İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİNİN MODEL HAT ÜZERİNDE ÇOK YÖNLÜ ANALİZİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Veysel ARLI
501022206

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Mart 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Haziran 2009

TEZ DANIŞMANI : **Doç.Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Emine AĞAR (İ.T.Ü.)**

Prof.Dr. Mete SÜMER (İ.Ü.)

Doç.Dr. Cengiz KUZU (İ.T.Ü)

Doç. Dr. İsmail ŞAHİN (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Son zamanlarda ülkemizde kentiçi ve yüksek hızlı raylı sistemlere verilen önem artmaktadır. Buna bağlı olarak, demiryolunun titreşim ve gürültü gibi çevresel etkileri, üzerinde durulması gereken önemli konulardır. Buna karşın, ülkemizde demiryolu dinamiği ve titreşimleri konusunda yeterli akademik çalışmanın bulunmaması nedeniyle, demiryolu titreşimlerinin model hat üzerinde çok yönlü analizi yapılmıştır. Tezde özellikle ray-tekerlek temasından kaynaklanan titreşimlerin üstyapı elemanlarına etkisi incelenmiştir.

Çalışma kapsamında arazi titreşim ölçümleri yapılmıştır. Ancak bu ölçümlerin laboratuvar ortamında tam kontrollü olarak yapılması daha faydalı sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Yakın zamanda bu tezin temeli üstüne kapsamlı çalışmaların yapılması gerektiğine inanmaktayım.

Çalışmanın yürütülmesi ve yönlendirilmesindeki değerli katkıları nedeniyle Sayın Hocam Doç. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e ve Sayın Doç. Dr. Haluk EROL'a içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmanın başından itibaren her türlü desteklerini esirgemeyen İstanbul Ulaşım A.Ş yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkürlerimi bir borç biliyorum.

Haziran 2009 Veysel ARLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ …… ii
İÇİNDEKİLER…… v
KISALTMALAR…… vii
ÇİZELGE LİSTESİ…… ix
ŞEKİL LİSTESİ……... xi
SEMBOL LİSTESİ…… xvii
ÖZET…… xix
SUMMARY…… xxi
1. GİRİŞ…… 1
1.1 Genel……..... 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı…… 3
2. TİTREŞİM TEORİSİ VE DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİ…….. 5
2.1 Titreşim Teorisi…… 5
2.2 Demiryolu Titreşimlerinin Nedenleri…….. 13
2.2.1 Kısa dalga boylu bozukluklar……..... 15
2.2.2 Uzun dalga boylu bozukluklar……..... 16
2.2.3 Darbe yükleri oluşturan düzensizlikler……. 18
2.3 Demiryolu Titreşiminin Özellikleri……..... 19
2.3.1 Yolun titreşim öz frekansları ve öz modları…… 19
2.3.2 Yol elemanlarının dinamik özellikleri…… 25
3. DEMİRYOLU TİTREŞİM MODELLERİ…….. 33
3.1 Taşıt Modelleri……..... 36
3.2 Üstyapı Eleman Modelleri……... 39
3.2.1 Ray modelleri…… 39
3.2.2 Elastik Tabaka modelleri…….. 40
3.2.3 Travers modelleri…… 41
3.2.4 Balast ve zemin modelleri……..... 42
3.2.4.1 Winkler temel modeli…….. 43
3.2.4.2 Pasternak temel modeli…… 46
3.3 Demiryolu Modeli…… 48
3.4 Ray-Tekerlek İlişki Modeli…….. 51
3.4.1 Frekansa bağlı çözüm teknikleri…….. 52
3.4.2 Zamana bağlı çözüm teknikleri…… 53
4. ANALİTİK VE NÜMERİK YÖNTEMLE TİTREŞİM ANALİZİ…… 55
4.1 Analitik Yöntemle Çözüm…….. 55
4.1.1 Analitik yöntemle statik analiz…….. 55
4.1.1.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme…… 56
4.1.1.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme…… 57
4.1.2 Analitik yöntemle dinamik analiz…….. 58
4.1.2.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme…… 62

4.1.2.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme…….. 66
4.2 Nümerik Yöntemle Çözüm…….. 67
4.2.1 Nümerik yöntemle statik analiz……..... 68
4.2.1.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme…… 68
4.2.1.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme……. 71
4.2.2 Nümerik yöntemle dinamik analiz……. 73
4.3 Analitik ve Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması……..... 81
4.3.1 Statik analiz sonuçlarının karşılaştırılması……..... 81
4.3.2 Dinamik analiz sonuçlarının karşılaştırılması……. 83
5. ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI…….. 85
5.1 Taşıtlardan Kaynaklanan Düşey Yönlü Ray Titreşimlerinin Ölçülmesi……. 85
5.1.1 Amaç ve kapsam…….. 85
5.1.2 Ölçüm yöntemi…… 89
5.1.3 Ölçümlerin değerlendirilmesi…….. 89
5.1.4 Sonuçlar…… 91
5.2 Çekiç Darbe Testi İle Demiryolunun Doğal Titreşim Frekanslarının Ölçülmesi……... 92
5.2.1 Amaç ve kapsam…….. 92
5.2.2 Ölçüm yöntemi……. 93
5.2.3 Ölçüm sonuçları…… 95
5.2.4 Ölçüm sonuçlarına göre nümerik modelin doğrulanması……. 98
5.3 Yolculuk Konforuna Yönelik Taşıt Titreşimlerinin Ölçülmesi ……. 100
5.1.1 Amaç ve kapsam…….. 100
5.1.2 Ölçüm yöntemi…… 100
5.1.3 Ölçümlerin değerlendirilmesi…….. 101
5.1.4 Sonuçlar…… 105
6. TİTREŞİM AZALTMA YÖNTEMLERİ……. 107
6.1 Titreşimlerin İzolasyonu…….. 107
6.2 Demiryolunda Titreşim Azaltma Yöntemleri…….. 109
6.2.1 Taşıtta Alınabilecek Titreşim Azaltma Yöntemleri……. 111
6.2.2 Yolda Alınabilecek Titreşim Azaltma Yöntemleri…… 112
6.3 Demiryolu Dinamiği Açısından Optimum Yol Rijitlik Katsayısı……... 116
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER……. 123
KAYNAKLAR……. 131
EKLER……. 137

KISALTMALAR

ISO : Uluslararası Standartlar Birliği
LRTS : (Light Rail Transit System) Hafif Raylı Transit Sistem
MGT : Milyon Gros Ton
NS : Hollanda Demiryolları
ORE : (Office for Research and Experiments) Araştırma ve Deney Ofisi
UIC : Uluslararası Demiryolları Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Demiryolu titreşimi problemleri ve frekans aralıkları…….....	2
Çizelge 2.1	Taşıttan kaynaklanan bazı tahrik frekansları…….....	15
Çizelge 2.2	Ondülasyondan ve mesnet aralığından kaynaklanan tahrik frekansları……	15
Çizelge 2.3	Yolun düşey titreşim öz frekansları……	21
Çizelge 2.4	Üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları…….	26
Çizelge 2.5	Yol elemanın toplam yol elastikliğine ortalama katkısı…….....	26
Çizelge 4.1	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle statik hesap sonuçları…….....	57
Çizelge 4.2	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle statik hesap sonuçları……..	58
Çizelge 4.3	Emniyet ve yol kalite faktörü……..	59
Çizelge 4.4	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle dinamik analiz sonuçları……..	65
Çizelge 4.5	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle dinamik analiz sonuçları……..	67
Çizelge 4.6	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları……..	69
Çizelge 4.7	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik indirgenmiş tekerlek yükü değerleri……	70
Çizelge 4.8	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları……..	72
Çizelge 4.9	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik indirgenmiş tekerlek yükü değerleri……	72
Çizelge 4.10	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için dinamik hesap sonuçları……..	76
Çizelge 4.11	Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için öz frekansları……	77
Çizelge 4.12	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için dinamik hesap sonuçları…….....	79
Çizelge 4.13	Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için öz frekansları……	80
Çizelge 4.14	Balastlı yol modeli analitik ve nümerik statik analiz sonuçları.....	82
Çizelge 4.15	Balastsız yol modeli analitik ve nümerik statik analiz sonuçları....	85
Çizelge 4.16	Balastlı yol modeli analitik ve nümerik dinamik analiz sonuçları……..	84
Çizelge 4.16	Balastsız yol modeli analitik ve nümerik dinamik analiz sonuçları……..	84
Çizelge 5.1	Metro dizilerinin tekerlek çap ve torna kilometre değerleri……	87
Çizelge 5.2	Titreşim ölçüm noktaları…….	87
Çizelge 5.3	Aksaray-Havalimanı metro hattı titreşim ölçüm noktaları……	94

Çizelge 5.4 Aksaray-Havalimanı metro hattı öz frekans ölçüm değerleri……. 96
Çizelge 5.5 Ray altı elastik tabakanın yol öz frekansına etkisi…….. 97
Çizelge 5.6 Ölçülen ve doğrulanmış sonlu elemanlar modelin öz frekans değerleri…….. 100
Çizelge 5.7 Titreşim düzeyine göre yolculuk tepkisi……..... 103
Çizelge 5.8 Konfor puanları……..... 104
Çizelge A.1 Rayların mekanik özellikleri……... 139
Çizelge A.2 Travers kütleleri…….. 139
Çizelge A.3 Balastlı yol modelin parametreleri…….. 140
Çizelge A.4 Balastlı yol modeli ray altı elastik tabakaları dinamik özellikleri... 141
Çizelge A.5 Zemin yatak modülü …….. 141
Çizelge A.6 Zemin-Balast rijitlik katsayıları …… 141
Çizelge A.7 Çelik seletli balastsız yol model parametreleri……... 142
Çizelge A.8 Bazı selet altı elastik tabakaların rijitlik ve sönüm katsayıları…… 143
Çizelge D.1 Çelik seletli balastsız yol için doğrulanmış modelin parametreleri 199
Çizelge D.2 Balastlı yol için doğrulanmış modelin parametreleri…….. 200

ŞEKİL LİSTESİ

			Sayfa
Şekil 1.1	**:**	Ray-tekerlek temasında titreşim iletimi…….	2
Şekil 2.1	**:**	Tek kütle-yay modeli…….	8
Şekil 2.2	**:**	Tek kütle-yay sistemi için frekans oranı-dinamik büyütme faktörü……	12
Şekil 2.3	**:**	Frekans oranı-faz açısı……	12
Şekil 2.4	**:**	Tren hızı-dinamik aks yükü……	14
Şekil 2.5	**:**	Yolun öz modu……...	21
Şekil 2.6	**:**	Travers veya blok öz modu……	22
Şekil 2.7	**:**	Ray öz modu……...	23
Şekil 2.8	**:**	Selet öz modu…….	23
Şekil 2.9	**:**	Birinci mesnet öz modu……..	24
Şekil 2.10	**:**	İkinci mesnet öz modu……...	25
Şekil 2.11	**:**	Ön yük-ray altı elastik tabaka rijitlik değişimi……..	27
Şekil 2.12	**:**	Sekant ve teğetsel rijitlik……	27
Şekil 2.13	**:**	Ön yük- balast rijitlik grafiği.....	29
Şekil 3.1	**:**	Taşıt-yol modeli…….	35
Şekil 3.2	**:**	Taşıt yük modelleri…….	38
Şekil 3.3	**:**	Serbest travers (en üstte), yoldaki travers (orta) ve travers modeli (en altta).....	42
Şekil 3.4	**:**	Zimmermann kirişin deplasman ve eğilme moment …….	45
Şekil 3.5	**:**	Yol rijitlik katsayısı-ray çökme ve eğilme momenti……..	46
Şekil 3.6	**:**	Pasternak kirişin yer değiştirmesi……...	47
Şekil 3.7	**:**	Pasternak kirişin eğilme momenti……..	48
Şekil 3.8	**:**	Demiryolu üstyapısı analitik ve nümerik modeller……	50
Şekil 3.9	**:**	Ray- tekerlek ilişki modeli……	51
Şekil 4.1	**:**	Sürekli mesnetli ve sonsuz uzunlukta tek ve çift kirişli model..	60
Şekil 4.2	**:**	Sonlu elemanlar yol modeli……	73
Şekil 5.1	**:**	Balastsız yolda çekiç darbe testi…….	94
Şekil 5.2	**:**	Balastlı yolda mesnet noktasında çekiç darbe testi……...	94
Şekil 5.3	**:**	Balastlı yolda iki mesnet ortasında çekiç darbe testi…….	95
Şekil 5.4	**:**	Balastsız yolda ölçüm noktaları…….	95
Şekil 5.5	**:**	Balastlı yolda ölçüm noktaları……	95
Şekil 5.6	**:**	Titreşim yöntemi ……...	101
Şekil 5.7	**:**	Titreşim ölçümü……	101
Şekil 5.8	**:**	W_d frekans ağırlık filtresinin kazancının frekansa bağlı olarak değişimi….. ……...	102
Şekil 5.9	**:**	W_b frekans ağırlık filtresinin kazancının frekansa bağlı olarak değişimi….. ……...	102
Şekil 5.10	**:**	Aksaray-Havalimanı metro hattı yolculuk konforu……	104
Şekil 6.1	**:**	Frekans oranı-geçirgenlik oranı……..	108
Şekil 6.2	**:**	Demiryolunda farklı elastik tabaka seviyeleri……	110
Şekil 6.3	**:**	Maksimum ray deplasmanı-titreşim sönümleme değerleri……	116

Şekil 6.4	**:**	Yol rijitlik katsayısı- dinamik balast gerilmesi……..	117
Şekil 6.5	**:**	Yol rijitlik katsayısı- P_2 darbe kuvveti……...	118
Şekil 6.6	**:**	Yol rijitlik katsayısı-traverse gelen tekerlek yük oranı …….	119
Şekil 6.7	**:**	Yol rijitlik katsayısı- balast çökme miktarı……	120
Şekil 6.8	**:**	Yol rijitlik katsayısı- geometri bakım maliyeti……..	122
Şekil A.1	**:**	Farklı zemin tipleri için tek kirişli model (üstte) ve çift kirişli (altta) model frekans-dinamik tepki ……..	144
Şekil A.2	**:**	Farklı travers aralıkları için tek kirişli model (üstte) ve çift kirişli (altta) model frekans-dinamik tepki ……	145
Şekil A.3	**:**	Farklı ray tipleri için tek kirişli model (üstte) ve çift kirişli (altta) model frekans-dinamik tepki ……	146
Şekil A.4	**:**	Farklı travers tipleri için tek kirişli model (üstte) ve çift kirişli (altta) model frekans-dinamik tepki ……..	147
Şekil A.5	**:**	Farklı ray altı elastik tabaka tipleri için frekans-dinamik tepki..	148
Şekil A.6	**:**	Farklı selet aralıkları için frekans-dinamik tepki……...	148
Şekil A.7	**:**	Farklı selet kütleleri için frekans-dinamik tepki.....	149
Şekil A.8	**:**	Farklı selet altı elastik tabaka tipleri için frekans-dinamik tepki……	149
Şekil B.1	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (balastlı yol modeli)	150
Şekil B.2	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (balastlı yol modeli)……	150
Şekil B.3	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti (balastlı yol modeli)……	151
Şekil B.4	**:**	İki mesnet ortasında dinamik ray eğilme momenti (balastlı yol modeli)……	151
Şekil B.5	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m)……..	152
Şekil B.6	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m)……..	152
Şekil B.7	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (zemin rijitlik katsayısı k=19.17x10^6 N/m)	153
Şekil B.8	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (zemin rijitlik katsayısı k=19.17x10^6 N/m)	153
Şekil B.9	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki(zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)…….	154
Şekil B.10	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)……	154
Şekil B.11	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)……	155
Şekil B.12	**.**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)…….	155
Şekil B.13	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (ray tipi, UIC 60 rayı)……	156
Şekil B.14	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (ray tipi, UIC 60 rayı)……	156
Şekil B.15	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (ray tipi, UIC 60 rayı)……...	157
Şekil B.16	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (ray tipi, UIC 60 rayı)……	157

Şekil B.17	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (travers tipi, B70 W beton travers)……..	158
Şekil B.18	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (travers tipi, B70 W beton travers)……	158
Şekil B.19	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (travers tipi, B70 W beton travers)……	159
Şekil B.20	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (travers tipi, B70 W beton travers)……	159
Şekil B.21	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (travers aralığı, a=0.75 m)……..	159
Şekil B.22	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (travers aralığı, a=0.75 m)……...	160
Şekil B.23	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (travers aralığı, a=0.75 m)……...	160
Şekil B.24	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (travers aralığı, a=0.75 m)……..	161
Şekil B.25	**:**	Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki (ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi)……...	162
Şekil B.26	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi)……	162
Şekil B.27	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi)……	163
Şekil B.28	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi)…….	163
Şekil B.29	**:**	Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki (balastsız yol modeli)…….	164
Şekil B.30	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (balastsız yol modeli)……	164
Şekil B.31	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (balastsız yol modeli)……	165
Şekil B.32	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (balastsız yol modeli)…….	165
Şekil B.33	**:**	Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki (selet kütlesi, m=10 kg)……	166
Şekil B.34	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (selet kütlesi, m=10 kg)……	166
Şekil B.35	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (selet kütlesi, m=10 kg)……	167
Şekil B.36	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (selet kütlesi, m=10 kg)……	167
Şekil B.37	**:**	Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki (selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi)……..	168
Şekil B.38	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi)……	168
Şekil B.39	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi)……	169
Şekil B.40	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi)……	169
Şekil B.41	**:**	Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki (selet aralığı, a=0.60 m)……...	170

Şekil B.42	**:**	İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki (selet aralığı, a=0.60 m)……...	170
Şekil B.43	**:**	Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment (selet aralığı, a=0.60 m)……..	171
Şekil B.44	**:**	İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti (selet aralığı a=0.60 m).....	171
Şekil C.1	**:**	Ray deplasman ve ivme grafiği (Emniyet-Ulubatlı istasyonları arası, 1.nolu metro dizisi, V=30 km/saat) ……	172
Şekil C.2	**:**	Ray deplasman ve ivme grafiği (Emniyet-Ulubatlı istasyonları arası, 2.nolu metro dizisi, V=30 km/saat) ……	173
Şekil C.3	**:**	Ray deplasman ve ivme grafiği (Emniyet-Ulubatlı istasyonları arası, 3.nolu metro dizisi, V=30 km/saat)…….	174
Şekil C.4	**:**	Ray deplasman grafiği (Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 km/saat) …….	175
Şekil C.5	**:**	Ray deplasman grafiği (Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=60 km/saat)……...	176
Şekil C.6	**:**	Ray ivme grafiği (Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arası, 1, 2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 ve 60 km/saat) ……	177
Şekil C.7	**:**	Ray deplasman grafiği (Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 km/saat) ……	178
Şekil C.8	**:**	Ray deplasman grafiği (Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=60 km/saat)……	180
Şekil C.9	**:**	Ray ivme grafiği (Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 ve 60 km/saat) ……..	180
Şekil C.10	**:**	Ray deplasman grafiği (Yenibosna-DTM istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 km/saat)…….	181
Şekil C.11	**:**	Ray deplasman grafiği (Yenibosna-DTM istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=60 km/saat)…….	182
Şekil C.12	**:**	Ray ivme grafiği (Yenibosna-DTM istasyonları arası, 1,2 ve 3.nolu metro dizisi, V=30 ve 60 km/saat) …….	183
Şekil C.13	**:**	Ray deplasman grafiği (Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arası, ray taşlama öncesi ve sonrası, 2.nolu metro dizisi, V=60 km/saat) …….	184
Şekil C.14	**:**	Ray deplasman grafiği (Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arası, ray taşlama öncesi ve sonrası, 3.nolu metro dizisi, V=60 km/saat) …….	185
Şekil C.15	**:**	Ray ivme grafiği (Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arası, ray taşlama öncesi ve sonrası, 2. ve 3.nolu metro dizisi, V=60 km/saat) …….	186
Şekil C.16	**:**	Ray hız ve ivme grafiği (Otogar-Esenler istasyonları arası, V=40 km/saat)……	187
Şekil D.1	**:**	Dinamik tepki ölçümü (Balastsız yolda mesnet noktası)……...	188
Şekil D.2	**:**	Doğrulanmış balastsız yol modelin dinamik tepkisi …….	188
Şekil D.3	**:**	Dinamik tepki ölçümü (Esenler depo sahası tabii zeminli beton traversli balastlı yolda mesnet noktası) ……...	189
Şekil D.4	**:**	Doğrulanmış balastlı yol modelin dinamik tepkisi…….	189
Şekil D.6	**:**	Doğrulanmış balastlı yol modelin dinamik tepkisi…….	190
Şekil D.7	**:**	Dinamik tepki ölçümü (Esenler-Otogar istasyonları arası beton zeminli ve ahşap traversli balastlı yolda mesnet noktası)	191

Şekil D.8		Dinamik tepki ölçümü (Esenler-Otogar istasyonları arası tabii zeminli ve ahşap traversli balastlı yolda iki mesnet arası)…….	191
Şekil D.9	:	Dinamik tepki ölçümü (Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda mesnet noktası)……	202
Şekil D.10		Dinamik tepki ölçümü (Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arası)……..	192
Şekil D.11	:	Dinamik tepki ölçümü (Balastsız yolda mesnet noktasında ray altı elastik tabakasız durumda)……..	193
Şekil D.12	:	Dinamik tepki ölçümü (Bahçelievler istasyonu beton zeminli balastlı yolda ray altı elastik tabakasız durumda)…….	193
Şekil D.13	:	Dinamik tepki ölçümü (Bahçelievler istasyonu, beton zeminli balastlı yol, yeni ray altı elastik tabaka)…….	194
Şekil D.14	:	Koherans grafiği (Balastsız yol, mesnet noktası)	194
Şekil D.15	:	Koherans grafiği (Bahçelievler istasyonu beton zeminli balastlı yolda mesnet noktası) ……...	195
Şekil D.16	:	Koherans grafiği (Bahçelievler istasyonu beton zeminli balastlı yol, yeni ray altı elastik tabaka …….	195
Şekil D.17	:	Koherans grafiği (Esenler depo sahası, tabii zeminli balastlı yol) …….	196
Şekil D.18	:	Koherans grafiği (Esenler-Otogar istasyonları arası beton zeminli, beton traversli balastlı yolda ölçümün koherans grafiği…….	196
Şekil D.20	:	Esenler-Otogar istasyonları arası tabii zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında ölçümün koherans	197
Şekil D.21	:	Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında yeni ray altı elastik tabaka durumunda ölçümün koherans grafiği……	198
Şekil D.22	:	Balastsız yolda ray altı pedsiz durumda ölçümün koherans grafiği…….	198
Şekil D.23	:	Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında ray altı elastik tabakasız durumda ölçümün koherans grafiği……	199

SEMBOL LİSTESİ

a : Travers aralığı
A : İvme genliği
A_k : Kesit alanı
A_t : Travers alanı
b_t : Travers genişliği
c : Sönüm katsayısı
C :Yatak modülü
d :Yol çökme oranı
E : Elastisite modülü
E_{v2} : Zeminin elastisite modülü
F_s : Yay kuvveti
F_d : Sönüm kuvveti
F_o : Kuvvetin genliği
f : Frekans
f_n : Öz frekans
f_s : Yapısal öz frekans
f_t : Yol öz frekans
f_b : Selet öz frekans
$f_{b\text{-}a}$: Anti öz frekans
f_r : Ray öz frekans
$f_{p\text{-}p}$: Mesnet öz frekans
G : Kayma modülü
G′ : Geçirgenlik
h : Balast yüksekliği
h′ : Eşdeğer tabaka kalınlığı
I : Atalet momenti
K_s : Sekant rijitlik
K_t : Teğetsel rijitlik
k : Statik rijitlik katsayısı
k′ : Dinamik rijitlik katsayısı
k_{eq} : Eşdeğer yatak katsayısı
K : Kesme katsayısı
L_t : Travers boyu
L : Kiriş karakteristik boy
m : Birim uzunluk kütlesi
M_t : Yaylandırılmayan taşıt kütlesi
M : Eğilme momenti
n : Mod sayısı
P_2 : Reaksiyon kuvvet
r : Rijitlik oranı
s : Yol kalite faktörü
t_e : Emniyet faktörü
t : Zaman

$\mathbf{T}$	**:** Periyot
$\mathbf{Q}$	**:** Tekerlek yükü
$\mathbf{Q_{aks}}$	**:** Aks yükü
$\mathbf{y}$	**:** Kirişin yer değiştirmesi
$\mathbf{V}$	**:** Taşıt hızı
$\mathbf{v_k}$	**:** Kritik hız
$\mathbf{v_R}$	**:** Yüzey dalga hızı
$\mathbf{W}$	**:** Mukavemet momenti
ω	**:** Dairesel frekans
ω_n	**:** Öz dairesel frekans
ω_d	**:** Sönüm frekansı
ξ	**:** Sönüm oranı
α_e	**:** Eğilme açısı
α_s	**:** İç sürtünme açısı
α	**:** Hız oranı
η	**:** Frekans oranı
ρ	**:** Yoğunluk
σ	**:** Ray gerilmesi
ϕ	**:** Faz açısı
θ	**:** Alt balast sürtünme açısı
φ	**:** Dinamik yük büyütme faktörü
μ	**:** Poisson oranı
γ	**:** Kesme faktörü
ε	**:** Faz açısı
λ	**:** Bozukluğun dalga boyu
ΔL_v	**:** Titreşim düzeyinde azalma

DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİNİN MODEL HAT ÜZERİNDE ÇOK YÖNLÜ ANALİZİ

ÖZET

Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Demiryolu üstyapısında da, ray ile tekerlek arasındaki temas sırasında bir çok düzensizlik ve pürüzlülüklerden dolayı dinamik yükler ve titreşim hareketi ortaya çıkmaktadır. Dinamik dingil yükleri, hem yol hem de taşıt elemanlarında zorlamalara ve deformasyonlara neden olduğu gibi, taşıt içindeki yolcular ve çevre sakinleri üstünde sarsıntı, titreşim ve gürültü gibi olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle, istenmeyen dinamik problemlerin oluşmaması için, taşıt ve yol elemanlarının dinamik karakteristikleri çok iyi tanımlanmalı ve demiryolunun tasarım aşamasında, statik analiz ile birlikte dinamik analiz yapılmalıdır.

Bu çalışmanın amacı, harmonik tahrik yükü nedeniyle oluşan ray-tekerlek titreşimlerinin balastlı ve balastsız (beton) demiryolu modellerine etkisini incelemektir. Bu çalışmada, balastlı ve balastsız üstyapı için analitik ve nümerik yöntemle dinamik analiz yapılmıştır. Analitik yöntemde ray, sürekli Winkler temel mesnetli Euler-Bernoulli kirişi olarak ve tekerlek yükü, noktasal hareket eden bir kuvvet olarak modellenmiştir. Bu model lineer elastiktir ve komşu tekerlek yüklerin etkisi süperpozisyon yöntemi ile hesaplanmaktadır Demiryolu üstyapısı yol eksenine göre simetrik bir yapıya sahip olduğundan hesaplamada kolaylık sağlamak için tek ray ve yarım traversten oluşan yol sistemi modellenmiştir.

