

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KENTİÇİ RAYLI SİSTEMLERİN ÜSTYAPISI VE**  
**DİNAMİK ANALİZİ**

İnş. Müh. Onur ÖZALP

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında**

**Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN**

**İSTANBUL, 2008**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KENTİÇİ RAYLI SİSTEMLERİN ÜSTYAPISI VE DİNAMİK ANALİZİ .....	i
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI ve KENTİÇİ RAYLI SİSTEM ÜSTYAPI TİPLERİ 3	
2.1 Demiryolu Üstyapısı .....	3
2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları .....	4
2.2.1 Ray .....	4
2.2.2 Travers .....	5
2.2.3 Bağlantı Elemanları .....	6
2.2.3.1 Ray-Travers Bağlantıları .....	6
2.2.3.2 Ray-Ray Bağlantıları .....	8
2.3 Balastlı Üstyapı .....	10
2.4 Rijit Üstyapı .....	10
2.5 Yol Yapısına Gelen Etkiler .....	18
3. TİTREŞİM ANALİZİ .....	20
3.1 Serbest, Sönümsüz ve Sönümlü Titreşimler .....	20
3.2 Titreşim Sönümleyiciler .....	24
3.2.1 Tekerlekten Sönümleyiciler .....	24
3.2.2 Raydan Sönümleyiciler .....	26
4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK ANALİZİ .....	27
4.1 İlgilenilen Frekans Limitleri .....	28
4.2 Yol Sisteminin Modellenmesi .....	28
4.2.1 Yol Modellerinin Hiyerarşisi .....	28
4.3 Yol Dinamiği için Kullanılabilecek Çözüm Teknikleri .....	31
4.3.1 Frekans Tanım Alanlı Çözüm Teknikleri .....	31
4.4 Seçilen Standart Yol Modeli için Dinamik Analiz ve Uygulamaları .....	31

4.4.1	Seçilen Standart Yol Modelinin Frekans Tanım Alanlı Çözüm Metodu ile Analizi	31
4.4.2	Sürekli Elastik Mesnetlenmiş Kirişlerin Modellenmesi ve Çözümü.....	32
4.4.3	Kayması Engellenmemiş (Kaymaya Karşı Serbest) Kiriş için Temel Bağıntılar.	33
4.4.4	Öngerilmeli Raylı Demiryolu .....	39
4.4.5	Çerçeve Traversli ya da Geniş Traversli Balastlı Demiryolu.....	44
4.4.6	Rijit Demiryolu ve Balastlı Uzun Traversli Demiryolunun Çift Kiriş Şeklinde Modellenmesi .....	48
4.5	Kayması Engellenmemiş Kiriş için Dinamik Çözüm.....	54
4.5.1	Farklı Ray Tipleri için Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm	56
4.5.2	Farklı Travers Aralıkları için Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm.....	58
4.5.3	Farklı Ray Altı Pedleri Kullanılması Halinde Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm .....	60
4.6	Elastik Mesnetli Kirişin Detaylı Travers Mesnet Modeli (DII) ile Çift Kiriş Modelinin (CII) Karşılaştırılması .....	62
4.7	Seçilen Yol Modeli için Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	66
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....		69
ÖZGEÇMİŞ.....		70

## SİMGE LİSTESİ

$A$	Travers (mesnet) aralığı.
$A_s$	Rayın kesit alanı.
$b_t$	Travers taban genişliği.
$c$	Yay sönümlenme katsayısı.
$c_b$	Balast tabakası ve zeminin sönümlenme katsayısı.
$c_b^1$	Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki sönümlenme katsayısı.
$c_{rp}$	Ray elastomer mesneti (ara mesnet) sönümlenme katsayısı.
$c_{rp}^1$	Birim uzunluktaki ara mesnet sönümlenme katsayısı.
$c_{sp}$	Travers taban mesnetinin sönümlenme katsayısı.
$c_{kr}$	Kritik sönüm katsayısı.
$e$	Hat genişliği.
$E$	Elatisite modülü.
$EI$	Rayın eğilme rijitliği.
$f$	Frekans.
$f_n$	Doğal frekans.
$f_s$	Sönümlü serbest titreşimlerin doğal frekansı.
$G$	Geçirgenlik faktörü.
$GA_s$	Kirişin kayma rijitliği.
$H_r$	Dinamik tepki (Birim yük etkisi altındaki dinamik çökme).
$I$	Atalet momenti.
$I_r$	Rayın atalet momenti.
$k$	Yay katsayısı.
$k_{dyn}$	Dinamik yay katsayısı.
$k^1$	Birim uzunluktaki yay katsayısı.
$k_b$	Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_{rot,b}$	Balast tabakası ve zeminin rotasyonel rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_b^1$	Balast tabakası ve zeminin birim uzunluktaki rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_{rp}$	Ray elastomer mesneti (ara mesnet) rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_{rot,rp}$	Ray elastomer mesneti (ara mesnet) rotasyonel rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_{rp}^1$	Birim uzunluktaki ara mesnet rijitlik (esneklik) katsayısı.
$k_{sp}$	Travers taban mesnetinin rijitlik (esneklik) katsayısı.
$L$	Travers Aralığı.

$m$	Kütle.
$m_r$	Birim uzunluktaki ray kütlesi.
$m_s$	Travers kütlesi.
$m_t^1$	Birim uzunluktaki travers kütlesi.
$M(x)$	Kirişin eğilme momenti.
$M_{din}$	Dinamik eğilme momenti.
$N$	Normal kuvveti.
$P$	Sistemi zorlayan kuvvet.
$Q$	Statik tekerlek yükü.
$Q_{(x)}$	Kirişin kesme kuvveti.
$Q_\omega$	Yanal tepki kuvveti.
$R$	Genlikler oranı (Büyütme katsayısı).
$R_{max}$	Maksimum genlikler oranı.
$T$	Periyot.
$\omega$	Dairesel (Açısal) frekans.
$\omega_n$	Doğal dairesel (açısal) frekans.
$\omega_s$	Sönümlü serbest titreşimlerin doğal dairesel (açısal) frekansı.
$x$	Titreşimin genliği.
$x_m$	Mesnetin genliği.
$x_{st}$	Sabit genlikli harmonik kuvvetle zorlanmış sistemin statik yer değiştirmesi.
$\zeta$	Sönüm faktörü.
$\beta_{stat}$	Statik yatak katsayısı.
$\beta_{dyn}$	Dinamik yatak katsayısı.
$\beta_{dyn,spbf}$	Detaylandırılmış mesnetin dinamik yatak katsayısı.
$B_r$	Eğilme rijitliği.
$\eta$	Frekanslar oranı.
$\nu$	Poisson oranı.
$\lambda_s$	Travers uzunluğu.
$\omega_{(x)}$	Kirişin yanal deplasmanı.
$\Psi_{(x)}$	Kirişin enine eğimi

## KISALTIMA LİSTESİ

ATD	Asfalt taşıma tabakası üzerine direkt döşeme.
ÇK	Çift giriş.
ERC	Embedded rail construction : Gömülü raylı yol yapısı.
FRF	Frequency response function : Frekans yanıt fonksiyonu.
LRT	Light Rail Transit : Hafif raylı toplu taşıma sistemi.
LVT	Low Vibration Track : Düşük vibrasyonlu yol.
PVC	Polyvinyl chloride.
SFF	Schwingungsgedaempfte Feste Fahrbahn : Titreşim sönümleyici rijit üstyapı.
NJT	New jersey transportation.
TK	Tek giriş.
TT	Taşıma Tabakası.
UIC	Union Internationale des Chemins de fer : Uluslararası Demiryolları Birliği.
ÜK	Üç giriş.

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Demiryolu Üstyapısı'nı oluşturan elemanlar (Erkul, 2002).....	3
Şekil 2.2 Ray üretimi (Esveld, 2003). .....	4
Şekil 2.3 Ray tipleri.....	5
Şekil 2.4 Travers yerleşimleri (Ludvig, 2004). .....	5
Şekil 2.5 Ahşap travers, betonarme travers ve çelik travers (Esveld, 2003). .....	6
Şekil 2.6 Bağlantı Sistemleri (Ludvig, 2004). .....	6
Şekil 2.7 Tirfon.....	7
Şekil 2.8 Vossloh W14, Pandrol ve Nabla direk bağlantı elemanları (Esveld, 2003).....	7
Şekil 2.9 Vossloh System 336 endirek bağlantı elemanı (Esveld, 2003). .....	7
Şekil 2.10 Conta Yerleşimi.....	8
Şekil 2.11 Cebire. ....	8
Şekil 2.12 Genleşme Cebiresi.....	8
Şekil 2.13 Alüminotermite kaynağı uygulaması. ....	9
Şekil 2.14 Mobil Işık kaynağı uygulaması (Esveld, 2003). ....	9
Şekil 2.15 Balastlı üstyapı (Esveld, 2003).....	10
Şekil 2.16 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli Rheda tipi rijit üstyapı (Esveld, 2003). .....	13
Şekil 2.17 TT içine gömülü travers mesnetli Porr tipi rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002). .....	13
Şekil 2.18 LVT, TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Ludvig, 2004). .....	13
Şekil 2.19 Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2003). .....	14
Şekil 2.20 Monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2003). .....	14
Şekil 2.21 Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (Esveld, 2001). .....	14
Şekil 2.22 Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı (tek ray) kesiti (Erel, 2002). .....	15
Şekil 2.23 Infundo üstyapı sistemi (Quante,2001). .....	16
Şekil 2.24 Gömülü ray yapısı (Ludvig,2004). .....	17
Şekil 2.25 Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi (Esveld, 2001). .....	17
Şekil 2.26 Yol yapısına etki eden kuvvetler (Yalçın, 2006). .....	18
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 (Yılmaz, 2004). .....	22
Şekil 3.4 VSG Titreşim sönümleyici takılmış NJT Bochum 54 elastik ray (Manning, 1985). .....	25
Şekil 3.5 Titreşim sönümleyici aparatı takılmış ve takılmamış tekerlekteki sürtünme FRF kuvvet büyüklüğü (Manning, 1985). .....	25

Şekil 3.6 115 lb/yd RE Ray'a takılmış sönümlenme aparatı (Manning, 1985).....	26
Şekil 4.1 Yol Modellerinin Hiyerarşisi (Knothe ve Grassie,1993). ....	1
Şekil 4.2 Farklı demiryolu tiplerinin şematik gösterimi (Knothe, 2001). ....	32
Şekil 4.3 Elastik mesnetlenmiş kayması engellenmemiş kiriş (Knothe, 2001).....	33
Şekil 4.4 Elastik yataklanmış kiriş için detaylı travers mesnet modeli. (a) Balast kütesiz (b) Balast kütleli (Knothe, 2001). ....	37
Şekil 4.5 Elastik mesnetlenmiş öngerilmeli kiriş (Knothe, 2001).....	40
Şekil 4.6 Elastik mesnetlenmiş öngerilmeli kiriş (a) Normal kesit (b) Düşey doğrultudaki bir kesit parçası (c) Kesitte ( $Qw^l$ ) teriminin ihmal edilmesi (Knothe, 2001). ....	40
Şekil 4.7 Özdeğerin kompleks sayılarla gösterimi (Knothe, 2001).....	41
Şekil 4.8 Çerçeve traversli demiryolunun (raysız) sistem taslağı (Knothe, 2001).....	45
Şekil 4.9 Çerçeve travers ya da geniş travers için mekanik bir dönüşüm modelinin geliştirilmesi (a- Elastik mesnetlenmiş travers kütesi, b- Dönme yayı ve dönme sönümü olan travers kütesi, c- Sürekli elastik mesnetli ve dönme mesnetli bölünmüş travers kütesi) (Knothe, 2001 ). ....	46
Şekil 4.10 Rijit demiryolu ve balastlı uzun traversli demiryolu (boyuna traversli demiryolu) için mekanik modelleme (Knothe, 2001).....	49
Şekil 4.11 Statik yükleme durumunda rijit demiryolu ve boyuna traversli demiryolu için elastik mesnetlenmiş çift kiriş modeli (Knothe, 2001). ....	49
Şekil 4.12 Düzeltilmiş edilmiş mesnetli çift kirişten dinamik duruma geçiş (Knothe,2001)...	51
Şekil 4.13 Zwp 104 ara plağı için 18 kN ve 40 kN önyükleme altında yapılan ölçüm sonuçlarına göre elde edilen dinamik elastisite değerleri (gerçek ve imajiner kısım için) (Knothe, 2001).....	53
Şekil 4.14 UIC 60 Ray tipi için Dinamik Tepki-Frekans grafiğı. ....	54
Şekil 4.15 S49, S54 ve UIC 60 ray tipleri için Dinamik Tepki-Frekans grafiğı. ....	56
Şekil 4.16 0.60 m, 0.70 m ve 0.75 m travers aralıkları için Dinamik Tepki-Frekans grafiğı...	58
Şekil 4.17 1. Tip, 2. Tip ve 3. Tip ray altı pedleri için Dinamik Tepki-Frekans grafiğı. ....	60
a)Elastik Mesnetli Kirişin b) Çift Kiriş Modeli (CII) .....	62
Şekil 4.18 Karşılaştırılan dinamik yol modelleri (Knothe, 2001). ....	62
Şekil 4.19 Elastik mesnetli kirişin detaylı travers mesnet modeli (DII) ve çift kiriş modeli (CII) için Dinamik Tepki-Frekans eğrilerinin karşılaştırılması. ....	64

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Yapı tipi ve döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002). ....	12
Çizelge 3.1 Bochum 54 Tekerleği için Tekerlekten Sönümleyici Aparat Takılmış ve Takılmamış Durumları İçin Sönümlenme Oranları (Manning, 1985). ....	24
Çizelge 4.1 Yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modeller (De Man, 2002). ....	30
Çizelge 4.2 Şekil 4.14 için hesaplamalarda kullanılan değerler. ....	55
Çizelge 4.3 Şekil 4.15 için hesaplamalarda kullanılan parametreler. ....	57
Çizelge 4.4 Şekil 4.16 için hesaplamalarda kullanılan değerler. ....	59
Çizelge 4.5 Şekil 4.17 için analizde kullanılan değerler. ....	61
Çizelge 4.6 Şekil 4.19 için analizde kullanılan parametreler. ....	65

## ÖNSÖZ

“Kentiçi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi” konulu bu tez çalışması sırasında benimle bilgisini, tecrübesini ve kaynaklarını paylaşan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. İsmail Şahin’e paylaşımlarından, desteğinden ve göstermiş olduğu sabırdan ötürü; bilgi, tecrübe ve kaynaklarından faydalanmış olduğum Prof. Dr. Aydın Erel’e birikimini bana aktardığından ötürü, Arş. Gör. İnş. Y. Müh. N. Sevgi Yalçın’a desteklerinden ötürü ve bu çalışmanın her aşamasında yanımda olduklarını hissettiğim sevgili aileme desteklerinden ötürü teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

## ÖZET

Son yıllarda büyük gelişim gösteren demiryolları, ulaşım sistemleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Globalleşen dünyada yolcu ve yük taşımacılığına olan ihtiyaç oldukça artmıştır. Kentiçi trafik ihtiyacının artmasından ötürü, raylı sistem kapasitelerinin artırılması ihtiyacı hissedilmiştir. Kapasitenin artması, hız ve dingil başına etkiyen yüklerde artışlara neden olarak, raylı sistem üstyapısında dinamik zorlanma, üstyapı elemanlarında yorulma hasarları gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Bu problemler sonucunda bakım ve onarım masraflarında ciddi artışlar meydana gelmektedir. Tüm bu olumsuzlukları en aza indirmek için yol tasarımında hem rijit üstyapı seçenekleri hem de balastlı üstyapı seçeneklerinde uygun tasarım ve üstyapı bileşenleri araştırılmaktadır.

Demiryolu sistemleri elastik yapılarından ötürü hız ve dingil yüklerindeki artışa bağlı olarak oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvete maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler sistemde çökmeler meydana getirmektedir. Yük taşıyan her yapıda beklendiği gibi belirli sınırlar dahilinde demiryolu sistemlerinde de çökmelerin olması sürpriz değildir. Oluşacak bu çökmelerin maksimum değerinin hangi frekansta oluşacağını bilmemiz, rezonans riskini en aza indirmemizde bize yardımcı olacaktır. Zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı ile sistemin doğal frekansının çakışması durumunda, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelecektir. Bu tip sorunlarla karşılaşılması için, yapacağımız kapsamlı bir dinamik analiz yardımıyla uygun yol tipini, uygun yol bileşenleri ile birlikte seçebiliriz.

Bu çalışmada “Kentiçi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi” konusu incelenmiştir. İlk bölümde konuya kısaca giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde öncelikle kentiçi demiryolu üstyapı tipleri ile yol yapısına gelen etkiler kısaca ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, “Titreşim Analizi” başlığı altında, titreşim kavramı, titreşim çeşitleri ve titreşim sönümleyiciler ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ise, yol sisteminin modellenmesi, yol dinamiği için kullanılacak çözüm teknikleri incelenmiştir. Seçilen standart yol modeli için frekans tanım alanlı çözüm metodu ile analitik çözümler yapılarak, farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar ve daha önceden benzer konuda yapılmış çalışmada elde edilen sonuç ile yapılan bir karşılaştırma sunulmuştur. Bu çalışmada bir önce yapılan çalışmadan bir adım ileri gidilerek, söz konusu modelin travers altında bulunan tabaka detaylandırılmıştır. Yapılan bu detaylandırma sonucunda tüm rijit üstyapı tipleri için kullanılacak bir model sunulmuştur. Sonuçlar bölümünde ise, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından genel tavsiyelerde bulunulmuş ve bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler ışığında da birtakım önerilere yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Demiryolu üstyapısı, kentiçi raylı sistemlerin üstyapısı, demiryolunun dinamik modellenmesi, dinamik analiz, titreşim, frekans tanım alanı.

## ABSTRACT

The railways which have been improved rapidly, have an important role in the transportation systems. The requirement to the passenger and freight transportation increased remarkably in the globalised world. Because of the increase of the urban traffic requirement, there is a need to escalate the capacity of the railway systems. Escalation of the capacity affects the operation speed and axle loads. By that effect, some kind of problems like dynamic forces, the damages of track components, occurs on the superstructure of the railways. These problems cause increase in maintenance costs and to minimise the possible problems, suitable design techniques and track components for ballastless and ballasted tracks are still being investigated.

Because of their elastic properties, railway systems are subjected to excessive vibrations and forces due to high velocities and increased axle loads. These loads are the cause of settlements in the systems. As expected in all structures, which carry loads, the settlements of the railway systems are not a surprise in some limits. If we knew frequency of the maximum settlement, it would be very helpful to minimise the resonance risk. Since one or more of the forced vibration frequency coincides with the natural frequency of the system, resonance vibrations, which are destructive because of their magnitude may occur. Therefore; to prevent these problems we can choose the suitable superstructure type and track components by comprehensive dynamic analysis.

In this study, a research about “Urban Rail Systems and Dynamic Analysis of the Superstructure” is presented. After giving a brief introduction in the first section, the type of railway track structures and forces acting on track structure are primarily described in the second section of this study. In the third section titled as “Vibration Analysis”, expressions about vibration, vibration types and the vibration absorbers are explained. In the fourth section, modelling of the track structure, solution techniques that can be used for necessary dynamic analysis during design stages are examined. Analytical solutions computed by frequency domain method for the selected standard track model according to different track components and a comparison with the previous study about this subject are presented. In this study the subject is taken one step ahead from the previous study by modelling the layer under sleeper in detail. By this way a model is presented for all rigid superstructure types. As a conclusion, general recommendations are presented to give an idea and a suggestion for future researches and studies.

**Keywords:** Superstructure of railway, superstructure of urban railway, dynamic modeling of railway track, dynamic analysis, vibration, frequency domain.

## 1. GİRİŞ

Raylı ulaştırma sistemleri, günümüzdeki yapısına ve boyutlarına ulaşıncaya dek, teknik ve ekonomik gereksinimlerle değişik aşamalar geçirmiştir. Stephenson'un 1825 yılında Stockton-Darlington arasında döşettirdiği taş mesnetler üzerindeki ve açıklıklarda balık karnı kesit verilmiş olan dökme demirden rayların yerini, bugün kırma taş tabakasından oluşan bir yatak üzerine rijit ya da elastik olarak bağlanmış olan geniş tabanlı ray dizileri almıştır.

Günümüzde hem işletim hem de ekonomik açıdan sistemlerde aranan en önemli özellik, yüksek hız ve hafiflik olmuştur. Hafifliği sağlamak amacıyla, dinamik sistem kesitleri daha küçük hale getirilmiştir. Bu sebepten dolayı sistemler daha elastik bir hal almışlardır. Dinamik sistemler, bu değişimlerden ötürü maruz kaldıkları kuvvetlerin ve momentlerin etkisinde daha kolay deforme olmaktadır. Aynı zamanda daha kolay titreşen dinamik birer sisteme dönüşmektedirler. Sistemlerin tasarımı esnasında gerekli tedbirlerin alınması durumunda söz konusu deformasyonların minimum seviyeye inmesi mümkündür. Bu tedbirler alınmadığı takdirde, sistemlerin işletilmesi esnasında sistemi oluşturan elemanlar erken yorulmalara ve kırılmalara maruz kalırlar. Taşıt ve yol sisteminde oluşabilecek hasar ve düzensizlikleri ve bakım masraflarını minimuma indirmek, yolcu konfor ve güvenliğini en iyi şekilde sağlayabilmek için demiryolu yapısının ve yol elemanlarının dinamik davranışlarının çok iyi bilinmesi ve uygun sonuçları araştırmaya yönelik dinamik analizlerin yapılması gerekir.

