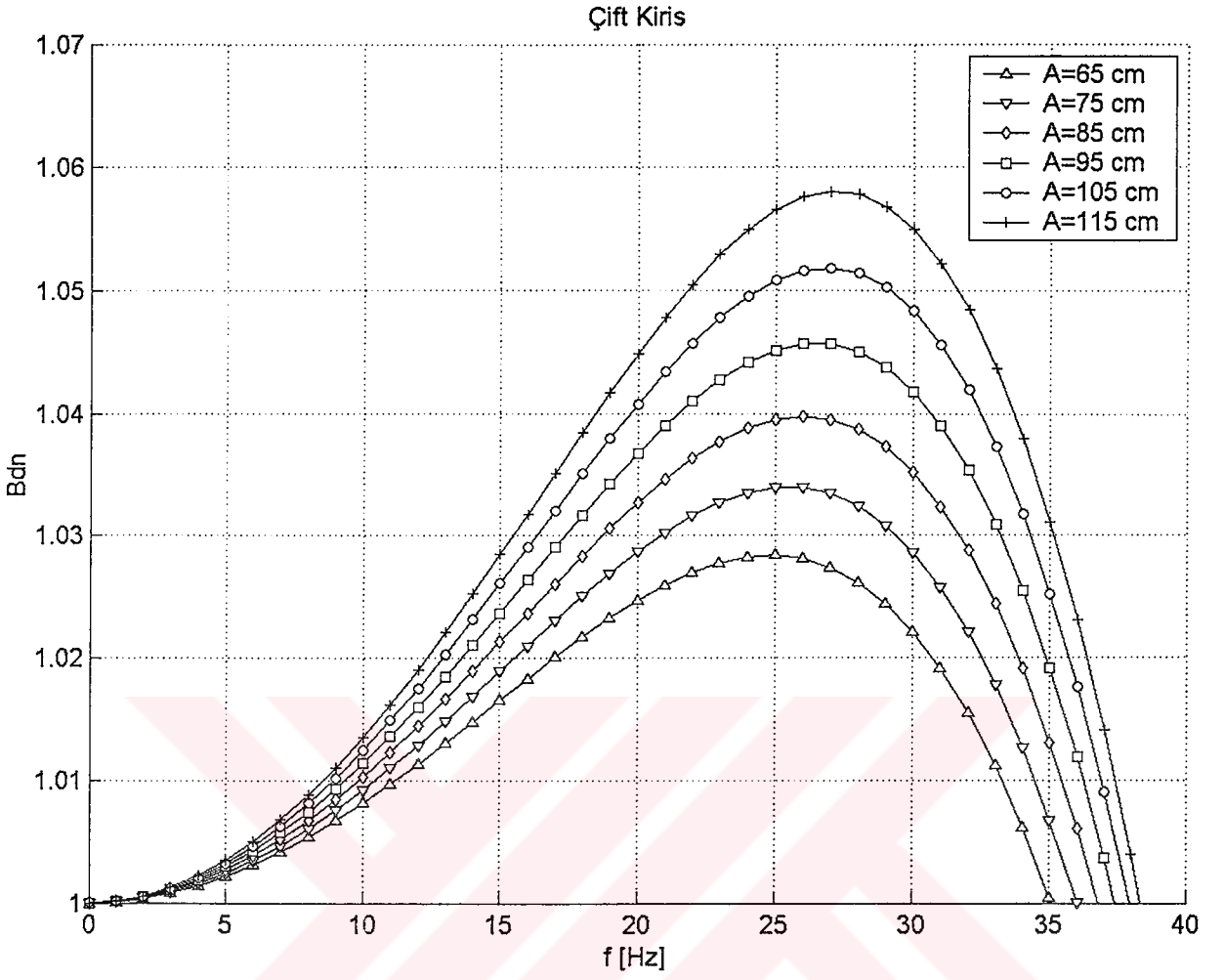
EI	N.m ²	4.5 10 ⁶	Ray yatay rijitliği
A	cm	65	Travers aralığı.
m_1	kg/m	54.43	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlikten (4.35)	Traversin birim kütlesi. ($M_t/2$)/($A/100$)
m	kg/m	m_1+m_2	Birim uzunluktaki toplam yol kütlesi.
k_l	N.m ⁻¹	Değişken*	Ray els.mesn. rijitliği
k^l	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki yol rijitliği.
c_l	Ns.m ⁻¹	Değişken*	Ray els.mesn. sönümleme oranı.
c^l	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki yol sönümleme oranı.
$Fc9$		*Ek-2	Ray els. mesn. rijitliği ve sönümlemesi.