En yaygın olarak kullanılan yöntem, rayı paralel yay ve sönüm elemanları üstüne yerleştirmektir. Ray altı elastik tabaka ve elastik temel yay-sönüm elemanı olarak modellenmektedir. Yol yapısının genel davranışını anlamak için tek kiriş modeli yeterlidir, ama ray altı elastik tabakanın davranışını incelemek veya beton döşemelerin etkisini araştırmak için çift kiriş modeli de kullanılmıştır. İlk kiriş, eğilme rijitliği olan rayı modellerken, diğer kiriş çoğunlukla eğilme rijitliği olmayan beton döşeme veya traversi ifade eder.

Analitik ve nümerik yöntemde, 0-1500 Hz frekans aralığı için değişik yol parametrelerinin (zemin rijitliği, mesnet aralığı, ray/travers/elastik tabaka tipi) dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. Balastlı yol modeli tek ve çift kirişli olarak ve balastsız yol modeli sadece çift kirişli olarak modellenmiştir. 3 Hz frekans aralıkları için toplam 500 frekans değerine göre dinamik hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca, tek bir tekerlek yükü için, rezonans durumundaki maksimum dinamik büyütme faktörü, ray çökme ve ray eğilme momenti hesaplanmıştır. Sürekli mesnetli modelin analitik çözümleri, MATLAB 6.5 programı ile ve ayrık mesnetli modelin nümerik çözümleri ANSYS 9.0 sonlu elemanlar paket programı ile elde edilmiştir. Nümerik yöntemde harmonik analiz yapılmıştır. Harmonik tepki analizi, aracın

devamlı dinamik davranışını, dolayısıyla, tasarımın rezonans, yorulma ve zorlanmış titreşimin diğer zararlı etkilerine başarıyla karşı koyup koyamayacağını belirleyebilmeyi sağlar. Harmonik tepki analizi lineer bir yapının zamanla sinüzoidal (harmonik) olarak değişen yüklere karşı sürekli durum tepkisini belirlemekte kullanılan bir tekniktir. Bu analizde amaç, çeşitli frekanslarda yapının tepkisini hesaplamak ve grafiğini elde etmektir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile modellemede, tekerlek yükü hem travers üstünde hem de iki travers ortasında uygulanarak çözüm bulunmuştur. Tekerlek yükü tam travers üstünde uygulanırken, ray ve traversin dinamik tepkisi belirlenmiştir. Burada ray ve traversin dinamik tepkilerinin farklı olduğu görülmektedir. Yolun dinamik tepki grafiği birim tekerlek yükü için elde edilmiştir. Bu grafiklerden yol, ray, ve mesnet öz frekansları hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, daha karmaşık ve daha fazla zaman gerektirmesine karşın, gerçeğe daha yakın olduğu için çok daha doğru sonuçlar vermektedir.

Analitik yöntemde, sürekli mesnetli yol modeli olduğu için, tekerlek yükü mesnet üzerindedir. Nümerik yöntemde ise, tekerlek yükü mesnet üstünde ve iki mesnet arasında ayrı ayrı uygulanarak dinamik tepkileri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, demiryolu dinamik davranışını en çok etkileyen parametrenin balastlı hat için zemin-balast tabaka rijitliğinin ve balastsız hat için balast görevini yapan elastik tabakanın olduğu görülmüştür.

Çalışmada, Aksaray-Havalimanı metro hattında titreşim ölçümleri yapılmıştır. Çekiç darbe testi ile demiryolunun doğal davranışı, yani öz frekansları ve dinamik tepkileri belirlenmiştir. Bu ölçümler farklı zemin (beton veya tabii zemin) farklı travers aralığı ve farklı üstyapı tipleri (balastlı ve balastsız üstyapı) için tekrarlanmıştır ve ölçüm sonuçlarına göre nümerik modeller doğrulanmıştır. Ölçümler sırasında, her çekiç darbe testi sırasında uygun koherans (tutarlılık) derecesi elde edilemediği için, en uygun koherans elde edilene kadar ölçümler tekrarlanmıştır. Ayrıca, tren geçerken raydaki deplasmanlar ve ivme değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerin kabul edilebilir olması için benzer tekerlek profillerine (birbirine yakın tornalama kilometre değerlerine) sahip araçların oluşturduğu metro dizileri gece saatlerinde sabit hızla geçerken yapılmıştır. Bu sayede dingil yükünün ve taşıt hızının sabit olması sağlanmıştır. Ölçümler farklı zemin koşullarında balastlı ve balastsız üstyapılarda tekrarlanmıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre, taşıt hızının artması titreşim ivmelerini ve yer değiştirmelerini yaklaşık 3-4 kat arttırmaktadır. Tekerleklerin kat ettikleri mesafe arttıkça, tekerlek profilinde bozulma da artmaktadır ve buna bağlı olarak ray titreşimleri de artmaktadır, ancak kilometre değeri ile titreşim ivmeleri arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Ayrıca, demiryolu titreşimlerine neden olan en önemli faktörlerden biri olan ray mantarı ondülasyonları varken ve ray taşlama ile temizlendikten sonra ölçümler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, ray taşlama bakımının sağladığı fayda ölçülmüştür. Ayrıca, demiryolu iyileştirme yöntemi olarak kullanılan elastik ray altı tabakanın ray titreşimlerine olumlu etkisi ölçülmüştür. Aynı hat üzerinde belli bir yol kesiminde elastik ray bağlantı elemanlarının olduğu ve olmadığı kısımlarda ray titreşimleri ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmış ve elastik ray bağlantı elemanlarının titreşimleri yarı yarıya azalttığı görülmüştür.

MULTI DIMENSIONAL ANALYSES OF RAILWAY VIBRATIONS ON MODEL TRACK

SUMMARY

When all systems that contain potential and kinetic energy are disturbed with dynamic loads, they start to vibrate. Dynamic loads and vibration occur due to irregularity and roughness during the contact between the rail and the wheel on a track superstructure. Dynamic loads causes degradations and deformations on track and on vehicle, and also they affect negative environmental effects like vehicle stability, passenger comfort, vibration and noise. Therefore, to prevent unwanted dynamic problems, dynamics characteristics of track and vehicle components must be determined very good and dynamic analyses must be performed besides static analyses during the design stage.

The aim of this study is to investigate the effects of rail-wheel vibrations due to a harmonic excitation load on ballasted and ballastless (slab) railway model. In this study, the dynamic computations of the ballasted and the ballastless superstructure were carried out with analytical and numerical method. In analytical method, rail is modeled as Euler-Bernoulli beam on a continuous Winkler foundation and the vehicle excitation load is usually modeled as a force that moves discretely. This model is linear elastic, and the effect of neighboring wheels is computed with the superposition method. Since railroad structure has a symmetrical structure compared to the track axis, a track system consisting of a single rail and half sleeper was modeled for ease during calculations.

The most commonly used method is to position the rails on parallel spring and damping elements. This spring-damping element models the elastic rail layer, as the supports sit on the elastic foundation, which is another spring-damping element system. The one beam model is enough to understand general behavior of track, but the double beams model is also used to investigate the behavior of the rail elastic layer or the concrete layer. The first beam is used for the rail with flexure stiffness and other beam is used for the concrete layer or the sleeper without flexure stiffness.

In the analytical and numerical analysis, the effects of various track parameters (soil stiffness, support distance, rail/elastic layer/sleeper type) on dynamic behavior are computed for the frequency interval 0-1500 Hz. Ballasted track model is analyzed as one and double beams and ballastless track model as only double beams. Since the harmonic analysis was carried out for every 500 points within the 0-1500 Hz frequency interval. Also, for the unit wheel load, maximum dynamic load factor, rail deflection and rail bending moment was calculated. The track model with continuous support was analyzed using MATLAB 6.5 software, the track model with discrete support was analyzed using ANSYS 9.0 finite element software. Harmonic analysis

was conducted using ANSYS software. Harmonic receptance analysis enables the continuous dynamic behavior of the vehicle to be determined; as a result, the ability of the design to successfully withstand resonance, fatigue, and other harmless effects of constrained vibration is revealed. Harmonic receptance analysis is a technique that is used to determine steady-state receptance against sinusoidal (harmonically) changing loads of a linear structure. The purpose of this analysis is to estimate the receptance of the structure at various frequencies and plot it.

While modeling with the finite elements method, the wheel load was applied both above the support and between two supports. When the wheel was exactly on the sleeper, the dynamic receptances of the rail and sleeper were determined, and it was observed that their receptances were different for this case. The dynamic receptance graph of the track was obtained for the unit wheel load. The natural track, rail and support frequencies for the track model were obtained from frequency-dynamic receptance graphs. The finite element analysis is more complex and more time-consuming, but it is more near the reality, and so it gives more correct results.

In analytical method, there was a continuous support track model and so the wheel load was applied above the support. In numerical method, the wheel was applied both above the support and between two supports, dynamic receptances of them were compared. The most significant parameter is the soil-ballast layer stiffness for ballasted track and elastic layer stiffness for ballastless track.

In this study, vibration measurements were performed in Aksaray-Airport metro line. A hammer impact test was performed to determine the natural frequencies and dynamic receptance behavior of the railroad and validate the finite element model based on the survey results. These measurement were repeated for different soil (concrete or natural soil), sleeper distance and superstructure types (ballasted and ballastless structure). A coherence graph was examined for each hammer hit, and the vibration receptance behavior was recorded when there was a proper coherence value. If the proper value was not attained, then impact trials were repeated. In addition, deflections and accelerations of rail were measured when train passing. To get acceptable results, the measurements were done at night hours with vehicles which have similar wheel profiles and with constant speed. In this case, the vehicle speed and the axle load was provided to be constant. These measurement were repeated on ballasted and ballastless tracks for different substructures. According these results, the higher vehicle speed increases vibration accelerations and deflections 3-4 times. As vehicle total kilometer distance increases, the deformation of wheel profile and so rail vibration increases, but there is no direct relation between the vehicle total kilometer distance and vibration acceleration. Also, when there was corrugation on rail, the one of the most important factors causing rail vibrations, and after they were removed by the rail grinding, the measurements were done and the results were compared. In this case, the benefit of rail grinding on rail vibrations was measured. Also, the rail elastic layer as a railway improvement method was tested. The vibration measurements were done on section with new rail elastic layer and on section without them on the same line, and the results were compared. As a result, it was seen that rail elastic layer decreases vibrations half and half.

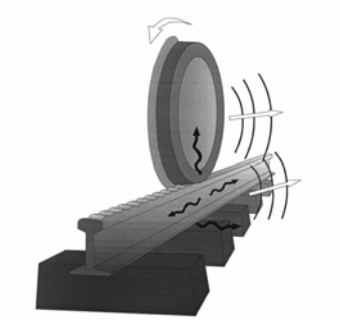
1. GİRİŞ

1.1 Genel

Demiryollarında artan ulaşım talebine paralel olarak işletme hızları ve taşınan yükler de artmaktadır. Bir çok ülkede yolcu taşımacılığında işletme hızı 250-300 km/saat'e ulaşmış ve yük taşımacılığında aks yükleri 25 tona çıkmıştır. Hız ve trafik yüklerinin artması ile demiryolu dinamiği daha fazla önem kazanmaya başlamıştır.

Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu harekettir. Titreşimler her üç eksende hem taşıta hem de üstyapıya iletilir, (Şekil 1.1). Bu konuda önemli olan husus, sistemin doğal frekanslarını ve sistemin titreşime olan tepkisini belirlemektir. Çünkü, titreşim kaynağının tahrik frekansı ile sistemin doğal frekansları arasında bir fark olmalıdır. Eğer tahrik frekansı ile sistemin doğal frekanslarından biri eşit olursa rezonans denilen olay meydana gelir. Bu durumda taşıt stabilitesi, yolcu konforu, taşıt ve yol bileşenlerinde istenmeyen bozulmalar ve hasarlar oluşmaktadır. Örneğin, İsveç Devlet Demiryolları Göteborg-Malmö arasında 1997 yılında açılan Batı Sahili yüksek hızlı hattında 200 km/saat hız civarında bazı yerlerde aşırı titreşim nedeniyle işletme güvenliği, dolgunun deformasyonu, ray yorulması, taşıt enerji beslemenin kesilmesi gibi sorunlar ortaya çıkmıştır ve bu yüzden bu kesimlerde hız sınırlamasına gidilmiştir. Daha sonra 1997-1998 yıllarında dinamik ölçümler yapılmış ve zemin iyileştirmesi yapılarak yeniden işletme hızı arttırılmıştır, (Madshus ve Kaynıa, 2000).

Demiryolu titreşimleri ile ilgili problemler ve oluştuğu frekans aralıkları genel olarak Çizelge 1.1'de verilmiştir**,** (Knothe, 2001).



Şekil 1.1 : Ray-tekerlek temasında titreşim iletimi.

Çizelge 1.1: Demiryolu titreşimi problemleri ve frekans aralıkları.

Problemler	Frekans aralığı (Hz)
Taşıt gövdesi • Stabilite • Kurba geçişi ve kılavuzlama davranışı • Konfor	0-30
Boji ve yaylandırılmayan kütleler • Tekerlek yataklarının işletme ömrü • Aksların, yatakların, frenlerin işletme ömrü • Tekerlek takımlarının işletme ömrü • Boji çerçevesinin işletme ömrü	0-200
Tekerlek ve ray yuvarlanma yüzeyleri • Tekerlek aplatisi (bandaj yüzeyi düzleşmesi) • Tekerlek daireselliğinde bozulma (poligonlaşma) • Tekerlek ondülasyonu • Uzun dalga boylu ray ondülasyonları • Kısa dalga boylu ray ondülasyonları • Ray contaları, bozuk kaynaklar • Yuvarlanma temas yorulma kusurları • Tekerlek ve ray aşınması	0-1500
Üstyapı elemanları • Ray yorulması • Ray altı elastik tabaka aşınması • Beton traversler • Balast oturması, yol geometri bozulması • Zemin oturması	0-1500
Ray-tekerlek temas gürültüsü • Yuvarlanma gürültüsü • Darbe gürültüsü • Kurplarda çınlama gürültüsü	0-5000
Yapısal gürültü ve titreşimler • Zeminde titreşimin iletimi • Köprülerde titreşim ve ses iletimi • Gürültünün yayılması • Taşıt gövdesinin yapısal gürültüsü	0-500

Demiryolu titreşimlerinin çevre yapılara etkisi, iletilen titreşimler ve gürültü ile olur. Demiryolunun çevresinde bulunan tarihi yapılar, hastane, okul, konser salonu gibi titreşime duyarlı yapılar ve konutlar için titreşim düzeyi ve gürültünün belirli düzeylerin altında olması istenir.

Yolculuk konforu, titreşimin ivmesinden, aracın bir yöndeki hareketinden kaynaklanan değişmelerden, gürültüden, sıcaklıktan, renkten, nemden, havalandırmadan ve aracın iç ve dış perspektif yapısından etkilenir. Konfor kavramı kısaca yolcu ve sürücü için doğru seçilmiş çevre olarak özetlenebilir. Günümüzde konfor kavramı taşıt dinamiğini de içine almıştır ve belki de en önemli faktörlerden birini oluşturmaktadır.

İnsan, ivmelenme ve mekanik titreşimler gibi dış tesirlere karşı tepki gösterir. Ama insan vücudu, bazı frekanslara karşı diğerlerinden daha fazla duyarlı olmaktadır. Ayrıca farklı iki insan titreşimlere karşı aynı şekilde tepki göstermez.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Demiryolu tasarımında kullanılan klasik yöntem, statik analiz yapmak ve dinamik etkileri hesaba katmak için dinamik etki katsayısı ile büyütmektir. Ancak bu yöntemin özellikle yüksek hızlı demiryolu hatları için uygun olmadığı ve dinamik analiz yapılması gerektiği görülmüştür. Çünkü, klasik yöntemde demiryolunun doğal frekansları ile trenin tahrik frekanslarının çakışması ile ortaya çıkan rezonansı ve çok yüksek olan dinamik yükleri hesaplamak mümkün değildir. Bu sebeple, sonlu eleman modellerini kullanan nümerik analizlerin yapılması ve rezonans durumundaki dinamik etkilerin belirlenmesi gereklidir. Ayrıca dinamik analizi desteklemek ve doğrulamak için sahada titreşim ölçümleri ile demiryolunun doğal frekansları ölçülmelidir.

Bu çalışmanın amacı, harmonik tahrik yükü nedeniyle oluşan ray-tekerlek titreşimlerinin örnek balastlı ve balastsız (beton) demiryolu modellerine etkisini incelemektir. Ama özellikle aşağıda belirtilen amaçlar hedeflenmiştir:

- Her iki yol modeli için rezonans durumundaki dinamik büyütme faktörlerini ve bu faktörleri kullanarak dinamik ray çökme ve ray eğilme momentlerini hesaplamak.

- Her iki yol modeli için parametrik irdeleme yapmak. Yani, değişik yol parametreleri (zemin tipi, elastik tabaka tipi, travers tipi, mesnet aralığı, ray tipi vs) için dinamik hesapları yaparak etkilerini incelemek.
- Arazi titreşim ölçümleri yaparak her iki yol modelinin dinamik davranışlarını belirlemek.
- Taşıttan kaynaklanan düşey yönlü ray titreşimlerini ölçerek, bazı parametrelerin (zemin tipi, travers tipi, üstyapı tipi, elastik ray bağlantı tipi, ray bakımı vs) dinamik davranışa etkisini belirlemek.

Bu çalışmada iki ayrı çözüm yöntemi kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Çözüm yöntemleri şunlardır:

- Sürekli elastik mesnet üstüne oturan sonsuz tek ve çift kiriş modeline göre analitik çözüm
- Ayrık mesnet üstüne oturan sonlu kiriş modeline göre nümerik çözüm

Bu çalışmada iki ayrı paket program kullanılmıştır:

- Analitik çözüm için MATLAB 6.5 programı
- Nümerik çözüm için ANSYS 9.0 programı

Nümerik çözüm yönteminde kullanılan sonlu elemanlar modeli gerçek demiryoluna yakın olmakla birlikte bazı kabuller yapıldığı için sonuçların doğruluğundan emin olunamamaktadır. Bu nedenle titreşim ölçüm sonuçlarına göre sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır.

Bu çalışmada örnek hat olarak İstanbul Aksaray-Havalimanı metro hattı seçilmiştir. Çünkü, bu hat üzerinde balastlı ve balastsız üstyapı bulunmaktadır ve değişik noktalarda kontrollü titreşim ölçüm imkanı vardır.

Bu çalışmada titreşimlerin dinamik hesaba etkisi çok iyi irdelenmekle birlikte, titreşimlerin nedenleri, etkileri, özellikleri ve titreşimleri azaltmak için uygulanabilecek etkili önlemler de ele alınmaktadır.

2. TİTREŞİM TEORİSİ VE DEMİRYOLU TİTREŞİMLERİ

Bu bölümde öncelikle genel titreşim teorisi ve tek kütle-yay modeli için dinamik tepki fonksiyonu açıklanacaktır. Yani kütlenin dinamik yer değiştirmesinin uygulanan harmonik yüke oranını veren dinamik tepki fonksiyonu elde edilecektir. Burada demiryolu modelinin temeli olan tek kütle-yay modeli izah edilecektir. Daha sonra demiryolunda titreşimlerin nedenleri ve titreşimlerin özellikleri açıklanacaktır. Demiryolunun öz frekans ve öz modları ve yol elemanlarının dinamik özellikleri anlatılacaktır.

2.1 Titreşim Teorisi

Klotter'e göre yönünü bir defadan fazla değiştiren harekete titreşim denir. Diğer bir ifadeyle titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yapmış olduğu harekettir. Buna en basit örnek, basit sarkacın salınım hareketidir.

Titreşimler, periyodik ve periyodik olmayan diye ikiye ayrılabilir. Belirli ve eşit zaman aralıkları içinde bütün özellikleri ile aynen tekrarlanan titreşimlere periyodik titreşim denir. Her periyodik fonksiyon bir Fourier serisi ile ifade edilebilir. Fourier serisi birbirinden farklı katsayı ve frekansları olan harmonik terimlerden ibarettir. Bu bakımdan harmonik hareket, titreşimlerin esas yapı taşını temsil eder.

Genel olarak harmonik hareket, A, ω ve ε sabitler olmak üzere,

$$X=A\cos(\omega t+\varepsilon) \qquad \textbf{(2.1)}$$

(2.1) bağıntısı ile temsil edilir. Burada A cismin denge konumdan itibaren maksimum sapma yani genliği, ω dairesel frekansı, t zamanı ve ε faz açısını ifade etmektedir.

Faz açısı, hareketin başlangıç şartlarını belirler ama hareketin karakterine tesir etmez. Dairesellik sıfatı harmonik titreşimlerin dönen vektörlerle temsil edilebilmesinden kaynaklanır.

Harmonik hareket dairesel frekansa göre 2π büyüklüğündeki periyotlar içinde tekrarlanmaktadır. Titreşimin periyodu,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{2.2}$$

(2.2) bağıntısı ile bulunur ve birimi saniyedir. Titreşim frekansı, periyodun tersidir ve (2.3) bağıntısı ile ifade edilir. Titreşim frekansının birimi Hertz (1/sn) dir.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \tag{2.3}$$

Bir mekanik sistemin bir mukayese sistemine göre konumunu tamamen belirli bir şekilde tayin edebilmek için gerekli olan birbirinden bağımsız büyüklüklerin sayısına bu mekanik sistemin serbestlik derecesi denir. Ayrık sistemlerde sonlu sayıda serbestlik derecesi varken, sürekli sistemlerde sonsuz sayıda serbestlik derecesi vardır.

Dinamik sistemlerin çözümünde en çok kullanılan yaklaşım, lineer ilişki kabulüdür. Lineer sistemin avantajları şunlardır;

- Sistemin tepkisi giriş verisi ile orantılıdır.
- Süperpozisyon uygulanabilir.
- Bir çok dinamik sistem davranışına yakındır.
- Tepki karakteristikleri kolay çözülebilen sistem denklemleri ile elde edilir.
- Çoğunlukla kapalı form çözümleri vardır.
- Nümerik analiz teknikleri kullanılabilir.
- Daha kompleks lineer olmayan sistemleri anlamada temel oluşturur.

Geri getirici kuvvet F, konum koordinatı x ve F=F(x) fonksiyonu orijinden geçen bir doğru ise lineer bir sistemden, aksi takdirde lineer olmayan bir sistemden bahsedilir. Bir çok sistem lineer olmamasına karşın, titreşim genliği belirli sınırlar içinde kalmak şartıyla lineer kabul edilebilir.

Garg ve Dukkipati (1984) bir mekanik sistemin titreşimlerini üç gruba ayırmışlardır;

- serbest titreşimler,
- zorlanmış titreşimler,
- kendinden tahrikli titreşimler.

Titreşen sistemin denge konumundan ayrıldıktan sonra belirli bir ilk hızla veya hızsız olarak kendi haline bırakılması sonunda ve geri getirici tesir sonucunda doğan titreşimlere serbest titreşimler denir.

Hemen hemen tüm mekanik sistemlerde sönüm vardır, ama sönüm çok az ise sistem sönümsüz kabul edilerek analiz edilebilir. Sönüm olmadığı takdirde toplam mekanik enerji korunur ve sistem sonsuza kadar sürekli potansiyel ve kinematik enerjilerin birbirlerine dönüşmesi ile titreşir. Sönümsüz serbest titreşimlerin harmonik hareketinin dairesel frekansı (ω_n) sadece sistemin fiziki parametrelerine bağlıdır ve başlangıç şartlarından bağımsızdır.

Titreşen m kütlesine ve k rijitlik katsayısına bağlı olarak bulunan dairesel frekansa, sistemin dairesel öz (doğal) frekansı denir ve (2.4) bağıntısı ile bulunur.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Dolayısıyla sönümsüz serbest titreşimin öz veya doğal frekansı,

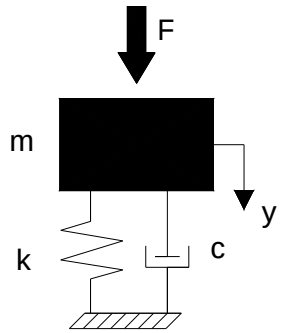
$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \textbf{(2.5)}$$

(2.5) formülü ile bulunur. Denge konumundan ayrıldıktan sonra kendi haline bırakılmış titreşim sisteminde, sistemin yapısı gereği kendiliğinden mevcut olan veya özellikle ilave edilmiş sönüm kuvvetleri mevcutsa, serbest titreşimlerin genliği zamanla azalır ve bu titreşimler sönümlü serbest titreşimler adını alırlar. Harekete karşı koyan bu direnç genellikle hıza bağlıdır. Hızla orantılı direnç kuvveti halinde viskoz veya lineer sönümlü sistemden, bunun dışında ise lineer olmayan sönümden söz edilir.

Titreşim yapmaya zorlayan bir etkenin olduğu titreşimlere, zorlanmış titreşimler adı verilir. Tahrik kuvveti determinist veya rastgele olabilir. Determinist titreşimlerde, gelecek zamandaki titreşimin frekansı ve genliği geçmiş verilerden hesaplanabilirken, rastgele titreşimlerde istatiksel yöntemlerle değerlerin olma ihtimalleri belirlenir.

Kendinden tahrikli titreşimler periyodik ve determinist titreşimlerdir. Titreşimi tahrik eden periyodik kuvvet titreşimin kendisinden kaynaklanır. Eğer sistem, titreşimden korunursa, tahrik edici kuvvet de kaybolur.

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) oluşmaktadır. En basit dinamik model rijitlik katsayısı k, kütlesi m ve sönüm katsayısı c olan tek kütle-yay sistemidir, (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Tek kütle-yay modeli.

Tek serbestlik dereceli sistemin düşey deplasman y(t) için diferansiyel denklem Newton'un üçüncü kanununa göre şöyle yazılmaktadır:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \qquad \textbf{(2.6)}$$

(2.6) bağıntısında, F(t) tahrik kuvveti, $F_s(t)=ky(t)$ yay kuvveti, $F_d(t)=c\dot{y}(t)$ sönüm kuvvetidir. F=F(t) fonksiyonu çok çeşitli şekillerde verilebilir. Bunlardan birisi lineer titreşim sisteminin davranışını geniş bir şekilde ortaya koyan $F(t)=F_0\cos\omega t$ harmonik fonksiyonudur. Burada; F_0, kuvvetin genliği ve ω ise tahrik frekansıdır.

(2.6) diferansiyel denklem çözümünün iki kısmı vardır; homojen denklem çözümü ve özel çözüm. Homojen kısım, ikinci tarafı sıfır olan yani sönümlü serbest titreşimin diferansiyel denklem çözümüdür. Özel çözüm, zorlanmış titreşimin diferansiyel denklem çözümüdür. Sönümlü serbest titreşimlerle zorlanmış titreşimin birleşimi olan genel harekette, başlangıçta serbest titreşimin etkisi olsa da kısa zamanda sönümlenerek kaybolurken, özel çözüm daha uzun bir süre kaybolmaz ve harmonik tahrik altında sürekli hal (steady-state) çözümünü verir.