Demiryolu sistemlerinin tasarımları esnasında doğru tanımlanmış dinamik modellerin kullanılması ve bu modellere ilişkin dinamik analizlerin yapılması gerekmektedir. Ülkemizde çoğu zaman projelendirme esnasında bu konuya gerekli önem verilmemektedir. Bu ihmalkarlık ne yazık ki, sistemin işletmeye açılmasından kısa bir süre sonra çok pahalı önlemler alınmasına neden teşkil etmektedir. Oysa projelendirme esnasında yapılması gereken analizler sayesinde, projenin kendi özellikleri kapsamında uygun yol elemanları ve uygun yol tipleri seçilebilir. Elbetteki metal elemanların kullanıldığı sistemlerde ondülasyonların oluşması beklenmektedir. Aynı şekilde yolun stabilitesinde de bozulmalar olacaktır. Ancak bu bozulmalarla meydana gelişlerini geciktirmek, uygun sistem seçimi yapılması suretiyle, bizim elimizdedir.

Projenin işletmeciye maliyetini, yatırım maliyeti ve işletme maliyeti olarak düşünmemiz gerekmektedir. Alınması gerekli önlemler ilk etapta yatırım maliyetini artırırsa dahi, proje ömrü süresince işletme maliyetindeki gereksiz masrafların oluşmaması sayesinde, toplam proje

maliyetinde önemli kazanımlar elde edilecektir.

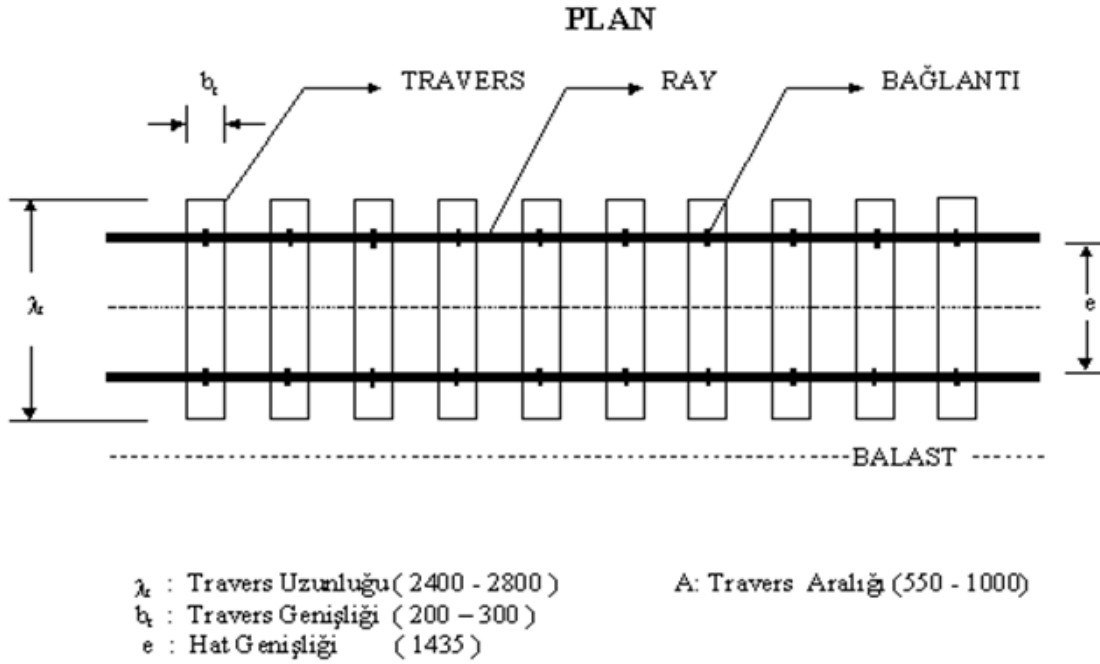
Bu çalışmada “Kentiçi Raylı Sistemlerin Üstyapısı ve Dinamik Analizi” konusu incelenmiştir. İlk bölümde konuya kısaca giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümde öncelikle kentiçi demiryolu üstyapı tipleri ile yol yapısına gelen etkiler kısaca ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, “Titreşim Analizi” başlığı altında, titreşim kavramı, titreşim çeşitleri ve titreşim sönümleyiciler ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ise, yol sisteminin modellenmesi, yol dinamiği için kullanılacak çözüm teknikleri incelenmiştir. Seçilen standart yol modeli için frekans tanım alanlı çözüm metodu ile analitik çözümler yapılarak, farklı yol bileşenlerinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar ve daha önceden benzer konuda yapılmış çalışmada elde edilen sonuç ile yapılan bir karşılaştırma sunulmuştur. Bu çalışmada Sevgi Yalçın tarafından 2006 yılında hazırlanan “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi” isimli tez çalışmasından bir adım ileri gidilerek, söz konusu modelin travers altında bulunan tabaka detaylandırılmıştır. Yapılan bu detaylandırma sonucunda tüm rijit üstyapı tipleri için kullanılacak bir model sunulmuştur. Sonuçlar bölümünde ise, gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından genel tavsiyelerde bulunulmuş ve bu çalışmanın sonucunda elde edilen bilgiler ışığında da birtakım önerilere yer verilmiştir.

## 2. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI ve KENTİÇİ RAYLI SİSTEM ÜSTYAPI TİPLERİ

### 2.1 Demiryolu Üstyapısı

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.

Demiryolu araçlarının tekerlekleri 'ray' dediğimiz sürekli iki sıra metalik çubuk üzerinde yuvarlanma hareketi yaparlar. Raylar da travers adı verilen ve rayların altında onlara dik yönde belirli aralıklarla yer alan mesnetlere oturtularak tespit edilmişlerdir. Böylece raylarla traversler Şekil 2.1'de de görüleceği gibi bir çerçeve oluştururlar.



Şekil 2.1 Demiryolu Üstyapısı'nı oluşturan elemanlar (Erkul, 2002).

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

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

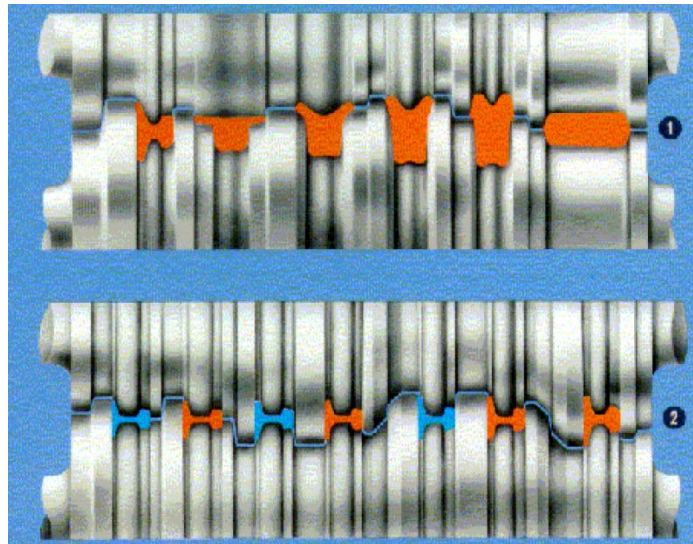
Demiryolu üstyapısının görevleri şunlardır (Erel, 2005):

- 1) Taşıtlara istenilen geometrik ve fiziksel standartlarda, düzgün, prüzsüz ve güvenli bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- 2) Taşıtların oluşturduğu dinamik etkiler ile diğer dış etkileri güvenlikle (hiçbir kalıcı yer ve şekil değiştirme yapmadan) karşılamak, bunları (elastik şekil değiştirmeler ile) kısmen azaltarak geniş bir yüzey boyunca altyapıya iletmek,
- 3) Bu görevleri düşük maliyetle uzun bir süre sürdürmek.

## 2.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları

### 2.2.1 Ray

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

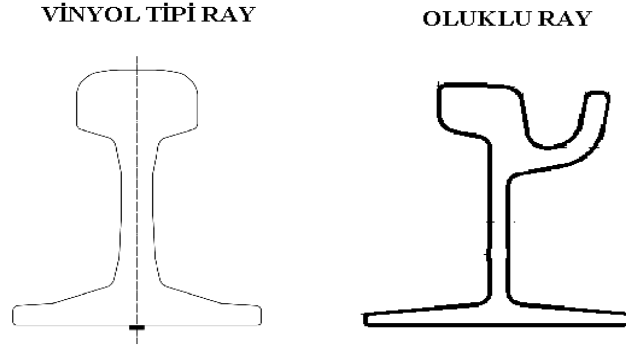


Şekil 2.2 Ray üretimi (Esveld, 2003).

Ray, 5-7 ton ağırlığındaki çelik bloklara 1250 °C sıcaklıkta haddeleme yöntemi ile Şekil 2.2'deki gibi enkesit tipi verilerek elde edilir. Bir bloktan yaklaşık 100 m uzunluğunda ray

elde edilir ve bu ray 12, 24 ya da 36 m'lik boylarda kesildikten sonra sıcak yataklarda yavaşça soğutulur. Gövde ve taban kısımları daha kalın olan ray mantarından önce soğuduğundan büzülme uğrar ve rayda bir eğrilme oluşur. Eğri raylar rulmanlar arasından geçirilerek doğrultulurlar; ancak bu işlem rayda  $100 \text{ N/mm}^2$  değerlerine çıkabilen arzu edilmeyen içsel gerilmelerin oluşmasına yol açar (Erel, 2005).

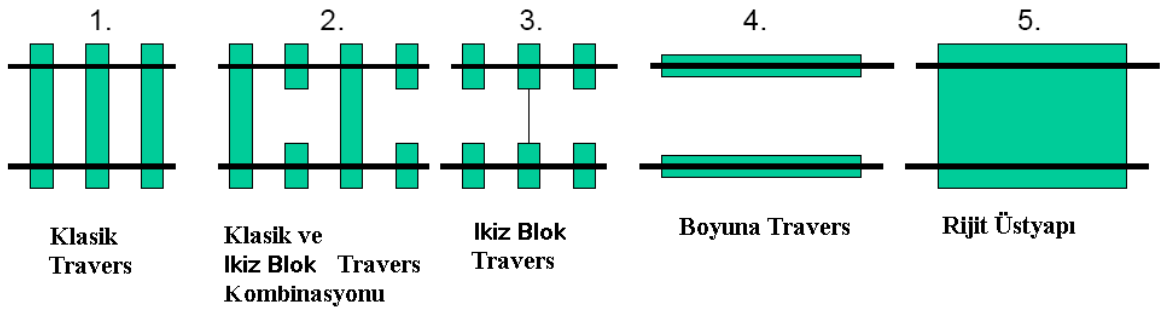
Temelde iki ray tipi vardır; birçok demiryolunda halen kullanılan tek mantarlı vinyol tipi ray ve oluklu ray (Şekil 2.3). Oluklu ray özellikle kentiçi demiryolu sistemlerinde kesintisiz akım olarak tabir edilen, demiryolu ve karayolu taşıtlarının kesiştiği bölümlerde tekerleğe bağımsız bir yuvarlanma yüzeyi sağlaması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Ray tipleri.

### 2.2.2 Travers

Traversler, yol eksenine dik veya paralel yönde ve belirli aralıklarla, rayların altına balast tabakası içine gömülü olarak döşenen enine ve boyuna kirişler olup, raylara mesnet görevi yapmaktadırlar. Traversler Şekil 2.4'te gösterildiği gibi çeşitli şekillerde yerleştirilebilirler.



Şekil 2.4 Travers yerleşimleri (Ludvig, 2004).

Günümüzde 3 tür travers kullanılmaktadır; ahşap, betonarme ve çelik traversler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Ahşap travers, betonarme travers ve çelik travers (Esveld, 2003).

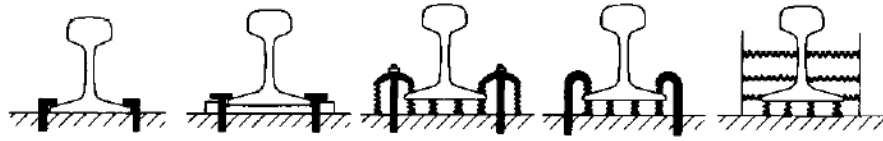
## 2.2.3 Bağlantı Elemanları

### 2.2.3.1 Ray-Travers Bağlantıları

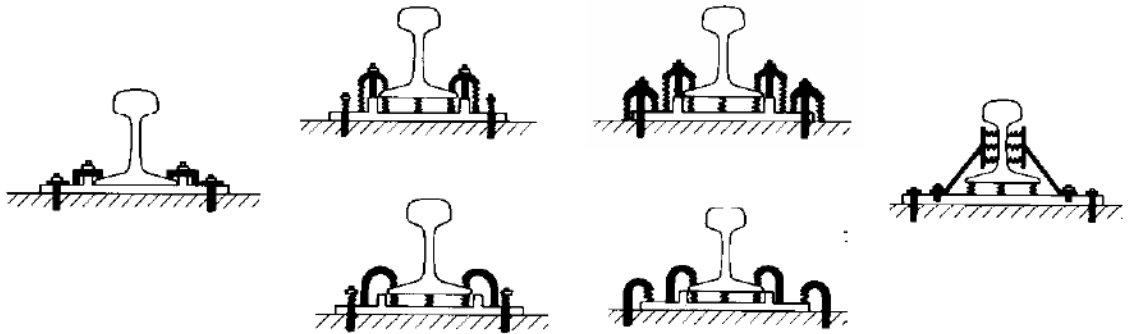
Demiryolu arabalarından yola gelen dinamik etkiler biri düşey doğrultuda, diğer ikisi yatayda yol eksenine paralel ve dikey olmak üzere üç doğrultuda toplanabilir. Bu üç doğrultudaki kuvvetler altında rayların traverslere raptı icap etmekte ve bağlantı elemanlarının şekil ve cinslerinin de ona göre seçilmesi gerekmektedir (Şekil 2.6).

### BAĞLANTI SİSTEMLERİ

#### Direk Bağlantılar

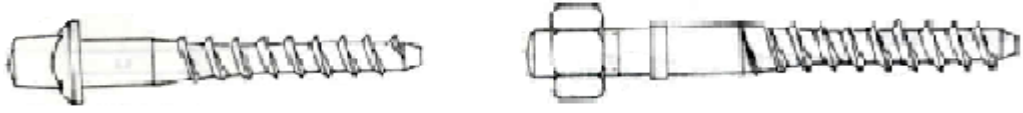


#### Endirek Bağlantılar



Şekil 2.6 Bağlantı Sistemleri (Ludvig, 2004).

Vinyol tipi rayların ahşap traverslere raptı eskiden ‘krampon’ adı verilen demir çivilerle yapılırdı. Bugün daha ziyade, traversten sökülmesi krampondan daha zor olan ve ‘tirfon’ adı verilen bir burgulu bağlantı elemanı kullanılmaktadır (Şekil 2.7).

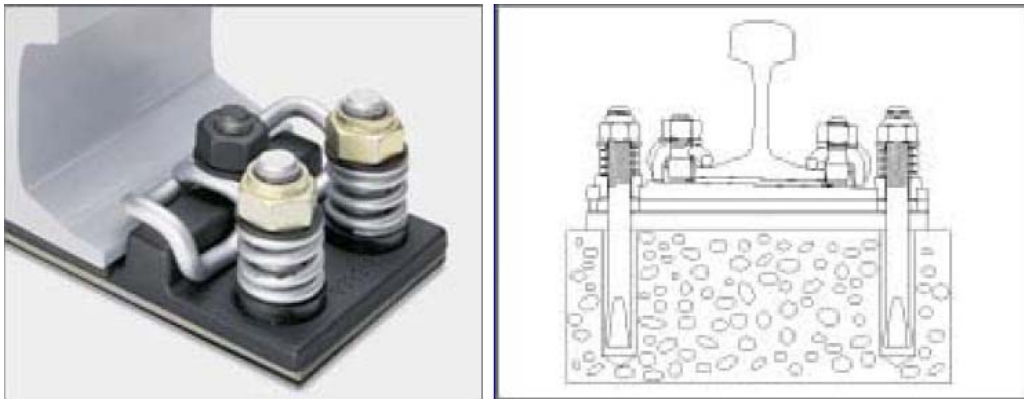


Şekil 2.7 Tirfon.

Günümüzde rayların traverslere zaptında değişik tipte birçok elastik bağlantı elemanı kullanılmaktadır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da günümüzde en çok kullanılan direk ve endirek sistemler görülmektedir.



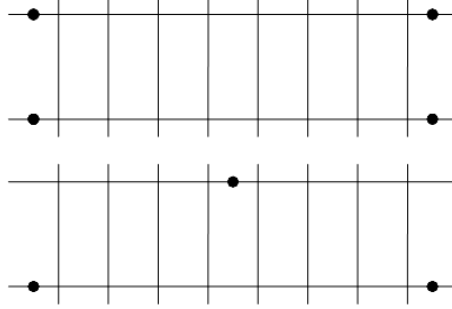
Şekil 2.8 Vossloh W14, Pandrol ve Nabla direk bağlantı elemanları (Esveld, 2003).



Şekil 2.9 Vossloh System 336 endirek bağlantı elemanı (Esveld, 2003).

### 2.2.3.2 Ray-Ray Bağlantıları

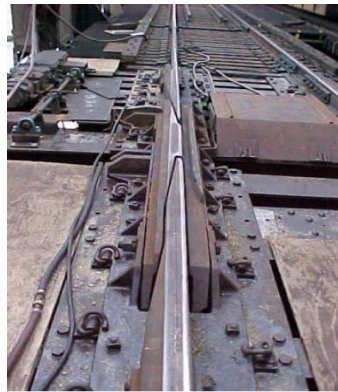
Ray dizileri, belirli uzunluktaki rayları uç uca getirilmesi ile oluştururlar. Bu şekilde oluşan ek yerlerine 'conta' adı verilir (şekil 2.10). Bir hat boyunca conta yerleri birbirleriyle aynı hizada ve şaşırtmacalı olarak iki şekilde dzenlenebilir. Raylar contalarla 'cebire' adı verilen iki profilli levha ile bağlanır (şekil 2.11, şekil 2.12).



şekil 2.10 Conta Yerleşimi.



şekil 2.11 Cebire.



şekil 2.12 Genleşme Cebiresi.

Ayrıca günümüzde raylar özel bazı metotlarla da kaynaklanarak birbirlerine bağlanmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan termit kaynak ve ışık kaynağıdır. Ülkemizde termit kaynak kentiçi raylı sistemlerin birçoğunda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 2.13'te İstanbul'da 2004 ile 2006 yılları arasında inşa edilen Zeytinburnu-Bağcılar Tramvay projesi esnasında gerçekleştirilen alüminotermit ray kaynağı uygulaması görülmektedir. Öncelikle kalıp kovası içerisine bırakılan termit malzeme 2400 °C sıcaklıkta eritilir ve bunun ardından soğumaya bırakılır. Soğumadan sonra kalıp açılır, fazla kısım kırılır. Ray flanşında bulunan malzeme ise flanş profiline uygun profildeki ekipman ile tesviye edilerek, düzgün bir yüzey sağlanır.

Işık kaynağı ise ilk olarak Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi kapsamında, Ankara-Eskişehir bölümünde kullanılmıştır. Şekil 2.14'te mobil ışık kaynağı uygulaması görülmektedir.



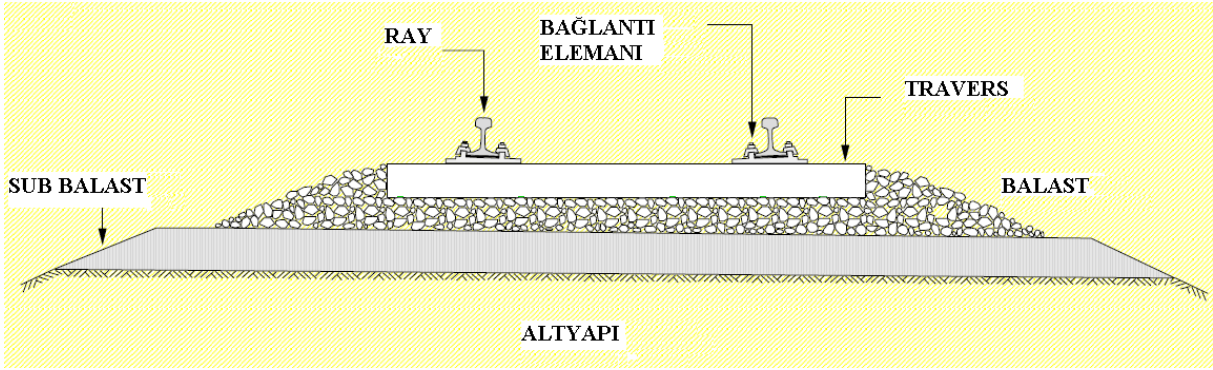
Şekil 2.13 Alüminotermit kaynak uygulaması.



Şekil 2.14 Mobil ışık kaynağı uygulaması (Esveld, 2003).

### 2.3 Balastlı Üstyapı

Dünyada kullanılan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı, balast tabakası üzerine döşenmiş ahşap, çelik veya betonarme traverslere mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmektedir. Balastlı üstyapı elemanları balast tabakası, sub balast tabakası, traversler, çelik ray ve bağlantı elemanlarından oluşur (Şekil 2.15). Yapım, bakım, onarım kolaylıkları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle balastlı üstyapı sistemlerinin gelecekte de uzun bir süre kullanılacağı aşikârdır. Fakat rijit üstyapının maliyeti daha fazla olmasına ve kalifiye işçilik gerektirmesine karşın, kullanılabilirlik süresi klasik üstyapıdan daha fazla, bakımı için harcanan zaman ve maliyet ise daha azdır. Bu durum, günümüzün gittikçe artan trafik yoğunluğunda bakım ve yenileme işlemlerinin yapılabilmesi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.15 Balastlı üstyapı (Esveld, 2003).