Şekil 3 CI (Çift kiriş) modelinde farklı travers aralıklarına sahip yolların frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi ($C=0,1$ N/mm³).

Çizelge 3. CI (Şekil 3.) modelinde kullanılan parametreler.

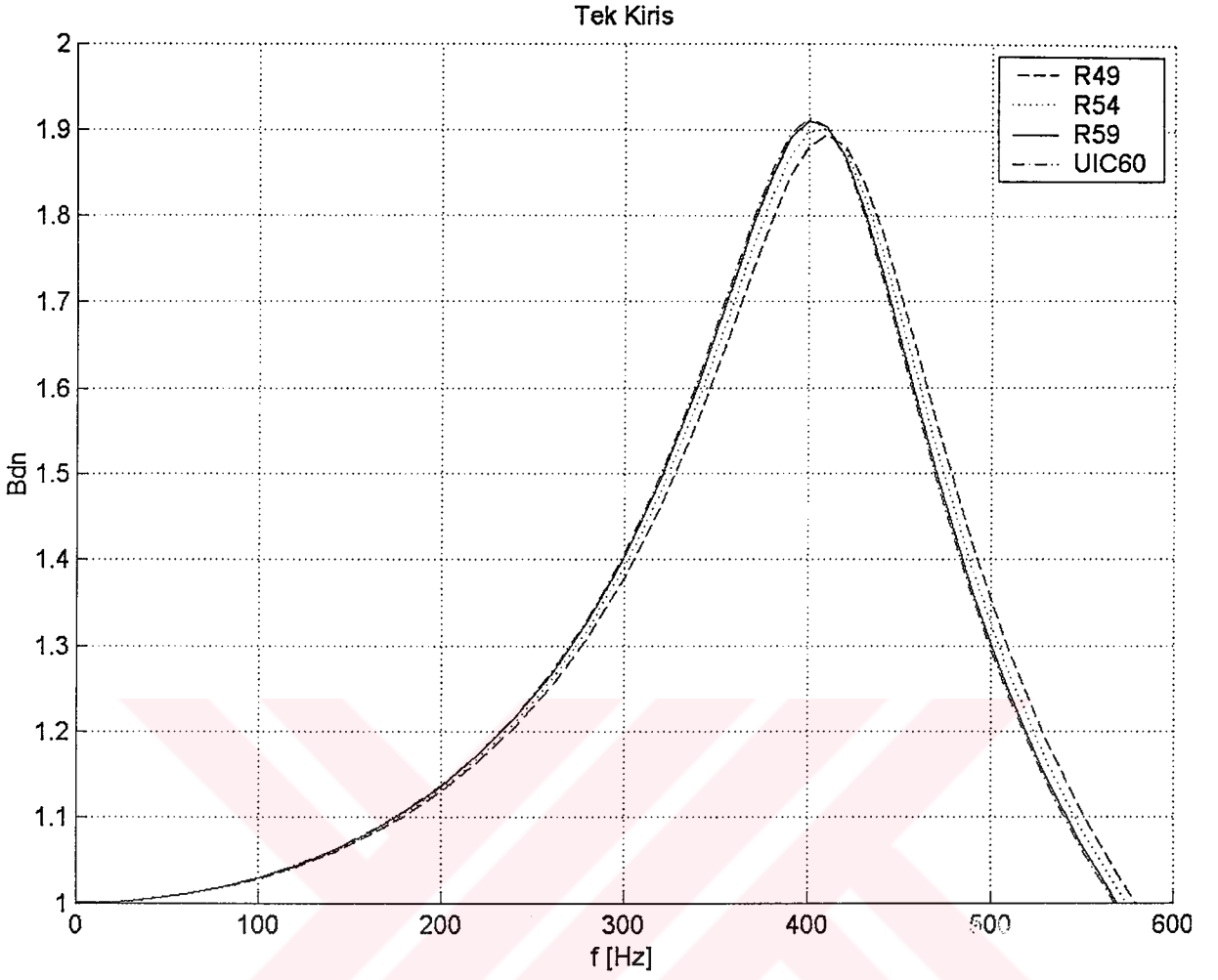
EI	N.m ²	4.5 10 ⁶	Ray yatay rijitliği.
l_t	cm	230	Travers taban uzunluğu.
m_t	cm	30	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu.
b_t	cm	30	Travers taban genişliği.
m_1	kg/m	54.43	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlikten (4.42)	Traversin birim kütlesi. ($M_t/2$)/($A/100$)
k_1	N.m ⁻¹	1120 10 ⁶	Ray els.mesn. rijitliği
k_1'	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki ray elastik mesnedi rijitliği.
k_2'	N.m ⁻²	Eşitlik (4.18)	Birim uzunluktaki zemin ve balastın rijitliği.
c_1	Ns.m ⁻¹	120 10 ³	Ray els.mesn. sönümlenme oranı.
c_1'	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki ray els.mesn. sönümlenme oranı.
c_2	Ns.m ⁻¹	1.2 10 ⁵	Zemin ve balast sönüm. oranı.
c_2'	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.23)	Birim uzunluktaki zemin ve balast sönüm. oranı.
C	N/mm ³	0,1	Yatak katsayısı.