Herhangi bir tahrik etkisinde kalan bir sistem, bunun sonucu olarak belirli bir davranış gösterir. Burada tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemi için F_0 tahrik kuvveti ile sistemin tahrik kuvvetine cevabı olan yer değiştirme arasındaki ilişki bulunacaktır. Sistemin tepkisinin, sistemin yapısının ve karakteristik özelliklerinin fonksiyonu olacağı açıktır. Sistemin giriş verisi olan tahrik kuvveti ile sistemin

tepkisi arasındaki fonksiyona dinamik tepki fonksiyonu (veya transfer fonksiyonu) adı verilir.

Harmonik tahrik altında sürekli hal çözümünü veren özel denklem şöyledir:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_o \cos \omega t \qquad \textbf{(2.7)}$$

Sönüm oranı $\xi = \dfrac{c}{2\sqrt{km}}$ olarak tanımlanırsa, (2.7) denklemini şu şekilde yazabiliriz:

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_n \dot{y}(t) + \omega_n{}^2 y(t) = \frac{F_0}{k}\omega_n{}^2 e^{i\omega t} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Burada tahrik kuvveti kompleks formda yazılmıştır. Çözümün genel ifadesi $y(t) = Ye^{i\omega t}$ üssel formda kabul edilirse (2.8) denklemi şöyle olur:

$$\frac{Y}{F_0} = \frac{1/k}{1-(\dfrac{\omega}{\omega_n})^2 + 2i\xi\dfrac{\omega}{\omega_n}} \qquad \textbf{(2.9)}$$

(2.9) denkleminde yerine $\omega = 2\pi f$ konularak,

$$\frac{Y}{F_0} = \frac{1/k}{1-(\dfrac{f}{f_n})^2 + 2i\xi\dfrac{f}{f_n}} \qquad \textbf{(2.10)}$$

(2.10) bağıntısı elde edilir. Sistemin giriş fonksiyonu ve tepki fonksiyonun zamana bağlı olması durumunda, çözümler kompleks formda olmaktadır. Daha basit çözüme ulaşmak için bu fonksiyonların Fourier dönüşümleri alınarak frekansa bağlı fonksiyonlar elde edilir. Frekansa bağlı tahrik fonksiyonu transfer fonksiyonu ile çarpılarak sistemin frekansa bağlı tepki fonksiyonu elde edilir. Dinamik tepki fonksiyonu, sistemin giriş verisi olan taşıt tahrik fonksiyonu ile sistemin çıkış verisi olan yolun çökmesi arasındaki ilişkiyi veren bir fonksiyondur ve frekansa bağlı bir fonksiyon olduğu için H(f) olarak gösterilir. Eğer dinamik tepki fonksiyonu belirlenirse, taşıt yük fonksiyonuna bağlı olarak, yolun çökmesi kolaylıkla hesaplanabilir. Yol çökme fonksiyonu,

$$Y(f)=H(f)F(f) \qquad \textbf{(2.11)}$$

(2.11) bağıntısı ile bulunur. Birim kuvvet için transfer fonksiyonu,

$$H(f) = \frac{Y(f)}{F(f)}) = \frac{1/k}{1 - \frac{f^2}{f_n{}^2} + i2\xi\frac{f}{f_n}} \quad \textbf{(2.12)}$$

(2.12) bağıntısı ile elde edilir. f=0 için statik tepki fonksiyonu,

H(0)=Y(0)/F(0)=1/k **(2.13)**

(2.13) bağıntısında, giriş fonksiyonu $F(0)=F_0$ için statik tepki fonksiyonu $Y(0)=F_0/k$ elde edilir.

Dinamik tepki fonksiyonu kompleks polar notasyona göre yazılırsa,

$$H(f) = |H(f)|e^{-i\phi(f)} \quad \textbf{(2.14)}$$

(2.14) bağıntısı elde edilir. Dinamik tepki fonksiyonunun mutlak değeri,

$$|H(f)| = \frac{1/k}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\xi^2\eta^2}} \quad \textbf{(2.15)}$$

(2.15) bağıntısında, $\eta=f/f_n$, tahrik frekansın sistemin öz frekansına oranıdır. ϕ ise, harmonik değişen zorlayıcı kuvvet ile zorlanmış titreşim arasındaki faz açısını göstermektedir ve (2.16) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\phi(f) = -a\tan\frac{2\xi\eta}{1-\eta^2} \quad \textbf{(2.16)}$$

Harmonik kuvvetin frekansına bağlı olarak sistemin yer değiştirmesi de değişmektedir. Dinamik yer değiştirmenin statik yer değiştirmeye oranına dinamik büyütme faktörü denilebilir. Bu durumda, harmonik kuvvet değişmediğine göre harmonik tepki fonksiyonunun statik tepki fonksiyona oranı da dinamik büyütme faktör fonksiyonunu verir. Dinamik büyütme faktör fonksiyonu

$$\varphi = \frac{|H(f)|}{H(0)} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\xi^2\eta^2}} \quad \textbf{(2.17)}$$

(2.17) formülü ile bulunur. Sistemin sönümsüz, yani $\xi=0$ olması halinde, dinamik büyütme faktör formülü şöyle olur,

$$\varphi = \frac{1}{|1-\eta^2|} \quad \textbf{(2.18)}$$

(2.18) bağıntısından, sönümsüz sistem için rezonans durumunda (η=1) dinamik büyütme faktörü ve dolayısıyla yer değiştirme sonsuz olmaktadır. Ama gerçekte tüm sistemlerde çok az da olsa sönüm vardır.

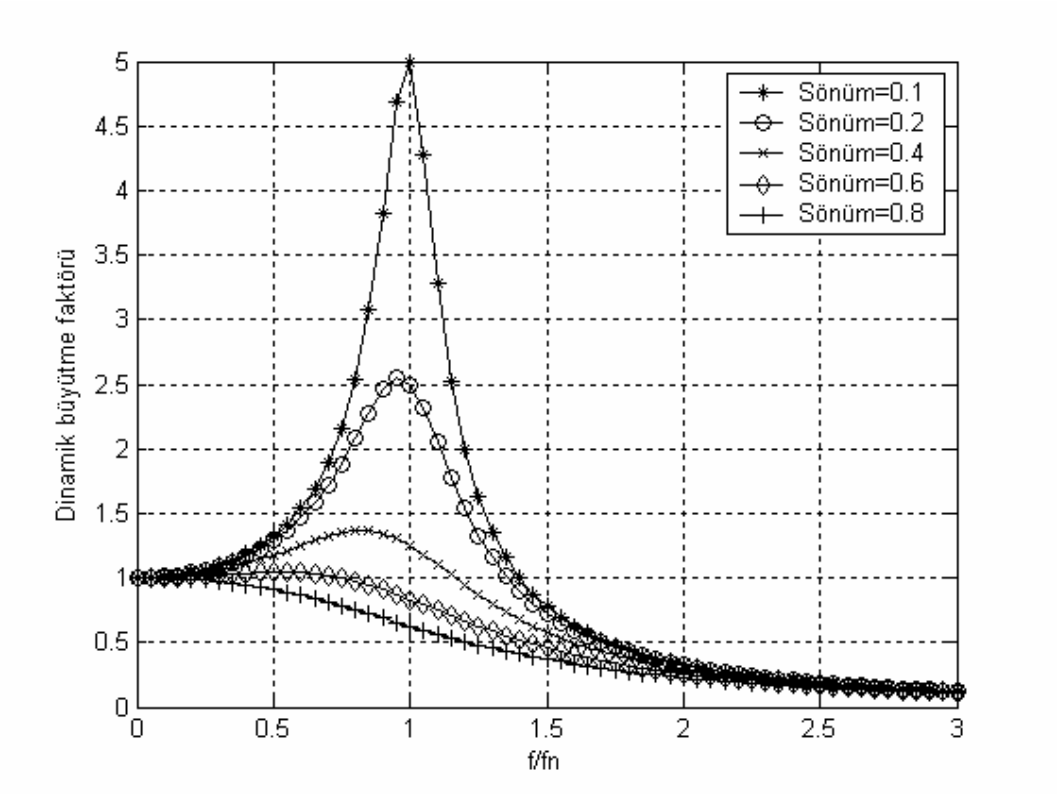
Rezonans durumunda dinamik ray çökmesini (veya ray eğilme momentini) bulmak için, dinamik büyütme faktörü ile statik ray çökme değerinin (veya eğilme momentinin) çarpılması gerekir. Tek tekerlek yükü Q için, rezonans ray çökme (2.19) ve ray eğilme moment (2.20) formülü şöyledir:

$$y_{mak} = \varphi \times y_{statik} = \varphi \times \frac{Q}{2kL} \qquad \textbf{(2.19)}$$

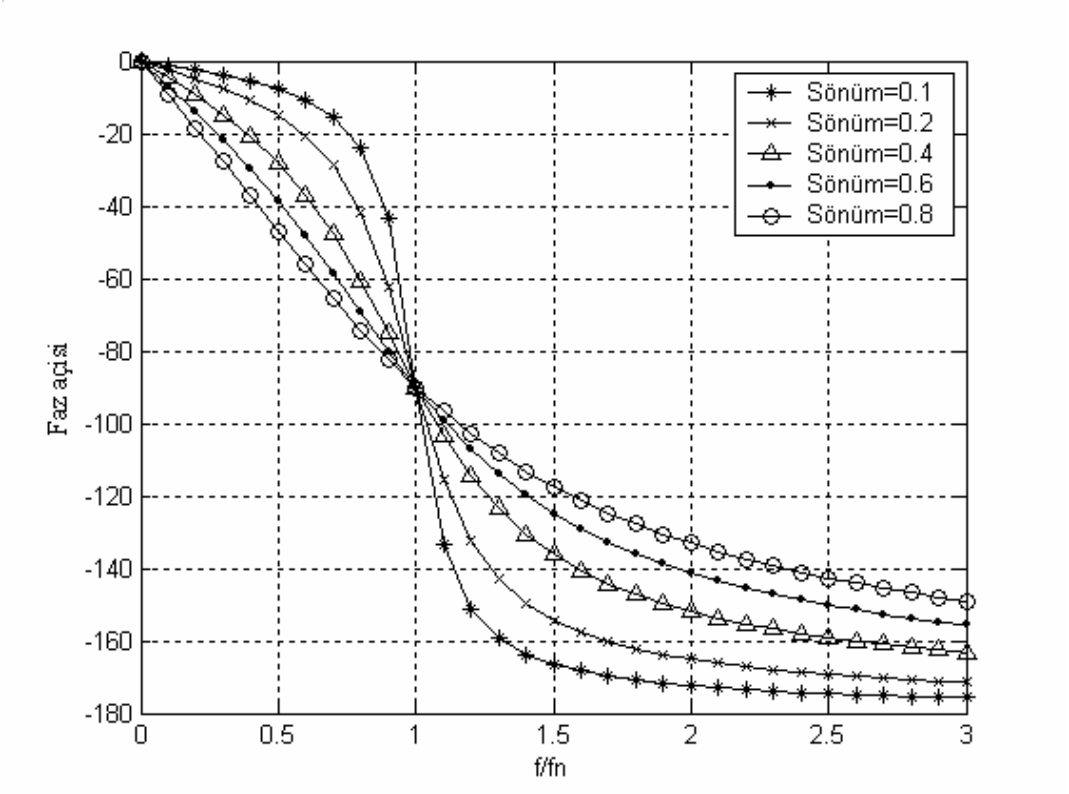
$$M_{mak} = \varphi \times M_{statik} = \varphi \times \frac{QL}{4} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Farklı sönüm oranları için MATLAB programı kullanılarak (2.17) denkleminden dinamik büyütme faktör grafiği ve (2.16) denkleminden faz açı grafiği elde edilmiştir. Şekil 2.2'deki her bir eğri farklı sönüm oranını göstermekte olup, sönüm oranı arttıkça grafik aşağıya doğru kaymakta ve dinamik büyütme faktörü azalmaktadır.

Frekans oranı (η=f/fn) artarken dinamik büyütme faktörünün sıfıra yaklaşması, kuvvetin yüksek frekanslarda sonsuz hızla yaptığı değişimi kütlenin takip edememesi ve basitçe statik denge konumunda kalması şeklinde açıklanabilir, (Pasin, 2000).



Şekil 2.2 : Tek kütle-yay sistemi için frekans oranı-dinamik büyütme faktörü.



Şekil 2.3 : Frekans oranı -faz açısı.

Düşük sönüm oranları için, tahrik frekansı, sistemin öz frekansına yaklaştıkça dinamik büyütme faktörü de artmaktadır ve öz frekansa eşit olduğu zaman rezonans olayı gerçekleşmektedir Bu durumda dinamik büyütme faktörü en yüksek değere çıkmaktadır ve faz açısı 90° olmaktadır, (Şekil 2.3).

2.2 Demiryolu Titreşimlerinin Nedenleri

Taşıtta, yolda ve çevrede salınımlara, titreşimlere ve gürültüye neden olan çok fazla sayıda tahrik kaynağı vardır. Bunlar için yol geometri bozuklukları, ray ve tekerlek yüzeyindeki düzensizlikler, cebireli ray contaları, makas ve kruvazman geçişleri, yol rijitliğinin değişmesi gibi bir çok neden sayılabilir.

Yol için dört farklı ve bağımsız geometri hatası veya bozukluk meydana gelebilir. Bu hatalar yolun doğrultusunda, düşey seviyesinde, ekartmanda ve deverde olabilir. Yol doğrultusundaki uzun dalga boylu bozukluklar (λ>30 cm) taşıtların yanal deplasmanına neden olur ve bu da yolcuların konforsuz seyahat etmelerine neden olur. Kısa dalga boylu bozukluklar (λ<30 cm) titreşimlere ve gürültüye neden olur. Aynı şey uzun ve kısa dalga boylu yol kotundaki (düşey profil) bozukluklar için de söylenebilir. Ekartmandaki bozukluklar da taşıtların yanal deplasmanına neden olur. Deverdeki fazlalık veya eksiklik kurplarda yanal kuvvetlere neden olur.

Eğer bozukluk sinüs eğrisine uygun düzenli bir şekilde ise, bozukluğun dalga boyuna (λ) ve taşıt hızına (V) bağlı olarak tahrik frekansı hesaplanabilir,

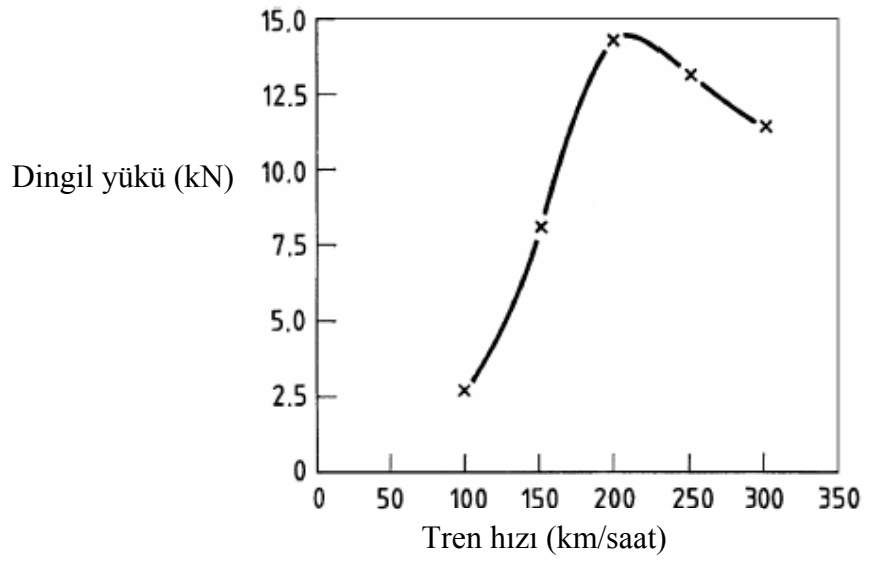
$$f=V/\lambda \qquad \textbf{(2.21)}$$

Burada görüldüğü gibi, dalga boyu arttıkça frekans azalır. Uzun dalga boylu yol geometri bozuklukları düşük frekanslı titreşimlere ve kısa dalga boylu ray ondülasyonları ise yüksek frekanslı titreşimlere neden olur.

Başka bir titreşim kaynağı ise yol rijitliğindeki düzensizliktir. Yol; travers üstünde daha rijit, iki travers arasında daha esnektir ve bundan dolayı, tekerlek iki travers arasındayken rayda daha fazla deplasman oluşmaktadır. Bu da taşıtın ve yolun travers geçiş frekansı ile tahrik edilmesine neden olur. Bu frekans, travers aralığına (a) ve taşıt hızına (V) bağlıdır ve tabiki rezonansa neden olabilir. Travers geçiş tahrik frekansı şöyle hesaplanır,

$$f=V/a \qquad \textbf{(2.22)}$$

Auersch (2005a), ICE (Intercity Express) hatlarında yaptığı araştırmada, travers geçiş tahrikinden kaynaklanan dinamik yüklerin frekansla veya tren hızı ile birlikte hızlı bir şekilde arttığını ve 200 km/saat hızda rezonans olayı ile birlikte maksimum seviyeye ulaştığını ispatlamıştır, (Şekil 2.4). Daha yüksek hızlarda veya frekanslarda dinamik kuvvet ve zemin titreşimleri azalarak 10 kN civarında sabit bir değere ulaşmaktadır. Bu durum yüksek hızlı demiryolu hatları için önemli bir sonuçtur.



Şekil 2.4 : Tren Hızı-Dinamik Aks Yükü

Ayrıca bir trenin eşit dingil veya boji aralığından ayrı bir tahrik frekansı oluşmaktadır. Ama genelde ardışık tekerleklerin ara mesafesi sabit olmadığı için tekerlek geçiş frekansı, travers geçiş frekansından daha az ortaya çıkmaktadır. Tramvay aracı, klasik tren ve yüksek hızlı trenin neden olduğu bazı tahrik frekansları Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, tekerlek geçiş frekansı travers geçiş frekansına göre çok düşük aralıklarda kalmaktadır, (Knothe ve Grassie, 1998).

Ray tekerlek temasında, değişken travers aralığı, makas geçişleri, lokal yol oturmaları gibi periyodik olmayan nedenlerden harmonik olmayan yükler oluşurken, ray ondülasyonları, ray contaları, tekerlek aplatisi gibi periyodik nedenlerden dolayı harmonik yükler oluşmaktadır. Harmonik yüklerin matematiksel modellemesi çok daha basit olduğu için, bir çok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir. Çizelge 2.2'de özellikle kentiçi raylı sistemlerde çok sık rastlanan ray ondülasyonlarından ve travers aralığından kaynaklanan harmonik tahrik frekansları hesaplanmıştır.

Çizelge 2.1 : Taşıttan kaynaklanan bazı tahrik frekansları.

	Tramvay	Tren	Yüksek hızlı tren
İşletme hızı (m/s)	10-20	30-40	60-80
Travers aralığı (m)	0.6-1	0.6	0.6
Travers geçiş frekansı (Hz)	10-33	50-67	100-133
Dingil aralığı (m)	1.5-2	1.5-2	2
Tekerlek geçiş frekansı (Hz)	5-13	15-33	30-40
Boji aralığı (m)	12	20	15
Boji geçiş frekansı (Hz)	0.8-1.7	1.5-2	4-5.3

Çizelge 2.2 : Ondülasyondan ve mesnet aralığından kaynaklanan tahrik frekansları.

Tahrik Nedeni	Tren Hızı				
	40 km/sa	80 km/sa	100 km/sa	150 km/sa	200 km/sa
λ=0.04 m dalga boylu ondülasyon	278	556	694	1042	1389
λ=0.15 m dalga boylu ondülasyon	74	148	185	278	370
λ=0.30 m dalga boylu ondülasyon	37	74	93	139	185
a=0.6 m travers aralığı	19	37	46	69	93
a=0.75 m travers aralığı	15	30	37	56	74

Bu çalışmada, taşıt ve yol titreşimlerine neden olan üç farklı kaynak tartışılacaktır:

- ray mantarı ondülasyonları (kısa dalga boylu bozukluklar),
- uzun dalga boylu bozukluklar,
- darbe yüklerine neden olan düzensizlikler.

2.2.1 Kısa dalga boylu bozukluklar

Bazen ray mantarında ve tekerlek bandajında farklı dalga boylarında bozukluklar gelişir. Ray mantarı bozuklukları ağır yük yollarından metropol yollara kadar hemen hemen her çeşit demiryolu hattında görülmektedir. Ray mantarındaki bozuklukların

gelişimi taşıt-yol dinamiği ile açıklanır ve ray-tekerlek sistemindeki rezonanslara bağlıdır. Bu kabulün nedeni, bozuklukların çoğunlukla 30-300 mm. arasında belli dalga boylarında periyodik olmasıdır. Bu periyodik bozukluklara ondülasyon denilir.

Ondülasyon, 0,05 mm'lik bir dalga derinliğinde gürültü düzeyinde hissedilen bir artışa ve dalga derinliği 0,1 mm'nin üstüne çıktığında ise, üstyapı bakım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır, (Kaess, 1983). Raylardaki ondülasyon, taşıtların geçişleri sırasında hem yol üstyapısında hem de yuvarlanan elemanlarda (asılı olmayan kütleler gibi) titreşimleri artırmaktadır. Belli hızlarda ondülasyondan kaynaklanan rezonans olayı, balastın parçalanmasına, yol profilini bozacak oturmalara, ray elastik tabaka ve ray bağlantı elemanlarında hasara ve travers yorulma hasarlarına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek frekanslı yüksek ivmeler, ray çatlaklarının hızlı bir şekilde gelişimini hızlandırır ve ray bağlantılarının gevşemesine sebep olur.

İstanbul Aksaray-Havalimanı metro hattında ondülasyonlarla ilgili bir dizi ölçüm yapılmıştır. Metro hattındaki uzun tünellerde ondülasyonun oluşmadığı ve buna karşılık travers altındaki gizli boşlukların ondülasyon oluşumunu hızlandırdığı görülmüştür, (Öztürk ve Arlı, 2006). Benzer şekilde Almanya'da ondülasyonun en fazla bataklık, kum, kil gibi zeminlerde oluşurken, kayalık ve beton zeminlerde daha az olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni, yumuşak zeminlerde raylar daha büyük bir uyarılmaya maruz kaldığı için rayda daha büyük bükümlerin oluşmasıdır.

Trafik yükünün türü, özellikle kısa dalga boylu ondülasyonların oluşumunda büyük etkiye sahiptir. Aynı büyüklükteki dingil yüklerine ve aynı çaptaki tekerleklere sahip olan taşıtlar, kısa dalgalı ondülasyon oluşumunu teşvik ederler. Çünkü tekerlek altında aynı türde gerilme durumları oluşur. Oysa farklı dingil yüklerine ve tekerlek çaplarına sahip olan taşıtlar söz konusu olduğunda, akmayı yaratan kritik gerilmelere farklı yerlerde rastlanır. Böylece, ondülasyon daha geç bir zamanda oluşur. Ayrıca dingil yükündeki artış ve tekerlek çapındaki azalma, ondülasyon oluşumunu arttırmaktadır.

2.2.2 Uzun dalga boylu bozukluklar

Dalga boyu 300 mm'den daha fazla olan, hattaki veya tekerlekteki geometrik bozukluklar ve yol rijitlik bozukluklarıdır.

Dairesel olmayan tekerlekler, taşıt ve yol elemanlarında aşırı gerilmelere ve taşıt konforunu azaltan kuvvet değişimlerine neden olmaktadır. Dairesel olmayan tekerleklerden kaynaklanan 50 ila 150 Hz frekans aralığının demiryolu hattı için çok önemli olduğu teorik ve deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Balast tanelerinin sıkışması ve/veya yeniden yerleşmesi için gerekli frekans değeri 100-200 Hz arasındadır. Balastın elasto-sıvılaşma davranışı yani balastın kenarlara doğru yayılması 35 Hz frekanstan sonra başlar. Bundan dolayı 25 ila 100 Hz frekans aralığı balast yatağı stabilitesi için çok önemli iken, 25 Hz frekans altındaki titreşimler balastlı yol için çok önemli değildir, (Knothe ve Wu, 2000).

Genelde taşıtın düşey dinamik analizi, hattın sabit bir düşey rijitliğe sahip olduğu kabulüne göre yapılır. Ama, yol rijitlik ölçümleri sonucunda, yol rijitliği özellikle çok fazla bakım gerektiren kısımlarda lineer değildir ve rijitlik yol boyunca değişkenlik göstermektedir. Bu rijitlik az çok yol boyunca rastgele olduğu için düşük frekanslı rastgele titreşimlere neden olmaktadır. Yol rijitliğinin değişiminin taşıtın yuvarlanma kalitesine etkisi önemsizdir, ama yola gelen dinamik yüklere ve dolayısıyla yolun bozulmasına etkisi önemlidir. Stabilitesi ve performansı iyi olan bir yol daha fazla uniform rijitliğe sahiptir. Balastın bozulması nedeniyle travers, balast yatağı tarafından mesnetlenmediği için asılı durumda kalmaktadır. Bu da yolun uniform rijitliğini bozmaktadır.

Makaslarda farklı boyda traversler ve farklı travers aralığı kullanılmaktadır ve bu da yol rijitliğini etkiler. Yolun simetrisi makaslarda kaybolur, yani sağ ve sol ray farklı rijitliğe sahiptir. Özellikle manganez döküm göbekli makaslarda rayın eğilme rijitliği büyük ölçüde değişmektedir. Ani rijitlik değişimi geçici ve yüksek frekanslı titreşimlere neden olmaktadır. Makas göbeğindeki kütle daha fazla olduğu için atalet kuvvetleri de daha fazla olmaktadır, (Andersson ve Dahlberg, 1999).

Yol, yüksek frekanslı yük değişimleri ile yüklendiği zaman, balast ve zeminde elastik olmayan hasarlar meydana gelmektedir. Yük kalktığı zaman yol orijinal pozisyonuna tam ulaşamaz, fakat ona çok yakın konuma gelir. Geçen taşıt sayısı arttıkça yolun farklı kısımlarında bu küçük, elastik olmayan deformasyonlar birikir. Kademeli yol oturması ile yolun yatay ve düşey doğrultusu zamanla değişmektedir. Zemine bağlı olarak birkaç metre ile yüzlerce metre arasında değişen dalga boylu bozukluklar meydana gelir ve taşıtın düşük frekanslı salınımlarına neden olur. Özellikle dolgudan köprüye geçişlerde yol oturmaları gerçekleşir.

Yolun her noktasının aynı miktarda oturmuş olması durumunda, geometri bozukluğu oluşmaz. Ama yol oturması, yol yatağı, yol yapısı ve yük yayılımındaki değişkenlikten dolayı uniform değildir.

2.2.3 Darbe yükleri oluşturan düzensizlikler

Darbe yükleri, tekerlek aplatileri veya tekerlek bandajındaki diğer kusurlar, ray contaları ve makas göbek geçişlerinden kaynaklanır.