### 2.4 Rijit Üstyapı

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

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

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

düşürülmesi sağlanabilecektir.

Rijit üstyapının en önemli nitelikleri; gevşek bağlantılı balastta yetersiz olan yük iletiminin, yükü dağıtan daha rijit bir tabaka ile sağlanması ve balastlı üstyapının etkili elastikliğinin, yol boyunca ray tabanının altına ya da travers tabanı altına konulan elastik elemanlarla sağlanmasıdır.

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

- Taşıma tabakası içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (PORR - Avusturya, Rheda, Züblin - Almanya, Stedef, Sonneville LVT-Fransa) (Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18),
- Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (ATD sistemi - Nant, GETRAC) (Şekil 2.19),
- Monolitik rijit üstyapı sistemi (Rasengleis) (Şekil 2.20),
- Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (German Prefabric – Almanya, Shinkansen - Japonya, Güney Kore, IP İtalya) (Şekil 2.21),
- Gömülü raylı üstyapı (Embedded Rail Structure) (Infundo üstyapı sistemi - Hollanda) (Şekil 2.23),
- Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı sistemi (Hollanda Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi) (Şekil 2.25).

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

- Demiryolu türüne göre,
- Uygulama yerine göre,
- Yapı tipi ve döşenme şekline göre (Çizelge 2.1),
- Ülkeye özgün gelişmelere göre,
- Kronolojik gelişime göre.

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

Uygulama yerine göre rijit üstyapı tipleri şunlardır:

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

Rijit üstyapıya özellikle tünellerde gereksinim duyulmaktadır. Ancak kentlerarası yüksek hızlı demiryollarında toprak gövde üzerindeki balastlı üstyapı yerine, fazla bakım gerektirmeyen iyi bir seyir yolu sağlayabilmek için, rijit üstyapı kullanılması daha uygundur. (Yılmaz, 2004)

Rijit üstyapı sistemleri genel olarak yapı tipi ve döşeme şekline göre sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.1). Döşeme şekline göre rijit üstyapı tipleri mesnetli döşeme ve sürekli döşeme olmak üzere başlıca iki grupta incelenebilir.

Çizelge 2.1 Yapı tipi ve döşeme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002).

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

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

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

Gömülü raylı yol tipinin yapı prensibi, rayların sürekli olarak elastik mesnetlenmiş (yataklanmış) olmasıdır. Raylar, beton taşıma tabakası üzerinde yol ekseni doğrultusunda ve beton ya da istisnai durumlarda çelik malzemedendir yapıları paralel iki kirişin (boyuna travers) içlerinde oluşturulan oluklarda, doğal ya da kauçuk yataklar içine döşenmektedir (Yılmaz, 2004).



Şekil 2.16 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli Rheda tipi rijit üstyapı (Esveld, 2003).



Şekil 2.17 TT içine gömülü travers mesnetli Porr tipi rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2002).



Şekil 2.18 LVT, TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Ludvig, 2004).



Şekil 2.19 Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2003).



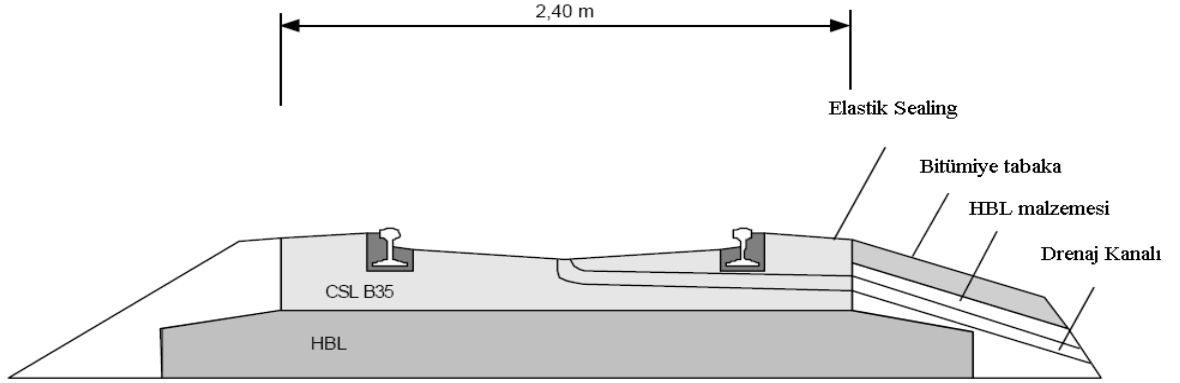
Şekil 2.20 Monolitik rijit üstyapı sistemi (Erkul, 2003).



Şekil 2.21 Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (Esveld, 2001).



sistemi, Hollanda'nın yanısıra İngiltere, İspanya, Macaristan ve Hong Kong'da kullanılmaktadır. Bu yol tipi "U" kesitindeki betonarme boyuna kirişler içinde de uygulanabilir ve üst yüzeydeki boş alanlar çimle kaplanabilir. Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı tipi Almanya'da bugüne dek sadece tramvay yollarında kullanılmıştır.

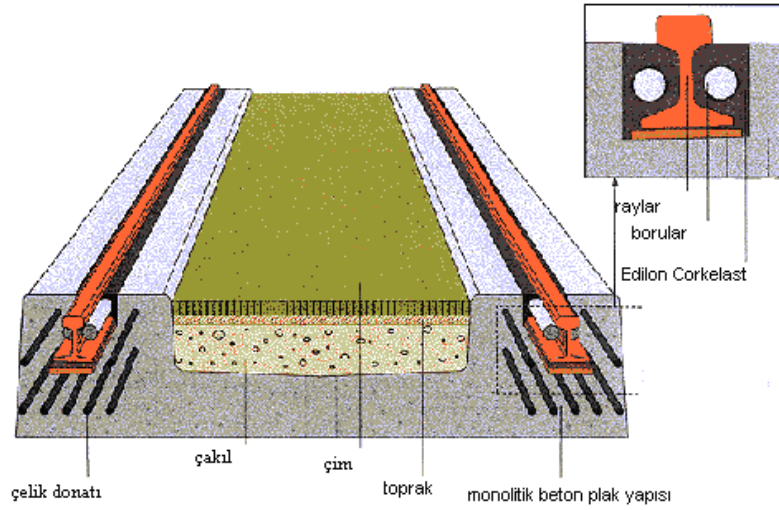


Şekil 2.23 Infundo üstyapı sistemi (Quante,2001).

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

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

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 (Şekil 2.24). Kullanılmakta olduğu önemli uygulama yerleri, Norveç'te hafif raylı sistem ve Madrid Metrosu'nun 100 km'lik bir kısmıdır (Şekil 2.25).



Şekil 2.24 Gömülü ray yapısı (Ludvig,2004).

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



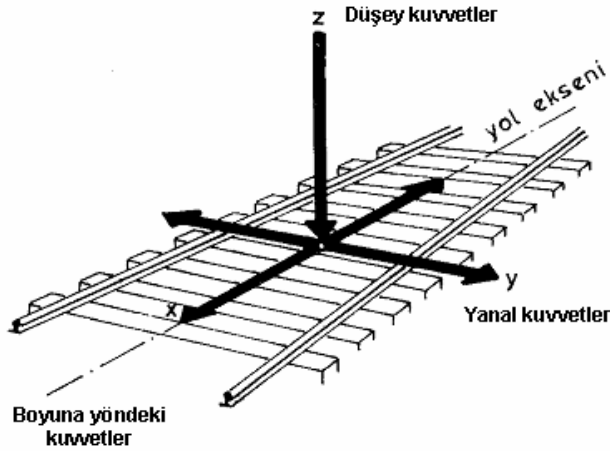
Şekil 2.25 Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi (Esveld, 2001).

## 2.5 Yol Yapısına Gelen Etkiler

Demiryolu yapısının stabilitesine ve dinamik davranışına değinmeden önce, yol yapısına etki eden zorlayıcı kuvvetlerden bahsetmek gerekir. Genel olarak yol yapısını zorlayan etkileri düşey, yanal ve boyuna yöndeki etkiler olmak üzere üç ayrı şekilde sınıflandırabiliriz (Şekil 2.26). Taşıt-yol etkileşimine, seyir koşullarına, yol yapısının özelliklerine, taşıt özelliklerine sıcaklık gibi çevresel faktörlere vb. bağlı olarak ortaya çıkan ve demiryolu yapısını zorlayan bu etkiler kökenlerine göre aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler:

1. Taşıtların oluşturduğu etkiler.
2. Yolun geometrik karakteristikleri, taşıtların yapısal özellikleri ve demiryolu üzerindeki hareket koşullarının oluşturduğu etkiler.
3. Yol ve taşıtlardaki bozuklukların oluşturduğu etkiler.
4. Çevre koşullarının etkisi.

Hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından yukarıda ifade edilen yol yapısına etki eden başlıca kuvvetleri, daha önce de belirtildiği gibi (x; y; z) koordinat sistemine göre, düşey, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler olmak üzere üç ayrı grupta inceleyebiliriz (Şekil 2.26).



Şekil 2.26 Yol yapısına etki eden kuvvetler (Yalçın, 2006).

Düşey yönde (z eksenine) etki eden yükler: Dingil yükleri, kurba kesimlerinde tekerlek yükü değişimi, conta ve ek yerlerindeki şoklar ve tekerlek aplatılığı sonucu taşıtların geçişi sırasında oluşan dinamik ani kuvvetler yol yapısına düşey yönde etki eden kuvvetlerdir. Taşıt şasileri ile dingil başlarına ve tekerlekler ile raya aktarılan dingil yükleri, taşıt ve yol durumuna bağlı olarak artan dinamik etkilerle birlikte, tüm yol yapısını ve taban zeminini zorlarlar.

Yanal yönde (y ekseni) etki eden yükler: Bandaj konikliğinden kaynaklanan ve yolun doğru kesimlerinde etki eden lase kuvvetlerini, kurbalarda dengelenmemiş merkezkaç ya da merkezci kuvvetleri, kılavuzlama kuvvetlerini ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan yanal yöndeki kuvvetleri içermektedir.

Boyuna doğrultuda ( x ekseni) etki eden kuvvetler: Sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ve rayların boyuna genleşmelerinin sınırlandırılması nedeniyle oluşan kuvvetler, taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde oluşan kuvvetler, ray içsel gerilmeleri ve kaynaklama sonrası ortaya çıkan büzülme gerilmelerinin oluşturdukları boyuna kuvvetler şeklinde sıralanabilirler. Ayrıca, rayların yürümesi (şöminman) ile oluşan kuvvetler, conta ve ek yerlerinde oluşan şoklar ve tekerlek aplatiliğinden kaynaklanan yanal kuvvetler de yolun boyuna doğrultusunda etki eden zorlayıcı kuvvetlerdir. (Yalçın, 2006)

Yapılan dinamik analiz çalışmalarında genellikle yanal yönde ve boyuna doğrultuda etki eden kuvvetler hesaba katılmazlar. Bu tez çalışmasında yer alan dinamik analizlerde de, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmiştir. Hesaplamalarda düşey yöndeki dingil yükleri dikkate alınmış ve dinamik dingil yükleri frekansa bağlı olarak tanımlanmıştır.

### 3. TİTREŞİM ANALİZİ

Titreşim bir denge noktası etrafındaki mekanik salınımdır. Bu salınımlar bir sarkaçın hareketi gibi periyodik olabileceği gibi çakıllı bir yolda tekerleğin hareketi gibi rastgele de olabilir.

Titreşim bazen arzu edilir. Örneğin; bir akort çatalının, üflemlerli çalgılarda veya mızıkada dilin hareketi bir çok aletin doğru kullanılması için gerekli olan arzu edilir titreşimlerdir.

Daha sıklıkla, titreşim istenmeyen bir harekettir, çünkü boşa enerji harcar ve istenmeyen ses ve gürültü oluşturur. Örneğin, motorların, elektrik motorlarının veya diğer bazı mekanik araçların çalışma esnasındaki hareketi istenmeyen titreşimler üretir. Böyle titreşimler motorlardaki dönen parçaların balanssızlığından, düzensiz sürtünmeden, dişli çarkların hareketinden kaynaklanabilir. Dikkatli tasarımlar genellikle istenmeyen titreşimleri minimize ederler.

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.

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

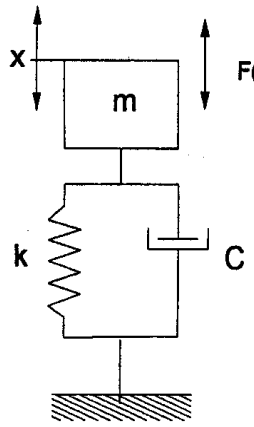
Buna göre periyod hareketin kendini tekrar etmesi yani bir tam salınım için geçen zaman, frekans ise saniyedeki titreşim sayısıdır. Frekans (titreşim/saniye) şeklinde gösterilebileceği gibi, kısaca Hertz (Hz) olarak da gösterilir.

#### 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.

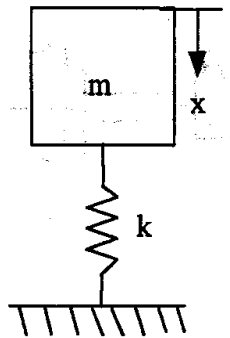
Bir sistemin titreşimi bu sistemin potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye, kinetik enerjisinin de potansiyel enerjiye dönüşümü ile olur. Eğer bu sistemde bir sönüm elemanı varsa titreşimin her periyodunda bir miktar enerji kaybı olacak ve bir süre sonra sistemdeki titreşim sönümlenecektir (Şekil 3.1). 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 sönümlenmeler göz ardı edilebilir, ancak rezonans bölgesi civarında titreşim analizi yapılırken sönümün göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır.

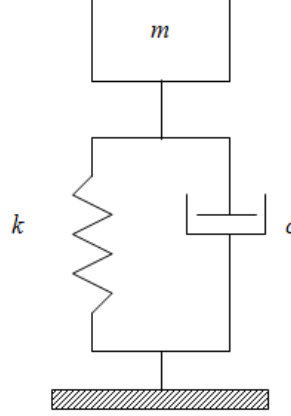


Şekil 3.2 Serbest titreşim (Erel, 2003).

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

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

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



Şekil 3.3 Sönümlü serbest titreşim (Yılmaz, 2004).

Şekil 3.3’te görülen 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)

$c$  : Sönümleme 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:

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

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

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:

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

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} = 1$$

$\zeta$  : Sönüm Faktörü

$$\left[ f_s^2 < 0 \quad , \quad \left( \frac{c}{2m} \right)^2 - f_n^2 = \mu^2 > 0 \quad , \quad \zeta > 1 \right] \quad (3.7)$$

**b) Aşırı (kritik üstü) Sönüm Durumu**

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2 Titreşim Sönümleyiciler

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber demiryolu taşıtlarında oluşan titreşimlerin sönümlenmesi konusunda ciddi sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır. Yol üstyapısında kullanılan ekipmanlarla bu titreşimlerin sönümlenebilme şansı olduğu gibi (rayaltı ped, travers altıped, vd.) taşıt – yol bileşeninde oluşan titreşimi sönümlemek amacıyla, tekerlekten sönümleyiciler ve raydan sönümleyiciler olarak iki tip sönümleyici vardır.

#### 3.2.1 Tekerlekten Sönümleyiciler

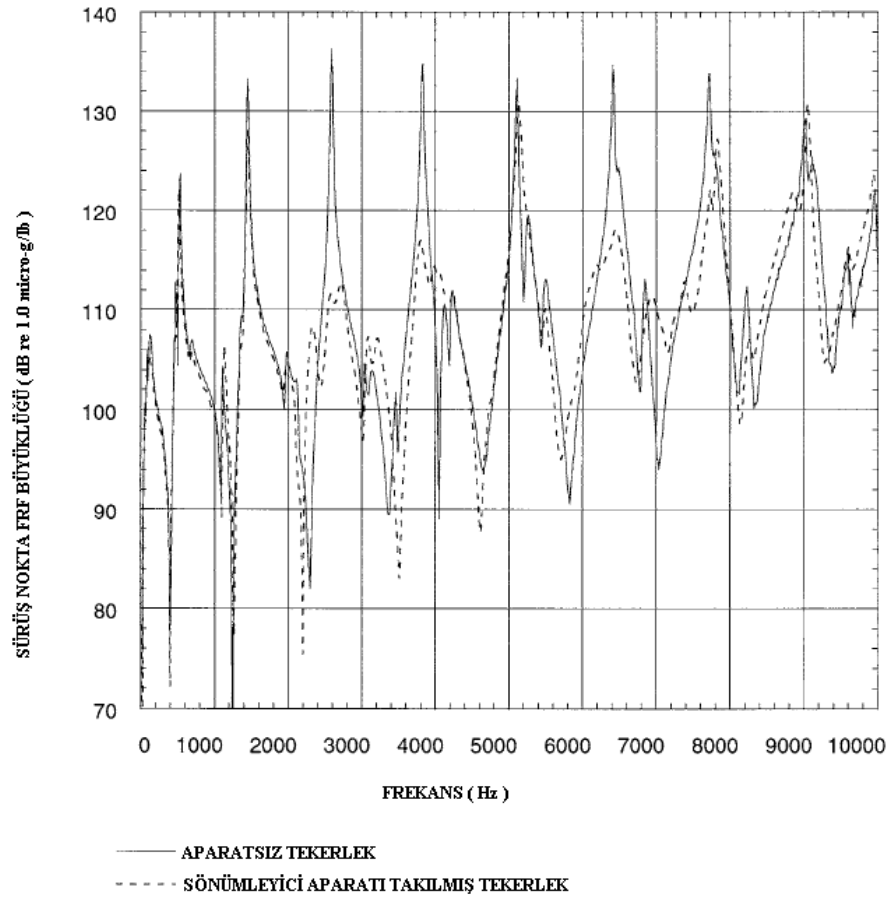
Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir araştırmada; 8 adet Bochum 84 elastik tip tekerlek kullanılarak yapılan bir deneyde VSG tipi tekerlekten sönümleyici kullanılmıştır (Şekil 3.4). Deneyde 0 – 10000 Hz aralığında tekerlekten sönümleyici kullanılması ve kullanılmaması durumundaki sönümleme oranları karşılaştırılmıştır (Şekil 3.5). Çizelge 3.1'de bu karşılaştırma verilmiştir.

Çizelge 3.1 Bochum 54 Tekerleği için Tekerlekten Sönümleyici Aparat Takılmış ve Takılmamış Durumları İçin Sönümleme Oranları (Manning, 1985).

Mode	Aparatsız Frekans Hz	Aparatsız Sönümleme Oranı	Aparatlı Frekans Hz	Aparatlı Sönümleme Oranı	Sönümleme Oranındaki Artış
1	102	6,33	100	7,28	15
2	530	1,47	518	1,76	20
3	1453	0,52	1453	0,68	31
4	2588	0,38	2554	1,58	316
5	3823	0,33	3808	0,71	115
6	5111	0,28	5129	0,4	43
7	6417	0,23	6448	0,58	152
8	7222	0,17	7827	0,26	53
9	9018	0,16	9057	0,18	13



Şekil 3.4 VSG Titreşim sönümleyici takılmış NJT Bochum 54 elastik ray (Manning, 1985).



Şekil 3.5 Titreşim sönümleyici aparatı takılmış ve takılmamış tekerlekteki sürtünme FRF kuvvet büyüklüğü (Manning, 1985).

### 3.2.2 Raydan Sönümleyiciler

Raya takılan sönümleyiciler sayesinde de, titreşimi sönümlemek mümkün olmaktadır. Ekonomik açıdan tekerleğe takılan aparatla yapılan sönümlemeye oranla daha makul olsalar da, sönümleme oranları karşılaştırıldığında tekerleğe takılan aparatla yapılan sönümleme kadar bir kazanım sağlayamamaktadırlar. En önemli avantajları ise, balastlı sistemlerde rayı kaldırmadan raya monte edilebilmeleridir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 115 lb/yd RE Ray'a takılmış sönümleme aparatı (Manning, 1985).

#### 4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISININ DİNAMİK ANALİZİ

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 frekanslar 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 (Yılmaz, 2004).