Şekil 4. CI (Çift kiriş) modelinde farklı travers aralıklarına sahip yolların frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi ($C=0,05 \text{ N/mm}^3$).

Çizelge 4. CI (Şekil 4.) modelinde kullanılan parametreler.

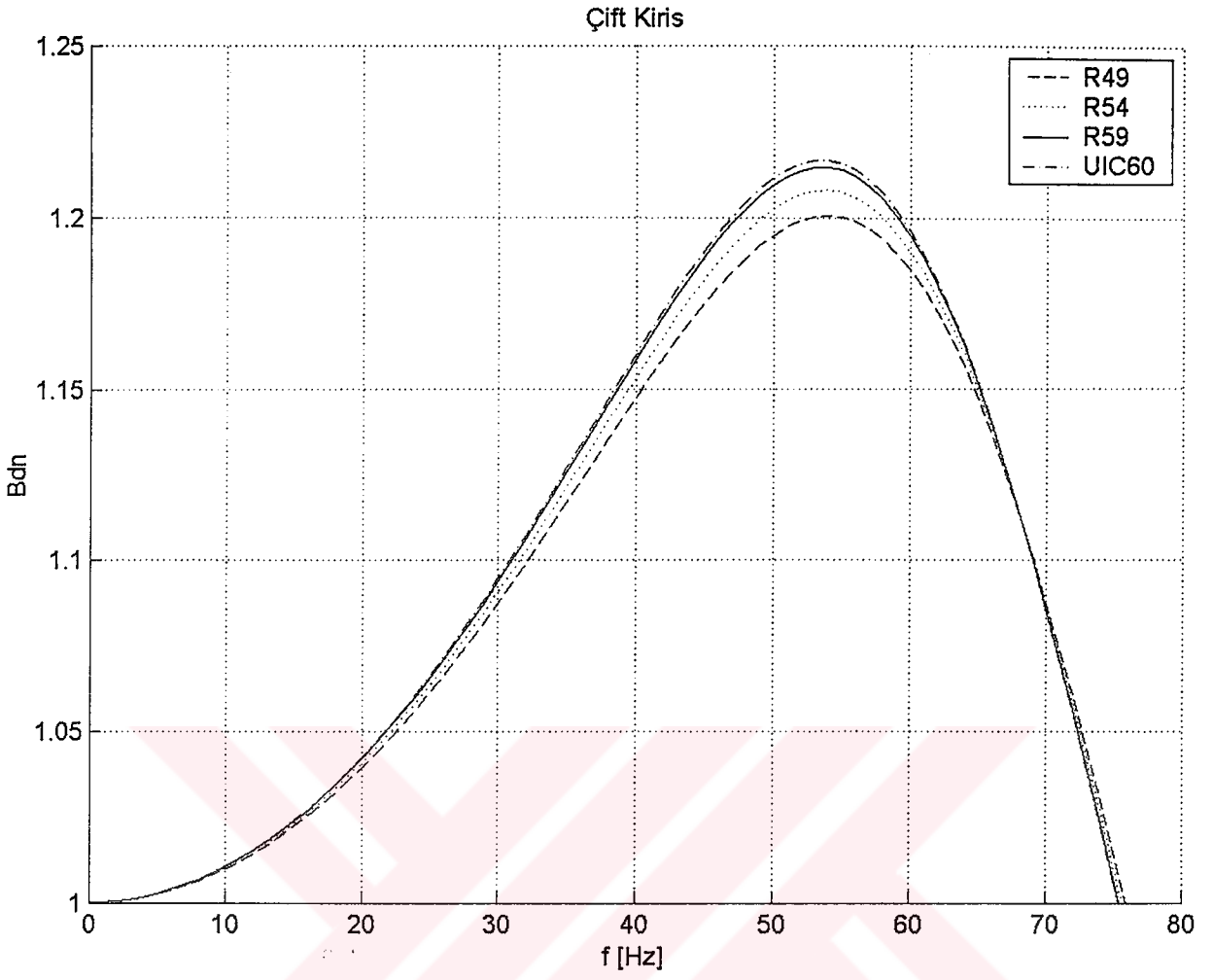
EI	N.m ²	4.5 10 ⁶	Ray yatay rijitliği.
l_t	cm	230	Travers taban uzunluğu.
m_t	cm	30	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu.
b_t	cm	30	Travers taban genişliği.
m_1	kg/m	54.43	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlikten (4.42)	Traversin birim kütlesi. $(M_t/2)/(A/100)$
k_1	N.m ⁻¹	1120 10 ⁶	Ray els.mesn. rijitliği
k_1'	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki ray elastik mesnedi rijitliği.
k_2'	N.m ⁻²	Eşitlik (4.18)	Birim uzunluktaki zemin ve balastın rijitliği.
c_1	Ns.m ⁻¹	120 10 ³	Ray els.mesn. sönümlleme oranı.
c_1'	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki ray els.mesn. sönümlleme oranı.
c_2	Ns.m ⁻¹	1.2 10 ⁵	Zemin ve balast sönüm. oranı.
c_2'	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.23)	Birim uzunluktaki zemin ve balast sönüm. oranı.
C	N/mm ³	0,05	Yatak katsayısı.