Ray ve tekerlek dinamik davranışının modellenmesinde en çok ilgilenilen tekerlek düzensizliği, tekerlek aplatisidir. Bazen tekerleğin freni ile ilgili bir sorun olduğu zaman (veya düşük adhezyondan dolayı), taşıt harekete geçtiği zaman tekerlek hemen kendi etrafında dönmeye başlamaz, bunun yerine bir an için ray üstünde kayar. Tekerlek kaydıkça bandajda bir düz yüzey oluşur. Daha sonra tekerlek döndükçe her seferinde raya bir darbe yükü uygular. Bu yük, yüksek frekanslı titreşimlere ve gürültüye neden olur. Bazen, darbe yükü düşük sıcaklıklarda rayın kırılmasına neden olabilir.

Nielsen (1993) ve Dukkipati ve diğ. (1999), ölçümler yaparak aplatili tekerlek ile ray arasındaki temasın aplati boyuna göre 60 ila 100 km/saat arasındaki bir hızın üstünde kaybolduğunu belirtmişlerdir. Bu hızdan sonra, sürekli ray-tekerlek teması olmadığı için, aplatili tekerlek darbe yükü uygulamaya başlamaktadır. Darbe yükü, taşıt hızı ile orantılı olarak artar ve daha sonra geniş bir hız aralığı için sabit bir değerde kalır.

Raylar birbirlerine kaynakla birleştirilir veya cebire denilen demir plakalarla bağlanır. Birleşim kaynaklarındaki ezilmelerden veya cebireli bağlantıda genleşme boşluğundan dolayı dinamik darbe yükleri oluşmaktadır. Cebireli contalarda veya genleşme contalarında sadece seviye farkı değil ayrıca rijitlik değişimi de oluşmaktadır.

Taşıt bir makası geçerken farklı faktörlerden dolayı dinamik kuvvetler oluşmaktadır. Travers aralığının ve travers boylarının değişmesi yol rijitliğini değiştirmektedir. Tekerlek makas dilini ve göbeği geçerken ray-tekerlek temas bandı aniden yanal olarak kaymaktadır. Tekerlek denge konumuna ulaşmak için yanal yönde hareket ederken tekerleğe ve hatta yanal kuvvet uygulanmaktadır. Tekerlek, tavşan ayağından göbeğe geçerken (veya tam tersi) seviye farkından dolayı darbe yükü uygulamaktadır.

2.3 Demiryolu Titreşiminin Özellikleri

Potansiyel ve kinetik enerji içeren tüm sistemler dinamik yüklerle tahrik edilmesi halinde titreşim hareketi yaparlar. Bir dinamik sistem, lineer bölgede, belirli bazı frekanstaki harmonik yüklere maruz kalırsa o sisteme has belirli bir deformasyon şeklinde titreşir. Bu frekansların dışındaki harmonik zorlamalarda ise yeni bir deformasyon şekli oluşmaz, fakat az önce ifade edilen deformasyon şekillerinin zaman alanında bir kombinasyonu meydana gelir. Dinamik sistemin kendisine has bu titreşim şekillerine serbest titreşim modları ve bu modlara tekabül eden frekanslara da sistemin öz frekansları denir.

Bu bölümde yolun öz frekansları ve öz modları açıklanacaktır. Yolun öz modları ve frekansları tahrik kuvvetinden bağımsız olarak yolun kendine özgü dinamik davranışını belirler ve bu davranış trenin tahrik kuvveti uygulaması sırasındaki dinamik etkileri belirler. Yolun dinamik davranışını kütle elemanları (ray, travers, beton vs) ve yay elemanları (elastik tabaka, balast, zemin) belirler.

2.3.1 Yolun titreşim öz frekansları ve öz modları

Demiryolunun dinamik karakteristikleri düşey, boyuna ve yanal olmak üzere üç doğrultuda belirlenebilir. Ancak, dinamik yüklerin büyük bir kısmı düşey yönde olduğu için, yol yapısı genelde bu yönde titreşir ve düşey yöndeki dinamik özellikler belirlenir, ancak yanal ve boyuna modlardan kısaca bahsedilecektir.

Rayların ve ray bağlantı elemanlarının yanal eğilme ve kesme rijitliği düşey yöndeki rijitliklere göre daha azdır ama ray ve traverslerin oluşturduğu çerçeve direnci yanal yönde yüksek bir stabilite ve rijitlik sağlar. Yanal titreşim modları rayın eğilmesi ve yanal burulmasıdır, ancak burulma modları eğilme modlarından daha yaygındır. Çünkü yanal kuvvetler ray dışında burulma momentleri oluşturur.

Boyuna titreşim modları, en iyi şekilde ray veya sürekli mesnet tabakaları içindeki basınç dalgaları ile açıklanır. Eğer frenleme ve düzensiz ray-tekerlek teması gibi boyuna dinamik yükler varsa, boyuna titreşim modları görülür. Bu titreşimler çoğunlukla 1500 Hz frekansın üstünde beklenmektedir. Ayrıca düşey yükler, yatay kuvvet ve deformasyonlar birleştiği zaman boyuna titreşimler ortaya çıkar. Buradan yol davranışının üç bağımsız ortogonal yöne ayrılamayacağı ve her üç yöndeki özellik ve davranış ile geniş bir yapı olarak düşünülmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Demiryolu üstyapısının dinamik davranışının önemli kısmını gösteren frekans aralığı 40-1500 Hz'dir. Üstyapı dinamiği açısından 0-40 Hz aralığındaki düşük frekans davranışı birkaç nedenden dolayı analiz edilmemektedir;

Düşük frekanslardaki yol davranışı, altyapı tarafından belirlenmekte ve bu nedenle üstyapıdan ayrı bir önemi vardır.

Üstyapı elemanlarının dinamik özellikleri doğrusal değildir ve farklı frekans aralıklarında değişmektedir. Frekans fonksiyonuna bağlı bir ilişki olmadığı için üç farklı frekans aralığı için üç farklı değer kullanmak uygun değildir. Düşük frekans aralığında (0-40 Hz) özelliklerin değişimi diğer frekans aralıklarına göre çok daha fazladır. Bundan dolayı, orta ve yüksek frekans aralıkları için dinamik özelliklerin sabit değerlerini kabul etmek daha uygun bir yaklaşımdır.

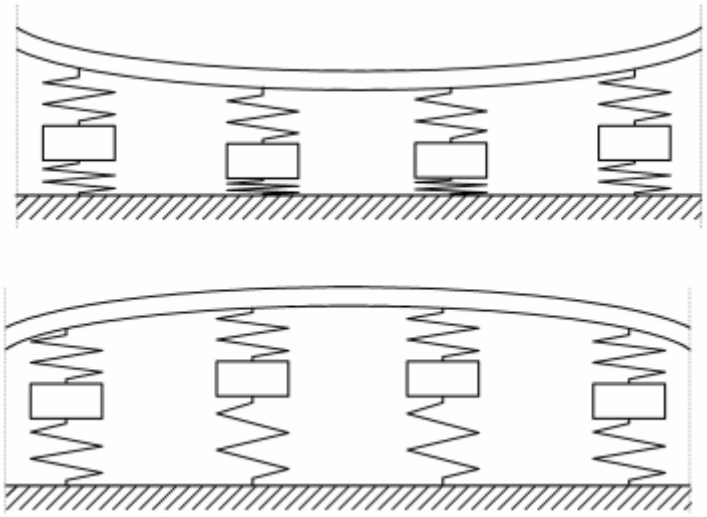
Düşük frekans davranışı özellikle taşıt hasarları ve konfor kaybı ile ilgilidir. Ancak orta ve yüksek frekans davranışı ise tekerlek-ray temas hasarları, üstyapı hasarları ve gürültü iletimi ile ilgilidir.

Titreşen bir yol yapısının şekli uzayda ve zamanda periyodik olan bir eğri ile karakterize edilir. Titreşim şekli genelde rezonans titreşim modları tarafından belirlenir.

Balastlı ve balastsız hatlarda yol, ray, mesnet ve antirezonans öz frekansları; balastsız yollarda mühendislik yapısından dolayı ilave olarak yapısal öz frekans vardır. Balastlı yollarda ise seletli (çelik plakalı) bir üstyapı varsa ilave olarak selet öz frekansı ve buna bağlı olarak antirezonans frekansı oluşmaktadır. Burada demiryolu öz frekansları kısaca açıklanacaktır ve öz frekans aralıkları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Yapısal öz frekans (fs) demiryolunu taşıyan mühendislik yapısının yapısal özelliklerine bağlıdır ve genelde 80 Hz frekansın altındadır.

En düşük öz frekans, tüm yol çerçevesinin öz frekansıdır. Yol öz frekansı (ft), yol yapısının tüm asılı kütlelerinin sonsuz rijit sınır şartlarına göre düşey yöndeki hareketi ile karakterize edilir. Teoride mod şekli ray ve traverslerin rijit kütle titreşimi ile fakat pratikte uzun eğilme dalgası ile açıklanır, (Şekil 2.5). Rayın eğilme özellikleri kesme özeliklerinden daha fazla belirleyici olmaktadır.



Şekil 2.5 : Yolun öz modu.

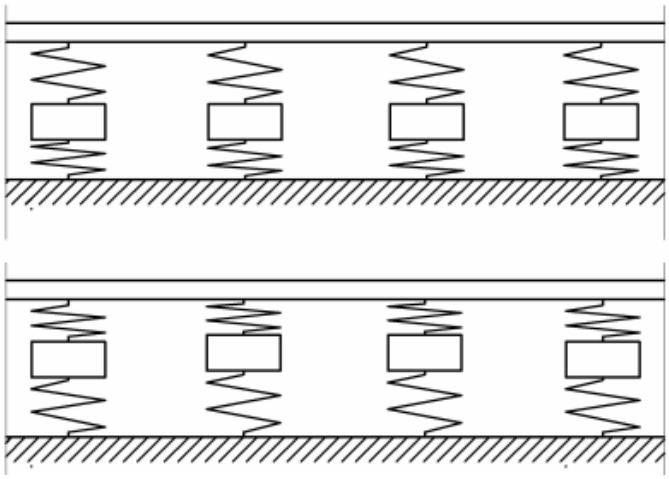
Çizelge 2.3 : Yolun düşey titreşim öz frekansları

Yolun öz frekansları	Balastlı yol		Balastsız yol		
	Normal yol (Hz)	İlave esnek sistemli (Hz)	Seletli (Hz)	Bloklu (Hz)	Seletli ve bloklu (Hz)
Yapısal öz frekans (fs)	-	-	<80	<80	-
Yol öz frekansı(ft)	40-140	40-140	100-400	40	140
Anti öz frekans(fb-a) (Travers öz frekansı)	80-300	80-300	180-1500	80-700	80-300
Ray öz frekansı (fr)	250-1500	250-1500	250-1500	250-1500	250-1500
İlave selet öz frekansı (fb)	-	100-400	-	-	-
Anti rezonans öz frekansı (fb-a_2)	-	180-600	-	-	-
Mesnet öz frekansı (fp-p)	500-1200	500-1200	500-1200	500-1200	500-1200

Yol öz frekansında raylar ve traversler kütleyi sağlar ve balast da büyük oranda sönümlü yay görevini sağlar, bundan dolayı bu titreşim çok iyi sönümlüdür. Yol rezonansı mesnet üstündeki veya iki mesnet arasındaki tahriklerde hemen hemen aynıdır. Ama iki travers arasındaki yol yapısı esnek olduğu için biraz daha yüksek tepki değerlerine neden olur.

Balastlı yolda çoğu zaman yol öz frekansı belli olmazken, balastsız yolun öz frekansı çok belirgin olmaktadır. Çünkü balastsız yolda balast olmadığı için kütle daha düşüktür.

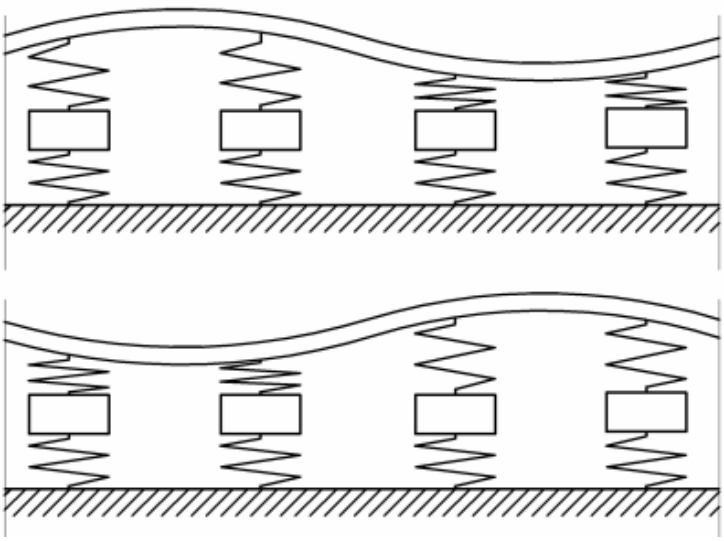
(Anti) öz frekans sayısı kütle ve rijitliğe sahip tabaka sayısına bağlıdır. Her çift öz frekans (fr-ft çifti ve fr-fb çifti) arasında bir anti öz frekans (fb-a ve fb-a_2) beklenmektedir. Tipik anti öz frekans, çift esnek tabakalı ve ayrık mesnetli yolda özellikle mesnet üstünde gözlemlenir. Anti öz frekans, ray yerine travers veya bloğun öz frekansıdır, (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Travers veya blok öz modu (anti rezonans modu).

Başka bir öz frekans, 200-600 Hz frekans aralığında ray öz frekansıdır. Ray öz frekansı (fr) büyük ölçüde ray altı elastik tabaka özelliklerine bağlıdır. Ray altı elastik tabaka, ray ve travers kütleleri arasında "yay" gibi hareket eder, (Şekil 2.7). Burada ayrıca balast, sönümün çoğunu sağlar.

Titreşimin mod şeklini 500 Hz frekansın altında rayın eğilmesi belirlerken, bu frekansın üstünde eğilme ile birlikte kesme özelliği belirleyici olur. Travers aralığı azaldıkça yol, selet ve ray öz frekansları artar.

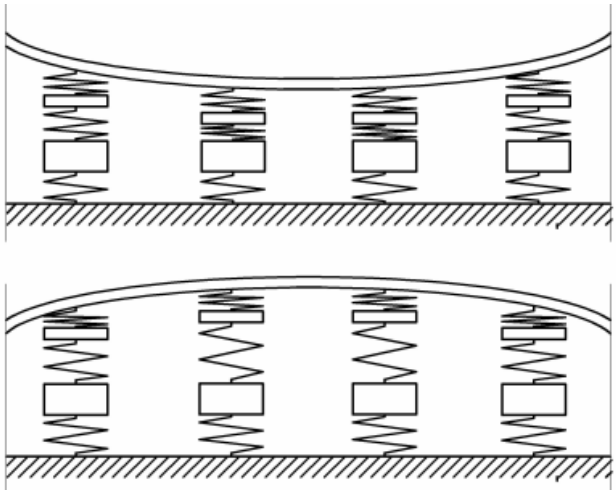


Şekil 2.7 : Ray öz modu.

Ölçümlerde ray öz frekansını belirlemek iki nedenle zordur;

- Sönüm oranı yüksek ise, pik değer belli olmayabilir,
- Ray altı elastik tabaka özelliği her traverste farklı olabildiği için çok sayıda öz frekans elde edilmiş olabilir.

Balastlı yolda travers ile ray arasına esnek tabaka ilave edilirse, mod şekli tüm yol moduna benzer başka bir öz frekans (fb) ortaya çıkar, (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Selet öz modu.

Burada tartışılan en yüksek öz frekans, mesnet öz frekansıdır. Bu frekans dar bir aralıkta pik değere çıkmaktadır ve bu da rezonansın çok düşük sönümlü olduğunu gösterir. Mesnet titreşimi ray boyunca çok kolay ilerler, bundan dolayı rayın geometrik sönümü çok sınırlıdır.

Çoğu durumda sürekli mesnetli yollarda rayın tek bir öz frekansı olurken, ayrık mesnetli yollarda mesnet aralığına bağlı olarak ilave öz frekanslar ortaya çıkmaktadır. Bu ilave titreşimlerden birinin dalga boyu mesnet aralığı ile uyuşursa, mesnet öz frekansı ortaya çıkmaktadır. İlk mesnet öz frekansı 400-1200 Hz arasında olurken, ikinci öz frekans, ilkinin 4 katına yakın yüksek frekanslarda olur.

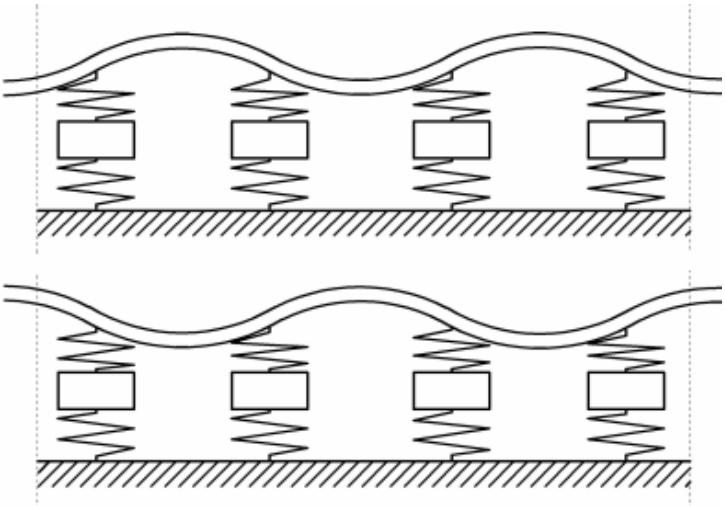
Mesnet öz modu, ray dönmesini mesnet üstünde boyuna doğrultuda tutan bir titreşim modudur, (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10). Mesnet öz frekansı, iki travers arası tepki fonksiyonunda açıkça görülebilir ve mesnet aralığına ve ray özelliklerine (ray kütlesi, eğilme ve kesme özellikleri) bağlıdır.

Mesnet öz frekansı,

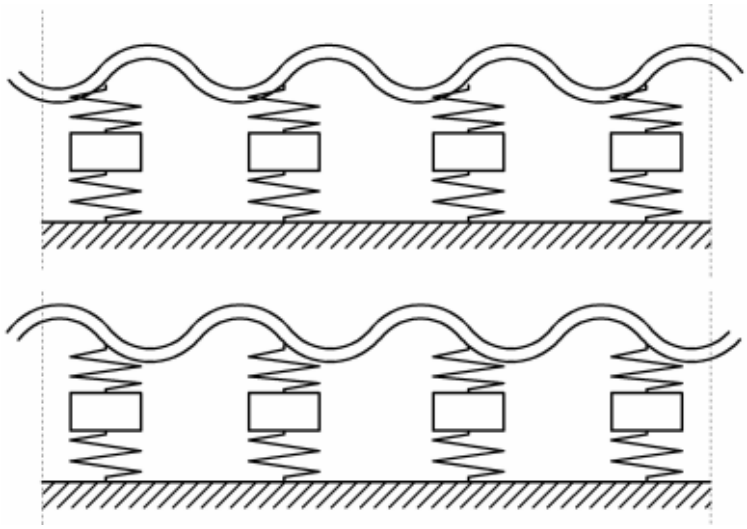
$$f_{p-p} = \frac{n^2 \pi}{2a^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \qquad \textbf{(2.23)}$$

(2.23) bağıntısı ile bulunur. Burada n mod sayısı, EI (Nm^2) eğilme rijitliği, m (kg/m) rayın birim uzunluk kütlesi ve a (m) mesnet aralığıdır.

Asıl mesnet öz frekansı, hesaplanan frekanstan daha düşüktür. Bunun nedeni, mesnet aralığının iki katına eşit olan titreşim dalga boyunun ray yüksekliğinden çok uzun olmadığı durumlarda, E-B kiriş teorisinin çok hassas sonuçlar vermemesidir. Pratikte rayın kesme deformasyonu ve dönme ataletini de dikkate alarak daha doğru bir mesnet frekansı hesaplamak gerekir. Bunun için kullanılan R-T kiriş teorisi ile E-B teorisine göre %20-25 daha düşük öz frekans elde edilir.



Şekil 2.9 : Birinci mesnet öz modu.



Şekil 2.10 : İkinci mesnet öz modu.

Demiryolunun öz frekansları demiryolu elemanlarının dinamik özelliklerine bağlıdır. Özellikle balast-zemin tabakası ve elastik tabakaların rijitlik ve sönüm katsayıları en etkili faktörlerdir. Bu nedenle yol elemanlarının dinamik özellikleri ve bunları etkileyen faktörlerin çok iyi anlaşılması gereklidir.

2.3.2 Yol elemanlarının dinamik özellikleri

Her elastik malzemenin bir rijitlik katsayısı olup, Çizelge 2.4'te bazı üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları görülmektedir, (Profillidis, 1995). Çizelgede görüldüğü gibi, zemin tabakasının rijitliği, yani rijitlik katsayısı çok düşük iken, kauçuk ray altı elastik tabakanın ve balastın rijitliği daha fazladır. Bir üstyapının toplam elastikliğine her bir elemanın katkısı çok farklıdır ve aşağıdaki Çizelge 2.5'te oransal değerleri verilmiştir, (Lichtberger, 2005).

Ray altı elastik tabakalarının yük ile yer değiştirme arasındaki ilişkisi lineer değildir. Bunun nedeni malzeme özellikleri ve bağlantı sisteminin karmaşık sınır şartlarıdır. Elastik tabaka rijitliği, yükleme frekansına, yükün süresine veya tekrar sayısına, ön yüke, hava şartlarına (özellikle sıcaklığa) bağlıdır, (Popp ve diğ., 1999).

Thompson ve diğ.(1998), ön yükün ve frekansın 10 mm kalınlığında kauçuk ray altı elastik tabaka rijitliğine olan etkisini incelemek için bazı ölçümler yapmıştır, (Şekil 2.11).

Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, elastik tabakanın rijitlik katsayısı, frekanstan daha çok ön yüke bağlıdır. Ray altı elastik tabakasına ön yük ray bağlantı elemanları

tarafından uygulanır ve bu ön yük 20 kN kadardır. Bu ön yük için dinamik/statik rijitlik oranı frekansa bağlı olarak 3 ila 5 kat arasında değişmektedir.

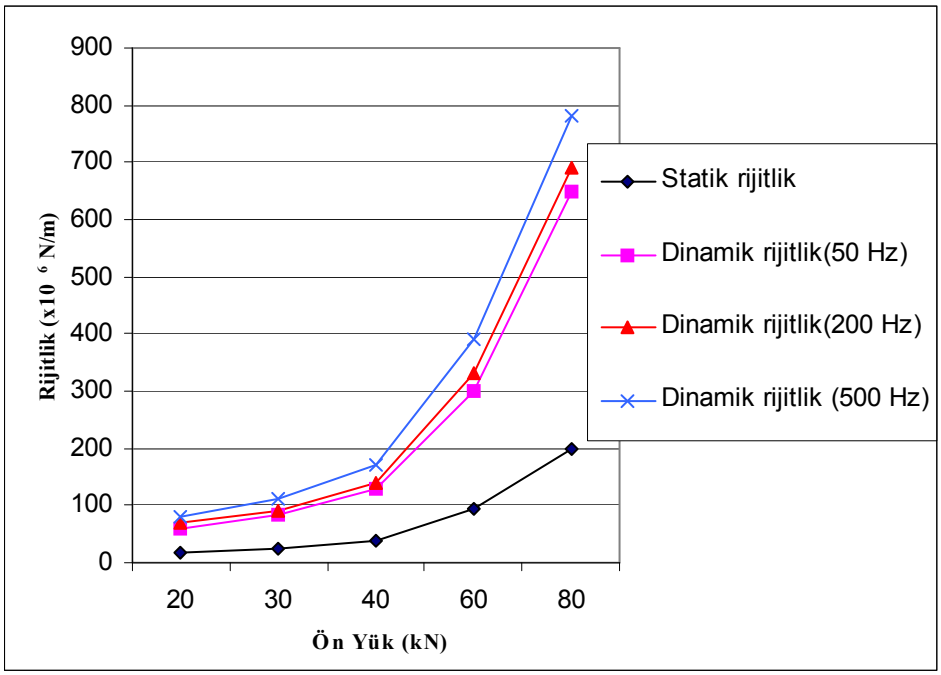
Özellikle elastik tabakalar sıcaklığa duyarlıdır. Poliüretanlar, polyesterler, doğal ve sentetik kauçukların elastisite modülleri sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca doğal elastik malzemeler, balast ve zemin için nem oranının önemli bir rolü vardır. Yol bileşenlerinin sıcaklık ilişkisi hakkında çok az bilgi mevcuttur. Tecrübeler göstermektedir ki, doğal ürünlerin rijitlik ve sönüm özelliklerine sıcaklığın etkisi sınırlıdır ve kısmen değiştirir.

Çizelge 2.4 : Üstyapı elemanlarının rijitlik katsayıları.

Malzeme	Rijitlik katsayısı (x10^6 N/m)
Ray	50.000-100.000
Ahşap travers	500-800
Beton travers	12000-15000
Balast	100-300
Kauçuk elastik tabaka	100-200
Çakıl/kaya zemin	20-80
Balçık zemin	5-15
Killi zemin	15-20

Çizelge 2.5 : Yol elemanının toplam yol elastikliğine ortalama katkısı.

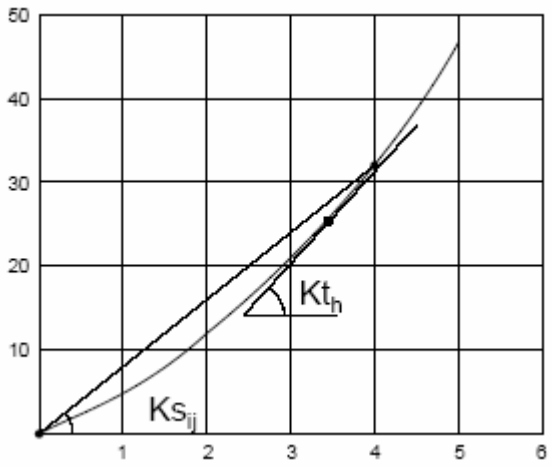
Yol elemanı	Ahşap traversli yol (%)	Beton traversli yol (%)
Ray	0.2	0.2
Ray altı elastik tabaka	25	34
Travers	14.8	0.8
Balast	20	22
Altyapı	40	43



Şekil 2.11 : Ön yük-ray altı elastik tabaka rijitlik değişimi.

Ray altı elastik tabakalarının ve diğer elastik elemanların yük-yer değiştirme ilişkisi lineer olmadığı için, yükün yer değiştirmeye oranı olan rijitliğin iki farklı tanımlaması vardır; sekant rijitlik ve teğetsel rijitlik.

Sekant rijitliği (Ks), tüm yükleme şartlarında rijitlik için eşdeğer parametredir, ama spesifik yükleme şartları için teğetsel rijitlik (Kt) daha uygundur. Teğetsel rijitlikte ön yükün etkisi önemlidir. Bunun için statik ön yük ve dinamik kuvvetin bilindiği testlerde yük-deplasman grafiğinin ilk türevi alınarak teğetsel rijitlik bulunabilir, (Şekil 2.12). Teğetsel rijitlik düşük frekanslarda doğrusal olarak, yüksek frekanslarda frekansa bağlı olarak artar.



Şekil 2.12 : Sekant ve teğetsel rijitlik.