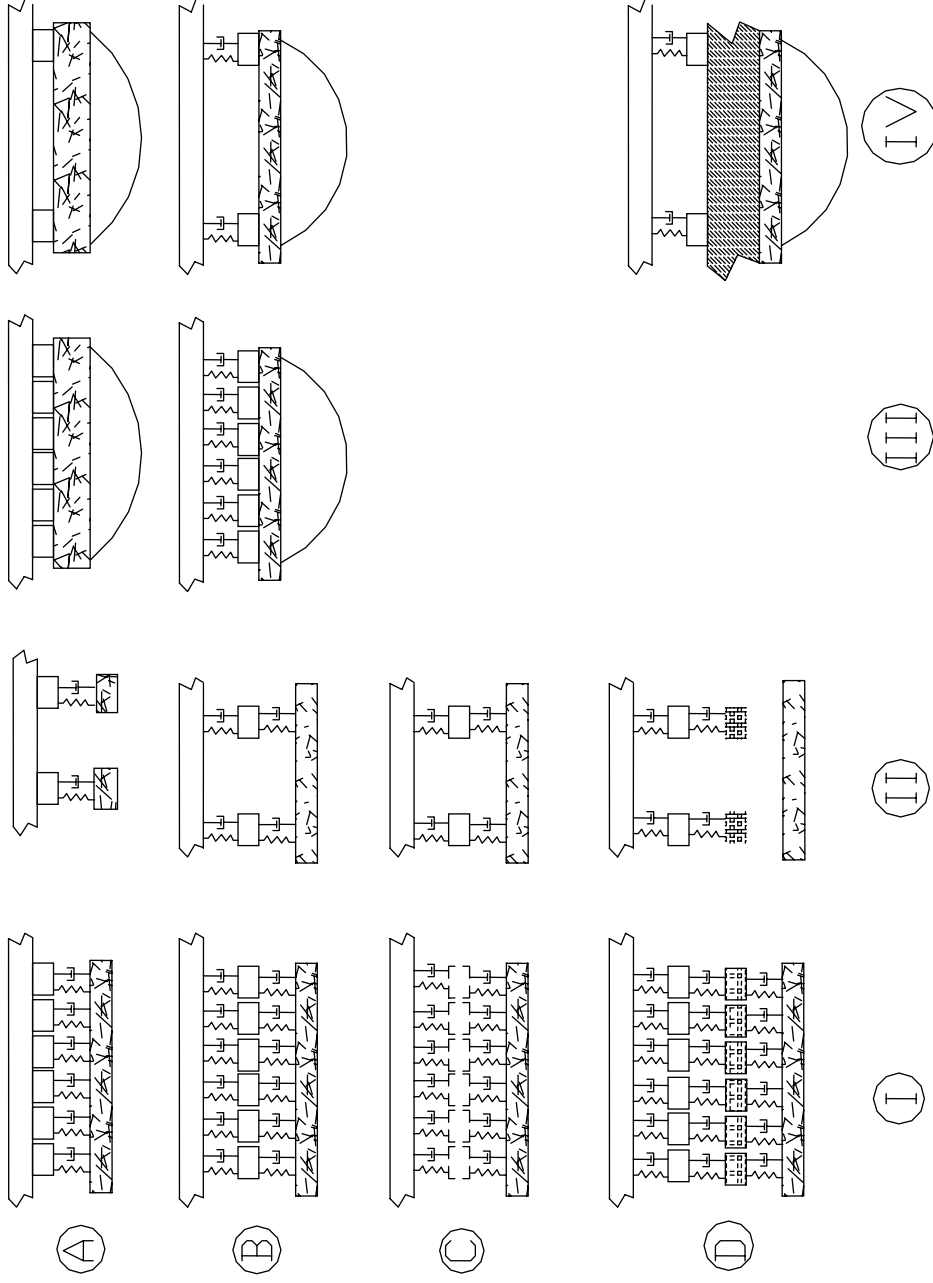
#### **4.1 İlgilenilen Frekans Limitleri**

Kullanılan yüksek frekans değerleri tekerlek/ray gürültüsü ile bağlantılıdır. Bu konuda kurulan modellerde kullanılan frekansların en üst limiti net algılama (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 (Yılmaz, 2004).

#### **4.2 Yol Sisteminin Modellenmesi**

##### **4.2.1 Yol Modellerinin Hiyerarşisi**

Modeller arasındaki temel farklılık, rayın tamamen sürekli (continuous) mesnetlenmiş veya ayrık (discrete) mesnetlenmiş biçimde ifade edilmesidir (Sırasıyla Şekil 4.1 kolon I ve III ve kolon II ve IV). İlgilenilen bütün frekans aralıklarında, rayların ayrık traversler üstüne döşenmesi şekliyle oluşturulmuş yolların çoğu için ayrık mesnetlenmiş model tipi gerçeğe daha uygun bir temsil gösterse de, sürekli mesnet tipi, ayrık mesnetlerin yol boyunca döndürülüp uç uca eklenmesi ile elde edilir. 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 4.1, CI) ve bu modellerle 500 Hz'den düşük frekans aralığında uygun bir sonuç elde edilebilir. Yolların dinamik davranışının hesabında kullanılacak bu tip sürekli mesnetli modeller, düşey tahrik kuvvetinde 500 Hz'in altındaki frekanslarda daha tutarlı sonuçlar vermektedir.



- A. 1 Tabakalı Modeller (Tek Kiriş) (TK)
- B. 2 Tabakalı Modeller (Çift Kiriş) (ÇK)
- C. Elastik traversli 2 tabakalı modeller (ÇK)
- D. Travers ve balastın detaylandırıldığı 3 tabakalı modeller (Üç Kirişli) (ÜK)
- I. Sürekli mesnetli modeller
- II. Ayrık mesnetli modeller
- III. Sürekli mesnetli yarı-mekanlı modeller
- IV. Ayrık mesnetli sürekli yarı-mekanlı modeller

Şekil 4.1 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 4.1) pratikte pek de ihtiyaç olmamaktadır. Genelde kullanılan sadece standart altı model vardır (Şekil 4.1 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. Çizelge 4.1'de yol yapı tipleri için en uygun analitik ve numerik modeller görülmektedir. Prensipde bu sunulanların dışında mevcut taşıt ve yol modellerinde sadece bir miktar modifikasyona ihtiyaç duyulmaktadır (Yılmaz, 2004).

Çizelge 4.1 Yol yapı tipleri için en uygun analitik ve nümerik modeller (De Man, 2002).

Yol Yapı Tipleri	Analitik	Nümerik
Balastlı Yol	C I veya A I	A II
Endirek Bağlı Balastlı Yol	C I	A II
Çizmeli Balastlı Yol	C I	A II
Çizmeli Beton Plak Yol	C I	A II
Rijit Üstyapıya Direkt Bağlı Yol	A I	B II
Direk Bağlı Blok Yol	C I	A II
Endirek Bağlı Yol	C I	B II
Endirek Bağlı Blok Yol	C I	A II
Rijit Üst Yapı (Gömülü Yol)	A I veya B I	C I

### 4.3 Yol Dinamiği için Kullanılabilecek Çözüm Teknikleri

Taşıt-yol sistemine ilişkin dinamik analizler için, başlıca iki çözüm yöntemi olan frekans tanım alanlı ve zaman tanım alanlı çözüm teknikleri kullanılır. Frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile yol yapısına etki eden dinamik tepkiler frekansa bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem 500 Hz frekans değerine kadar oldukça kullanışlıdır. Frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile yol sürekli mesnetli bir kiriş şeklinde modellenir ve yol için elde edilen rezonans frekanslarına bağlı olarak uygun yol parametreleri seçilir. Zaman tanım alanlı çözüm yöntemi ile zamana bağlı olarak yoldaki dinamik etkileşimler incelenir. Zaman tanım alanlı çözüm yönteminde tahrik kuvvetleri zamanın bir fonksiyonu şeklinde tanımlanarak, yola ilişkin olası dinamik tepkiler hesaplanır. Bu yöntem, 500 Hz üzerindeki frekans değerleri için oldukça kullanışlıdır. Sürekli mesnetli dinamik yol modelleri için genellikle frekans tanım alanlı çözüm yöntemi kullanılır. Ayrık mesnetli yol modellerinde ise dinamik analiz için gerekli çözümlerler daha karmaşık olup, zaman tanım alanlı çözüm yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin birlikte kullanılmasıyla basite indirgenirler.

#### 4.3.1 Frekans Tanım Alanlı Çözüm Teknikleri

Frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile yoldaki dinamik çökme değerleri, belirli yükleme durumlarında oluşabilecek titreşimler sonucu mevcut frekans değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu yöntemde yol için elde edilen rezonans frekans değerlerine bağlı olarak uygun yol parametreleri seçilir. Frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile yola ilişkin dinamik tepki değerleri, diğer bir deyişle birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri frekansa bağlı olarak hesaplanabilir. Frekans tanım alanlı çözümleri, hareketli ve hareketsiz noktasal yükler için farklı şekillerde uygulanabilir. Şimdi, bu her iki noktasal yükleme durumu için frekans tanım alanlı çözüm yönteminin kullanım şeklini açıklayalım (Yılmaz, 2004).

### 4.4 Seçilen Standart Yol Modeli için Dinamik Analiz ve Uygulamaları

#### 4.4.1 Seçilen Standart Yol Modelinin Frekans Tanım Alanlı Çözüm Metodu ile Analizi

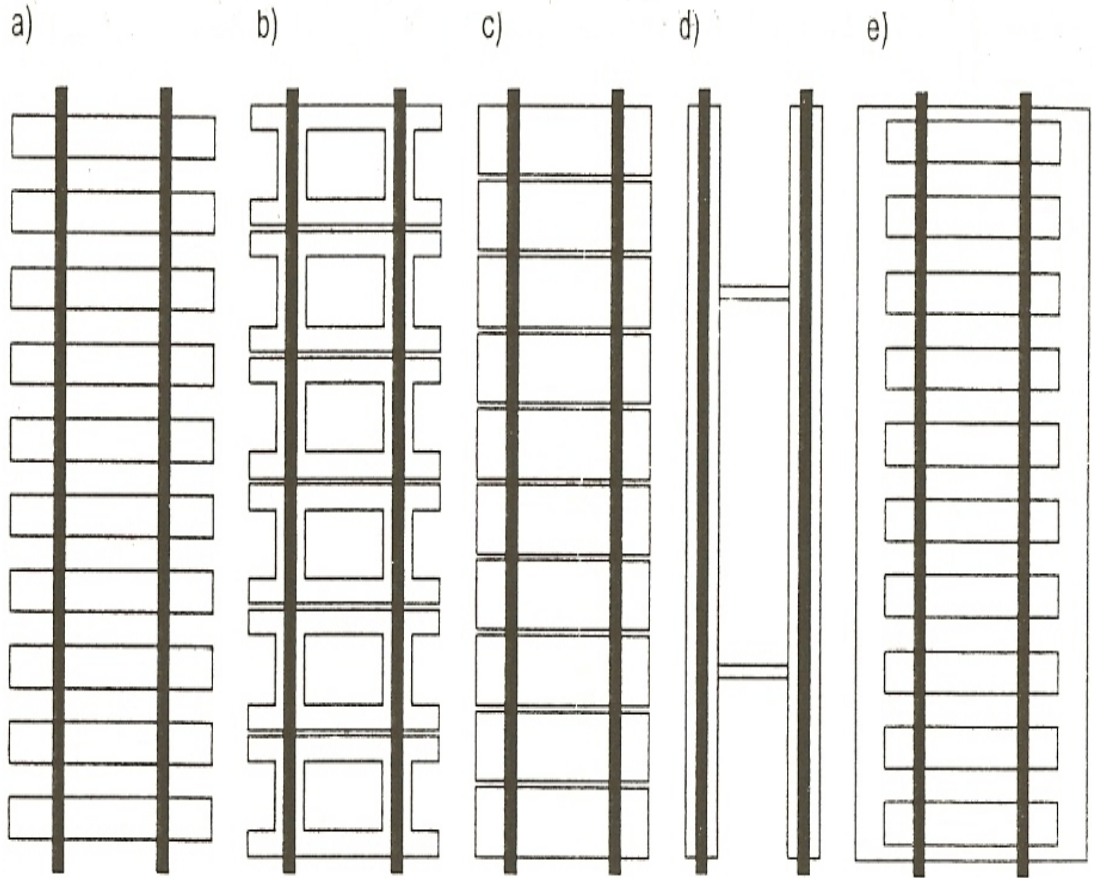
Bu tez çalışmasında sayısal uygulama olarak, Şekil 4.1'de verilmiş olan ayrık mesnetli çift kiriş modeli (DII), sürekli mesnetli çift kiriş modeline (Şekil 4.1, DI) dönüştürülerek, frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile yola ilişkin dinamik analiz çözümlerleri 0-3000 Hz aralığındaki frekans değerleri için yapılmıştır. 0-3000 Hz aralığındaki frekans değerlerinde yola ilişkin dinamik tepki değerleri (birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri) farklı yol bileşenlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yer alan sayısal uygulamada

kullanılan frekans tanım alanlı çözüm tekniğine ilişkin hesap yöntemleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

#### 4.4.2 Sürekli Elastik Mesnetlenmiş Kirişlerin Modellenmesi ve Çözümü

İzleyen kısımda elastik mesnetlenmiş kirişlerin sürekli mesnetli tipleri üzerinde durulacaktır. Bunlar, yeni gelişen demiryolu tipi modelleridir. Modeller için çözümler verilmektedir, zira çözümden kastedilen, öncelikle statik kuvvetlerin gösterimidir.

Şekil 4.2’de beş farklı demiryolu çeşidi gösterilmiştir. Şekil 4.2.(a)’da klasik balastlı enine traversli demiryolu vardır. Şekil 4.2.(b)’de çerçeve travers ve Şekil 4.2.(c)’de geniş travers sembolize edilmektedir. Şekil 4.2.(d)’de boyuna traversli demiryolunun şematik gösterimi ve Şekil 4.2.(e)’de rijit demiryolu gösterilmektedir. Gerek balastlı, gerekse de rijit sistem çift kirişli modellenebilir (Knothe, 2001).

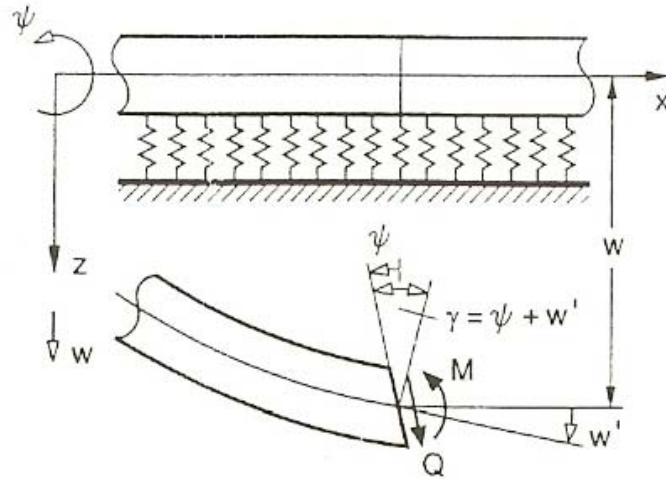


Şekil 4.2 Farklı demiryolu tiplerinin şematik gösterimi (Knothe, 2001).

#### 4.4.3 Kayması Engellenmemiş (Kaymaya Karşı Serbest) Kiriş için Temel Bağntılar

Şekil 4.3'te kayması engellenmemiş elastik mesnetli kiriş modeli kullanılan notasyonlar ile gösterilmiştir.

$\omega(x)$	Kirişin yanal deplasmanı
$\psi(x)$	Kirişin enine eğimi
$M(x)$	Eğilme momenti
$Q(x)$	Kirişin kesme kuvveti
$P$	$x=0$ noktasına etkiyen yük
$B_r=EI_r$	Eğilme rijitliği
$GA_s$	Kirişin kayma rijitliği
$\beta$	Elastik yatak katsayısı (elastik yatak rijitliği)



Şekil 4.3 Elastik mesnetlenmiş kayması engellenmemiş kiriş (Knothe, 2001).

Kayması engellenmemiş kirişe ilişkin denge koşulları aşağıdaki gibidir;

$$M' - Q = 0 \quad (4.1)$$

$$Q' - \beta\omega = 0 \quad (4.2)$$

Burada mesnetlerden biri dikey ekseninde (z-ekseni) alınırken, dönme ekseninde ( $\psi$ -ekseninde) mesnet olmadığı kabul edilir. Kinematik bağıntılarla (bkz. Şekil 4.3) kesit tesirleri elde edilir;

$$M(x) = EI_r \psi'(x) \quad (4.3)$$

$$Q(x) = GA_s (\omega'(x) + \psi(x)) \quad (4.4)$$

ve buna göre temel diferansiyel eşitlikler;

$$(EI_r \psi')' - GA_s (\psi + \omega') = 0 \quad (4.5)$$

$$GA_s (\psi + \omega')' - \beta \omega = 0 \quad (4.6)$$

şeklinde yazılır.

### **Karakteristik Eşitlik ve Çözümü**

Kirişin yanal deplasmanı  $\omega(x)$  ve enine eğime  $\psi(x)$ ,  $e^{\lambda x}$  ilavesi yapıldığında,  $\omega$  ve  $\psi$ 'nin bu kez bilinmeyen büyüklükler olduğu aşağıdaki cebirsel eşitlikler elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \lambda^2 GA_s - \beta & \lambda GA_s \\ -GA_s \lambda & -GA_s + EI_r \lambda^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega \\ \psi \end{Bmatrix} = 0 \quad (4.7)$$

ve buradan karakteristik eşitlik;

$$\lambda^4 - \frac{\beta}{GA_s} \lambda^2 + \frac{\beta}{EI_r} = 0 \quad (4.8)$$

şeklinde bulunur.

Bu eşitliğin çözümü bütün büyüklükler için geçerli değildir. Bu eşitlik için aşağıdaki dört kök elde edilir.

$$\lambda_1 = +\alpha^* + i\gamma^* \quad , \quad \lambda_2 = +\alpha^* - i\gamma^* \quad , \quad (4.9)$$

$$\lambda_3 = -\alpha^* + i\gamma^* \quad , \quad \lambda_4 = -\alpha^* - i\gamma^* \quad , \quad (4.10)$$

(4.9) ve (4.10) eşitliklerinde yer alan  $\alpha^*$  ve  $\gamma^*$  ifadeleri açık şekilde aşağıda verilmiştir.

$$\alpha^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\frac{\beta}{EI_r} + \frac{\beta}{2GA_s}}} \quad (4.11)$$

$$\gamma^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{\frac{\beta}{EI_r} - \frac{\beta}{2GA_s}}} \quad (4.12)$$

### **Kirişin Yanal Deplasmanı $\omega(x)$ ve Enine Eğim $\psi(x)$**

$\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  değerleri  $x < 0$  için çözüm verirken,  $\lambda_3$  ve  $\lambda_4$  değerleri  $x > 0$  için çözüm verir.  $x > 0$

çözümü aşağıdaki gibi yazılır;

$$\omega(x) = e^{-\alpha^*x} (A \cos \gamma^* x + B \sin \gamma^* x) \quad (4.13)$$

$$\psi(x) = e^{-\alpha^*x} (C \cos \gamma^* x + D \sin \gamma^* x) \quad (4.14)$$

$x \rightarrow \infty$  şartı otomatik olarak sağlanmış olur.  $x=0$  sınır koşullarının uygulanmasıyla ve  $\omega(x)$  ile  $\psi(x)$  eşitliklerinin (4.7) eşitliğinde yerlerine yazılması ile geriye kalan dört bilinmeyen A, B, C ve D sabitleri belirlenir.  $x=0$  noktasında geçerli olan iki sınır koşulu;

$$\psi(0) = 0, \quad (4.15)$$

$$Q(0) = -\frac{P}{2} \quad (4.16)$$

şeklindedir.

(4.15) sınır koşulundan dolayı doğrudan  $C=0$  elde edilir ve buradan;

$$\psi(x) = D e^{-\alpha^*x} \sin \gamma^* x \quad (4.17)$$

elde edilir.

İkinci sınır koşulu (4.16) aynı biçimde  $\psi$  cinsinden ifade edilebilir;

$$Q(0) = M'(0) = EI_r \psi''(0) = -\frac{P}{2} \quad (4.18)$$

$\psi(x)$ 'in ikinci türevinden  $x=0$  değeri için D sabiti elde edilir.

$$\psi''(x) = D e^{-\alpha^*x} (\alpha^{*2} \sin \gamma^* x - 2\alpha^* \gamma^* \cos \gamma^* x - \gamma^{*2} \sin \gamma^* x) \quad (4.19)$$

$$D = \frac{P}{4\alpha^* \gamma^*} \frac{1}{EI_r} \quad (4.20)$$

Böylece  $\psi(x)$ 'in değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\psi(x) = \frac{P}{4\alpha^* \gamma^*} \frac{1}{EI_r} e^{-\alpha^*x} \sin \gamma^* x \quad (4.21)$$

Yükün etkime noktasındaki eğilme momenti aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

$$M(0) = EI_r \psi'(0) = \frac{P}{4\alpha'} = \frac{P}{4\sqrt{\sqrt{\frac{\beta}{4EI_r} + \frac{\beta}{4GA_s}}}} \quad (4.22)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{EI_r \beta}}{2GA_s} \quad (4.23)$$

(4.23)'te verilen kısaltma ile (4.22) bağıntısı;

$$M(0) = P_4 \sqrt{\frac{64EI_r}{\beta}} \frac{1}{\sqrt{1+\kappa}} \quad (4.24)$$

şeklinde yazılabilir.

Şimdi  $\omega(0)$  eşitliği gereklidir. Aşağıdaki bağıntıyla;

$$EI_r \psi''' = \beta \omega \quad (4.25)$$

$\omega(0)$  yanal deplasmanı için;

$$\omega(0) = P_4 \sqrt{\frac{1}{64EI_r \beta^3}} \left[ \frac{1+2\kappa}{\sqrt{1+\kappa}} \right] \quad (4.26)$$

bağıntısı elde edilir.