Şekil 5. AI (Tek kiriş) modelinde farklı ray tiplerine sahip yolların frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi (Fc9-1).

Çizelge 5. AI (Şekil 5.) modelinde kullanılan parametreler.

EI	N.m ²	Değişken (Çizelge 2.2)	Ray yatay rijitliği.
A	cm	65	Travers Aralığı.
m_1	kg/m	Değişken (Çizelge 2.2)	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlikten (4.35)	Traversin birim kütlesi ($M_t/2$)/($A/100$).
m	kg/m	m_1+m_2	Birim uzunluktaki toplam yol kütlesi.
k_l	N.m ⁻¹	1120 10 ⁶	Ray els.mesn. rijitliği
k'	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki yol rijitliği.
c_l	Ns.m ⁻¹	120 10 ³	Ray els.mesn. sönümlleme oranı.
c'	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki yol sönümlleme oranı.



Şekil 6. CI (Çift kirişi) modelinde farklı ray tiplerine sahip yolların frekansa bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün değişimi ($C=0,1 \text{ N/mm}^3$).

Çizelge 6. CI (Şekil 6.) modelinde kullanılan parametreler.

EI	N.m ²	Değişken (Çizelge 2.2)	Ray yatay rijitliği.
l_t	cm	230	Travers taban uzunluğu.
m_t	cm	30	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu.
b_t	cm	30	Travers taban genişliği.
A	cm	65	Travers aralığı.
m_1	kg/m	Değişken (Çizelge 2.2)	Birim uzunluktaki toplam ray kütlesi.
M_t	kg	260	Travers kütlesi.
m_2	kg/m	Eşitlikten (4.42)	Traversin birim kütlesi. ($M_t/2$)/($A/100$)
k_1	N.m ⁻¹	1120 10 ⁶	Ray els.mesn. rijitliği
k_1^1	N.m ⁻²	Eşitlik (4.21)	Birim uzunluktaki ray elastik mesnedi rijitliği.
k_2^1	N.m ⁻²	Eşitlik (4.18)	Birim uzunluktaki zemin ve balastın rijitliği.
c_1	Ns.m ⁻¹	120 10 ³	Ray els.mesn. sönümleme oranı.
c_1^1	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.22)	Birim uzunluktaki ray els.mesn. sönümleme oranı.
c_2	Ns.m ⁻¹	1.2 10 ⁵	Zemin ve balast sönüm. oranı.
c_2^1	Ns.m ⁻²	Eşitlik (4.23)	Birim uzunluktaki zemin ve balast sönüm. oranı.
C	N/mm ³	0,1	Yatak katsayısı.

Ek 2 Örnek ray elastik mesnetleri parametre tablosu (De Man, 2002).