Ray altı elastik tabaka rijitliği lineer olmamasına karşın, genelde modellemede lineer olduğu kabul edilir. Elastik tabakanın rijitlik ve sönüm özelliklerini ifade etmek için genelde yay-sönüm elemanı fiziksel modeli kullanılır.

Ray altı elastik tabakaların sönüm oranlarının ön yükten hemen hemen bağımsız olduğu ve frekansla birlikte çok az arttığı bulunmuştur, (Thompson ve diğ., 1998).

Ray bağlantı elemanları rayı yerinde tutar ve rayın yanal yük altında devrilmesini önler. Ray bağlantılarının rijitliği ray elastik tabakasına göre çok azdır. Bundan dolayı, bir tekerlek takımı yolda yük uyguladığı zaman sadece ray altı elastik tabakanın rijitliği önemlidir. Ray altı elastik tabakalarının rijitlik artışında üzerinden geçen toplam aks sayısı önemli bir faktör değildir, ama bağlantı elemanının sürekli germe kuvveti önemlidir. Germe kuvveti nominal düzeyinene göre %60 azaltılırsa elastik tabakanın rijitliğinin hiç artmadığı görülmüştür, (De Man, 2002). Ray bağlantılarının deforme olması durumunda ray ivmesi, %30 ve ray yer değiştirmesi %60-70 oranında artmaktadır. Bu yüzden deforme olmuş bağlantı elemanları, daha fazla zarara neden olmadan değiştirilmelidir, (Zhai ve Chai, 1997).

Balast-zemin gibi granüler malzemeler, fiziksel açıdan kompleks bir yapıdadır. Bundan dolayı dinamik tepki için elastik modülü ve değişik modül yaklaşımlarını içeren uygun kurallar geliştirilmiştir.

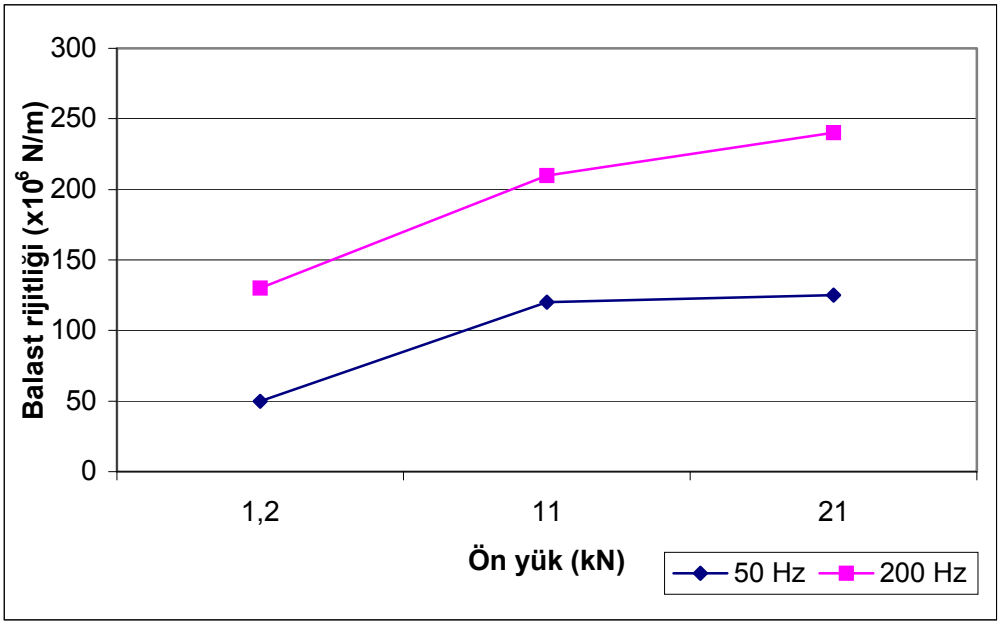
Popp ve Schiehlen (2003), balastın lineer olmayan davranışını araştırmak için deneyler yapmıştır. Peplow ve diğ. (1996) ise, balast malzemesinin spesifikasyonları ile ilgili literatür araştırması yapmıştır. Bu çalışmada, yol yapısı-balast etkileşiminin statik ve dinamik yük altındaki değerleri tartışılmıştır. Statik yük için bir yaklaşım kapsamlı olarak sunulmuştur. Bu yaklaşım, balast ve zemin tabakalarını yansıtmak için çok tabakalı lineer elastik teoriyi kullanmaktadır. Sonlu eleman modelleri geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır, farklı konfigürasyonlar için balast ve zemindeki gerilmeler tartışılmıştır. Knothe (1998), balast davranışlarını ve zemin oturmalarını da içeren uzun süreli yol davranışı üzerine bir araştırma yapmıştır. Knothe, genel kabul edilebilecek deformasyon ve oturma denklemlerinin olmadığını ve balast malzemesi ile ilgili denklemlerin neredeyse olmadığını belirtir. Sadece fenomenal yaklaşımla balast oturmalarını açıklayan öneriler vardır ve bunlar yük devir sayısına ve/veya yük miktarına bağlıdır. Jacobsson (1998) balast davranışının kuramsal ve matematik modellemesine vurgu yapan literatür taraması yapmıştır. Ayrıca basınç-germe, üç eksenli basınç ve kesme gibi farklı yük koşullarına göre testler yapmıştır.

Malzemenin yapısal davranışı ile ilgili farklı matematik tanımlar vermiştir. Özellikle, esnek malzeme davranış tanımlarını ve gerilme miktarına, gerilme sayısına ve sıkışma oranına bağlı olarak kalıcı deformasyon oluşumunu ortaya koymuştur.

Balastın rijitliği, traversin yük alanına ve alan şekline, boşluk oranına, frekansa, basınç dağılımına ve balastın elastik özelliklerine bağlıdır. Balast rijitliği, ön yüke ve özellikle frekansa bağlı olarak önemli oranda değişir. Şekil 2.13 balast tabakasının ön yüke ve frekansa bağlı olarak değişimini göstermektedir, (Fremion ve diğ., 1996).

Şekil 2.13'ten görüldüğü gibi, düşük yüklerde balast rijitliği hızlı artarken, daha yüksek yüklerde daha yavaş artmaktadır. Balast için ön yükün kaynağı ray ve travers ağırlığıdır. Monoblok beton traversli yol için balasta gelen ön yük 1.86 kN kadardır. Ray altı elastik tabakanın rijitliği frekanstan daha çok ön yüke bağlı iken, balastın rijitliği ön yükten daha çok frekansa bağlıdır.

Ahlbeck ve diğ. (1975) travers altındaki balast ve zemin tabakalarının rijitlik katsayılarını bulmak için bir model geliştirmiştir. Traversin altından balastın içine doğru genişleyen hayali bir piramidin her derinliğinde uniform basınç dağılımının olduğu kabulüne dayalı basitleştirilmiş bir model iyi sonuçlar vermektedir. Bu modelde sadece piramit içinde kalan malzeme basınç altındadır. Burada poisson oranı yerine piramitin düşeyle yaptığı açıyı ifade eden içsel sürtünme açısı kullanılır.



Şekil 2.13 : Ön yük- balast rijitlik grafiği.

Bu modele göre balastın tabakasının rijitlik katsayısı aşağıdaki ampirik formülle bulunur,

$$k_{balast} = \frac{2\tan\alpha_s(\lambda - a)E_b}{\ln(\frac{\lambda}{a}(\frac{a + 2\tan\alpha_s h}{\lambda + 2\tan\alpha_s h}))} \quad \textbf{(2.24)}$$

(2.24) bağıntısında α_s, balast içsel sürtünme açısıdır ve balast için 20° kabul edilir. h, balast yüksekliği, a travers aralığı, E_b (N/m^2) balastın elastisite modülü ve λ travers altı yük alanının uzunluğudur. Bu mesafe travers boyundan hat genişliği olan 1,5 m. çıkartılarak bulunur.

Eğer zeminin elastisite modülü yeterli değilse, balast tabakası altına alt balast denilen ilave bir tabaka daha eklenir ve benzer şekilde alt balast tabakasının rijitlik katsayısı şöyle bulunur;

$$k_{alt\ balast} = \frac{2\tan\theta(\lambda - a)E_{ab}}{\ln(\frac{(\lambda + 2\tan\alpha_s h)(2\tan\theta h_b + 2\tan\alpha_s h + a)}{(a + 2\tan\alpha_s h)(2\tan\theta h_b + 2\tan\alpha_s h + \lambda)})} \quad \textbf{(2.25)}$$

(2.25) bağıntısında θ, alt balast iç sürtünme açısıdır ve alt balast için 35° kabul edilir. h_b, alt balast yüksekliği ve E_{ab} (N/m^2) alt balastın elastisite modülüdür.

Balast ve alt balast tabakanın sönüm katsayıları kritik sönüm katsayılarının %40'ı olarak belirlenir ve bu oranın Grassie ve diğ.(1982) tarafından yapılan araştırmada gerçekçi olduğu düşünülür.

Zeminin deformasyon veya elastisite modülü (Ev_2), plaka yük testi ile belirlenen taşıma kapasite parametresidir. Plaka yük testinde, kademeli yükleme ve yük boşaltma prosesi altında çapı 30 cm olan dairesel plakanın çökmesi ölçülür. Poisson oranı 0,21 olan elastik izotropik yarı-mekan zeminde yükleme sonrasında aşağıdaki formülden elastisite modülü hesaplanır.

$$Ev_2 = \frac{1.5\sigma r}{y} \quad \textbf{(2.26)}$$

(2.26) bağıntısında σ (N/m^2) ortalama zemin basıncı, y (m) oturma miktarı ve r (m) plaka yarıçapıdır.

Ahlbeck ve diğ.(1975), balast ve alt balast tabakalarında olduğu gibi zeminin rijitliğini balast-zemin arasındaki piramit alan ile zeminin elastisite modülünün çarpımı ile hesaplamıştır;

$$k_z = E_z(\lambda + 2h\tan\alpha_s + 2h_b\tan\theta)(b_t + 2h\tan\alpha_s + 2h_b\tan\theta) \quad \textbf{(2.27)}$$

(2.27) bağıntısında E_z zeminin elastisite modülü ve b_t travers genişliğidir. Zemin ve balast gibi tabakalı sistemler için rijitlik katsayısı, yatak modülünden bulunur. Yatak modülü ise tabakaların elastisite modüllerine ve tabaka kalınlıklarına bağlı olarak, Odemark'ın eşdeğer tabaka teorisine göre hesaplanır.

Odemark Eisenmann'ın eşdeğer tabaka teorisinden yararlanarak tabakalardan oluşmuş bir taban için yatak modülü şöyle hesaplanır;

$$C = \frac{E_z}{h_1' + h_2' + h_3'}, \text{ N/m}^3 \quad \textbf{(2.28)}$$

(2.28) bağıntısında h'_j eşdeğer tabaka kalınlığıdır ve (2.29) bağıntısı ile hesaplanır;

$$h_j' = 0{,}9h_j\sqrt[3]{\frac{E_j}{Ez}} \quad \textbf{(2.29)}$$

Yatak modülü belirlendikten sonra, rijitlik katsayısı yarım travers mesnet alanı ile çarpılarak bulunur;

$$k = C x A_t/2 \quad \textbf{(2.30)}$$

3. DEMİRYOLU TİTREŞİM MODELLERİ

Demiryollarının ilk yıllarından itibaren, artan dingil yükleri ve taşıt hızları ile birlikte ray kırılmaları, balast tabakasında aşırı zorlama sonucu çökmeler gibi bazı sorunlar yaşanmaya başlamıştır. 19.yüzyılın ortalarında statik ve mukavemet bilimindeki gelişmelerle birlikte, demiryollarında güvenilir hesap yöntemlerine ihtiyaç doğmuştur. 1882 yılında Schwedler, yüksek gerilmelerden dolayı oluşan ray kırılmaları ve deformasyonlarını önlemek amacıyla üstyapı elemanlarına gelen yükleri hesaplamak gerektiğini ve bunun için de matematik modele ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Statik yükler altında demiryollarında oluşan zorlanmaların nasıl tahmin edilebileceği konusunda kayda değer ilk çalışma 1867 yılında Emil Winkler tarafından yapılan "Boyuna traversli demiryolu hesabı için elastik yataklı kiriş modeli" çalışmasıdır. Winkler adıyla günümüzde de kullanılmakta olan bu teori, basitliği ve uygulama kolaylığı bakımından her zaman tercih edilmiştir. 1888 yılında H. Zimmermann deneysel çalışmalar yaparak Winkler teorisini kanıtlamıştır.

1920'li yıllardan itibaren sürekli kaynaklı rayların kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkan sıcak havalardaki ray burulmaları ve soğuk havalardaki ray kırılmaları problemleri yol stabilitesi analizini gerekli kılmıştır. 1915 yılında, Stephen P. Timoshenko, günümüzde de kullanılan ayrık mesnetlemenin sürekliye dönüştürülmesi ile elde edilen sürekli mesnetlenmiş kiriş modeli ile hesaplanabileceğini ilk kez kanıtlamıştır. Ayrıca, Timoshenko'nun bu çalışmasında, yol dinamiği konusundaki ilk araştırmalar yer almaktadır.

1926 yılından sonra, Timoshenko'nun tekerlek aplati etkilerini incelediği makalesi ile başlayarak, demiryolu yapısındaki dinamik yüklere karşı gelişen bir ilgi oluşmuştur. Timoshenko'nun 1930'lu yıllarında kabul edilen çalışmasının sonucu olarak günümüzde yaygın olarak kullanılan enine traversli demiryolu da Winkler temeline oturan bir kiriş olarak modellenebilir.

Son 20 yıl içerisinde, dinamik yüklerin yol ve taşıtlarda önemli hasarlara yol açtığının farkına varılmasıyla demiryolundaki pratik problemleri anlamak ve çözmek

için matematik model uygulamalarına çok daha fazla ilgi olmuştur, (Knothe ve Grassie, 1993).

Taşıt ile yol arasındaki dinamik davranışın modellenmesinde, 5 alt sistemin dikkate alınması uygun olmaktadır;

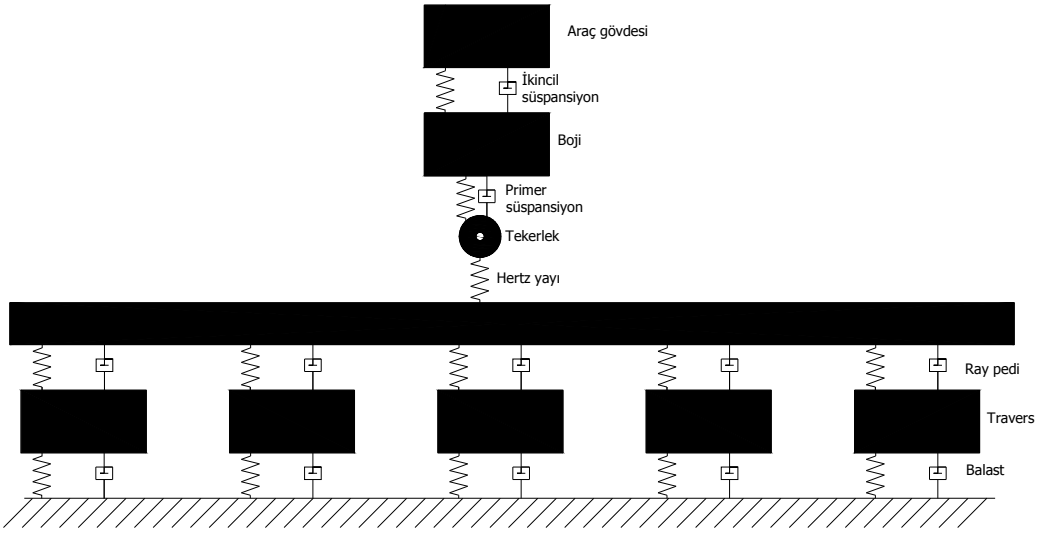
- Vagon gövdesi, boji ve tekerlek takımını kapsayan taşıt,
- Ray-tekerlek teması ve tahrik kuvvetinin gösterilmesi,
- Ray,
- Bağlantı elemanlarını ve ray elastik mesnedini kapsayan bağlantı sistemi,
- Travers,
- Balast ve altyapıyı kapsayan travers temeli.

Demiryolu taşıtları ile yol arasındaki ilişki, çok sayıda serbestlik derecesi içeren çok karmaşık bir sistemdir. Dinamik taşıt-yol etkileşimi ile ilgili bir çok modelleme, arazi ölçüm ve laboratuar çalışması yapılmaktadır. Bu çalışmalarda, taşıt-yol sistemi değişkenlik gösteren ve belirsiz bir sistem olduğu için basit kabuller yapılarak basitleştirme yoluna gidilmiştir. Çünkü, ray veya tekerlek profil bozukluklarından dolayı ray-tekerlek temas yüzeyi sürekli değişebilmekte ve ayrıca demiryolu üstyapısında kullanılan elastik malzemeler ve balast ve zemin gibi taneli malzeme elastoplastik davranış göstermektedir. Demiryolu dinamiği konusunda yapılan araştırmaların çoğunda malzemelerin lineer elastik davranış gösterdiği kabulü vardır. Malzeme özellikleri arazi ve laboratuar testleri ile elde edilir. Asıl dinamik hesaplama çok karmaşıktır ve genelde belli bir hesaplama yöntemi yoktur. Gerçek dinamik problemlere ölçümler yaparak pragmatik bir yolla yaklaşılır.

Modeller mümkün olduğu kadar basit ve amacı sağlayacak kadar da güvenilir olmalıdır. Basit olması için çoğunlukla frekans tanımında hızlı çözüm veren lineer modeller kullanılır. Modelin güvenirliliği, ihmal edilen önemli etkiler, yanlış yük veya bozukluk kabulleri veya yanlış sistem parametreleri ile ilgilidir. Bu hatalardan kaçınmak için tanımlama yöntemleri uygulanmalı ve model, deneysel çalışmalarla doğrulanmalıdır.

Genelde bir sistem için tek bir yeterli model yoktur ama çok farklı modeller çok farklı amaçlar için kullanılır. Kompleks dinamik sistemler için ilk adım, tekerlek, elastik tabaka veya travers gibi bileşenler için ayrık modeller kurmaktır. Daha sonra

bu modeller alt sistemleri tanımlamak için birleştirilir. Sonunda alt sistemler de birleştirilerek tüm taşıt-yol sistemi modellenir.



Şekil 3.1 : Taşıt-yol modeli.

Taşıt-yol sistemi kütlelerden ve yaylardan oluşan bir sistem olarak modellenmektedir, (Şekil 3.1). Ray, travers, tekerlek ve boji elemanları rijit kütle olarak, ray altı elastik tabaka, balast, zemin, ve taşıtın primer (birincil) ve ikincil süspansiyonları sönümleme özelliği olan yay olarak modellenmektedir. Tekerlek takımı-boji arasındaki süspansiyon sistemi tekerlek-ray etkileşiminden kaynaklanan titreşimleri azaltan ilk damper sistemidir. Daha düşük frekanslı titreşimleri taşıt gövdesi ile boji arasındaki ikincil süspansiyonlar sönümler.

Demiryolu üstyapısının modellenmesinde genelde 20-1500 Hz frekans aralığı titreşim analizleri için kullanılmaktadır. Tekerlek ve rayın yuvarlanma yüzeyi 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. Gürültü etkisini de incelemek için 5000 Hz frekans düzeyinene kadar ölçülmektedir.

Yol problemlerinin davranışının modellenmesi 100 yılı aşkın bir süredir yapılmaktadır. Buna karşın, yolların özellikle yüksek frekanslardaki davranışı, taşıtınkine nazaran daha az anlaşılmıştır. Bu konudaki bilgisizlik, yol dinamiği ve taşıt-yol etkileşimi problemlerinden daha çok, basit geleneksel taşıt dinamiği

problemlerine önem verilmesine neden olmaktadır. Bununla beraber, balast gibi yol elemanlarının dinamik davranışları genellikle günümüzde ihmal edilmektedir.

Bu bölümde, literatürde geçen demiryolu dinamik modelleri incelenecektir. Öncelikle 3.1 nolu bölümde demiryolu taşıtları için dinamik modeller, 3.2 nolu bölümde üstyapı elemanlarının dinamik modelleri, 3.3 nolu bölümde ise tüm üstyapı sistemi için dinamik modeller ve son bölümde ise ray-tekerlek etkileşim modelleri incelenecektir.

3.1 Taşıt Modelleri

Demiryolu taşıtlarının titreşim analizleri için ise 0-20 Hz arasındaki frekans aralığı dikkate alınmaktadır. Çünkü taşıtların serbest titreşim modları bu frekans aralığındadır. 20 Hz'e kadar demiryolu hattının rijit bir yay gibi davrandığı kabul edilir. Bununla beraber, 20 Hz'in üzerindeki frekanslarda, taşıt süspansiyonu taşıtın yaylandırılmamış kütleleri dışında kalan diğer elemanlarını izole etmektedir. Ama yaylandırılmamış kütleleri tam olarak izole edemediğinden, yolun ataletinin önemi artmaya başlar. Taşıtın yaylandırılmamış kütlesi, yüksek frekanslarda tekerlek takımı ile yol arasındaki düşey dinamik yükleri etkileyen tek bileşendir. Taşıt için yaylandırılmamış kütle; tekerlek takımı, yataklar, dingil aksına asılı motor ve aktarma sistemi olarak tanımlanır. Yaylandırılmamış kütle, düşey yöndeki tahrik için gerçekten rijit bir gövde gibi tanımlanmaktadır. Çoğu demiryolu kuruluşu bu davranışı bir avantaj olarak kullanmaktadır. Öyle ki bu avantaj, rutin olarak aksa bağlı ivme ölçer kullanarak kısa dalga boylu düzensizliklerin izlenmesine kolaylık sağlamaktadır, (Knothe ve Grassie, 1993).

Taşıt süspansiyonları, genellikle taşıt bojisinin rijit kütle modlarının sağlanması ve modların yaklaşık 10 Hz frekansın altında olması için tasarlanır. Yolcu konforu, taşıtın stabilitesi gibi taşıtın dinamik davranışı, sadece birkaç frekans değerinde önem kazanmaktadır. Taşıt süspansiyonları, taşıtta oluşacak titreşimi izole ederek yolcuların konforunu sağlar ve özellikle yaylandırılmamış kütlelerin etkisini azaltarak ray-tekerlek temas yüzeyindeki dinamik yükleri azaltır.

Taşıt, en basit olarak tek akslı olarak veya süspansiyonları da ilave ederek bojili olarak modellenebilir. Taşıtın dinamik davranışının modellenmesinde bazı bilgisayar

programları (MEDYNA, VAMPİRE, NUCARS ve VOCO gibi) yararlı bir şekilde kullanılmaktadır.

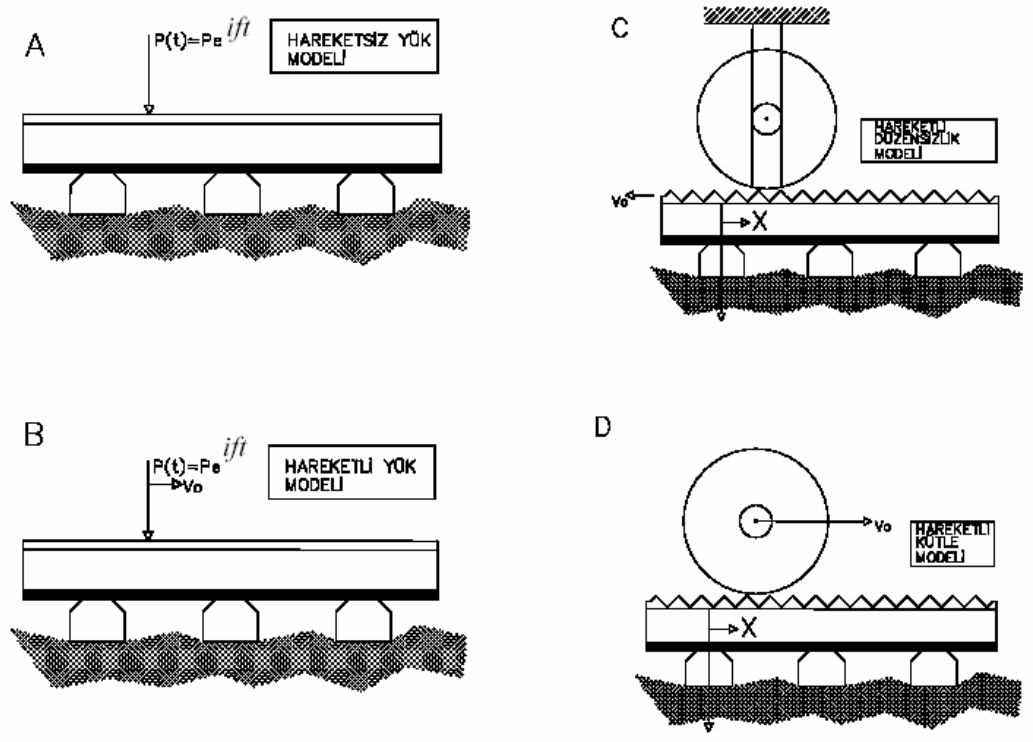
Grassie (1996) değişik matematiksel modellemelere göre, taşıt modelinin hesap sonuçları açısından çok önemli olmadığını söylemiştir. Ancak, Kisilowski (1991) yüksek hassasiyet için taşıt modelinin tercih edilmesi gerektiğini ileri sürmüştür. Kisilowski'nin hesaplamasına göre, temas kuvveti için, tek akslı taşıt modeli çift akslı boji modeline göre %13, boji modeli ise iki bojili taşıt modeline göre %9 daha düşük sonuç vermektedir. Balast ivmesi içinde benzer şekilde sonuçlar sırasıyla %35,7 ve %19 daha düşük çıkmaktadır. Ama, taşıt çok yaygın olarak en basit şekliyle, tek bir yaylandırılmayan kütle veya tek bir noktasal yük olarak modellenir.

Taşıt tahrik yükü genelde dört şekilde modellenmektedir:

- Hareketsiz yük modeli,
- Hareketli yük modeli,
- Hareketli düzensizlik (pürüzlülük) modeli,
- Hareketli kütle modeli

Knothe ve Grassie (1993) tarafından geliştirilen dört farklı taşıt yük modeli Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Sabit bir noktaya uygulanan periyodik (örneğin vibratör) veya kısa süreli bir kuvvet ile (örneğin darbe çekici) uyarılan yollardaki tahrik kuvvetlerinin hesaplanmış ve ölçülmüş değerlerinin karşılaştırılması için en uygun model Şekil 3.2 (a)'da gösterilmektedir.

Şekil 3.2 (c)'deki hareketli düzensizlik modeli fiziksel olarak şöyle tanımlanabilir. Tekerlek takımı ray üzerinde sabit bir pozisyonda kalırken, ray mantarı ve tekerlek bandajındaki düzensizlikleri içeren bir şerit, ray ve tekerlek arasından sabit bir hızla çekilir. Bu tip modeller, yolun sürekli mesnetli olarak düşünüldüğü modellerde, yol üzerinde hareket eden tekerlek takımının dinamik davranışının araştırılmasında kullanılır. Bununla bağlantılı olarak da, bu modelin çözümü frekansa bağlı hesaplamalarla kolayca yapılabilir. Ayrıca bu model tipi, ray-tekerlek etkileşim problemlerinde en çok kullanılan model tipidir.