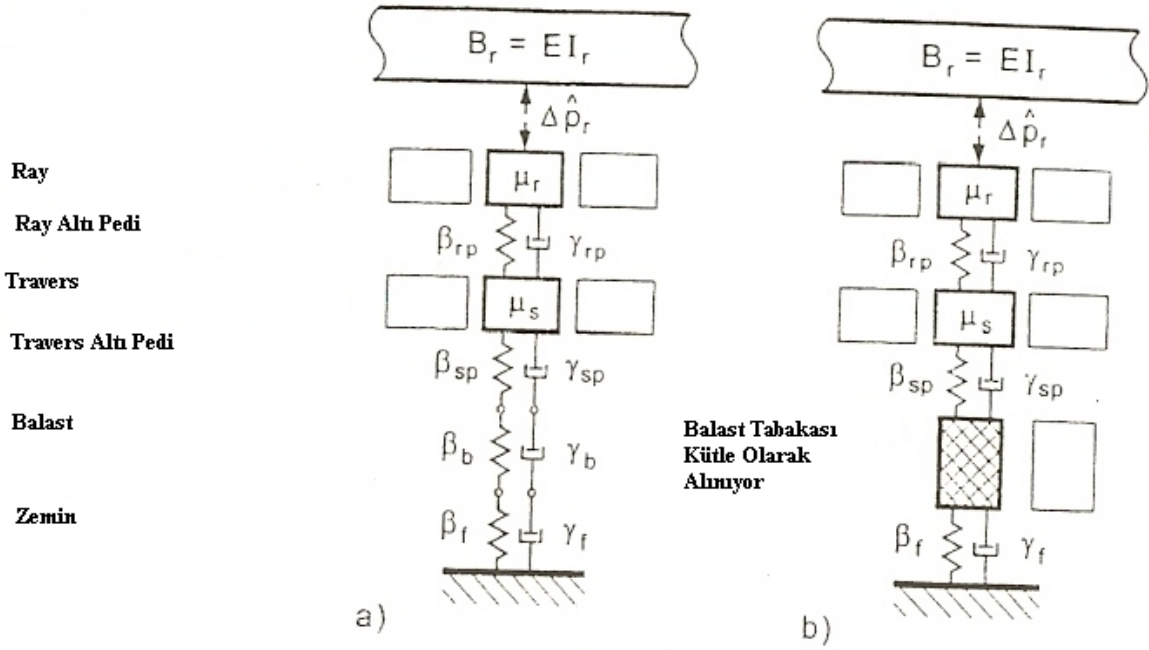
Kayması engellenmiş duruma geçerken  $\kappa=0$  alınır. Böylece (4.22) eşitliği eşitlik (4.27)'ye dönüşür ve (4.26) eşitliği de eşitlik (4.28)'e dönüşür (Knothe, 2001).

$$M(0) = Q_4 \sqrt{\frac{B_r}{64\beta}} \quad (4.27)$$

$$\omega(0) = \frac{Q}{\sqrt[4]{64\beta^3 \text{ statik } B_r}} \quad (4.28)$$

### **Kayması Engellenmemiş Kiriş için Dinamik Tepki**

Burada zaman ile orantılı sabit P yükü yerine harmonik olarak değiştirilmiş  $\Delta Q \cdot e^{i\Omega t}$  yükü kullanılır. Modelde balastlı demiryolu, ara mesnet, travers, balast hasırı ve balast/zemin şeklinde düşünülmüştür. Zira bu durum Şekil 4.4'te iki modelleme aşaması şeklinde gösterilmiştir. Ray ve travers için dönüştürücü, dolayısıyla dönme ile kütle taşıma etkisi, ihmal edilecek kadar küçük etkide bulunduğu göz ardı edilebilir (Knothe, 2001).



Şekil 4.4 Elastik yataklanmış kiriş için detaylı travers mesnet modeli. (a) Balast kütsüz (b) Balast kütleli (Knothe, 2001).

Eşitlik (4.26) değışmeden alınır, ancak bu durumda yerdeğıştirmenin genliğı  $\Delta\hat{\omega}$  ile yükün genliğı  $\Delta\hat{Q}$  arasında bir ilişki söz konusudur.  $\beta$  statik yatak katsayısı,  $\beta_{\text{dyn}}$  dinamik yatak katsayısı ile değıştirilmelidir.

$$\Delta\hat{\omega} = \hat{Q}^4 \sqrt{\frac{1}{64EI_r\beta_{\text{dyn}}^3}} \left[ \frac{1+2\kappa_{\text{dyn}}}{\sqrt{1+\kappa_{\text{dyn}}}} \right] \quad (4.29)$$

Bu eşitlikte  $\kappa_{\text{dyn}}$ ;

$$\kappa_{\text{dyn}} = \frac{\sqrt{EI_r\beta_{\text{dyn}}}}{2GA_s} \quad (4.30)$$

şeklinde ifade edilir.

Dinamik yatak katsayısı  $\beta_{\text{dyn}}$ 'in elde edilmesi için Şekil 4.4.(a)'da görülen sürekli mesnetlenmiş demiryolu kesiti dikkate alınır. Burada “ $\mu_r$ ” ray kütlesi, elastik raydan ayrılacağı şekilde kesilmiştir. Öncelikle, rayın ve traversin kütleleri ve ara mesnet, balast altı pedi ile balast ve zeminin elastikliği dikkate alınır. Böylece iki kütleli titreşen bir sistem için eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} \beta_{rp} + i\gamma_{rp} - \mu_r \Omega^2 & -(\beta_{rp} + i\gamma_{rp}) \\ -(\beta_{rp} + i\gamma_{rp}) & \beta_{rp} + i\gamma_{rp} + \beta_{\text{dyn,spbf}} - \mu_s \Omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varpi_r \\ \Delta \varpi_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta p_r \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.31)$$

Travers altı pedi, balast ve zemin için kombine dinamik rijitlik (yatak katsayısı) değeri aşağıda verilen eşitlik ile belirlenir.

$$\frac{1}{\beta_{\text{dyn,spbf}}} = \frac{1}{\beta_{sp} + i\Omega \gamma_{sp}} + \frac{1}{\beta_b + i\Omega \gamma_b} + \frac{1}{\beta_r + i\Omega \gamma_r} \quad (4.32)$$

Dinamik yatak katsayısı  $\beta_{\text{dyn}}$ ,  $\Delta \hat{p}_r$  'nin  $\Delta \hat{w}_r$  'ye oranı şeklinde hesaplanır;

$$\beta_{\text{dyn}} = \frac{\Delta \hat{p}_r}{\Delta \hat{w}_r} = \frac{(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} - \mu_r \Omega^2)(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} + \beta_{\text{dyn,spbf}} - \mu_s \Omega^2) - (\beta_{rp} + i\gamma_{rp})^2}{(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} + \beta_{\text{dyn,spbf}} - \mu_s \Omega^2)} \quad (4.33)$$

Bölümün başlangıcında belirtilen notasyonlara ek olarak aşağıdaki notasyonlar kullanılmıştır:

Sembol	Birim	Açıklama
$EI_r$	$\text{kNm}^2$	Rayın eğilme rijitliği
$\mu_r$	$\text{kg/m}$	Birim uzunluktaki ray kütlesi
$\beta_{rp}$	$\text{kN/m}^2$	Birim uzunluktaki ray elastomer mesneti rijitlik katsayısı
$\gamma_{rp}$	$\text{kNs/m}^2$	Birim uzunluktaki ray elastomer mesneti sönümleme katsayısı
$\mu_s$	$\text{kg/m}$	Birim uzunluktaki travers kütlesi
$\beta_{sp}$	$\text{kN/m}^2$	Birim uzunluktaki travers taban mesneti rijitlik katsayısı
$\gamma_{sp}$	$\text{kNs/m}^2$	Birim uzunluktaki travers taban mesneti sönümleme katsayısı
$\beta_b$	$\text{kN/m}^2$	Balast tabakasının birim uzunluktaki rijitlik katsayısı
$\gamma_b$	$\text{kNs/m}^2$	Balast tabakasının birim uzunluktaki sönümleme katsayısı
$\beta_r$	$\text{kN/m}^2$	Zeminin birim uzunluktaki rijitlik katsayısı
$\gamma_r$	$\text{kNs/m}^2$	Zeminin birim uzunluktaki sönümleme katsayısı
$\beta_{\text{dyn,spbf}}$	$\text{kN/m}^2$	Dinamik yatak katsayısı (travers altı pedi+ balast + zemin rijitliği)

Esas olarak balastın kütle olarak dikkate alınması herhangi bir soruna yol açmamaktadır (Şekil 4.4.(b)). Bu durumda balast tabakasının üstündeki ve altındaki yerdeğiştirmelerin dikkate alınması için, (4.29) eşitliğinin yerine dört kütleli bir titreşim sistemi için eşitlik elde edilir.

Yola ilişkin dinamik tepki değeri  $H_r(i\Omega)$ , yanal deplasmanın “ $\Delta \hat{w}(0)$ ”, “ $\Delta \hat{Q}$ ” yüküne oranı şeklinde ifade edilir.

$$H_r(i\Omega) = \sqrt[4]{\frac{1}{64EI_r\beta^3_{\text{dyn}}}} \left[ \frac{1 + 2\kappa_{\text{dyn}}}{\sqrt{1 + \kappa_{\text{dyn}}}} \right] \quad (4.34)$$

Sonuç olarak dinamik tepkinin çok düşük ve çok yüksek frekanslardaki değişimi incelenmelidir. Çok düşük frekanslar için geçerli olan dinamik tepki değeri,

$$H_r(0) = \sqrt[4]{\frac{1}{64EI_r\beta^3_{\text{stat}}}} \left[ \frac{1 + 2\kappa_{\text{stat}}}{\sqrt{1 + \kappa_{\text{stat}}}} \right] \quad (4.35)$$

eşitlikteki statik yatak katsayısı  $\beta_{\text{stat}}$  değeri;

$$\beta_{\text{stat}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{\text{rp}}} + \frac{1}{\beta_{\text{sp}}} + \frac{1}{\beta_{\text{f}}}} \quad (4.36)$$

ve  $\kappa_{\text{stat}}$  değeri;

$$\kappa_{\text{stat}} = \frac{\sqrt{EI_r\beta_{\text{stat}}}}{2GA_s} \quad (4.37)$$

şeklinde tanımlanır.

Çok büyük frekanslar için sadece  $\Omega$ 'nın en yüksek mertebeden terimleri dikkate alınabilir. Böylece küçük değişikliklerin ardından elde edilen eşitlik:

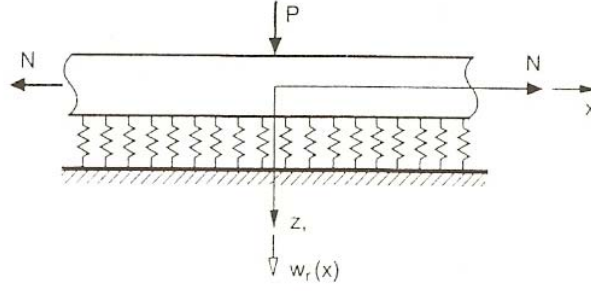
$$H_r(0) = \frac{-i}{2\Omega} \frac{1}{\sqrt{\mu_r GA_s}} \quad (4.38)$$

şeklindedir.

#### 4.4.4 Öngerilmeli Raylı Demiryolu

##### Öngerilmeli Kiriş Modeli

Oldukça yüksek ya da düşük sıcaklıklar altında rayın dinamik davranışı ile ilgilenildiğinde, sürekli kaynaklı demiryoluna öngerilmeli kiriş modeline başvurulmalıdır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Elastik mesnetlenmiş öngerilmeli kiriş (Knothe, 2001).

Bu modelde statik durum için diferansiyel eşitlik aşağıdaki şekildedir.

$$EI_r \frac{d^4 \omega_r(x)}{dx^4} - N \frac{d^2 \omega_r(x)}{dx^2} + \beta \omega_r(x) = 0 \quad (4.39)$$

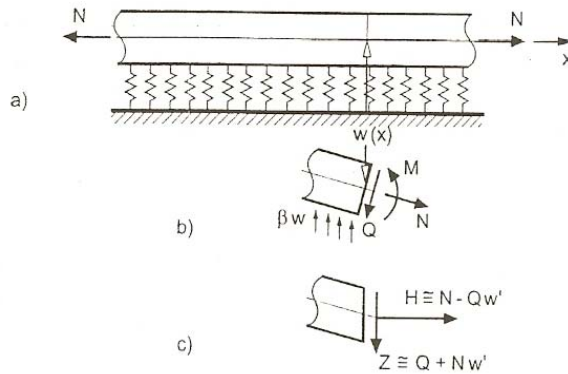
Öngerilmemiş durumdaki aynı sınır koşulları geçerli olup, aşağıdaki şekildedir.

$$\omega_r'(0) = 0, \quad (4.40)$$

$$\omega_r'''(0) = -\frac{Q}{2EI_r} \quad (4.41)$$

### Diferansiyel Eşitliğin Çözümü

Elastik mesnetlenmiş kiriş Şekil 4.6'da verilmiştir. Diferansiyel eşitliğin yazılmasında dikey yönde denge oluşturulur, zira normal kuvvetin izdüşümü dikkate alınmalıdır. Boyuna doğrultudaki yatay kuvvetin izdüşümü oysa ki genelde ihmal edilmektedir.



Şekil 4.6 Elastik mesnetlenmiş öngerilmeli kiriş (a) Normal kesit (b) Düşey doğrultudaki bir kesit parçası (c) Kesitte ( $Qw'$ ) teriminin ihmal edilmesi (Knothe, 2001).

Aşağıdaki ifadenin ilavesiyle

$$\omega(x) = \omega e^{\lambda x} \quad (4.42)$$

4.39 diferansiyel eşitliğinden aşağıdaki karakteristik eşitlik elde edilir.

$$EI_r \lambda^4 - N \lambda^2 + \beta = 0 \quad (4.43)$$

Bu dördüncü dereceden eşitlik için kapalı bir çözüm verilebilir. Öncelikle  $\lambda^2$  için elde edilen

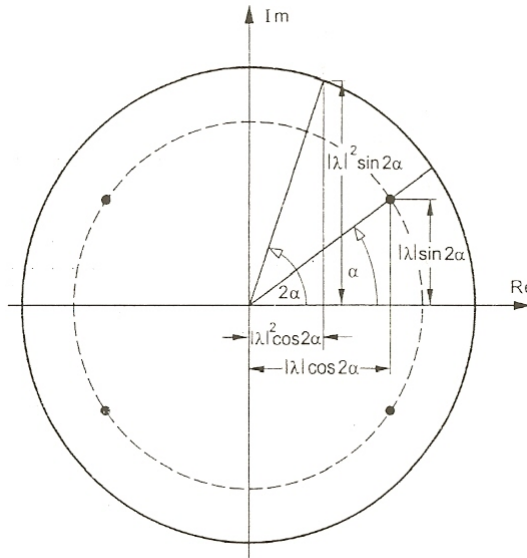
$$\lambda^2 = \frac{N}{2EI_r} \pm i \sqrt{\frac{\beta}{EI_r}} \sqrt{1 - \frac{N^2}{4\beta EI_r}} \quad (4.44)$$

eşitliğinin devamında kısaltmalar kullanmakta fayda vardır. İfadenin kendi değerini aşağıdaki gibi gösterebiliriz;

$$|\lambda| = \left( \frac{\beta}{EI_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.45)$$

$\lambda^2$  ve  $\lambda$ 'yı kompleks büyüklükler olarak ifade etmek için Şekil 4.7'de görüldüğü gibi  $\alpha$  ve  $2\alpha$  açıları kullanılabilir.

$$\cos 2\alpha = \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}} \quad \sin 2\alpha = \sqrt{1 - \frac{N^2}{4\beta EI_r}} \quad (4.46)$$



Şekil 4.7 Özdeğerin kompleks sayılarla gösterimi (Knothe, 2001).

Böylece özdeğerin karesi halinde yazılırsa;

$$\lambda^2 = \left( \frac{\beta}{EI_r} \right)^2 \left( \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}} \pm i \sqrt{1 - \frac{N^2}{4\beta EI_r}} \right) \quad (4.47)$$

eşitliği elde edilir.

Burada  $N^2 \leq 4\beta EI_r$  kabul edilir.

Özdeğerin karesinden ( $\lambda^2$ ), özdeğere geçiş, kompleks sayılar ekseni kullanılarak sağlanacaktır.

Burada  $\sin\alpha$  ve  $\cos\alpha$  ilişkilerinin elde edilmesinde fayda vardır.

$$\sin\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}} \right)} \quad (4.48)$$

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}} \right)} \quad (4.49)$$

Böylece; (4.43) karakteristik eşitliğinin dört kökü aşağıdaki biçimde yazılır.

$$\lambda_{1,2} = |\lambda| e^{\pm i\alpha} \quad (4.50)$$

$$\lambda_{3,4} = -|\lambda| e^{\pm i\alpha} \quad (4.51)$$

Bu iki kısaltmayla devam edilirse;

$$\delta = |\lambda| \cos\alpha \quad (4.52)$$

$$\gamma = |\lambda| \sin\alpha \quad (4.53)$$

$\omega(x)$ 'in çözümü aşağıdaki biçimde yazılacaktır.

$$\omega(x) = \omega_1 e^{-\delta x} \cos\gamma_0 + \omega_2 e^{-\delta x} \sin\gamma_1 + \omega_3 e^{\delta x} \cos\gamma_0 + \omega_4 e^{\delta x} \sin\gamma_1 \quad (4.54)$$

$x = 0$  noktasına etkiyen bir  $Q$  kuvveti inceleniyorsa, bu durumda  $x > 0$  olan ilk iki çözüm ifadesi geçerlidir. Diğer ikisi ise  $x < 0$  için geçerlidir. Bunu izleyen hesaplamalar yalnızca  $x > 0$  için geçerlidir. Bu yüzden yalnızca  $\omega_1$  ve  $\omega_2$  terimleri üzerinde işleme devam edilir.  $\omega(x)$ 'in türevinden elde edilen

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = -\omega_1 |\lambda| e^{-\delta x} \cos(\gamma x - \alpha) - \omega_2 |\lambda| e^{-\delta x} \sin(\gamma x - \alpha) \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \omega_1 |\lambda|^2 e^{-\delta x} \cos(\gamma x - 2\alpha) + \omega_2 |\lambda|^2 e^{-\delta x} \sin(\gamma x - 2\alpha) \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} = -\omega_1 |\lambda|^3 e^{-\delta x} \cos(\gamma x - 3\alpha) - \omega_2 |\lambda|^3 e^{-\delta x} \sin(\gamma x - 3\alpha) \quad (4.57)$$

bu ilişkilerle geçiş koşulları formüle edilecek.

### **x=0 Noktasında Geçiş Koşullarının Formüle Edilmesi ve Aranılan İlişkilerin İfade Edilmesi;**

x=0 noktasında Q kuvvetinin kirişe pozitif x yönünde uygulandığı kabul edilecektir. x=0 bu durumda simetri eksenini olacaktır. x>0 bölgesinde sadece aşağıdaki iki sınır koşulunun formüle edilmesi bize yeterlidir.

x=0 noktasında eğim çizgisinin teğeti yatay doğrultudadır. Yatay kuvvet, normal kuvvetin olmadığı durumdaki gibi uygulanan Q kuvvetinin yarısı kadar ve negatiftir. Böylece

$$\left. \frac{\partial \omega}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (4.58)$$

$$EI_r \left. \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} \right|_{x=0} = \frac{Q}{2} \quad (4.59)$$

yazılabilir.

Sonuç olarak aşağıdaki eşitlik sistemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\cos 3\alpha & \sin 3\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{Q}{2|\lambda|^3 EI_r} \end{Bmatrix} \quad (4.60)$$

Çözüm olarak bulunan aşağıdaki eşitlik,

$$\begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \sin 3\alpha & -\sin \alpha \\ \cos 3\alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{Q}{2|\lambda|^3 EI_r} \end{Bmatrix} \quad (4.61)$$

ve

$$\Delta = \sin 2\alpha \quad (4.62)$$

ifadesinin kullanılmasıyla, sağ taraf vektörü yalnızca tek bir noktada etkidiğinden çözüm daha basitleştirilmiş halde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sin 2\alpha} \begin{Bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{Bmatrix} \frac{Q}{2|\lambda|^3 EI_r} \quad (4.63)$$

Öncelikle uygulama noktasında yük etkisiyle oluşan yerdeğiştirme ve moment ile ilgilenilecektir.

$$M(0) = -EI_r \left. \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right|_{x=0} = \frac{\sin \alpha}{\sin 2\alpha} \frac{Q}{2|\lambda|} \quad (4.64)$$

Yukarıdaki eşitliğin kullanılmasıyla, kısaltmalar diferansiyel eşitliğindeki büyüklüklerin yerine yazılacak olursa, aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\omega(0) = \frac{Q}{\sqrt{1 + \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}}}} \frac{1}{\sqrt[4]{64 EI_r \beta^3}} \quad (4.65)$$

$$M(0) = \frac{Q}{\sqrt{1 + \frac{N}{2\sqrt{\beta EI_r}}}} \sqrt[4]{\frac{EI_r}{64\beta}} \quad (4.66)$$

Eşitliklerin sağ tarafındaki ilk terim genelde öngerilme nedeniyle oluşan düzeltme terimidir.

Bu çözümün elde edilmesi ancak aşağıdaki koşulda mümkündür.

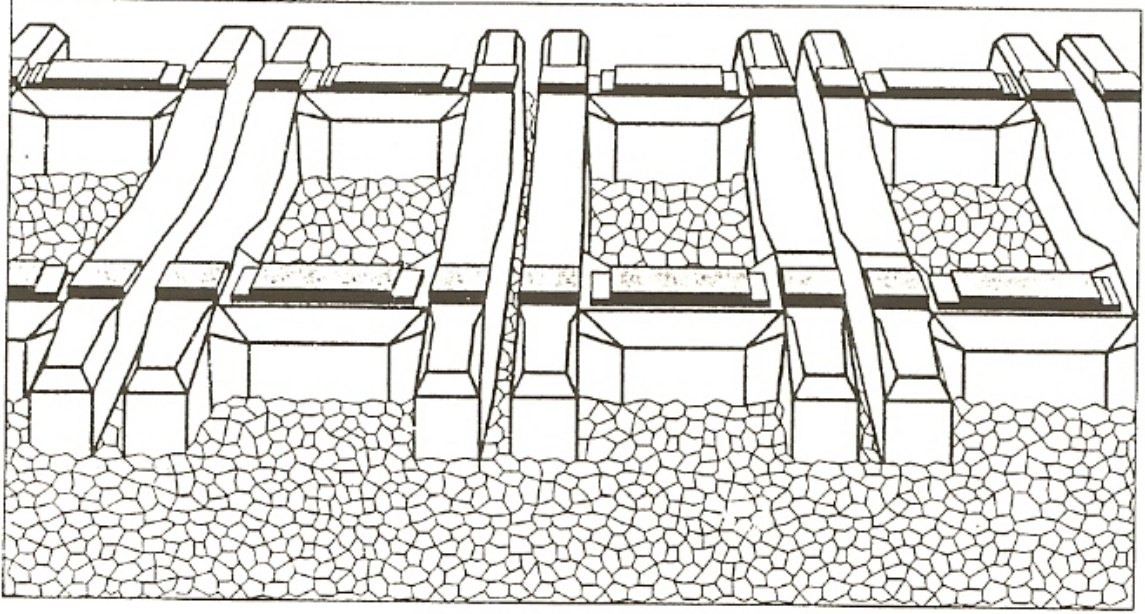
$$\frac{N^2}{4\beta EI_r} \leq 1 \quad (4.67)$$

Bu koşul sağlanmazsa derinlemesine incelendiğinde özel bir türev gerektirmektedir. Dinamik durumda ortaya çıkan bütün fonksiyonlar kompleks elemanlar içerdiğinden ve her koşulda kompleks bir hesaplama gerektiğinden bu koşuldan vazgeçilebilir.