Kod	Tipi	k (N/m)	c(Ns/m)
Fc9-1	Ray Els. Mesnedi 4.5 mm R54 için (Yeni Kalın)	1120e6	120e3
Fc9-2	Ray Els. Mesnedi 4.5 mm R54 için (Kalın Aşınmış)	2127e6	44.9e3
Fc9-3	Ray Els. Mesnedi 4.5 mm R54 için (Kalın Az Aşınmış)	1191e6	38.4e3
Fc9-4	Ray Els. Mesnedi 4.5 mm R54 için (Yeni İnce)	693e6	66.2e3

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

Axle:	Dingil
Bending Mode:	Eğilme modu
Bogie:	Boji
Catenary:	Katenar
Closed ring:	Kapalı halkalar
Concrete sleeper:	Beton Travers
Coordinate system:	Düzenli sistem
Corrugation:	Ondülasyon, dalgalanma
Cross receptance:	Geçişli tepki davranışı
Dash-pot:	Amortisör
Deterioration:	Bozulma
Dipped welds and joints:	Kaynaklanma Adhesiv Aşınma
Direct receptance:	Direkt tepki davranışı
Eigenvalue:	Özdeğer
Flexural:	Eğilme
Fourier Transform:	Fourier Dönüşümü
Frequency-Domain:	Frekans-Tanım-Alanı
Half space :	Yarı-mekan
Impact noise:	Çarpma sesi
Impulse-hammer:	Darbe çekiçi
Irregularities:	Düzensizlikler
Load/deflection:	Yük-yer değiştirme
Non Steady-state:	Durağan olmayan durum
Out-of-round wheel:	Tekerlek yassılaştırması
Pantograph:	Pantografin
Peak-to-peak:	En yüksek-en alçak
Pinned-pinned:	Tutuna-tutuna 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
Rail Roughness:	Ray pürüzlülüğü,
Rail weld:	Ray kaynağı
Railhead:	Ray üstü
Railhead:	Ray mantarı
Rail pad:	Ray elastik mesnedi
Rail seat:	Ray oturma yeri
Receptance:	Rayların gelen tahrik noktası altında yaptıkları deplasman, tepki davranışı.
Rolling contact fatigue:	Yuvarlanma kontak yorulması
Rolling noise:	Yuvarlanma sesi
Roll-slip:	Yuvarlan-kay mekanizması dalgalanmaların oluşumu mekanizması.
Roughness:	Pürüzlülük
Running surface of the rail:	Rayın yuvarlanma yüzeyindeki (ray mantar kenarının tekerleğe temas yüzeyi)
Shear factor K:	Kayma Faktörü
Shear waves:	Kayma titreşimi doğuran dalga

Shelling: Kabuklanma
Skewing: Rayın relativ dönmesi
Sleeper span: Travers aralığı
Sleeper: Travers
Squat: Uğuldama
Squeal: Uğuldayan raylar
Stationary point load: Hareketsiz noktasal yük
Stationary: Hareketsiz, sabit, durağan
Steady speed: Sabit hız
Steady-state: Durağan durum
Stick-Slip: Kayma yapışma.
Substrate: Altyapı
Time-Domain: Zaman-Tanım-Alanı
Time-Step integration: Zaman-Adım entegrasyonu
Torsional Mode: Burulma modu
Transfer Function: Büyütme faktörü
Transient component: Süreksiz Bileşen
Unsprung mass: Yaylandırılmamış kütle
Walking: Rayın Yürümesi
Wavelength: Dalga boyu
Wave-length: Dalga Boyu
Wave-type: Dalga Tipli
Wear: Aşınma
Wheel Roughness: Teker pürüzlülüğü
Wheel tread: Teker yuvarlanma yüzeyi
Wheel tread: Tekerlek üzerindeki pürüzlülükler
Wheel flat: Aplatı teker
Wheelset: Tekerlek takımı, tertibatı

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	04.03.1978	
Doğum yeri	Adana	
Lise	1988-1994	Haydarpaşa Lisesi
Lisans	1995-1999	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

Çalıştığı kurumlar

1999-1999	Şener Arda İnşaat Mühendislik Ltd Şti.
2000-2000	Askerlik Görevi
2000-2001	Yeditepe Gayrimenkul Yapı Denetim. A.Ş.
2001-Devam ediyor	Emay Uluslararası Müh. Müş. ve Tic. Ltd. Şti.