Şekil 3.2 : Taşıt yük modelleri.

Ray-tekerlek teması sırasında oluşan düşey uyarımın gösterildiği en gerçekçi model, tekerleğin yol üzerindeki düzensizliklerde yuvarlandığı modellerdir. Bu durumun bir örneği Şekil 3.2 (d)'de gösterilmektedir. Ancak bu tip modellerin kullanılması çok zor olup, daha basit tipteki modellerin kullanımı, belirli durumlarda daha iyi olmaktadır.

Şekil 3.2 (b)'deki hareketli yük uyarımı ilk defa 1933 yılında sürekli mesnetlenmiş Euler-Bernoulli (E-B) kiriş modelinde Hovey tarafından kullanılmıştır ve daha sonra Dörr (1944)'ün makalelerinde ve birçok teorik araştırmada kullanılmıştır. Frybra (1972) hareketli yük problemiyle ilgili kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Bu makalelerde, hareketli yük altındaki bir kirişin dinamik stabilite probleminde, hareketli yük hızının kirişteki dalga yayılma hızına eşit olduğu durumdaki bir 'kritik hız' durumu araştırılmıştır. Aslında demiryolu için bu problem akademik ilgi alanlarından sadece biridir, çünkü kritik hız bugünkü trenlerin hızlarından çok daha yüksektir.

Ray ve dolgu sistemi zeminle dinamik etkileşiminde bir kiriş olarak hareket eder. Bu kabule dayanarak homojen yarı uzay üstündeki kirişlerin ray kritik hızı ve zemin kritik hızı (yüzey dalga hızı) şeklinde tanımlanan iki kritik hız vardır.

Ray kritik hızı, ray, travers, balast ve dolgu tabakasından oluşan kirişin eğilme rijitliği ve kütlesi tarafından belirlenir ve kritik hız (V_k) formülü şöyledir:

$$V_k^{\,2} = \frac{2}{m}\sqrt{kEI} \qquad \textbf{(3.1)}$$

(3.1) bağıntısında k yolun rijitlik katsayısı, m kirişin birim uzunluk kütlesi ve EI kirişin eğilme rijitliğidir. Hesaplamalarda tüm yol çerçevesinin eğilme rijitliği bilinmediği için sadece rayın eğilme rijitliği kullanılır. Kritik hızı artırmak için altyapıda eğilme rijitliğini artıracak ama kütlesi düşük olan yeterli durabiliteye sahip hafif dolgu malzemeleri kullanılmalıdır.

Çok yüksek hızlı demiryolunda, özellikle zayıf zeminin bulunduğu kesimlerde dinamik yüklerin ve buna bağlı olarak deformasyonların çok hızlı arttığı görülmektedir. Çünkü iyi kalitedeki yollarda kritik hız işletme hızının çok üstünde kalırken, zayıf zeminli yollarda kritik hız düşük olabilir. Bu durumlarda taşıt hızı yüzey dalgalarının yayılma hızına yaklaştıkça oturmalar da artmaktadır. İzotropik ve homojen yarı-mekan için yüzey dalga hız formülü şöyledir:

$$v_R = (0{,}9 + 0{,}1\nu)\sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \qquad \textbf{(3.2)}$$

(3.2) bağıntısında E (N/m^2) rayın elastisite modülü, ρ (kg/m^3) rayın yoğunluğu ve ν zeminin poisson oranıdır.

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

3.2 Üstyapı Eleman Modelleri

3.2.1 Ray modelleri

Ray ya klasik kiriş teorisi olan Euler-Bernoulli (E-B) kiriş teorisi ile ya da Rayleigh-Timoshenko (R-T) kiriş teorisi ile modellenebilir. E-B teorisinde sadece rayın

eğilmesi dikkate alınmaktadır ve rayın ötelenmesinde kütle ataleti katılmaktadır. Dönme ataleti ilk defa Rayleigh (1894), kayma şekil değiştirmesi Timoshenko ve Young (1955) tarafından göz önüne alındığından, her iki tesirin ihmal edilmemesi halinde Rayleigh-Timoshenko kirişi veya sadece Timoshenko kirişinden bahsedilir. Bu modelde ayrıca boyuna (eksenel) kuvvet de dahil edilmektedir.

Knothe ve Grassie (1993) 500 Hz'in altındaki frekanslarda kesme deformasyonunun ihmal edilebileceğini ifade etmişlerdir. Dahlberg (1995) araştırmasında UIC 60 rayı için E-B teorisi ile hesaplanan öz frekansın 500 Hz'de ölçümden %15 ve 1000 Hz'de %30 daha fazla çıktığını göstermiştir. İsveç BV 50 ray profili için aynı frekanslarda sırasıyla %12 ve %30 daha fazla çıkmıştır. Rayın modellenmesinde 500 Hz frekanslara kadar E-B kiriş teorisi yeterli olurken, daha yüksek frekanslarda R-T kiriş teorisi kullanılmalıdır.

Dahlberg (1955) farklı kesme faktörleri için kirişlerin öz frekanslarını her iki teori ile hesaplamıştır. Araştırmaya göre, ölçüm sonuçları ile teori sonuçlarının tutarlı olması için farklı frekans aralıklarında ve farklı raylar için farklı kesme faktörlerini seçmek gereklidir. Mesela, UIC 60 rayı ve 1500 Hz'in altındaki frekanslar için kesme faktörü k=0,4 uygunken, 1500-3000 Hz frekans aralığı için k=0,38 uygundur. BV 50 rayı için daha büyük frekans aralığında k=0,35 iyi sonuçlar vermektedir

3.2.2 Elastik tabaka modelleri

Genelde ray ve travers arasına ray elastik tabakaları yerleştirilir. Ray elastik tabakaları rayların elektriksel direncini sağlar ve traversleri aşınmaya karşı korur. Ray elastik tabakanın yol dinamiği açısından önemli bir rolü vardır. Yumuşak ray elastik tabakası, yük altında rayın daha fazla deplasmanına izin verir ve taşıttan gelen aks yükünü daha fazla azaltır. Ayrıca, yumuşak ray elastik tabakası yüksek frekanslı titreşimleri sönümler. Buna karşılık rijit ray elastik tabakası aks yükünün traverse ve balasta daha fazla iletilmesine neden olur.

Genellikle ray elastik mesnedi, kauçuktan, plastikten ya da kauçuk kaplı mantar gibi kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Ray bağlantı sisteminin yük-yer değiştirme davranışı doğrusal değildir. Fakat, yükleme esnasında tekerlekler traversin yakınında iken, yük-yer değiştirme davranışının doğrusal şekilde olabileceği savunulmaktadır.

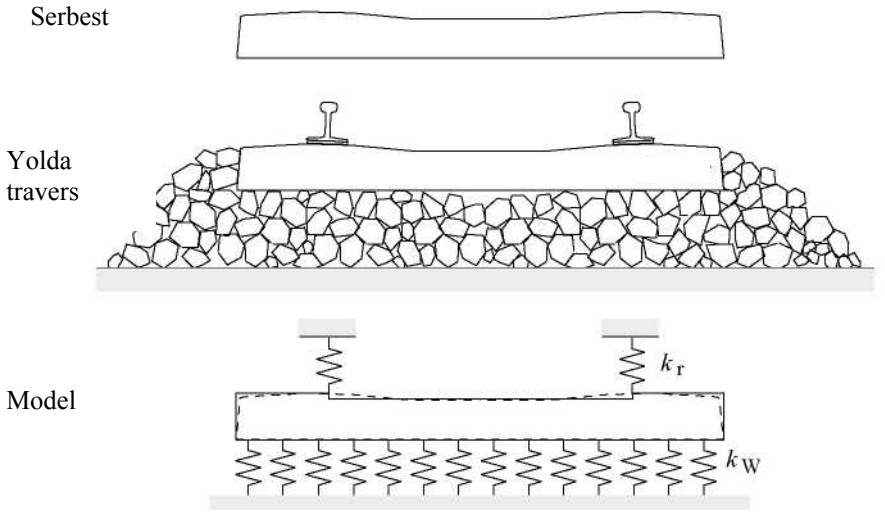
Düşey titreşim için, elastik mesnetler genellikle birbirine paralel bir yay ve bir viskoz sönümleyici olarak modellenmektedirler. Gerçekte üç boyutlu olan yol ve ray modelleri için, elastik mesnetlerin ray tabanı ortasına visko-elastik tabakalar şeklinde dağıtılması uygundur. İki boyutlu modellerde ise, elastik mesnetler ray tabanındaki bir noktada gösterilmek suretiyle tanımlanabilmektedir. Viskoz sönümlemeli bir model için, uygulamadaki en büyük zorluk, uygun değerlerin bulunamamasıdır. Bu konuda laboratuar ortamında çeşitli deneyler yapılabilmesine karşın, gerekli parametreleri elde etmenin en iyi yolu, ilgilenilen ray elastik mesnedini içeren yollar üzerinde, taşıtın hareketi sırasında ölçümler yapmaktır. Bunun yanında, elektromanyetik uyarıcılarla ya da darbe çekiçleri ile yol üzerinde yapılan deney ölçümlerinden elde edilen verileri kullanarak, gerekli parametreleri elde etme yöntemi bilimsel çevreler tarafından kabul edilmektedir.

Grassie ve diğ. (1982) ölçümlerle birlikte farklı yol modellerini karşılaştırmıştır ve doğru bir yol modeli elde etmek için ray elastik tabakalarını dahil etmenin önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca Grassie ve Cox (1984) travers deformasyonlarının hesabında ray elastik tabakalarının önemli olduğunu göstermiştir. Ray-tekerlek temas kuvvetinin hesabında ve yol dinamiğinde yumuşak ve rijit ray elastik tabakalarının etkisi bir demiryolu taşıtına monte edilen ivme ölçerlerle ölçülmüştür ve Fermer ve Nielsen (1993) tarafından raporlanmıştır. Bu ölçümlerde aplatili ve aplatisiz tekerlek takımlarına, raya ve traverslere ölçüm aletleri monte edilmiş ve ivme değerleri ölçülmüştür. Yumuşak elastik tabakaların rijit elastik tabakalara göre travers ivmelerini düşürdüğü, ama ray mantarı ivmelerini artırdığı bulunmuştur. ICE hatlarında sert Zw687a ray elastik tabaka (rijitlik katsayısı $k=500x10^6$ N/m) yerine daha yumuşak Zw900 (rijitlik katsayısı $k=60\text{-}70x10^6$ N/m) ray elastik tabakası kullanılarak travers titreşimleri %50, açık hatta yol titreşimleri %30 ve köprüde yol titreşimleri %20-50 azaltılmıştır, (Müller ve Frank, 1994).

3.2.3 Travers modelleri

Beton traverslerin dinamik modellemesi çoğunlukla serbest sınır koşulları ile yapılmaktadır. Yani traversin çok yumuşak yaylar üstüne oturduğu kabul edilmektedir. Yaylar traversin titreşimini etkilememektedir ve bundan dolayı traversin tamamen serbest olduğu kabul edilmektedir. Serbest prekast beton traverslerde yapılan ölçümler traversin öz frekanslarını verir. Daha sonra traversler E-B ve R-T kirişleri modellenerek hesaplanan öz frekanslar, ölçüm sonuçları ile

karşılaştırılmıştır. Bu araştırma ilk defa Dahlberg ve Nielsen (1991) tarafından yapılmıştır.



Şekil 3.3 : Serbest travers, yoldaki travers ve travers modeli.

Şekil 3.3 serbest traversi, yoldaki traversi ve travers modelini göstermektedir. Elastik balast yatağı üstünde duran travers raylara bağlanır. Travers modelinde elastik yatak, travers boyunca yayılı olan ve rijitlik katsayısı kw (N/m/travers boyu) olan yaylarla, traversin raya ve diğer yol kısımlarına bağlantısı farklı yaylarla (kr) modellenir.

Grassie (1995), traverslerin serbest titreşim öz frekanslarını ölçmüş ve sonuçları E-B ve R-T kiriş modelleri ile karşılaştırmıştır. Buna göre, ilgili frekans aralığına bağlı olarak, beton traversler ya bir rijit kütle olarak (<100 Hz frekanslarda) veya esnek kiriş olarak modellenir. 300-400 Hz'e kadar olan frekanslarda E-B kiriş teorisi yeterli olmakta, daha yüksek frekanslarda daha hassas sonuçlar için R-T kiriş teorisi kullanılmaktadır.

3.2.4 Balast ve zemin modelleri

Günümüzde balast ve zeminle ilgili yol tasarımı çoğunlukla ampiriktir ve balastın performansını etkileyen faktörler tam anlaşılamamıştır. Belli bir yol kısmında bakım ihtiyacının nedenini anlamak için balast ve zemin karakteristiklerini, bakım, çevre ve trafik geçmişini bilmek gereklidir. Genelde sadece son üç bilgi kayıtlardan elde edilmektedir. Mevcut bir hattın balast ve zemin karakteristiği çoğunlukla bilinmez, bilgi edinmek için sahada etütlerin yapılması gereklidir.

Zemin tabakası tam elastik veya visko-elastik olarak iki şekilde modellenmektedir. Yarı-mekanda (half-space) dinamik yükler altındaki zeminin davranışı, elastik ve

plastik davranış arasındaki bir davranış olarak, yani visko-elastik davranış şeklinde düşünülür. Tam elastik zemin modeli, en çok kullanılan ve bilinen kabul ve hesap yöntemidir.

Balastlı yol için iki model kullanılmaktadır;

- Winkler temel modeli,
- Pasternak temel modeli.

Bir çok modellemede Winkler temeli kullanılırken, bazı modellemelerde kesme etkilerini de hesaba katan Pasternak temeli kullanılmaktadır.

3.2.4.1 Winkler temel modeli

Klasik balastlı yol çerçevesinin yatağını oluşturan balast ve zemin tabakası ile ilgili 1867 yılında formüle edilmiş olan Winkler temeli kabulü kullanılır. Winkler temelinde birbirine çok yakın bağımsız lineer yaylardan oluşan bir yatak kabulü vardır.

Terzaghi'ye göre maksimum taşıma gerilmesinin yarısının altındaki gerilmelerde yer değiştirme ile gerilme arasında lineer bir ilişki vardır:

$$\sigma = Cy \qquad \textbf{(3.3)}$$

(3.3) bağıntısında C (N/m^3), yatak modülünü ve y, ray deplasmanını ifade eder.
Ray, travers veya selet gibi ayrık mesnetler üzerine oturmaktadır. Mesnet noktalarında düşey kuvvet F ile deplasman arasındaki ilişki şöyledir:

$$F=CA_ty=k_dy \qquad \textbf{(3.4)}$$

(3.4) bağıntısında A_t, travers oturma alanını ve k_d, yolun rijitlik katsayısını ifade eder. Demiryolunda rijitlik katsayısı kolaylıkla şu formülle bulunur:

$$k_d = Q/\Sigma y \qquad \textbf{(3.5)}$$

(3.5) bağıntısında Q, düşey tekerlek yükünü ve Σy tekerlek yükü çevresindeki önemli miktardaki deplasmanların toplamını ifade eder.

Ayrık mesnetli bir demiryolu hattı için nümerik yöntemler kullanarak analiz yapılabilir. Ama statik hesaplama ve basit konfigürasyonlar için sürekli yatak teorisi ayrık mesnetli durum için de kullanılabilir. Bu durumda rijitlik katsayısı k(N/m/m) şöyle bulunur:

$k = k_d / a$ **(3.4)**

(3.4) bağıntısında a, mesnet eksenleri ara mesafedir. Tek tekerlek yükü için ayrık mesnetli üstyapının rijitlik katsayısı şu formülle yaklaşık olarak bulunur:

$$k_d \approx \frac{a}{4}\sqrt[3]{\frac{Q^4}{EIy_{mak}^4}} \quad \textbf{(3.5)}$$

(3.5) bağıntısında y_{mak}, tekerlek yükü altındaki ray deplasmanıdır. Rijitlik katsayısı basit bir testle maksimum ray deplasmanı ölçülerek (3.5) formülü ile hesaplanabilir, (Esveld, 1980).

Sonsuz uzunluktaki bir ray, yatak katsayısı k olan elastik Winkler temeli üstünde oturduğu kabulü ilk defa Zimmermann tarafından 1888 yılında geliştirilmiştir.

Yayılı yüksüz sürekli yataklı kiriş modelin diferansiyel denklemi şöyledir;

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad \textbf{(3.6)}$$

(3.6) denkleminden kirişin yer değiştirme denklemi ve eğilme momenti denklemi elde edilmiş ve sırasıyla (3.7) ve (3.8) bağıntıları ile verilmiştir;

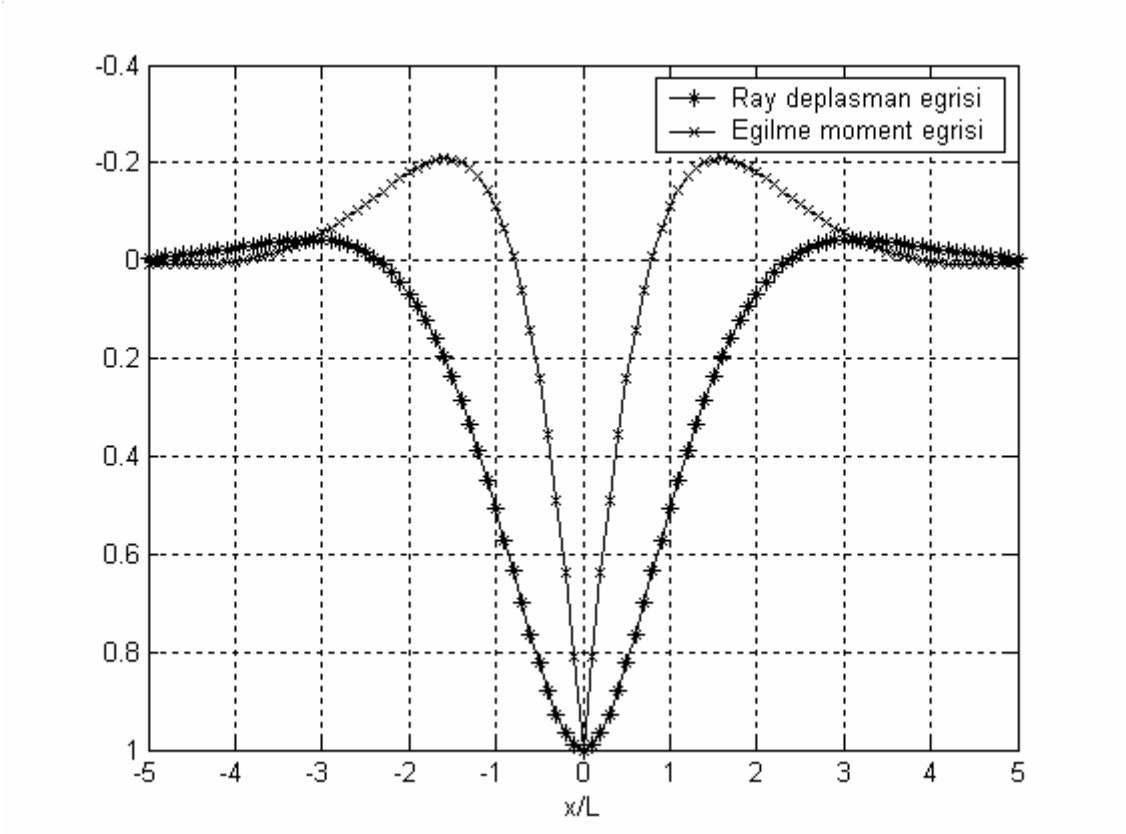
$$y(x) = \frac{Q}{2kL} e^{-x/L} (\cos x/L + \sin x/L) \quad x \geq 0 \quad \textbf{(3.7)}$$

$$M(x) = \frac{QL}{4} e^{-x/L} (\cos x/L - \sin x/L) \quad x \geq 0) \quad \textbf{(3.8)}$$

(3.7) ve (3.8) bağıntılarında L, kirişin elastik boyudur ve formül (3.9) ile hesaplanır,

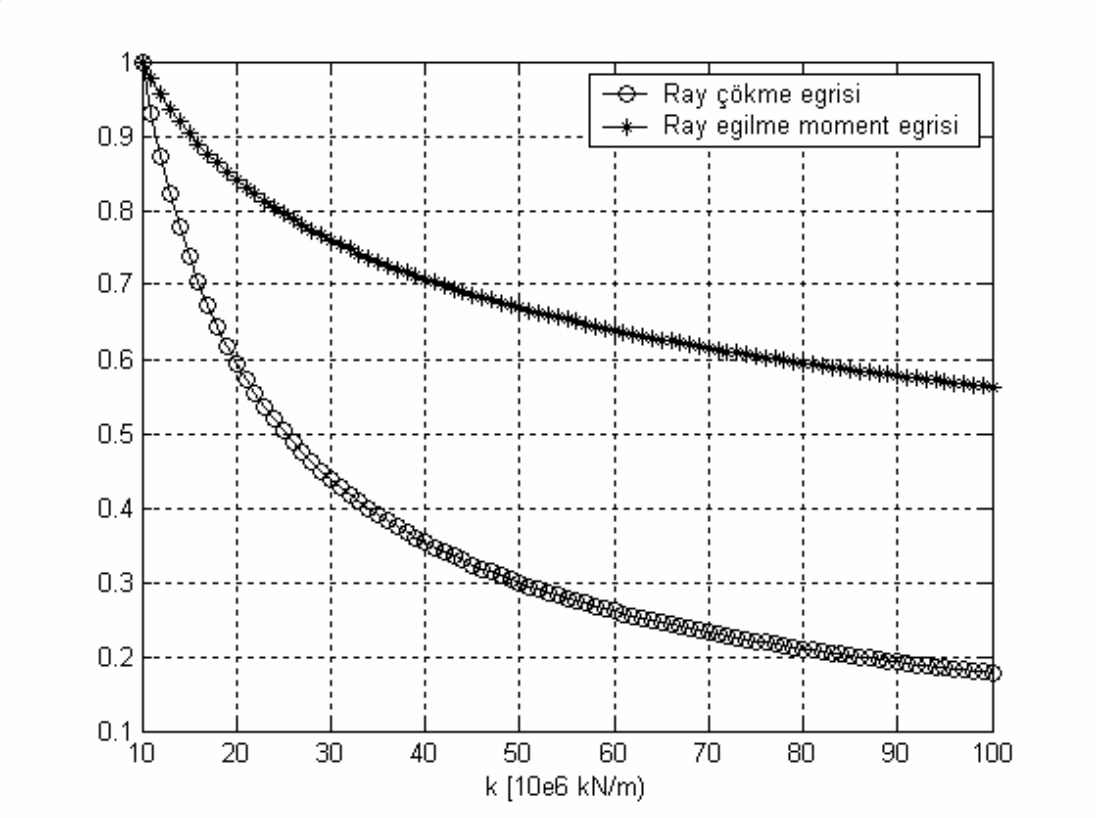
$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad \textbf{(3.9)}$$

Kirişin yer değiştirme ve eğilme moment değişimi sırasıyla (3.7) ve (3.8) formülleri ile hesaplanmış ve Şekil 3.4 elde edilmiştir.



Şekil 3.4 : Zimmermann kirişinin deplasman ve eğilme moment grafiği.

Yol rijitlik katsayısına bağlı olarak ray çökme ve ray eğilme moment değişimi Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Ray çökme değeri y, yol rijitlik katsayısı k'nın 3/4 üssü ile ters orantılı olarak değişirken, ray eğilme moment değeri M, yol rijitlik katsayısının 1/4 üssü ile ters orantılı olarak değişmektedir. Yol rijitlik katsayısının arttırılması eğilme momentine göre ray çökmesini 3 kat daha fazla azaltmaktadır.



Şekil 3.5 : Yol rijitlik katsayısı-ray çökme ve eğilme momenti.

3.2.4.2 Pasternak temel modeli

Elastik temeldeki kirişin yer değiştirmesini daha hassas açıklamak için yaylar arasında değişik etkileşimler düşünülür. Pasternak, yaylar arasında kesme ilişkisini kabul eder. Yaylar, kirişe bağlı ezilmeyen ama sadece kesme deformasyonu gösteren düşey elemanlar kabul edilir.