#### 4.4.5 Çerçeve Traversli ya da Geniş Traversli Balastlı Demiryolu

Bir başka demiryolu tipi çerçeve travers ya da geniş travers olarak karşımıza çıkar. Çerçeve

traversli demiryolu (raysız) Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu durumda her bir travers güzergah doğrultusunda yaklaşık 1 metre genişliğinde ve büyük boşluklara izin vermeden arka arkaya yerleştirilir. Ray ve çerçeve travers arasında sürekli devam eden ara ped bulunmaktadır. Çerçeve travers ilaveten alt tarafta tabana çakılabilir.



Şekil 4.8 Çerçeve traversli demiryolunun (raysız) sistem taslağı (Knothe, 2001).

Geniş travers prensipte benzer bir yapıya sahiptir. Bu bir çeşit tek bir demiryolu olarak düzenlenmiş ve 0,6 – 1 m aralıklarla bölünmüş rijit demiryoludur. Çerçeve travers ile arasındaki fark, geniş traversde raylar arasında, balastın sıkıştırılmasına yalnızca ön yüzden müdahale edecek şekilde boşluk bırakılmamasından ortaya çıkmaktadır.

### **Ayrık Mesnetli Modelin Sürekli Mesnetli Modele Dönüştürülmesi**

Bu iki demiryolu tipini de benzer şekilde sürekli mesnetlenmiş bir demiryolu ile değiştirebiliriz. Burada dikkat edilmesi gereken yatay traverse kıyasla geniş traversde yalnızca dikey yönde bir kayma oluşmayacağı, aynı zamanda y ekseninde hissedilir bir direnç oluşturan dönmenin oluşacağıdır. Bunu dikkate almak için, elastik mesnetin statik olarak incelenmesine ek olarak dönme mesneti de yerleştirilmelidir. Buna karşılık gelen dönme mesnet sabitleri iki adımda elde edilir (bkz. Şekil 4.9): Öncelikle Şekil 4.9(a)’daki bölünmüş elastik mesnet, bir yay  $k_{rp}$  ve bir dönme yayı  $k_{rot,rp}$  halinde tek bir noktada toplanır (bkz. Şekil 4.9 b)). Geniş bir travers ile rayların sürekli bir şekilde traversler üzerinde mesnetlenmesi ve



$$\beta_r \frac{d^4 \omega(x, t)}{dx^4} - \beta_{rot} \frac{d^2 \omega(x)}{dx^2} + \beta \omega(x) = 0 \quad (4.68)$$

eşitliği ile aşağıda verilen yatak katsayıları elde edilir.

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_{rp}} + \frac{1}{\beta_b} \quad (4.69)$$

$$\frac{1}{\beta_{rot}} = \frac{1}{\beta_{rot,rp}} + \frac{1}{\beta_{rot,b}} \quad (4.70)$$

$$\omega_r(0 + \varepsilon) - \omega_r(0 - \varepsilon) = 0$$

$$\omega'_r(0 + \varepsilon) - \omega'_r(0 - \varepsilon) = 0$$

$$\omega''_r(0 + \varepsilon) - \omega''_r(0 - \varepsilon) = 0$$

$$\omega'''_r(0 + \varepsilon) - \omega'''_r(0 - \varepsilon) = \frac{Q}{B_r} \quad (4.71)$$

$$\omega'_r(0) = 0$$

$$\omega'''_r(0) = \frac{Q}{2B_r} \quad (4.72)$$

Yükün  $x=0$  uygulama noktasında sınır koşulu olarak (4.71) ve (4.72) yazılabilir. (4.68) diferansiyel eşitliğinin, elastik mesnetlenmiş öngerilmeli kirişin (4.39) diferansiyel eşitliği ile aynı tipte olduğu göze çarpmaktadır. Traverslerin yatay ekseninde dönmeye karşı direnci, öngerilmeli rayınkine benzer bir mesnetlenme etkisine sahiptir.

### **Dinamik Yüklemenin Diferansiyel Eşitliği**

Dinamik yükleme durumunda diferansiyel eşitliklerin türevi biraz daha zordur. Rayın sadece kütlesi dikkate alınır, ancak dönme ataleti ihmal edilir. Böylece

$$\beta_r \frac{\partial^4 \omega_r(x, t)}{\partial x^4} + \beta_{rp} (\omega_r(x, t) - \omega_s(x, t)) - \beta_{rot,rp} \frac{\partial^2 (\omega_r(x, t) - \omega_s(x, t))}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega_r(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.73)$$

eşitliği elde edilir. Sürekli travers için momentum ve burulma eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$\mu_s \frac{\partial^2 \omega_s(x, t)}{\partial t^2} + \beta_{rp} (\omega_s(x, t) - \omega_r(x, t)) + \beta_b \omega_s(x, t) = 0 \quad (4.74)$$

$$\Theta_s \frac{\partial^2 \psi_s(x, t)}{\partial t^2} + \beta_{\text{rot, rp}} (\psi_s(x, t) - \psi_r(x, t)) + \beta_{\text{rot, b}} \psi_s(x, t) = 0 \quad (4.75)$$

Burada da sönümü ihmal edebiliriz.

### **Cerçeve Traversli Demiryolunun Diferansiyel Eşitliğinin Çözümü**

Çerçeve traversli demiryolunun diferansiyel eşitliği için özel bir çözüm gerekmemektedir. Zira daha önceki bilgilerden biliyoruz ki, statik yükleme için verilen eşitlik (4.68), öngerilmeli kiriş için verilen (4.39) diferansiyel eşitliği ile aynı tiptedir. Öngerilmeli kirişin çözümünde sadece  $\beta$  yatak katsayısı  $\beta_{\text{dyn}}$  ile, ve N normal kuvveti  $\beta_{\text{rot, dyn}}$  ile değiştirilmelidir. Sonuç olarak (4.65) ile (4.66) eşitliklerinden aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$\Delta \hat{\omega}(0) = \frac{\Delta Q}{\sqrt{1 + \frac{\beta_{\text{rot, dyn}}}{2\sqrt{\beta_{\text{dyn}} EI_r}}}} \frac{1}{\sqrt[4]{64 EI_r \beta_{\text{dyn}}^3}} \quad (4.76)$$

$$\Delta M(0) = \frac{\Delta Q}{\sqrt{1 + \frac{\beta_{\text{rot, dyn}}}{2\sqrt{\beta_{\text{dyn}} EI_r}}}} \sqrt[4]{\frac{EI_r}{64 \beta_{\text{dyn}}}} \quad (4.77)$$

Her iki dinamik yatak katsayısının hesaplanması kolaydır.

$$\beta_{\text{dyn}} = \frac{[-\Omega^2 \mu_s + i\Omega(\gamma_{\text{rp}} + \gamma_b) + (\beta_{\text{rp}} + \beta_b)] [-\Omega^2 \mu_r + i\Omega \gamma_{\text{rp}} + \beta_{\text{rp}}] - [i\Omega \gamma_{\text{rp}} + \beta_{\text{rp}}]^2}{-\Omega^2 \mu_s + i\Omega(\gamma_{\text{rp}} + \gamma_b) + (\beta_{\text{rp}} + \beta_b)} \quad (4.78)$$

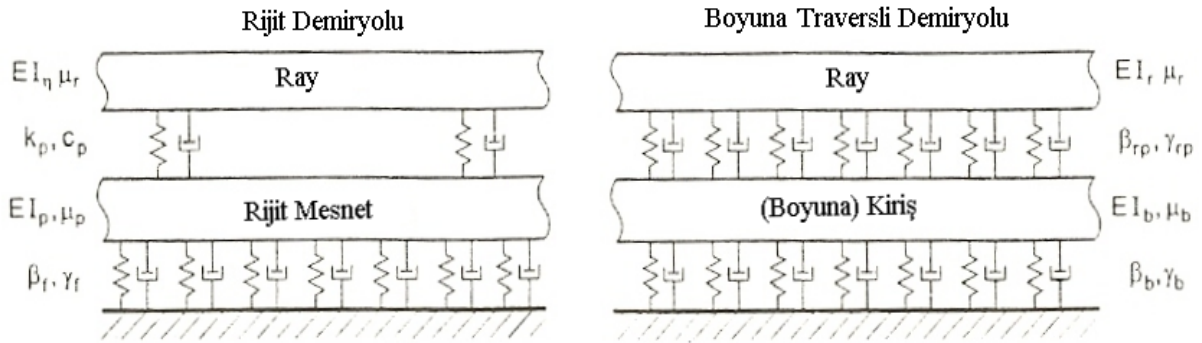
Eşitliği ile  $\beta_{\text{rot, dyn}}$  için geçerli bir ilişki elde edilir.

$$\beta_{\text{dyn}} = \frac{[-\Omega^2 \mu_{\text{rot, s}} + i\Omega(\gamma_{\text{rot, rp}} + \gamma_{\text{rot, b}}) + (\beta_{\text{rot, rp}} + \beta_{\text{rot, b}})] [i\Omega \gamma_{\text{rot, rp}} + \beta_{\text{rot, rp}}]}{-\Omega^2 \mu_{\text{rot, s}} + i\Omega(\gamma_{\text{rot, rp}} + \gamma_{\text{rot, b}}) + (\beta_{\text{rot, rp}} + \beta_{\text{rot, b}})} - \frac{[i\Omega \gamma_{\text{rot, rp}} + \beta_{\text{rot, rp}}]^2}{-\Omega^2 \mu_{\text{rot, s}} + i\Omega(\gamma_{\text{rot, rp}} + \gamma_{\text{rot, b}}) + (\beta_{\text{rot, rp}} + \beta_{\text{rot, b}})} \quad (4.79)$$

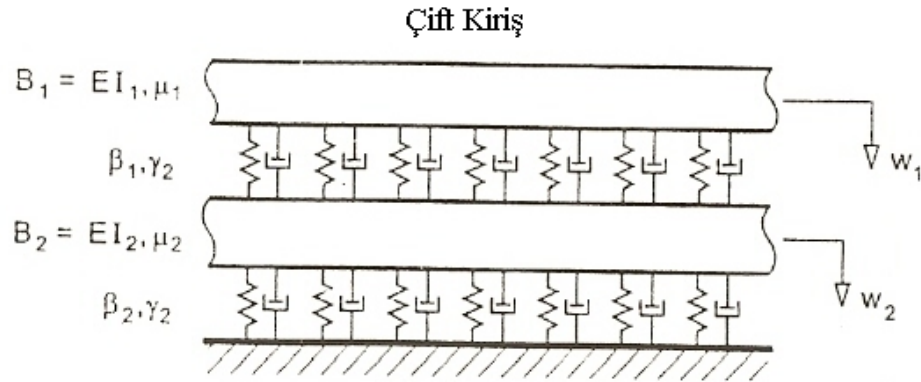
#### **4.4.6 Rijit Demiryolu ve Balastlı Uzun Traversli Demiryolunun Çift Kiriş Şeklinde Modellenmesi**

Bir dizi durum arasında, dinamik inceleme için, elastik mesnetlenmiş kirişle yetinilemez. Ray ile travers arasında yüksek elastisiteli ara ped ile, her iki sistemde de rayın yanında boyuna doğrultuda iki adet eğilme elastikliğine sahip yapı mevcuttur. Her iki sistemin

modellenmesinde çift kiriş tercih edilecektir (Şekil 4.10). Bu durum ne rijit demiryolunda ne de boyuna traversli demiryolunda tam olarak uygundur. Rijit demiryolunda demiryolu plağı dikkate alınarak plak halinde modellenmelidir. Boyuna traversli demiryolunda modelleme daha zordur, çünkü uzun travers sürekli değildir. Bunun yerine 6 metre uzunluğundaki kesitlere bölünmüştür. Yükleme uzun travers değil de raya etkiyeceği için ve yük dağılımı söz konusu olacağından, burada yine sürekli uzunluklu çift kiriş modellemesi ilk yaklaşım olarak alınabilir (Şekil 4.11).



Şekil 4.10 Rijit demiryolu ve balastlı uzun traversli demiryolu (boyuna traversli demiryolu) için mekanik modelleme (Knothe, 2001).



Şekil 4.11 Statik yükleme durumunda rijit demiryolu ve boyuna traversli demiryolu için elastik mesnetlenmiş çift kiriş modeli (Knothe, 2001).

### Ayrık Mesnetlenmenin Sürekliye Dönüştürülmesi

Burada ray ya önceden sürekli olarak mesnetlenmiştir ya da her bir mesnet noktası için ayrı ayrı mesnetlenmiştir. Ayrık mesnetli rayda mesnetleme, balastlı enine traversli demiryolundakine benzer şekilde yapılmıştır.

### **Statik Yükleme için Diferansiyel Eşitlikler**

Statik yükleme etkisi altındaki modelin davranışını bütünüyle tanımlayabilmek için, diferansiyel eşitliğe ilişkin ifadeler ile sınır ve geçiş koşullarının tekrar verilmesi gerekmektedir. Bu durumda birbiri ile ilişkilendirilen iki diferansiyel eşitlik söz konusudur.

$$B_1 \frac{d^4 \omega_1(x)}{dx^4} + \beta_1 (\omega_1(x) - \omega_2(x)) = 0 \quad (4.80)$$

$$B_2 \frac{d^4 \omega_2(x)}{dx^4} + \beta_1 (\omega_2(x) - \omega_1(x)) + \beta_2 \omega_2(x) = 0 \quad (4.81)$$

Burada Şekil 4.11'deki ilişkiler ifade edilmiştir.

$x \rightarrow \infty$  ve  $x \rightarrow -\infty$  için yine sınır koşulları geçerlidir, bu nedenle yerdeğiştirmeler ve ilk türevler ortadan kalkacaktır.  $x = 0$  noktasında geçiş koşulu olarak ilk iki kiriş için ( $i = 1, 2$ );

$$\omega_i(0 + \varepsilon) - \omega_i(0 - \varepsilon) = 0 \quad (4.82)$$

$$\omega_i'(0 + \varepsilon) - \omega_i'(0 - \varepsilon) = 0 \quad (4.83)$$

$$\omega_i''(0 + \varepsilon) - \omega_i''(0 - \varepsilon) = 0 \quad (4.84)$$

$$\omega_i'''(0 + \varepsilon) - \omega_i'''(0 - \varepsilon) = -\frac{Q_i}{B_i} \quad (4.85)$$

geçerlidir.

Burada  $Q_1 = Q$  ve  $Q_2 = 0$ 'dır. Buradan yine anlaşılır ki çözüm  $x = 0$ 'a göre simetriktir ve böylece yalnızca sınır koşullarını  $x \geq 0$  için ( $i = 1, 2$ ) ifade etmek gerekecektir.

$$\omega_i'(0) = 0 \quad (4.86)$$

$$\omega_i'''(0) = -\frac{Q_i}{2} B_i \quad (4.87)$$

### **Dinamik Yükleme için Diferansiyel Eşitlikler**

Dinamik yükleme için her iki diferansiyel eşitlik, mesnet sönümlemesi dikkate alınmaksızın sadece mesnet rijitliği dikkate alınarak tekrar ifade edilecektir. Sistemin davranışı, birbiri ile ilişkili, kısmen zamana ve mekana bağlı iki diferansiyel eşitlikle ifade edilmiştir.

$$B_1 \frac{\partial^4 \omega_1(x,t)}{\partial x^4} + \beta_1 (\omega_1(x,t) - \omega_2(x,t)) + \mu_1 \frac{\partial^2 \omega_1(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.88)$$

$$B_2 \frac{\partial^4 \omega_2(x,t)}{\partial x^4} + \beta_1 (\omega_2(x,t) - \omega_1(x,t)) + \beta_2 \omega_2(x,t) + \mu_1 \frac{\partial^2 \omega_2(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4.89)$$

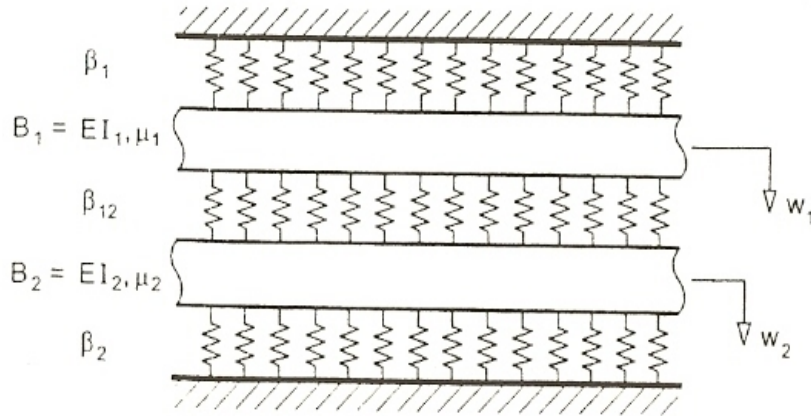
### **Statik ve Dinamik Yükleme için Diferansiyel Eşitliğin Çözümü**

Dinamik durumu inceleyebilmek için, statik durumun basitçe modifiye edilmiş bir modeli kullanılır. Zira burada birinci kiriş hem ikinci kiriş ile hem de iç sistem ile bağlanmıştır (Şekil 4.12). Mesnet parametreleri ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$  ve  $\beta_{1,2}$ ) bu kez, Şekil 4.11 ile Şekil 4.12'nin karşılaştırılmasından anlaşılabilir gibi, basitçe değiştirilmiş bir anlam ifade eder. Buradan elde edilen

$$B_1 \frac{\partial^4 \omega_1(x)}{\partial x^4} + \beta_1 \omega_1(x) + \beta_{12} (\omega_1(x) - \omega_2(x)) = 0 \quad (4.90)$$

$$B_2 \frac{\partial^4 \omega_2(x)}{\partial x^4} + \beta_2 \omega_2(x) + \beta_{12} (\omega_2(x) - \omega_1(x)) = 0 \quad (4.91)$$

$x = 0$  noktasındaki sınır koşulları 4.80 eşitliğine kıyasla değiştirilmesine gerek yoktur.



Şekil 4.12 Düzeltilmiş edilmiş mesnetli çift kirişten dinamik duruma geçiş (Knothe,2001).

Bu tür bir düzeltmeye neden gerek duyulacağı dinamik durum için geçerli olan 4.88 diferansiyel eşitliğine  $e^{i\Omega t}$  ilavesi yapıldığında anlaşılabilir. Böylece Şekil 4.12'den statik durum için elde edilen üç mesnet parametresi yerine üç adet uygun dinamik mesnet

parametresi elde edilir.

$$\begin{aligned}\beta_{1,dyn} &= -\mu_1 \Omega^2, \\ \beta_{12,dyn} &= \beta_{rp} + i\Omega \gamma_{rp}, \\ \beta_{2,dyn} &= -\mu_2 \Omega^2 + i\Omega \gamma_{rp} + \beta_{rp}\end{aligned}\quad (4.92)$$

Dinamik modeli iki parametreye indirgeme imkanı yoktur. Halihazırda kullanılan ilave ile

$$\omega_i(x) = \omega_i e^{\lambda x} \quad i = 1, 2 \quad (4.93)$$

eşitliği 4.90 eşitliğinde yerleştirilirse, böylece bu iki adet diferansiyel eşitlik ile cebirsel eşitlik sistemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda^4 B_1 + \beta_1 + \beta_{12} & -\beta_{12} \\ -\beta_{12} & \lambda^4 B_2 + \beta_{12} + \beta_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.94)$$

Buna ek olarak karakteristik eşitlik,  $\lambda^4$  için ikinci dereceden bir eşitliktir. Bu iki çözüm şöyledir;

$$\lambda_a^4 = -\frac{1}{2} \left( \frac{\beta_{12} + \beta_2}{B_2} + \frac{\beta_1 + \beta_{12}}{B_1} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\beta_{12} + \beta_2}{B_2} + \frac{\beta_1 + \beta_{12}}{B_1} \right)^2 - 4 \frac{[(\beta_1 + \beta_{12})(\beta_{12} + \beta_2) - \beta_{12}^2]}{B_1 B_2}} \quad (4.95)$$

$$\lambda_b^4 = -\frac{1}{2} \left( \frac{\beta_{12} + \beta_2}{B_2} + \frac{\beta_1 + \beta_{12}}{B_1} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\beta_{12} + \beta_2}{B_2} + \frac{\beta_1 + \beta_{12}}{B_1} \right)^2 - 4 \frac{[(\beta_1 + \beta_{12})(\beta_{12} + \beta_2) - \beta_{12}^2]}{B_1 B_2}} \quad (4.96)$$

$\lambda_a^4$  ve  $\lambda_b^4$  değerleri negatiftir. Bu şekilde iki özdeğer ifadesi elde edilir. Bunların yapısı basit, elastik mesnetlenmiş kiriştekinin aynısıdır.

$$\lambda_{a,1...4} = \frac{|\lambda_a|}{\sqrt{2}} (\pm 1 \pm i) \quad (4.97)$$

$$\lambda_{b,1...4} = \frac{|\lambda_b|}{\sqrt{2}} (\pm 1 \pm i) \quad (4.98)$$

burada  $|\lambda_a|$  ve  $|\lambda_b|$  özdeğerlerdir.