Kesme modülünün hesaba katıldığı sürekli yataklı kirişin diferansiyel denklemi şöyledir

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} - GA\frac{d^2y}{dx^2} + ky = 0 \qquad \textbf{(3.10)}$$

(3.10) denkleminden Pasternak temel üstündeki kirişin yer değiştirme denklemi ve eğilme momenti denklemi elde edilmiş ve sırasıyla (3.11) ve (3.12) bağıntıları ile verilmiştir;

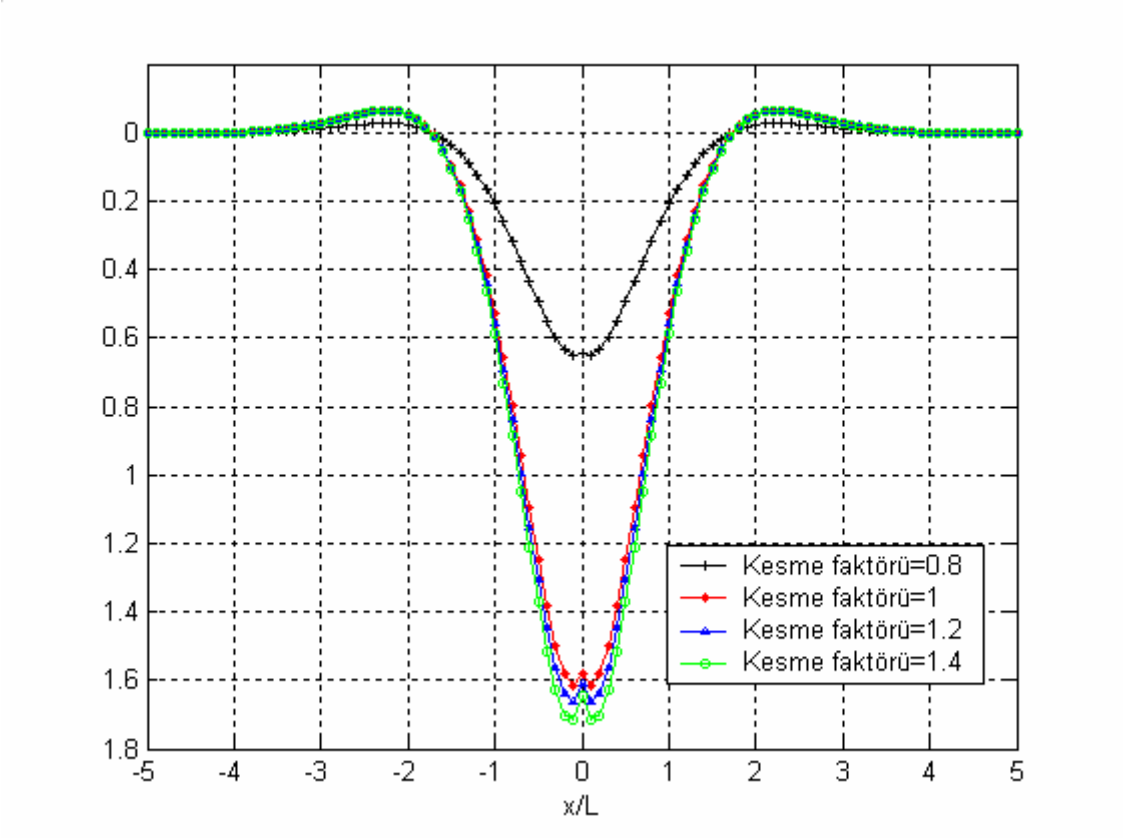
$$y(x) = \frac{Q}{8EIab\beta^2} e^{-bx}(a\cos ax + b\sin ax)\; x \geq 0 \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$M(x) = \frac{Q}{4ab} e^{-bx}(a\cos ax - b\sin ax)\; x \geq 0 \qquad \textbf{(3.12)}$$

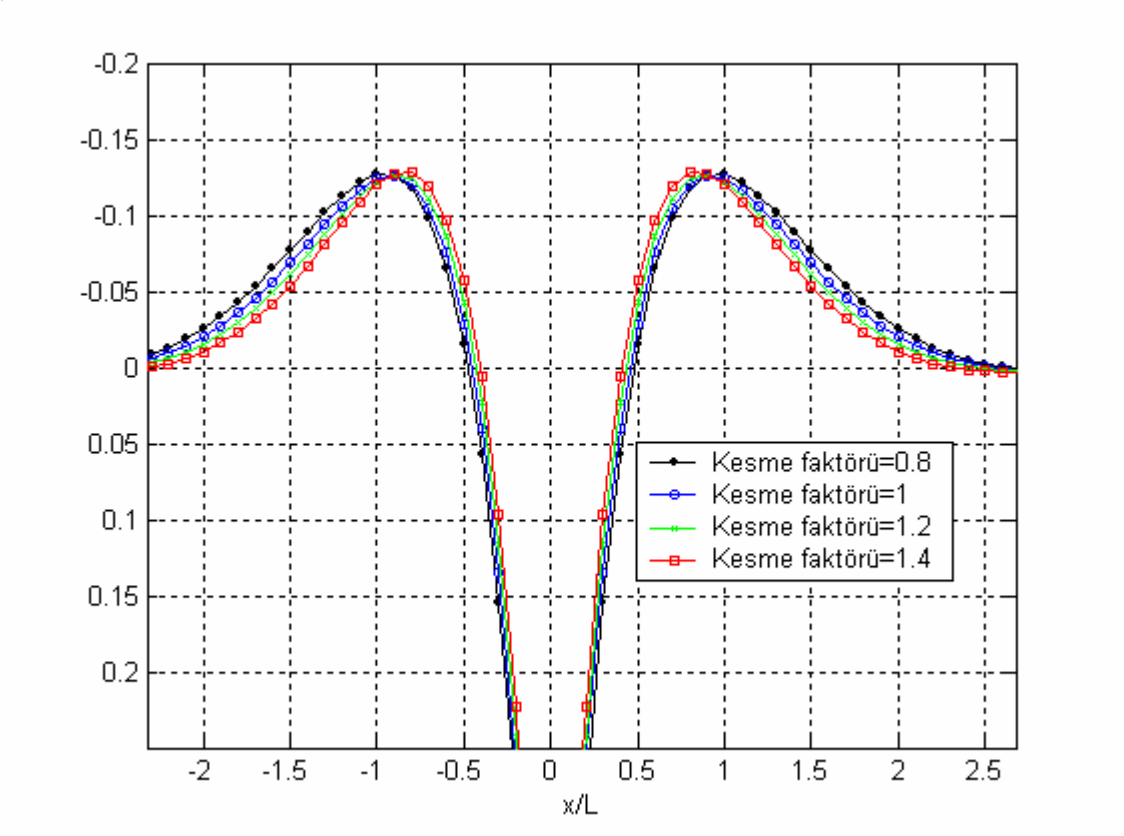
(3.11) ve (3.12) bağıntılarında geçen a, b parametrelerinin ve kesme faktörünün (γ) hesabı bağıntı (3.13)'te verilmektedir;

$$a = \sqrt{\frac{4 - \gamma L^2}{2L^2}} \quad b = \sqrt{\frac{4 + \gamma L^2}{2L^2}} \quad \gamma = \frac{GA}{EI} \tag{3.13}$$

Değişik kesme faktörleri için, kirişin yer değiştirme ve eğilme moment değişimi sırasıyla (3.11) ve (3.12) formülleri ile hesaplanmış ve Şekil 3.6'da ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Pasternak kirişin yer değiştirmesi.



Şekil 3.7 : Pasternak kirişin eğilme momenti.

3.3 Demiryolu Modeli

Bu kısımda raylar, traversler, balast ve zemin tabakalarından oluşan demiryolu sistemi için dinamik modeller incelenmiştir. Genelde demiryolu üstyapısı, ayrı yaylardan oluşan elastik temel üstündeki sonsuz bir kiriş olarak iki boyutlu olarak modellenir. Tekerlek yükü, noktasal hareket eden bir kuvvet olarak modellenir. Bu model lineer elastiktir ve komşu tekerlek yüklerin etkisi süperpozisyon yöntemi ile hesaplanır.

Rayların balast ve zemin üzerine mesnetlenmesi temel olarak iki şekilde olup, bunlar ayrık ve sürekli mesnetlemedir. Sürekli mesnetli yol modelini ilk defa Timoshenko 1926 yılında kullanmıştır. Daha sonra, Heteny (1946), Sato (1977), Grassie (1980), Tassily (1988) gibi bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Ayrık mesnetli yol modeli Inglis (1938), Grassie ve diğ. (1982), Nielsen (1990), Ripke (1991) tarafından kullanılmıştır, (Knothe ve Grassie, 1993).

Sürekli mesnetleme, ayrık mesnetlerin yol boyunca döndürülüp uç uca eklenmesi ile elde edilmektedir. Böylece, modelde mesnetler kesintisiz bir tabaka halinde ve sürekli bir boyuna kiriş şeklinde temsil edilmektedir. Bu sanal boyuna kiriş, rijit bir

yapıymış gibi veya rijitliği ve kütlesi uniform dağıtılmış bir kiriş gibi modellenebilir. Sürekli mesnetli modeller 500 Hz'den düşük frekans aralığında uygun sonuçlar verirken, daha geniş frekans aralığında ayrık mesnetli modeller gerçeğe daha uygun sonuç vermektedir, (Knothe ve Grassie, 1993).

Yol üstyapısı ile ilgili genelde kabul gören yaklaşım, balast ve zeminden oluşan elastik yatak üstüne oturan sonsuz kiriş modelidir. Ray ve traverslerden oluşan çerçeve, balast yatağı üstüne oturmaktadır. Bu model Winkler tarafından 1867 yılında tanıtılmış ve halen kolay ve hızlı yol deplasmanlarının hesabında kullanılmaktadır. Balast ve zemin genelde sürekli yaylardan oluşan elastik Winkler temeli olarak modellenmektedir.

Yol modeline mesnet frekansını dahil etmek için ray ayrık noktalara mesnetlenmelidir. Sürekli yatak yerine ayrık mesnet modeli ilk defa 1915 yılında Timoshenko tarafından geliştirilmiştir. Çoğunlukla kullanılan yöntem rayı paralel yay ve sönüm elemanları üstüne yerleştirmektir. Bu yay-sönüm elemanı ray elastik tabakasını modellemektedir. Traversler başka bir yay-sönüm elemanı sistemi olan elastik temel üstüne oturmaktadır. Bu yol modeli kullanılarak yol çerçevesinin balast üstünde titreşim frekansı, ray ve traverslerin ray elastik tabakası ile titreşim frekansı ve mesnet frekansı elde edilebilir.

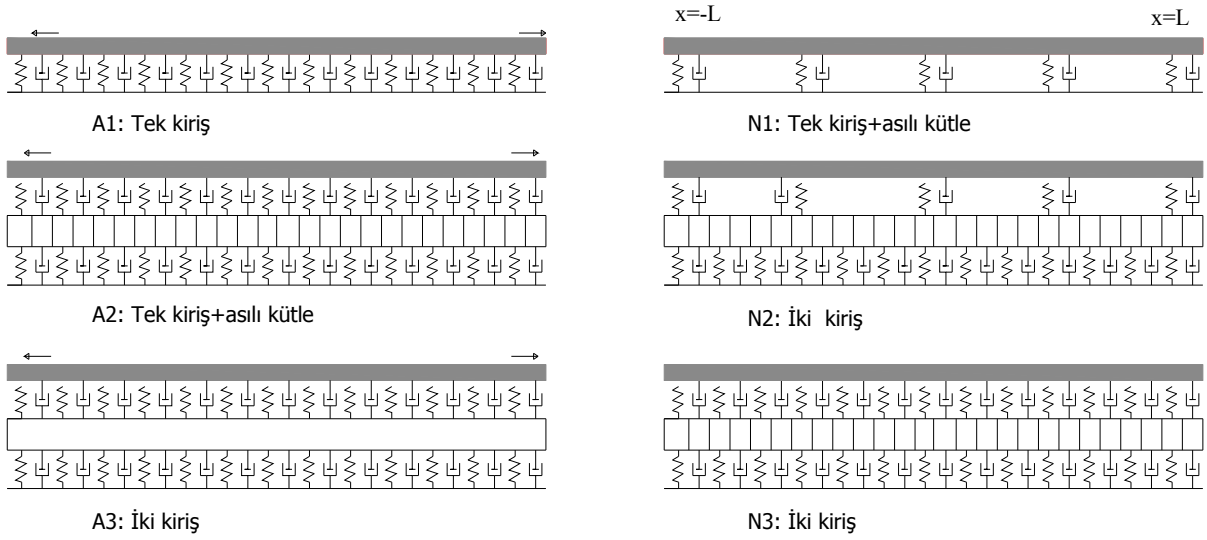
Bazen rijit kütleler elastik temel üstüne bir kiriş olarak yerleştirilir. Kiriş raya dik olarak uzatılarak üç boyutlu bir yol modeli elde edilir. Bu modele düşük frekanslı (20-40 Hz) rezonans frekansı eklemek için Oscarsson (2001) modele balast ve zemin kütlesini ilave etmiştir. Balast ve zemin kütleleri zemin rijitliği üstünde titreşir. Zhai ve Cai (1997) balast yoğunluğunun tekerlek-ray temas kuvvetine ve balast ivmesine olan etkisini araştırmak için benzer bir model kullanmıştır. Bu modelin avantajı hesaplanan ve ölçülen değerler arasında daha iyi korelasyonun olmasıdır.

Demiryolunu modellemek için analitik ve nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Analitik modeller sürekli mesnetli yol kabulüne dayanmaktadır ama gerekli durumda yol bileşenlerinin mekanik özelliklerini ayrık mesnetlere dağıtmak suretiyle ayrık mesnetli yol modellemek mümkündür. Zimmermann, Euler, Bernoulli ve Timoshenko elastik yatak üstünde sonsuz kiriş için analitik çözümler bulmuşlardır.

Analitik modeller sürekli mesnetli şartların, sınırlı sayıda yük pozisyonlarının ve bağlantının olduğu sonsuzluk ve simetrik eksen için şartların açık tanımlı olduğu

homojen durumlar için tercih edilmektedir. Analitik model çözümlerinin uygun olmadığı durumlarda hem ayrık hem de sürekli mesnetli yol için sonlu elemanlar modelleri ile nümerik çözüm bulmak mümkündür.

Demiryolu üstyapısı için analitik (A1, A2, A3) ve nümerik modeller (N1, N2, N3) Şekil 3.8'de gösterilmiştir, (De Man, 2002). Aslında modeller arasındaki temel farklılık, rayın tamamen sürekli mesnetlenmiş veya ayrık mesnetlenmiş biçimde ifade edilmesidir.



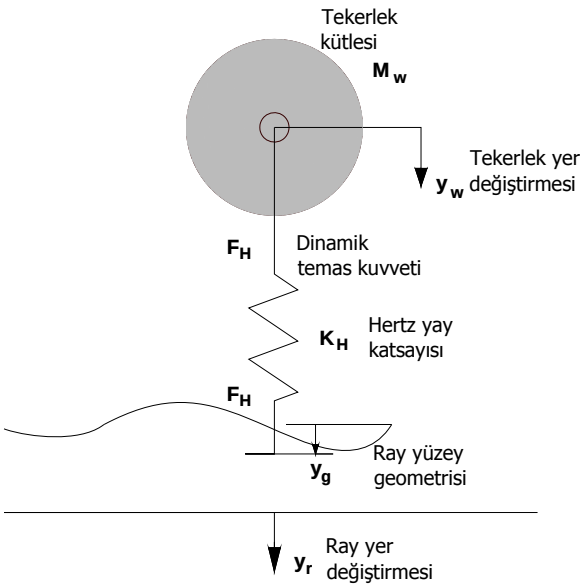
Şekil 3.8 : Demiryolu üstyapısı analitik ve nümerik modeller.

Düşey doğrultudaki analiz yöntemlerinin çoğu basit tek kirişli ayrık mesnet modelini (N1 modeli) kullanmaktadır. Bu model, özellikle traverse yakın tekerlek yükü için ve yüksek frekanslarda daha uygun sonuçlar vermektedir. Şekil 3.8 A1 modelinde yolun rijitlik ve sönümleme katsayıları, ayrık mesnetli N1 modelinde olduğu gibi deney sonuçlarının ve hesaplanmış değerlerin korelasyonundan elde edilebilir. Bu model tipi genelde 500 Hz'den daha düşük frekans aralığında gerçekçi sonuçlar vermektedir. Sürekli yataklı tek kiriş modeli ahşap traversli yol gibi yumuşak mesnetli bir yolun statik yükü için kabul edilebilir. Fakat kütle içermediği için dinamik analiz yapılamaz. Özellikle, rayın travers üstünde titreşimi ile meydana gelen 800-1000 Hz civarındaki mesnet (pinned-pinned) öz frekansı bu modelde hesaplanamaz. Buna karşın bu modelde tekerleğin ön ve arka kısmında rayın yukarı kalktığı ve ray ile yatak arasında çekme kuvveti olduğu kabul edilmektedir. Gerçekte ise rayın ve traversin ölü yükünden dolayı yol yukarı doğru kalkmamaktadır.

3.4 Ray-Tekerlek Etkileşim Modeli

Ray-tekerlek ilişkisi hakkında ilk çalışmalar Fryba (1972) tarafından yapılmıştır. Bu kitap hareketli yük altında yapıların titreşimini incelemektedir. Daha sonra taşıt-yol dinamiği konusunda Kisilowski ve diğ. (1991), Sato ve diğ. (1988), Diana ve diğ. (1994), Li ve Selig (1995b), Frohling (1997), Zhai ve Cai (1997), Wu ve Thompson (2001) ve Sun ve Dhanasekar (2002) çalışma yapmışlardır.

Taşıt-yol sisteminde tekerlek-ray temasından dolayı bir "yay" elde edilir. Temas yüzeyindeki deformasyon lineer olmayan karakteristikte bir yay gibi davranır, yani "temas yay" rijitliği tekerlek-ray temas kuvveti ile doğru orantılı olarak artar. Temas yayı malzeme özelliklerine, tekerlek-ray yarıçaplarına bağlı olarak değişir. Tekerlek-ray arasındaki yay, taşıt-yol sisteminin yüksek frekanslı davranışını etkiler. Bu yaya elastik kütleler arasındaki teması araştıran Hertz'in isminden dolayı Hertz yayı adı verilir. Şekil 3.9'da ray-tekerlek ilişkisini ifade eden model gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Ray- tekerlek etkileşim modeli.

Ray-tekerlek ilişkisini inceleyen çözüm teknikleri iki gruba ayrılmaktadır;

- frekansa bağlı çözüm teknikleri,
- zamana bağlı çözüm teknikleri

20 yıl öncesine kadar ray-tekerlek dinamik davranışı konusu bütünüyle teorik bir durumdaydı. Yüksek frekanslarda tatminkar ray-tekerlek etkileşim modellerine duyulan ihtiyaç, dinamik yüklerde gürültünün, ondülasyon formasyonunun ve diğer

tip taşıt ve yol hasarlarının artmasına paralel olarak gelişmiştir. Bu konuda frekans tanım alanı çözümlerinin uzun bir geçmişi bulunurken, zaman tanım alanı çözümleri sadece son 20 yıldır yaygınlaşmıştır. Bunun nedeni yeterli deneylerin ve ölçümlerin yapılabilirliğinin son 20 yılda gelişmesidir, (Knothe ve Grassie, 1993).

3.4.1 Frekansa bağlı çözüm teknikleri

Frekans tanım alan çözüm tekniği, zaman tanım alan çözüm tekniğine göre daha kolay olması nedeniyle daha fazla tercih edilmiştir. 1926 yılında Timoshenko frekans tanım çözümünü uygulamış ve daha sonra Heteny (1946), Sato (1977), Grassie (1980), Rücker (1982), Tassily (1988), Thompson (1989), Ripke (1992) bu tekniği kullanmıştır, (Knothe ve Grassie, 1993).

Frekans tanım alanı tekniğinde; sistem hareketsiz noktasal yükler tarafından tahrik edildiği anda, sistem için uygun dinamik tepki davranışını elde etmek gereklidir. Sistem tepkisi bulunduğu takdirde, dinamik büyütme faktörü de bulunmuş demektir. Düşey ve yanal tepki, yerinde ölçülebilir veya bir yol modeli ile hesaplanabilir.

Ray-tekerlek temasındaki pürüzlülüklerden kaynaklanan dinamik ilişkiyi bulmak için tekerlek yükünün durağan olduğu ve ray-tekerlek arasında pürüzlü bir yüzeyin çekildiği kabulü ile yol tepkisi bulunabilir. Eğer ray-tekerlek arasındaki pürüzlülük sinüsoidal formda ise, tepki fonksiyonları kullanılabilir. Ama tekerlek aplatisi gibi sinüsoidal olmayan bir pürüzlülük için Fourier dönüşümü ile frekans tanımlı hale dönüştürülür.

Eğer sürekli yataklı bir ray, harmonik değişen hareketli bir yükle tahrik edilirse, yükü izleyen bir koordinat sisteminde yol tepkisi belirlenebilir. Hareketli koordinat sisteminde yolun tepkisi sürekli hal kabul edilir. Hareketin diferansiyel denklemi hareketli koordinat sisteminde adi diferansiyel denklemlere dönüştürülür ve genelde integral dönüşümleri ile çözüm elde edilir.

Yol ve tekerlek tepkileri ve ray-tekerlek temas rijitliği birleştirilerek uygun transfer fonksiyonu elde edilir. Daha sonra ters Fourier dönüşümleri ile zaman tanımlı tepkileri sağlanır.

Frekans tanımlı teknikte sadece tam lineer sistemler incelenebilir. Yol tepkisi sabit kabul edildiği için ray contası, asılı travers (balast teması olmayan) gibi tekil olaylar bu yöntemde incelenemez.

Frekans tanımlı teknikte belli bir taşıt-yol etkileşim çözümü elde edildiği zaman, farklı taşıt-yol konfigürasyonları için çözüm çok kolay elde edilebilir.

3.4.2 Zamana bağlı çözüm teknikleri

Taşıt-yol dinamiği zaman tanım alanlı incelendiği zaman, taşıt yol boyunca hareket ederken taşıt ve yolun deplasmanları nümerik zaman integrali ile hesaplanır. Tekerlek-ray temas deformasyonu irdelenirken tekerlek takımının düşey hareketi rayın düşey deplasmanı ile çakıştırılır. Zaman tanım alan çözüm tekniğini Jenkins ve diğ.(1974), Newton ve diğ. (1979), Grassie ve diğ. (1982), Olsson (1985), Nielsen ve diğ. (1991), Zhai (1992), Ripke (1993) gibi bazı araştırmacılar kullanmıştır, (Knothe ve Grassie, 1993).

Ray-tekerlek temas kuvveti hesaplanırken, hesaplama zamanını azaltmak için, hareket denklemleri modal analiz ile bağımsız hale getirilir. Her denklem ayrı ayrı çözülür ve her modal tepkinin süperpozisyonu alınarak tüm sistemin tepkisi bulunur.

Yol, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenir ve çoğu durumda bir modal analiz kullanılır. Modal analiz teknikleri lineer modeller gerektirir. Modal analizin dezavantajı, kirişlerin ve mesnetlerin balast ve travers arasındaki gizli boşlukların ve değişken travers aralığı gibi daha karışık modellerinin genellenmesindeki zorluktur. Avantajı ise, demiryolu için yapısal düzensizlikler ile yolu münferit olarak ele almaya izin verir olmasıdır. Sonlu elemanlı yol modeli lineer olmayan elemanları da içerir, malzeme özellikleri lineer olmayan yol elemanlarının fiziksel davranışını gösterecek şekilde seçilir. Normalde, ray elastik tabakaları ve balast-zemin malzemeleri lineer değildir. Bunun için gerçek yolun lineer olmayan karakteristiklerine uygun kuvvet-deplasman ilişkisini sağlayan ilave yükler ilave edilerek tanımlanabilir.

4. ANALİTİK VE NÜMERİK YÖNTEMLE TİTREŞİM ANALİZİ

Titreşim analizinin amacı, ray-tekerlek temasından kaynaklanan titreşimleri ve titreşimlerin neden olduğu hasarları en aza indirmektir. Bunun için taşıt-yol sistemine ilişkin dinamik davranışın çok iyi bilinmesi gereklidir. Taşıtın tahrik frekansları ile yolun öz frekansları çakıştığı zaman rezonans olayı meydana gelmektedir. Bu nedenle, yolun öz frekansları rezonans frekanslarını oluşturmakta ve bu frekanslarda dinamik büyütme faktörü önemli oranlarda artmaktadır. Yeni hatların tasarım aşamasında veya eski hatların iyileştirilmesi sırasında, yolun dinamik özellikleri ve dinamik tepki davranışları çok iyi analiz edilmelidir. Ancak, balast ve elastik tabakaların dinamik özellikleri (rijitlik ve sönüm oranları) genelde bilinmemektedir. Bu nedenle laboratuar veya arazi ölçümleri yapılarak, dinamik özellikler belirlenmelidir.

Bu bölümde seçilen yol modelleri için statik ve dinamik analiz uygulanmıştır. Yol modelleri için İstanbul kentiçi raylı sistemlerinden Aksaray-Havalimanı metro hattında kullanılan balastlı üstyapı ve çelik plakalı balastsız (beton döşemeli) üstyapı seçilmiştir. Seçilen iki farklı üstyapı için yol modelleri oluşturulmuş, yolun statik ve dinamik davranışı incelenmiştir.

4.1 Analitik Yöntemle Çözüm

Analitik yöntemle çözümde, balastlı ve balastsız yol modelleri ve değişik yol parametreleri için statik ve dinamik analiz yapılarak rayın yer değiştirmesi (çökmesi) ve ray eğilme momenti hesaplanmıştır.

4.1.1 Analitik yöntemle statik analiz

Sürekli mesnetli balastlı ve balastsız yol modelinin statik ray çökme ve ray eğilme momentleri (3.7)-(3.9)'daki Zimmermann formüllerinden hesaplanmıştır.

4.1.1.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme

Sürekli mesnetli balastlı yol modelin hesaplanan statik ray çökme ve ray eğilme momentleri Çizelge 4.1'de ve balastlı yol modelinin özellikleri Ek A'da verilmiştir. Statik hesaplamadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Balastlı yol modeli için statik ray çökmesini en çok etkileyen yol parametresi zemin-balast rijitliğidir. Zemin-balast kalitesi yani rijitliği arttıkça, ray çökmesi de azalmaktadır. Zemin kalitesi düştükçe yani daha zayıf zeminlerde ray çökmesi artmaktadır. İyi zeminli yol modeline göre, kaya zemin, ray çökmesini %50 azaltırken, daha zayıf zemin %25 artırmaktadır. Ray eğilme momenti yani ray gerilmeleri açısından daha rijit zeminlerde (kaya zemin gibi) benzer sonuçlar vardır. Zemin kalitesi, yol parametreleri içinde en önemli parametredir. Altyapısı kaya veya beton gibi rijit yollarda ray çökmesi ve ray gerilmeleri önemli oranda azalmaktadır, ancak zemine gelen gerilmeler daha fazla olmaktadır. Rijitlik katsayısı arttıkça, zemin üzerine gelen gerilmeler de artmaktadır.
- Yol modelinde B58 beton travers yerine daha büyük olan B70W beton traversinin kullanılması durumunda, statik ray çökmesinde %9 azalma, eğilme momentinde %3 gibi bir azalma olmaktadır. Yüksek hızlı ve ağır yük hatlarında oturma alanı daha geniş ve daha ağır olan B70W beton traverslerin kullanılması önemlidir.
- Ray kütlesi arttıkça ray çökmesi azalmakta ancak ray gerilmeleri artmaktadır. Daha ağır ve daha rijit olan ray kullanımı çökmeyi azaltmakta ancak daha fazla gerilmeye neden olmaktadır.
- Travers aralığının artırılması (0.60 m. travers aralığı yerine 0.75 m. travers aralığı) ray eğilme momentini %6 ve ray çökmesini %18 kadar artırmaktadır.
- Ray altında çok yumuşak elastik tabaka kullanılması durumunda, ray gerilmesinden daha fazla ray çökmesi artmaktadır. Mesela Rp 1 elastik tabaka yerine daha yumuşak Rp 3 ray altı elastik tabaka kullanılırsa, ray eğilme momenti ve dolayısıyla ray gerilmesi %9.5 artarken ray çökmesi %24 artar.

Çizelge 4.1 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Ray çökme y (mm)	Ray eğilme momenti M (kNm)
Balastlı yol modeli	0,766	9,706
Zemin tipi (zayıf zemin, k=19.17 x10^6 N/m)	0,955	10,446
Zemin tipi (kaya zemin, k=77.7 x10^6 N/m)	0,349	7,468
Travers tipi (B70W beton travers)	0,694	9,392
Ray tipi (UIC 60)	0,673	11,051
Travers aralığı (a=0.75 m)	0,905	10,261
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	0,952	10,434

4.1.1.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme

Sürekli mesnetli çift kirişli balastsız yol modelinin statik ray çökme ve ray eğilme momentleri hesaplanmış ve Çizelge 4.2'de verilmiştir. Balastsız yol modelinin özellikleri Ek A'da verilmiştir.

Statik hesaplamadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Balastız yol modeli için, statik ray çökmesini en çok etkileyen yol parametresi balast görevini sağlayan elastik tabaka rijitliğidir. Rijitlik oranı daha yüksek olan elastik tabaka ray çökmesini ve ray eğilme momentini azaltmaktadır.
- Balastız yol modelinde çelik plaka (selet) aralığının azaltılması, ray çökmesini ve ray eğilme momentini azaltmaktadır.
- Balastsız yol modelinde selet kütle değişiminin statik ray çökme ve ray eğilme momentine hiçbir etkisi olmamıştır.