### **Rijit Demiryolu için Sadeleştirme**

Daha önce yapılan araştırmalar göstermektedir ki, demiryolu plağı/platformu çok iyi bir yaklaşımla, zemindeki titreşim yayılımı ile ilgilenmediğimizde, sabit kabul edilebilir. Bunun

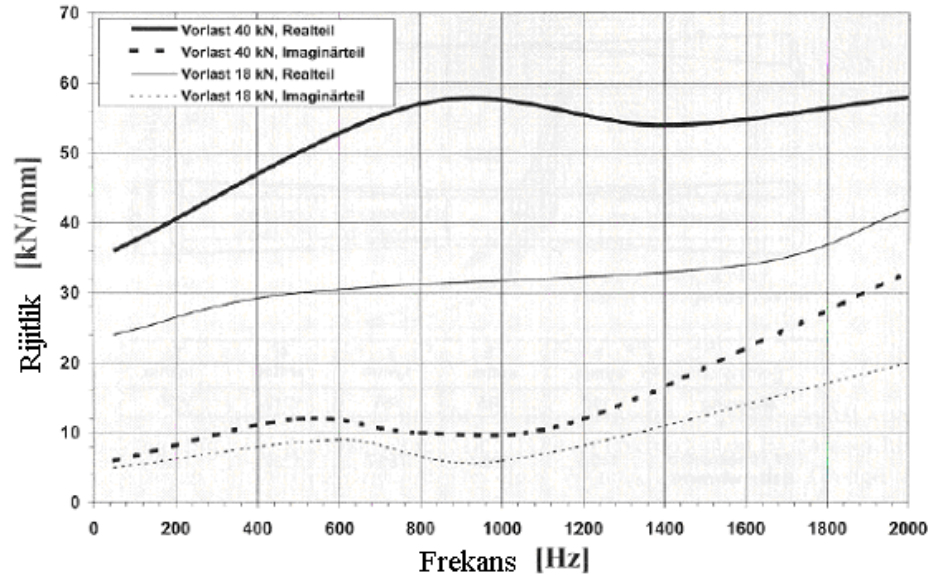
için mesnetlenmiş kirişin diferansiyel eşitliği kullanılabilir. Tek fark dinamik mesnetlenmenin elde edilmesindedir. Muhtemelen oldukça sert yapıdaki ara ped'e ilaveten bir de çok yumuşak bir plak ara plak bulunmaktadır. Böylece;

$$\frac{1}{k_{dyn}} = \frac{1}{k_{rp1} + i\Omega c_{rp1}} + \frac{1}{k_{rp2} + i\Omega c_{rp2}} \quad (4.99)$$

$$\beta_{dyn} = \frac{k_{dyn}}{L} \quad (4.39)$$

eşitlikleri elde edilir.

Ara ped ve ara plak arasına yerleştirilmiş çelik plak kütlesi ihmal edilebilir. Ara plağın gerçel kısım  $k_{rp2}$  ve imajiner kısım  $\Omega c_{rp2}$  değerleri Şekil 4.13'ten alınabilir.

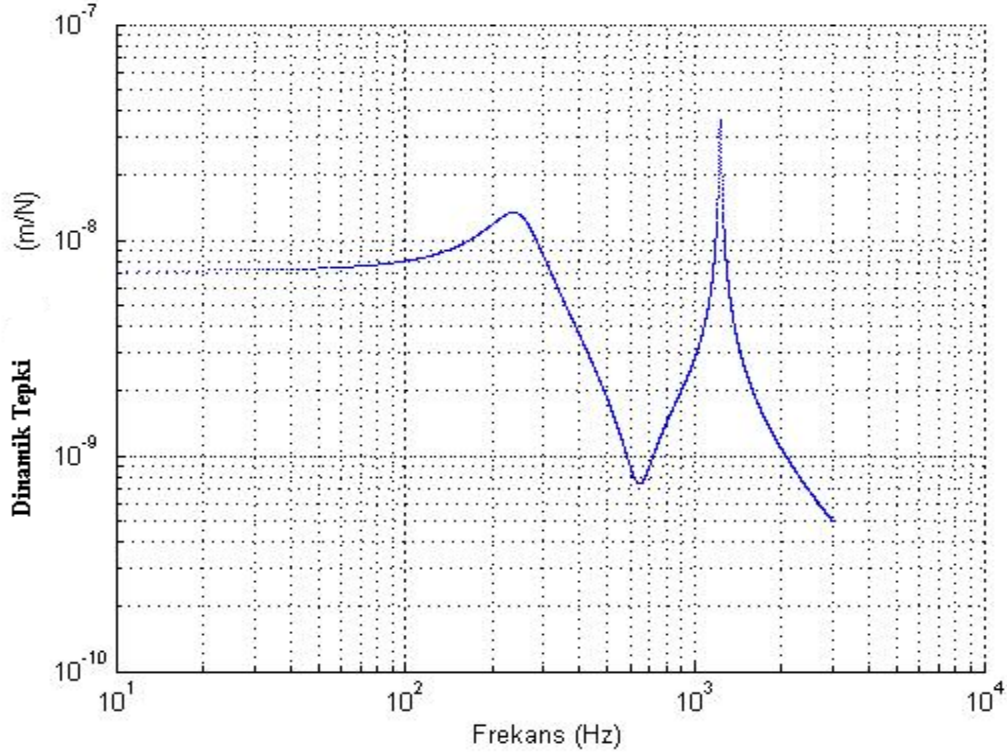


Şekil 4.13 Zwp 104 ara plağı için 18 kN ve 40 kN önyüklemeye göre elde edilen dinamik elastisite değerleri (gerçel ve imajiner kısım için) (Knothe, 2001).

Frekans aralığında bir iterasyon yapmak rijit demiryolu için mümkündür. Sabitin yalnızca maksimum değerinin kalacağı görülmektedir. Q kuvvet azaltımı genliğinin dağıtılmasında bile daha küçük maksimumlar elde edilmektedir.

#### 4.5 Kayması Engellenmemiş Kiriş için Dinamik Çözüm

Aşağıdaki grafik, 0-3000 Hz frekans değerleri arasında, UIC 60 ray tipi için, yukarıda bahsi geçen dinamik modelin, MATLAB programı yardımı ile çözümünden elde edilmiştir. Kullanılan değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.14 UIC 60 Ray tipi için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

Çizelge 4.2 Şekil 4.14 için hesaplamalarda kullanılan değerler.

Simge	Değer	Birim	Açıklama
E	$2,1 \cdot 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>	Rayın elastisite modülü
I <sub>r</sub>	0,00003055	m <sup>4</sup>	UIC60 rayın atalet momenti
G	80769230769	N	Rayın kayma modülü
A <sub>s</sub>	0,007687	m <sup>2</sup>	UIC60 rayın kesit alanı
L	0,60	m	Travers aralığı
B <sub>r</sub>	$6,41 \cdot 10^6$	N/m <sup>2</sup>	Rayın rijitliği
m <sub>r</sub>	60,3	kg/m	Birim uzunluktaki ray kütlesi
k <sub>sp</sub>	$4,1 \cdot 10^8$	N/m	Travers mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>sp</sub>	$7,4 \cdot 10^4$	Ns/m	Travers mesnetinin sönümleme katsayısı
k <sub>rp</sub>	$2,8 \cdot 10^8$	N/m	Ray mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>rp</sub>	$6,3 \cdot 10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin sönümleme katsayısı
m <sub>s</sub>	290	kg	Travers kütlesi
k <sub>b</sub>	$1,8 \cdot 10^8$	N/m	Balast tabakasının esneklik katsayısı
c <sub>b</sub>	$8,22 \cdot 10^4$	Ns/m	Balast tabakasının sönümleme katsayısı
k <sub>f</sub>	$2,58 \cdot 10^8$	N/m	Zeminin esneklik katsayısı
c <sub>f</sub>	$1,2 \cdot 10^4$	Ns/m	Zeminin sönümleme katsayısı

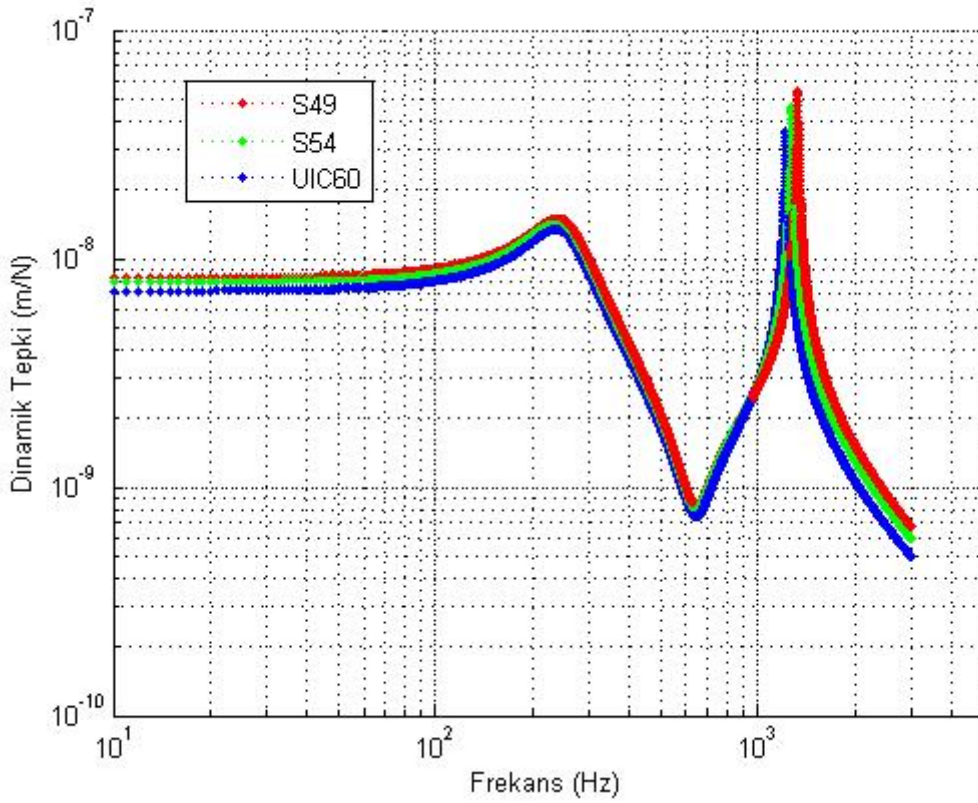
Grafik çözümden anlaşılacağı üzere; 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3,5 \times 10^{-8}$  metredir.

#### 4.5.1 Farklı Ray Tipleri için Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm

Aşağıdaki grafik, 0-3000 Hz frekans değerleri arasında, S49, S54 ve UIC 60 ray tipleri için, bahsi geçen dinamik modelin, MATLAB programı yardımı ile çözümünden elde edilmiştir. Kullanılan değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Grafik çözümden anlaşılacağı üzere; S49 ray tipi kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $5.7 \times 10^{-8}$  metredir. S54 ray tipi kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $4.7 \times 10^{-8}$  metredir. UIC60 ray tipi kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme değeri yaklaşık olarak  $3.7 \times 10^{-8}$  metredir.

Her üç ray tipi için de maksimum çökmeler 1020 – 1050 Hz frekans değerleri arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 4.15 S49, S54 ve UIC 60 ray tipleri için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

Çizelge 4.3 Şekil 4.15 için hesaplamalarda kullanılan parametreler.

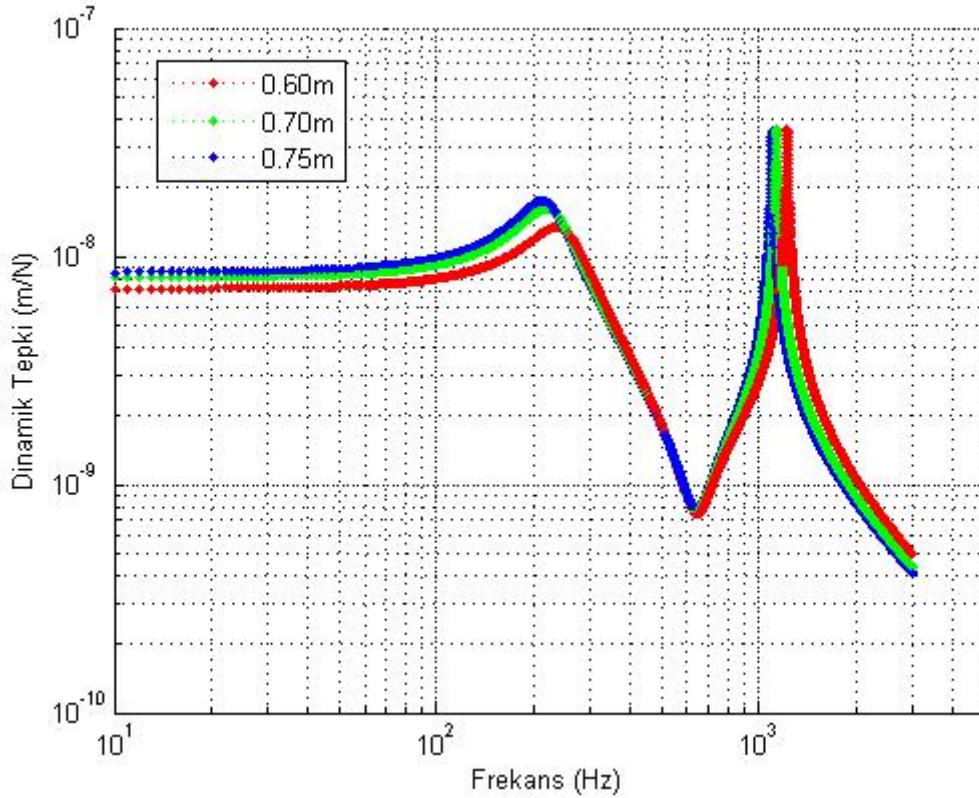
Simge	Değer	Birim	Açıklama
E	$2,1.10^{11}$	N/m <sup>2</sup>	Rayın elastisite modülü
I <sub>r</sub>	0,00001819	m <sup>4</sup>	S49 rayın atalet momenti
I <sub>r</sub>	0,00002073	m <sup>4</sup>	S54 rayın atalet momenti
I <sub>r</sub>	0,00003055	m <sup>4</sup>	UIC60 rayın atalet momenti
G	80769230769	N	Rayın kayma modülü
A <sub>s</sub>	0,006297	m <sup>2</sup>	S49 rayın kesit alanı
A <sub>s</sub>	0,006948	m <sup>2</sup>	S54 rayın kesit alanı
A <sub>s</sub>	0,007687	m <sup>2</sup>	UIC60 rayın kesit alanı
L	0,60	m	Travers aralığı
m <sub>s</sub>	290	kg	Travers kütlesi
m <sub>r</sub>	49,4	kg/m	Birim uzunluktaki S49 ray kütlesi
m <sub>r</sub>	54,5	kg/m	Birim uzunluktaki S54 ray kütlesi
m <sub>r</sub>	60,3	kg/m	Birim uzunluktaki UIC60 ray kütlesi
k <sub>sp</sub>	$4,1.10^8$	N/m	Travers mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>sp</sub>	$7,4.10^4$	Ns/m	Travers mesnetinin sönümleme katsayısı
k <sub>rp</sub>	$2,8.10^8$	N/m	Ray mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>rp</sub>	$6,3.10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin sönümleme katsayısı
k <sub>b</sub>	$1,8.10^8$	N/m	Balast tabakasının esneklik katsayısı
c <sub>b</sub>	$8,22.10^4$	Ns/m	Balast tabakasının sönümleme katsayısı
k <sub>f</sub>	$2,58.10^8$	N/m	Zeminin esneklik katsayısı
c <sub>f</sub>	$1,2.10^4$	Ns/m	Zeminin sönümleme katsayısı

#### 4.5.2 Farklı Travers Aralıkları için Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm

Aşağıdaki grafik, 0-3000 Hz frekans değerleri arasında, 0.60 m, 0.70 m ve 0.75 m travers aralıkları için, bahsi geçen dinamik modelin MATLAB programı yardımı ile çözümünden elde edilmiştir. Kullanılan değerler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Grafik çözümden anlaşılacağı üzere; 0.60 m travers aralığı kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.8 \times 10^{-8}$  metredir. 0.70 m travers aralığı kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.8 \times 10^{-8}$  metredir. 0.75 m travers aralığı kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.8 \times 10^{-8}$  metredir.

Her üç ayrı travers aralığı için de maksimum çökmeler 1000 – 1040 Hz frekans değerleri arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 4.16 0.60 m, 0.70 m ve 0.75 m travers aralıkları için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

Çizelge 4.4 Şekil 4.16 için hesaplamalarda kullanılan değerler.

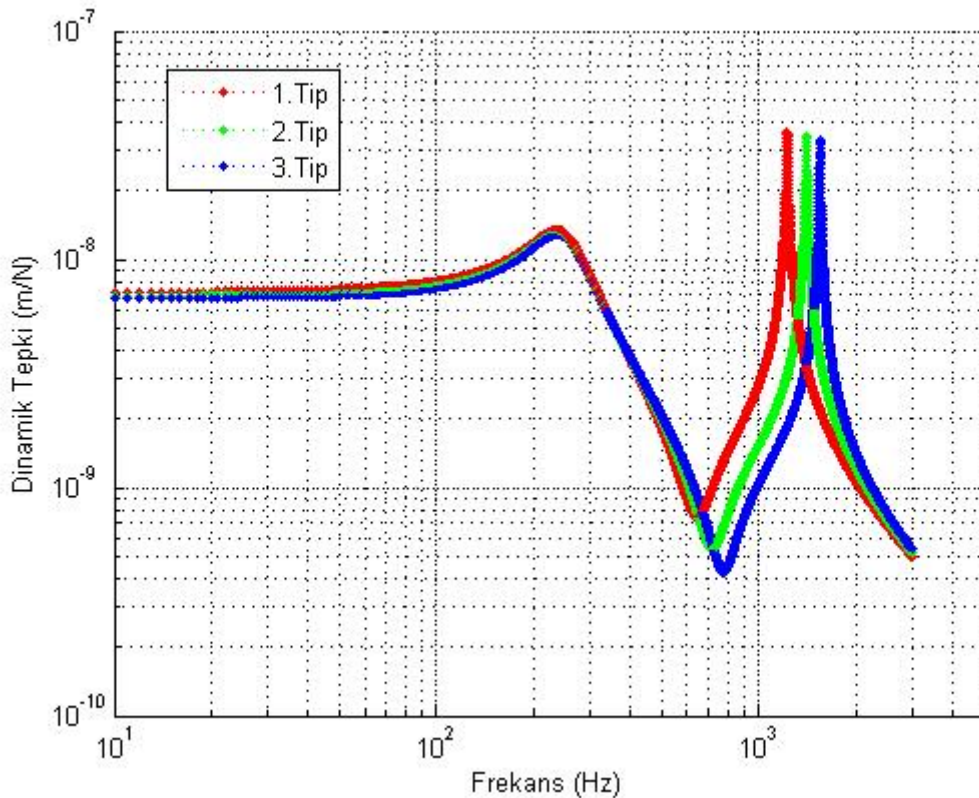
Simge	Değer	Birim	Açıklama
E	$2,1 \cdot 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>	Rayın elastisite modülü
I <sub>r</sub>	0,00003055	m <sup>4</sup>	UIC60 rayın atalet momenti
G	80769230769	N	Rayın kayma modülü
A <sub>s</sub>	0,007687	m <sup>2</sup>	UIC60 rayın kesit alanı
L	0,60-0,70-0,75	m	Travers aralığı
m <sub>s</sub>	290	kg	Travers kütlesi
m <sub>r</sub>	60,3	kg/m	Birim uzunluktaki UIC60 ray kütlesi
k <sub>sp</sub>	$4,1 \cdot 10^8$	N/m	Travers mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>sp</sub>	$7,4 \cdot 10^4$	Ns/m	Travers mesnetinin sönümlenme katsayısı
k <sub>rp</sub>	$2,8 \cdot 10^8$	N/m	Ray mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>rp</sub>	$6,3 \cdot 10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin sönümlenme katsayısı
k <sub>b</sub>	$1,8 \cdot 10^8$	N/m	Balast tabakasının esneklik katsayısı
c <sub>b</sub>	$8,22 \cdot 10^4$	Ns/m	Balast tabakasının sönümlenme katsayısı
k <sub>f</sub>	$2,58 \cdot 10^8$	N/m	Zeminin esneklik katsayısı
c <sub>f</sub>	$1,2 \cdot 10^4$	Ns/m	Zeminin sönümlenme katsayısı

### 4.5.3 Farklı Ray Altı Pedleri Kullanılması Halinde Kayması Engellenmemiş Kiriş Modeli ile Dinamik Çözüm

Aşağıdaki grafik, 0-3000 Hz frekans değerleri arasında, 1. tip, 2. tip ve 3. tip ray altı pedleri için, bahsi geçen dinamik modelin MATLAB programı yardımı ile çözümünden elde edilmiştir. Kullanılan değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Grafik çözümden anlaşılacağı üzere; 1.tip ray altı ped kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.8 \times 10^{-8}$  metredir. 2. tip ray altı pedi kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.5 \times 10^{-8}$  metredir. 3. tip ray altı ped kullanılması halinde 2. maksimum noktadaki dinamik çökme yaklaşık olarak  $3.4 \times 10^{-8}$  metredir.

Dikkat edilmesi gereken konu söz konusu çökmelerin meydana geldiği frekanslar arasındaki farktır. 1. tip ray altı ped için maksimum çökme 1025 Hz frekansında gerçekleşirken, 2. tip ray altı ped için maksimum çökme 1050 Hz, 3. tip ray altı pedi için ise maksimum çökme 1070 Hz frekansında gerçekleşmektedir.

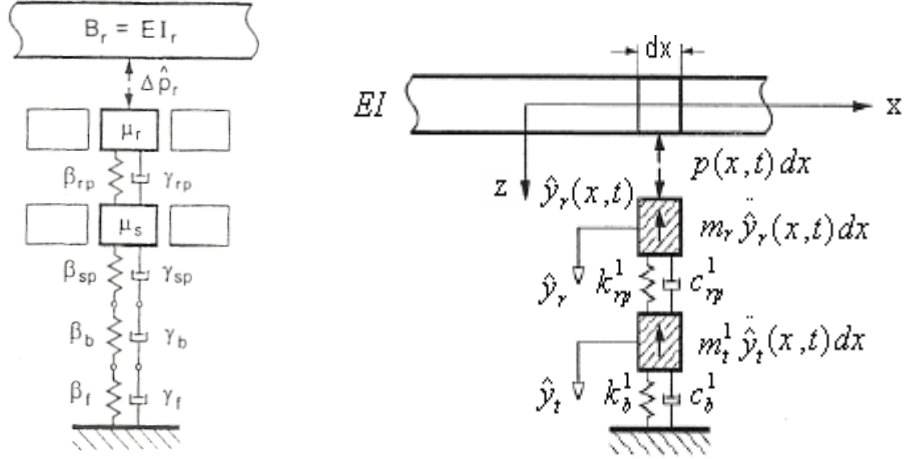


Şekil 4.17 1. Tip, 2. Tip ve 3. Tip ray altı pedleri için Dinamik Tepki-Frekans grafiği.

Çizelge 4.5 Şekil 4.17 için analizde kullanılan değerler.

Simge	Değer	Birim	Açıklama
E	$2,1.10^{11}$	N/m <sup>2</sup>	Rayın elastisite modülü
I <sub>r</sub>	0.00003055	m <sup>4</sup>	UIC60 rayın atalet momenti
G	80769230769	N	Rayın kayma modülü
A <sub>s</sub>	0,007687	m <sup>2</sup>	UIC60 rayın kesit alanı
L	0,60	m	Travers aralığı
m <sub>s</sub>	290	kg	Travers kütlesi
m <sub>r</sub>	60,3	kg/m	Birim uzunluktaki UIC60 ray kütlesi
k <sub>sp</sub>	$4,1.10^8$	N/m	Travers mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>sp</sub>	$7,4.10^4$	Ns/m	Travers mesnetinin sönümleme katsayısı
k <sub>rp</sub>	$2,8.10^8$	N/m	Ray mesnetinin (1. Tip) esneklik katsayısı
k <sub>rp</sub>	$3,7.10^8$	N/m	Ray mesnetinin (2. Tip) esneklik katsayısı
k <sub>rp</sub>	$4,5.10^8$	N/m	Ray mesnetinin (3. Tip) esneklik katsayısı
c <sub>rp</sub>	$6,3.10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin (1. Tip) sönümleme katsayısı
c <sub>rp</sub>	$8,2.10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin (2. Tip) sönümleme katsayısı
c <sub>rp</sub>	$9,2.10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin (3. Tip) sönümleme katsayısı
k <sub>b</sub>	$1,8.10^8$	N/m	Balast tabakasının esneklik katsayısı
c <sub>b</sub>	$8,22.10^4$	Ns/m	Balast tabakasının sönümleme katsayısı
k <sub>f</sub>	$2,58.10^8$	N/m	Zeminin esneklik katsayısı
c <sub>f</sub>	$1,2.10^4$	Ns/m	Zeminin sönümleme katsayısı

#### 4.6 Elastik Mesnetli Kirişin Detaylı Travers Mesnet Modeli (DII) ile Çift Kiriş Modelinin (CII) Karşılaştırılması



a) Elastik Mesnetli Kirişin Detaylı Travers Mesnet Modeli (Balast Kütlesiz)      b) Çift Kiriş Modeli (CII)

Şekil 4.18 Karşılaştırılan dinamik yol modelleri (Knothe, 2001).

Hesaplarda; her iki model de sürekli mesnetlenmiş modele dönüştürülmüştür.

Şekil 4.18.(a)'daki model için dinamik yatak katsayısı;

$$\beta_{\text{dyn}} = \frac{\Delta p_r}{\Delta \omega_r} = \frac{(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} - \mu_r \Omega^2)(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} + \beta_{\text{dyn,spbf}} - \mu_s \Omega^2) - (\beta_{rp} + i\gamma_{rp})^2}{(\beta_{rp} + i\gamma_{rp} + \beta_{\text{dyn,spbf}} - \mu_s \Omega^2)} \quad (4.100)$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Eşitlikteki  $B_{\text{dyn,spbf}}$  ise;

$$\frac{1}{\beta_{\text{dyn,spbf}}} = \frac{1}{\beta_{sp} + i\Omega \gamma_{sp}} + \frac{1}{\beta_b + i\Omega \gamma_b} + \frac{1}{\beta_f + i\Omega \gamma_f} \quad (4.101)$$

şeklinde her üç değişken de (travers altı pedi, balast tabakası ve zemin elastiklik ve sönümleme değerleri) hesaba katılarak bulunmuştur.

Şekil 4.18.(a)'daki model için birim yük etkisi altındaki dinamik çökme bulunurken;

$$H_r(i\Omega) = \sqrt[4]{\frac{1}{64EI_r\beta^3_{dyn}}} \left[ \frac{1 + 2\kappa_{dyn}}{\sqrt{1 + \kappa_{dyn}}} \right] \quad (4.102)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Şekil 4.18.(b)'de gözükten çift kiriş modelinde ise  $B_{dyn}$  ;

$$\beta_{dyn} = \frac{\Delta\hat{p}}{\Delta\hat{y}_r} \quad (N/m^2) \quad (4.103)$$

$$\beta_{dyn} = \frac{[-\Omega^2\mu_s + i\Omega(\gamma_{rp} + \gamma_b) + (\beta_{rp} + \beta_b)] * [-\Omega^2\mu_r + i\Omega\gamma_{rp} + \beta_{rp}] - [i\Omega\gamma_{rp} + \beta_{rp}]^2}{-\Omega^2\mu_s + i\Omega(\gamma_{rp} + \gamma_b) + (\beta_{rp} + \beta_b)} \quad (4.104)$$

şeklinde bulunmuştur. Birim yük etkisi altındaki dinamik çökme bulunurken;

$$H_r(i\omega) = \frac{1}{\sqrt[4]{64\beta_{dyn}^3 EI}} \quad (m/N) \quad (4.105)$$

eşitliği kullanılmıştır.

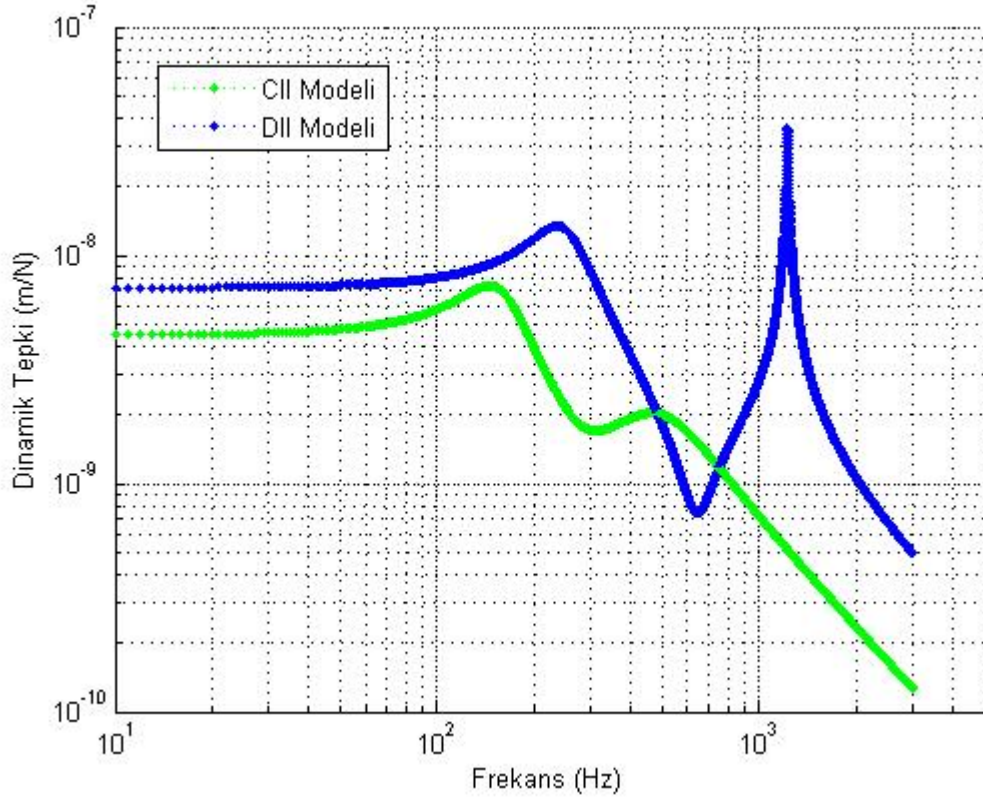
İki modelin karşılaştırması yapılırken aralarındaki iki farktan biri, yukarıda anlatılan  $B_{dyn}$  yatak katsayısının hesabıdır. Diğeri ise, Şekil 4.18.(a)'daki modelde eşitliğin  $\kappa_{dyn}$  katsayısı ile çarpılmasıdır.

$\kappa_{dyn}$  ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$\kappa_{dyn} = \frac{\sqrt{EI_r\beta_{dyn}}}{2GA_s} \quad (4.106)$$

Şekil 4.19'da; 0-3000 Hz frekans değerleri arasında, UIC60 ray tipi için, dinamik analizlerde kullanılan elastik mesnetli kirişin detaylı travers mesnet modeli ile çift kiriş modeline ilişkin analiz sonuçları aynı grafikte karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir.

Analiz için kullanılan parametreler Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Elastik mesnetli kirişin detaylı travers mesnet modeli (DII) ve çift kiriş modeli (CII) için Dinamik Tepki-Frekans eğrilerinin karşılaştırılması.

Çizelge 4.6 Şekil 4.19 için analizde kullanılan parametreler.

Simge	Değer	Birim	Açıklama
E	$2,1 \cdot 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>	Rayın elastisite modülü
I <sub>r</sub>	0,00003055	m <sup>4</sup>	UIC60 rayın atalet momenti
G	80769230769	N	Rayın kayma modülü
A <sub>s</sub>	0,007687	m <sup>2</sup>	UIC60 rayın kesit alanı
L	0,60	m	Travers aralığı
B <sub>r</sub>	$6,41 \cdot 10^6$	N/m <sup>2</sup>	Rayın rijitliği
m <sub>r</sub>	60,3	kg/m	Birim uzunluktaki ray kütlesi
k <sub>sp</sub>	$4,1 \cdot 10^8$	N/m	Travers mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>sp</sub>	$7,4 \cdot 10^4$	Ns/m	Travers mesnetinin sönümleme katsayısı
k <sub>rp</sub>	$2,8 \cdot 10^8$	N/m	Ray mesnetinin esneklik katsayısı
c <sub>rp</sub>	$6,3 \cdot 10^4$	Ns/m	Ray mesnetinin sönümleme katsayısı
m <sub>s</sub>	290	kg	Travers kütlesi
k <sub>b</sub>	$1,8 \cdot 10^8$	N/m	Balast tabakasının esneklik katsayısı
c <sub>b</sub>	$8,22 \cdot 10^4$	Ns/m	Balast tabakasının sönümleme katsayısı
*k <sub>f</sub>	$2,58 \cdot 10^8$	N/m	Zeminin esneklik katsayısı
*c <sub>f</sub>	$1,2 \cdot 10^4$	Ns/m	Zeminin sönümleme katsayısı

\* Zemine ilişkin değerler, Şekil 4.18.(b)'deki modelde yer almamasından dolayı kırmızı ile belirtilmiştir. Söz konusu değerler normal zemin olarak adlandırılan zemin koşullarına ilişkin esneklik ve sönümleme katsayısı değerleridir.

#### 4.7 Seçilen Yol Modeli için Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Seçilen standart yol modeli (DI) için, farklı yol bileşenlerine (travers aralığı, ray tipi, ray elastomer mesnet tipi,) bağlı olarak, 0-3000 Hz frekans aralığındaki yola ilişkin dinamik tepki değerleri (birim yük etkisi altındaki dinamik çökme değerleri) MATLAB programı aracılığıyla hesaplanarak, çözümlenmeler sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir. Elde edilen grafikler ilgili bölümlerde yorumlanmıştır. Çözümlenmelerde kullanılan parametreler, tablolar grafiklerin altında ayrıca ilgili çizelgelerde verilmiştir.

Genel olarak tez çalışması sırasında görülmüştür ki; yol bileşenlerinde yapılacak farklı seçimler dinamik modeller ile hesaplanan maksimum çökme değerlerinde farklılıklar meydana getirmektedir. Aynı şekilde maksimum çökmenin meydana geleceği frekansı değiştirmek de, yol bileşenlerinde yapılacak değişikliklerle mümkündür.

Yol üstyapısında meydana gelecek çökmeler elbette ki kullanılacak olan ray tipiyle doğru orantılı olacağı gibi, bu raylara gelen kuvvetleri zemine indirgeyerek ileten ray altı pedlerinin de önemi bu çalışma ile ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde travers aralığında yapılacak ayarlamalar da çökme miktarını ve bu çökmenin meydana geleceği frekans büyüklüğünü değiştirebilmektedir.

Olaya ekonomik açıdan yaklaşacak olursak, ve basit bir hesap yapacak olursak, travers aralığının 0.75 m yerine 0.60 m kullanılması travers sayısında %25'lik bir artışa neden olacaktır. Ancak görülmektedir ki, travers aralığının değişimi çökme miktarında çok büyük değişikliklere neden olmamaktadır. Oluşabilecek farklılıkların ray altı pedinde yapılacak değişikliklerle yok edilmesi mümkündür. Özellikle son yıllarda yapılan demiryolu yatırımlarında projelendirme aşamasında dinamik hesaplara önem verilmesi halinde, kurulacak olan modellerde sistemin rijitliği öngörülebilir. Bilimin kullanılması sayesinde ülkemiz ekonomisine fayda sağlanabileceğinin farkında olmamız gerekmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Demiryolu sistemleri elastik yapılarından ötürü hız ve dingil yüklerindeki artışa bağlı olarak oldukça fazla titreşime ve zorlayıcı kuvvete maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler sistemlerde çökme gibi tepkiler meydana getirmektedir. Yük taşıyan her yapıda beklendiği gibi belirli sınırlar dahilinde demiryolu sistemlerinde de çökmelerin olması sürpriz değildir. Oluşacak bu tepkinin maksimum değerinin hangi frekansta oluşacağını bilmemiz, rezonans riskini en aza indirmemizde bize yardımcı olacaktır. Zorlayıcı kuvvetlerden bir veya birkaçının frekansı ile sistemin doğal frekansının çakışması durumunda, titreşim genliği açısından tahrip edici özelliğe sahip rezonans titreşimleri meydana gelecektir. Bu tip sorunlarla karşılaşılması için, yapacağımız kapsamlı bir dinamik analiz yardımıyla uygun yol tipini, uygun yol bileşenleri ile birlikte seçebiliriz.

Dünya çapında demiryolu yapısının dinamik davranışı konusunda birçok araştırma mevcuttur ve halen de yeni araştırmalar yapılmaktadır. Ne yazık ki ülkemizde bu konu ile ilgili yapılan araştırma sayısı oldukça azdır. Bilinmektedir ki ülkemizde son yıllarda demiryolu yatırımlarında büyük artışlar olmuştur. Bu yatırımlar elbette ki beraberinde ekonomik yükler getirecektir. Demiryolu sistemlerinin ekonomik olarak değerlendirilmeleri yapılırken sadece yatırım maliyeti değil, işletim maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin ihtiyaçtan farklı olarak modellenmesi neticesinde, işletme esnasında beklenenden erken yorulmalar ve bu yorulmalar neticesinde de üstyapı elemanlarında hasarlar oluşabilir. Oysa baştan yapılacak doğru tespitler ile bu gibi kayıplar önlenabilir. Aynı şekilde sistem içerisinde optimizasyon yapılarak daha ekonomik çözümler de bulunabilir.

Bu çalışmada demiryolu yapısının ve demiryolu taşıtlarının dinamik özelliklerine değinilmiş, yolun düşey yöndeki dinamik stabilitesi için taşıtların ve yol yapısının dinamik olarak nasıl modellenmesi gerektiği incelenmiştir. Değişik hesap yöntemleri araştırılmış ve dinamik analizlerde kullanılan başlıca yöntemlerden birisi olan frekans tanım alanlı çözüm yöntemi ile 0 – 3000 Hz frekans aralığında yolda oluşabilecek dinamik tepkiler hesaplanmıştır. Farklı frekans aralıklarında çeşitli üstyapı bileşenlerinin kullanılması durumunda, yolun dinamik davranışında oluşacak değişiklikler incelenmiştir. Örneğin farklı aralıklarda travers kullanılması durumunda demiryolu üstyapısında meydana gelebilecek çökme miktarları arasındaki farklılıkların çok büyük olmadığı, ancak kullanılacak ray elastomer mesnetlerindeki farklılıkların çökme miktarlarını büyük ölçüde değiştirdiği gözlenmiştir.

Ülkemizde yapılan kentiçi raylı sistem yatırımlarında, projelendirme esnasında kullanılan bazı

değerlerin hep aynı olduğu gözlenmektedir. Tüm bu projelendirmeler sırasında modellemeler yapılarak elde edilecek kazanımlar şüphesiz ki önem taşımaktadır. Travers aralığının 60 cm yerine 75 cm kullanılması dinamik olarak büyük bir etki yaratmayacak olsa da, kullanılacak olan travers, bağlantı elemanı vb. elemanların miktarlarında %20 azalma sağlayacaktır. Bu değişimden ortaya çıkacak etki, örneğin seçilecek ray altı pedin değiştirilmesi ile telafi edilebilir. Bu ve bunun gibi değişiklikler sayesinde daha ekonomik üstyapı tasarımı sağlanabilecektir. İleride bu konuda yapılacak bir çalışmanın ülkemiz ekonomisine katkı sağlayacağı şüphesizdir.

Bu çalışmada, aynı konuda Sevgi Yalçın tarafından 2006 yılında hazırlanan “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi” isimli tez çalışmasından bir adım ileriye gidilerek demiryolu üstyapısının travers altında kalan kısmı detaylandırılmıştır. Söz konusu tabakada balast, zemin ve travers altı ped kullanılarak modellemeler ve analizler yapılmıştır. Yapılan bu detaylandırma ile beraber balast yerine betonarme oturma tabakası kullanılan sistemler için de modellemeler yapmak mümkün hale gelmiştir. Bu sayede ileride bu konuda yapılacak araştırmalara ışık tutulması amaçlanmıştır.

**KAYNAKLAR**

- De Man, A. P., (2002) “Dynatrack A Survey of Dynamic Railway Track Properties and Their Quality”, Ph.D. Thesis, TU Delft University, Netherlands.
- Esveld, C., (2001), “Modern Railway Track”, Second Edition, TU Delft University, Netherlands.
- Esveld, C., (2003) “Conventional Track Structures”, TU Delft University Lesson Notes, Netherlands.
- Erel, A., (2002) “Ankara Metrosu 3. Aşama İşleri İçin Rijit Üstyapı Seçeneklerinin Araştırılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erel, A., (2003) “Ankara Metrosu 3. Aşama İşleri Travers Aralıklarının Dinamik Analizle Tahkiki”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erel, A., (2005) “Demiryolu Üstyapısı”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Ders Notu, İstanbul.
- Erkul, C., (2002) “Demiryolunun Tarihsel Gelişimi ve Demiryolu Üstyapısı”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bitirme Tezi, İstanbul.
- Quante, F., (2001) “Innovative Track Systems Technical Construction”, European Community Competetive and Sustainable Growth Programme, Karlsruhe.
- Knothe, K., Grassie, S.L., (1993) “Modeling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies”, *Vehicle System Dynamics* 22, 209-262, Netherlands.
- Knothe, K., (2001) “Gleisdynamik” Technische Universität, Berlin.
- Ludvigh, E., (2004) “Structures of Permanent Way”, *Department of Highway and Railway Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, Hungary.
- Manning, J.E., (1985), “In-service Evaluation of Four Types of Damped Subway Car Wheels” U.S. Department of Transportation, Washington DC.
- Yalçın, S. N., (2006), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.
- Yılmaz, V. O., (2004), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Davranışı”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi		04.08.1981
Doğum yeri		Polatlı / Ankara
Lise	1991-1998	Polatlı Anadolu Lisesi
Lisans	1998-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Programı

**Çalıştığı kurumlar**

2004-2006	Yapı Merkezi İnş. ve San. A.Ş. / İstanbul - Türkiye <i>Zeytinburnu-Bağcılar Tramvay Projesi</i>
2007-2008	Alsim Alarko Taahhüt Grubu / Kocaeli - Türkiye <i>Teklif Departmanı</i>
2008-Devam	Doğuş İnşaat Ukrayna / Kiev - Ukrayna <i>Teklif Departmanı</i>