Çizelge 4.2 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Ray çökme y (mm)	Ray eğilme momenti M (kNm)
Balastsız yol modeli	0,373	7,635
Selet kütlesi (m=10 kg)	0,373	7,635
Selet aralığı (a=0.60m)	0,315	7,220
Selet altı elastik tabaka tipi (1403-N)	0,243	6,624

4.1.2 Analitik yöntemle dinamik analiz

Demiryollarında genelde en çok kullanılan hesaplama yöntemi statik analize göre elde edilen sonuçları dinamik etki katsayısı oranında artırmaktadır. Dinamik etkileri belirlemek için bazı basit ampirik formüller önerilmiş olup, bu formüller yaklaşık sonuçlar vermektedir. Çünkü yolun geometrik kalitesi, yol ve aracın mekanik karakteristikleri tam olarak hesaba katılmamaktadır.

Münih Teknik Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nce Eisenmann ve ekibi tarafından uzun süreli ölçümler yapılmış ve sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi sonucu taşıt hızı ve üstyapının bakım durumuna bağlı olarak bir dinamik büyütme faktörü geliştirilmiştir. Eisenmann dinamik büyütme faktörü bağıntı (4.1) ve (4.2)'den hesaplanır:

$V<60$ km/sa $\quad \varphi=1+t_e s$ **(4.1)**

$60<V\leq 200$ km/sa $\quad \varphi = 1 + t_e s(1 + \frac{V-60}{140})$ **(4.2)**

Burada t_e emniyet faktörünü ve s yol kalitesini ifade etmektedir.

Çizelge 4.3 : Emniyet ve yol kalite faktörü.

Dinamik hesap uygulama alanı	Emniyet faktörü (t_e)	Yol kalitesi	Yol kalite faktörü (s)
Ray-tekerlek teması ve zemin	1	Çok iyi	0,1
Yanal yük ve balast	2	İyi	0,2
Ray ve travers	3	Kötü	0,3

Eisenmann dinamik yük hesabı oldukça basit bir yaklaşımdır. Çünkü yol kalitesine ve taşıt hızına bağlı olarak lineer bir ilişki vardır, ancak balast yatağının sönüm etkileri ve aracın tahrik frekansları gibi dinamik özellikler dikkate alınmamaktadır. Daha doğru bir yaklaşım, rayın ve elastik tabakaların dinamik karakteristiklerine ve aracın tahrik frekanslarına bağlı olarak dinamik büyütme faktörünün hesaplanmasıdır.

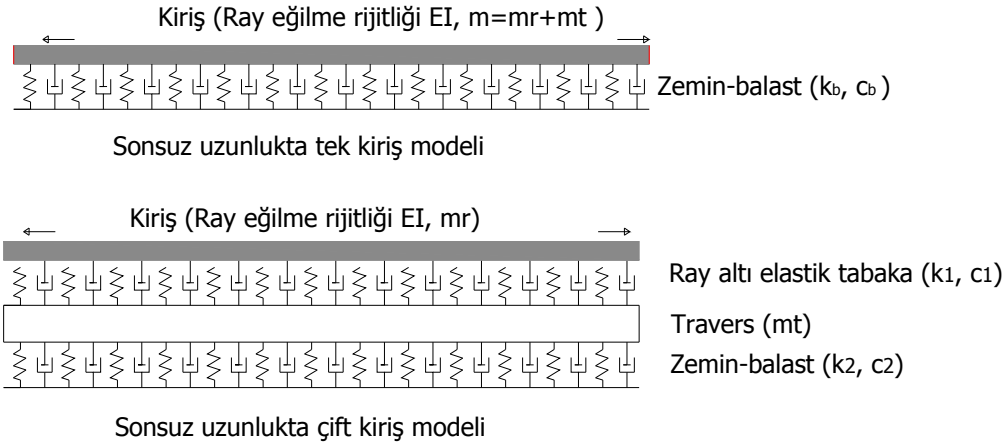
Genelde, demiryolu üstyapısı, ayrı yaylardan oluşan elastik temel üstündeki sonsuz bir kiriş olarak iki boyutlu modellenir. Tekerlek yükü, noktasal hareket eden bir kuvvet olarak alınır. Bu model lineer elastiktir ve komşu tekerlek yüklerin etkisi süperpozisyon yöntemi ile hesaplanır.

Demiryolu üstyapısı yol eksenine göre simetrik bir yapıya sahip olduğu için, genelde hesaplamada kolaylık sağlamak için tek ray ve yarım traversten oluşan yol sistemi modellenir. Ray sürekli bir kiriş olduğu için, modellemede birim uzunluk kütlesi ve eğilme rijitliği hesaba katılır. Travers ise rijit kütle olarak modellendiği için, sürekli mesnetli modelde birim uzunluk kütlesi, ayrık mesnetli modelde tekil kütlesi dikkate alınır. Benzer şekilde ray altı elastik tabaka ve balast tabakalarının rijitlik ve sönüm oranları da sürekli mesnetli modelde, travers aralığına bölünerek, birim uzunluk değerleri bulunarak dahil edilir.

En basit dinamik model, sürekli yayılı yay ve sönüm elemanlarından oluşan bir temel üstünde tek kiriş modelidir. Kiriş olarak, en basit haliyle dönme ataleti ve kesme deformasyonu ihmal edilen E-B kirişi kabul edilmiştir.

Sürekli mesnetli tek kiriş modelinde dinamik tepki faktörü, yolun birim uzunluk kütlesine, balast-zemin tabakasının rijitlik ve sönüm katsayısına bağlı olarak değişir. Yolun birim uzunluk kütlesi ray ve yarım traversin birim uzunluk kütlelerinin

toplamı ile bulunur. Şekil 4.1'de sürekli mesnetli ve sonsuz uzunlukta tek ve çift kirişli model gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Sürekli mesnetli ve sonsuz uzunlukta tek ve çift kirişli model.

Eğer tek kirişli bir model kullanılacaksa, eşdeğer rijitlik katsayısı hesaplanır. Üstyapının elastik tabakalarının seri yaylardan oluştuğu kabulü ile eşdeğer rijitlik katsayısı, (4.3) bağıntısı ile hesaplanır:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \tag{4.3}$$

Ancak, tek kiriş modelinde çoğunlukla ray altı elastik tabakanın rijitliği, balast ve zemin tabakalarına göre çok yüksek olduğu için ihmal edilir ve sadece balast-zemin tabakasının rijitliği kabul edilir.

Sürekli mesnetli ve sonsuz uzunlukta tek Euler kirişinin hareket denklemi (4.4) bağıntısı ile gösterilmiştir:

$$EI\frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} + ky(x,t) = 0 \tag{4.4}$$

Bölüm 2.1'de tek serbestlik dereceli bir sistem için dinamik tepki fonksiyonunun nasıl bulunduğu açıklanmıştı. Burada, sürekli mesnetli demiryolu için yani sonsuz serbestlik dereceli bir sistem için dinamik tepki fonksiyonu bulunacaktır. Bölüm 2.1'de izah edildiği gibi, harmonik tahrik yükü altındaki ray çökmesinin uygulanan yüke oranını veren bu fonksiyona dinamik tepki fonksiyonu adı verilir. Dinamik tepkinin birimi m/N dur.

Sonsuz serbestlik dereceli bir sistem için dinamik tepki fonksiyonu,

$$H(f) = \frac{1}{2kL}\left\{(1-\eta^2)^2 + 4\xi^2\eta^2 \right\}^{-3/8} e^{i\phi} \quad \textbf{(4.5)}$$

(4.5) bağıntısı ile elde edilir ve faz açısı,

$$\phi = -\frac{3}{4} a\tan\frac{2\xi\eta}{1-\eta^2} \quad \textbf{(4.6)}$$

(4.6) bağıntısı ile elde edilir. Statik durumda frekans sıfıra eşittir ve statik transfer fonksiyonu,

$$H(0) = \frac{1}{2kL} \quad \textbf{(4.7)}$$

(4.7) bağıntısı ile elde edilir. Harmonik dinamik tepkinin statik tepkiye oranına, tüm frekans aralığında geçerli olmayan ve sadece rezonans frekansında geçerli olan dinamik büyütme faktörü adı verilir. Yani trenin tahrik frekansı ile yolun öz frekansının aynı olduğu şartlarda geçerli olan ve maksimum ray çökmesinin statik ray çökmesine oranını veren bir faktördür. Dinamik büyütme faktörü,

$$\varphi = \frac{H(f)}{H(0)} = \left\{(1-\eta^2)^2 + 4\xi^2\eta^2 \right\}^{-3/8} \quad \textbf{(4.8)}$$

(4.8) bağıntısı ile elde edilir.

Yol yapısının genel davranışını anlamak için tek kiriş modeli yeterlidir ama ray elastik tabakasının davranışını incelemek veya beton döşemelerin etkisini araştırmak için daha hassas analiz yapmak gereklidir. Bunun için daha gerçekçi olan çift kiriş modeli kullanılır. İlk kiriş eğilme rijitliği EI olan rayı modellerken, diğer kiriş çoğunlukla eğilme rijitliği olmayan beton döşeme veya traversi ifade eder.

Çift kirişli modelde, iki kiriş arasında rijitlik katsayısı k_1 ve sönüm katsayısı c_1 olan ray altı elastik tabaka, ikinci kirişin altında ise rijitlik katsayısı k_2 ve sönüm katsayısı c_2 olan balast vardır. Dinamik analizde, statik çift kiriş modelindeki k_1 ve k_2 değerleri yerine (4.9) ve (4.10) bağıntılarında gösterilen rijitlik değerleri kullanılır.

$$k_1' = k_1 - m_1 w^2 + iwc_1 \quad \textbf{(4.9)}$$

$$k_2' = k_2 - m_2 w^2 + iwc_2 \quad \textbf{(4.10)}$$

Bundan sonra, (4.5-4.8) denklemlerinde tek kiriş modelindeki eşdeğer rijitlik katsayısı k yerine, iki tabakalı sistemin eşdeğer dinamik rijitlik katsayısı k' kullanılır.

Bu bölümde, analitik yöntemle sürekli Winkler temel mesnetli E-B kirişi olarak modelleme yapılmıştır. Analitik analizde, 0-1500 Hz frekans aralığı için değişik yol parametrelerinin (zemin rijitliği, mesnet aralığı, ray/travers/ray altı elastik tabaka tipi) dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. Balastlı yol modeli tek ve çift kirişli olarak, balastsız yol modeli ise sadece çift kirişli olarak modellenmiştir. 3 Hz frekans aralıkları için toplam 500 frekans değerine göre dinamik hesaplama yapılmıştır.

Sürekli mesnetli modelin analitik çözümleri, MATLAB (MATrix LABoratory) 6.5 programı ile elde edilmiştir. MATLAB programı hakkında detaylı bilgi Ek A'da sunulmuştur. (4.8) formülüne göre dinamik büyütme faktörü ve daha sonra rezonans durumundaki maksimum ray çökme ve ray eğilme momenti hesaplanmıştır. Maksimum ray çökme ve ray eğilme momenti, Q=50 kN olan tek bir harmonik yük için 0-1500 Hz frekans aralığında rezonans durumundaki maksimum dinamik büyütme faktörü ile statik ray çökme ve ray eğilme momentinin çarpımı ile hesaplanmıştır.

4.1.2.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme

Sürekli mesnetli balastlı yol modeli tek ve çift kirişli olarak modellenmiş ve değişik yol parametrelerinin (zemin rijitliği, travers aralığı, ray/travers/ray altı elastik tabaka tipi) dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. Tek kiriş modelinde ray altı elastik tabakanın rijitliği, balast ve zemin tabakalarına göre çok yüksek olduğu için ihmal edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4.4'te ve dinamik tepki grafikleri Ek A'da verilmiştir.

Çizelge 4.4'te balastlı yol modelinin analitik yöntemle dinamik analizin sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Aynı üstyapı parametreleri kullanılarak oluşturulan tek kirişli ve çift kirişli modellerin dinamik hesap sonuçları arasında bir fark olduğu görülmüştür. Genel olarak, çift kiriş modelinin dinamik hesap sonuçları, tek kiriş modeline göre %7-9'a varan oranda daha düşük çıkmaktadır. Çift kirişli modelleme gerçeğe daha yakın olduğu için tek kiriş modeline göre daha doğru sonuçlar verdiği kabul edilmektedir.

- Demiryolu dinamik davranışını en çok etkileyen parametre, zemin-balast tabaka rijitliğidir. Zemin kalitesi arttıkça, yani zemin-balast tabakasının rijitliği yaklaşık 4 kat artınca (rijitlik katsayısı 25.9 $x10^6$ N/m'dan 77.7 $x10^6$ N/m değerine çıkınca), ray çökmesi yarı yarıya azalmaktadır. Dinamik ray eğilme momenti, dolayısıyla ray gerilmeleri ise artmaktadır. Aslında statik hesaplamadan beklendiği gibi ray çökmesi azaldığı için, ray eğilme momenti de azalmalıdır, ancak dinamik büyütme faktörü yol rijitlik katsayısı ile orantılı olarak arttığı için dinamik eğilme momenti de artmıştır.

- Travers aralığını (0.60 m.'den 0.65 m, 0.70 m. veya 0.75 m.'ye) arttırmak, ray eğilme momentini biraz artırırken, ray çökmesini önemli oranda artırmaktadır. Statik hesaplamada beklendiği gibi mesnet aralığı ray gerilmesinden ziyade ray çökmesi ile ilgilidir. Bu modelde, ayrık mesnetli sistemin özellikleri travers aralığına bölünerek sürekli mesnetli sisteme dönüştürüldüğü için, rayın birim kütlesi ve eğilme rijitliği hariç tüm özellikler travers aralığı ile orantılı olarak değişmektedir.

- Travers kütlesini artırmak (B58 monoblok beton travers yerine B70 W monoblok beton travers kullanmak) ray çökmesini çok az azaltırken, ray eğilme momentini artırmaktadır.

- Ray kütlesini artırmak (49.43 kg/m'den 54.54 kg/m'ye veya 60.34 kg/m'ye artırmak) ray çökmesini azaltırken, ray eğilme momentini artırmaktadır. Daha ağır rayın kullanılması, ray çökmesini azaltır, ancak ray kütlesinin artmasından dolayı eğilme gerilmeleri de artmaktadır.

- Ray altı elastik tabakaları için sönüm katsayısı, rijitlik katsayısına göre dinamik davranışı daha fazla etkilemektedir. Rp 1 ve Rp 2 elastik tabakaların rijitlik katsayıları (sırasıyla 970 $x10^6$ N/m ve 2990 $x10^6$ N/m) olmakla birlikte sönüm oranları (32 $x10^3$ Ns/m ve 29 $x10^3$ Ns/m) çok yakın olduğu için, dinamik ray çökme ve ray eğilme momenti düşük ve birbirine çok yakın çıkmıştır. Düşük sönüm oranlarına (7 $x10^3$ Ns/m ve 6 $x10^3$ Ns/m) sahip Rp 3 ve Rp 4 elastik tabakaları için ray çökme ve ray eğilme momenti daha büyük bulunmuştur. Ancak en yüksek dinamik değerler rijitlik katsayısı düşük, yani daha esnek Rp 3 elastik tabakanın kullanılması durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlara göre, düşük ray gerilmeleri ve düşük ray çökmeleri

için, sönüm katsayısı yüksek olan ray altı elastik tabakalarının seçilmesi uygundur.

Ek A.1-A.5'te balastlı yol modelinin dinamik tepki grafikleri verilmektedir. Tek ve çift kiriş modeli için farklı dinamik tepki grafikleri elde edilmiştir. Tek kirişli sürekli mesnetli modelde, sadece ray ve traversten oluşan yol çerçevesinin kütlesi olduğu için tek bir pik değer görülmektedir. Ancak çift kirişli sürekli mesnetli modellemede ray ve travers iki ayrı kütle olduğu için iki pik değer görülmektedir. Her iki modelde, ilk pik değer aynı frekanstadır ve bu frekans yolun öz frekansını ifade etmektedir. Çift kiriş modelindeki ikinci pik değer ise, ray öz frekansını ifade etmektedir, çünkü bu modelde ray ve travers ayrı ayrı modellenmektedir.

Balastlı yol modelinin dinamik tepki grafiklerinde elde edilen bazı sonuçlar şunlardır:

- Şekil A.1'de görüldüğü gibi, yol rijitliği arttıkça, dinamik tepki azalmakta ve yol öz frekansı artmaktadır.
- Şekil A.2'de görüldüğü gibi, travers aralığı arttıkça, dinamik tepki artmakta ve yol öz frekansı değişmemekte ancak ray öz frekansı azalmaktadır.
- Şekil A.3'te görüldüğü gibi, ray kütlesini artırmak dinamik tepkiyi ve ray öz frekansını azaltmaktadır.
- Şekil A.4'te görüldüğü gibi, travers kütlesini artırmak dinamik tepkiyi çok az azaltmakta ve öz frekansları değiştirmemektedir.
- Şekil A.5'te görüldüğü gibi, tüm ray altı elastik tabakalar için yol öz frekansı aynı ancak ray öz frekansı farklı çıkmaktadır. En yüksek ray öz frekansı Rp 1 ve daha sonra Rp 4 elastik tabakası için çıkmaktadır. Dinamik tepki açısından en yüksek değer Rp 3 elastik tabakası için elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle dinamik analiz sonuçları.

Yol parametresi	Tek kiriş modeli			Çift kiriş modeli		
	Dinamik büyütme faktörü	Mak. ray çökme y(mm)	Mak. eğilme momenti M(x10^3 Nm)	Dinamik büyütme faktörü	Mak. ray çökme y(mm)	Mak. eğilme momenti M((x10^3 Nm)
Balastlı yol modeli	1,162	0,890	11,280	1,101	0,844	10,690
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı (k=19.17x10^6 N/m)	1,073	1,000	11,208	1,036	0,990	10,826
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı (k=51.8x10^6 N/m)	1,423	0,660	11,684	1,323	0,614	10,867
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı (k=77.7x10^6 N/m)	1,617	0,564	12,074	1,486	0,519	11,101
Travers aralığı (a=0.65 m)	1,167	0,949	11,559	1,101	0,896	10,906
Travers aralığı (a=0.70 m)	1,173	1,000	11,828	1,101	0,945	11,111
Travers aralığı (a=0.75 m)	1,178	1,100	12,088	1,102	0,997	11,303
Ray tipi (S54)	1,169	0,866	11,724	1,101	0,816	11,049
Ray tipi (UIC60)	1,176	0,791	12,996	1,101	0,741	12,172
Travers tipi (B70W beton travers)	1,271	0,882	11,937	1,199	0,832	11,265
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 2)	-	-	-	1,108	0,838	10,709
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	-	-	-	1,540	1,465	16,068
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 4)	-	-	-	1,252	1,010	12,376

4.1.2.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme

Sürekli mesnetli balastsız (beton) yol modeli çift kirişli olarak modellenmiş ve değişik yol parametrelerinin (elastik tabaka tipi, çelik plaka kütlesi ve mesnet aralığı) dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 4.5'te ve dinamik tepki grafikleri Ek A'da verilmiştir.

Çizelge 4.5'te balastsız yol modelinin analitik yöntemle dinamik analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Balastsız üstyapıda balast olmadığı için, balastın görevini sağlayan elastik tabakalar çok önemlidir. Balastlı yol modelinde zemin-balast tabakası, dinamik davranışı çok etkilediği gibi balastsız yol modelinde elastik tabaka yolun dinamik davranışını önemli oranda etkilemektedir. Balastsız üstyapıda, balastın görevini yapan selet altı elastik tabakanın rijitlik ve sönüm katsayısı arttıkça ray çökme ve ray eğilme momenti önemli oranda azalmaktadır. Balastsız yol modelinde, dinamik davranışı en çok etkileyen yol bileşeni elastik tabakadır, daha sonra selet aralığı ve selet kütlesi gelmektedir.
- Çelik levha aralığını (0.6 m.'den 0.75 m., 0.90 m. veya 1.05 m.'ye) artırmak, ray eğilme momentini biraz artırırken, ray çökmesini önemli oranda artırmaktadır.
- Selet kütlesini artırmak, (4 kg yerine 6, 8 veya 10 kg) ray çökmesini ve ray eğilme momentini aynı oranda artırmaktadır.

Ek A.6-A.8'de çift kirişli balastsız yol modelinin dinamik tepki grafikleri verilmektedir ve elde edilen bazı sonuçlar şunlardır:

- Şekil A.6'da selet aralığı arttıkça, dinamik tepki artmakta ancak yol öz frekansı değişmemektedir.
- Şekil A.7'de görüldüğü gibi selet kütlesini artırmak, dinamik tepkiyi azaltmakta ama yol öz frekansını artırmaktadır.
- Şekil A.8'e göre de selet altı elastik tabakanın rijitlik ve sönüm katsayısı arttıkça (Fc 14 elastik tabaka yerine Fc 864 veya 1403-N elastik tabaka kullanılırsa) dinamik tepki azalmakta ancak öz frekans artmaktadır.

Çizelge 4.5 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için analitik yöntemle dinamik analiz sonuçları.

Yol parametresi	Mak. dinamik büyütme faktörü	Mak. ray çökme miktarı (mm)	Mak eğilme momenti ($x10^3$ Nm)
Balastsız yol modeli	3,855	1,437	29,433
Selet aralığı (a=0.6 m)	3,851	1,214	27,808
Selet aralığı (a=0.9 m)	3,861	1,650	30,851
Selet aralığı (a=1.05 m)	3,870	1,857	32,138
Selet kütlesi (m=4 kg)	3,121	1,163	23,824
Selet kütlesi (m=6 kg)	3,483	1,298	26,587
Selet kütlesi (m=10 kg)	4,183	1,559	31,935
Elastik tabaka tipi (Fc864)	2,639	0,788	18,712
Elastik tabaka tipi (1403-N)	1,922	0,468	12,730

4.2 Nümerik Yöntemle Çözüm

4.1 bölümünde demiryolu üstyapısı çift kirişli ve sürekli mesnetli olarak MATLAB programı ile modellenmiştir. Değişik ray, travers, zemin, elastik tabaka tiplerinin ve mesnet aralığının dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. Bu bölümde (Ek A'da verilmiş olan) sürekli mesnetli çözülen yol modelleri ayrık mesnetli olarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrık mesnetli yol modelinde, ray E-B kirişi olarak ve traversler (veya çelik selet) rijit kütle olarak modellenmiştir. ANSYS sonlu elemanlar programı ile statik ve harmonik analiz yapılmıştır. ANSYS programı hakkında geniş bilgi Ek A'da sunulmuştur.

4.2.1 Nümerik yöntemle statik analiz

Ayrık mesnetli balastlı ve balastsız yol modelinin statik ray çökme, ray eğilme momentleri ve mesnet noktasına gelen indirgenmiş tekerlek yükü ANSYS programı ile hesaplanmıştır. Q=50 kN tek tekerlek yükü mesnet üstünde ve iki mesnet arasında iken, rayın çökmesi ve eğilme momenti statik analizle hesaplanmıştır.

Raya etkiyen tekerlek yükü, komşu traverslerin etkisi nedeniyle azalmaktadır ve yük altındaki traverse daha az yük gelmektedir. Komşu traverlerin etkisi ile azalan bu yüke indirgenmiş tekerlek yükü denilmektedir. Bu indirgenmiş yük, travers, balast ve zemin gerilme hesabında kullanılmaktadır. Nümerik analizde, travers üstünde uygulanan tekerlek yükünün her iki tarafta iki komşu traverse daha fazla etkisinin olduğu ancak daha uzaktaki traverslere etkisinin ihmal edilebileceği görülmüştür. En yakın komşu traverse gelen yük, tekerlek yükünün %25'i kadardır.

4.2.1.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme

Çizelge 4.6'da çift kirişli balastlı yol modeli için nümerik yöntemle statik analiz hesap sonuçları verilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Tekerlek yükü mesnet üstünde olması ve iki mesnet arasında olmasına göre hesap sonuçları değişmektedir. İki mesnet arasında ray daha elastik olduğu için ray çökmesi %2-3 kadar daha fazla olmaktadır. Ray eğilme momenti ise %20-25 daha fazladır.
- Balastlı yol modeli için, statik ray çökmesini en çok etkileyen yol parametresi zemin-balast rijitliğidir. Zemin-balast kalitesi yani rijitliği arttıkça, ray çökmesi de azalmaktadır. İyi zeminli yol modeline göre, kaya zemin, ray çökmesini %50 azaltırken, daha zayıf zemin %25 artırmaktadır. Ray eğilme momenti, yani ray gerilmeleri açısından daha rijit zeminlerde (kaya zemin gibi) benzer sonuçlar vardır. Zemin kalitesi, yol parametreleri içinde en önemli parametredir. Altyapısı kaya veya beton gibi rijit yollarda ray çökmesi ve ray gerilmeleri önemli oranda azalmaktadır, ancak zemine gelen gerilmeler daha fazla olmaktadır. Rijitlik katsayısı arttıkça, zemin üzerine gelen gerilmeler de artmaktadır.
- Yol modelinde B58 beton travers yerine daha büyük olan B70W beton traversinin kullanılması durumunda, statik ray çökmesinde %9 azalma,

eğilme momentinde ise %3 gibi bir azalma olmaktadır. Yüksek hızlı ve ağır yük hatlarında oturma alanı daha geniş ve daha ağır olan B70W beton traverslerin kullanılması önemlidir.

- Ray kütlesi arttıkça ray çökmesi azalmakta ancak ray gerilmeleri artmaktadır. Daha ağır ve daha rijit olan ray kullanımı çökmeyi azaltmakta ancak daha fazla gerilmeye neden olmaktadır.
- Travers aralığının artırılması, iki mesnet arasındaki ray eğilme momentini artırırken, ray çökmesini önemli oranda artırmaktadır. 0.60 m travers aralığı yerine 0.75 m travers aralığı ray çökmesini %18 kadar artırmaktadır.
- Ray altında çok yumuşak elastik tabaka kullanılması durumunda, ray gerilmesinden daha fazla ray çökmesi artmaktadır. Mesela Rp 1 elastik tabaka yerine daha yumuşak Rp 3 ray altı elastik tabaka kullanılırsa, ray eğilme momenti ve dolayısıyla ray gerilmesi %9.5 artarken ray çökmesi %24 artar.

Çizelge 4.6 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Travers üstünde tekerlek yükü		İki travers arasında tekerlek yükü	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastlı yol modeli	0,768	8,654	0,777	10,245
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	0,956	9,472	0,965	10,936
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	0,348	6,065	0,361	8,221
Travers tipi (B70W beton travers)	0,695	8,654	0,705	10,245
Ray tipi (UIC 60)	0,676	10,122	0,681	11,503
Travers aralığı (a=0.75 m)	0,904	8,410	0,925	10,880
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	0,954	9,459	0,962	10,924

Balastlı yol modeli için statik indirgenmiş tekerlek yükü hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.7'de sunulmuştur. Bu hesaplarda elde edilen sonuçlar şunlardır:

- İndirgenmiş tekerlek yükünü en çok etkileyen yol parametresi, zemin-balast rijitliği, daha sonra travers aralığıdır. Zemin-balast rijitliği azaldıkça yani yumuşak yataklarda daha iyi bir yük dağılımı sağlanmaktadır. Nümerik analizde, zayıf zeminlerde traverse gelen yükün tekerlek yüküne oranı %36 iken bu oran iyi zeminli yolda %39, kaya zeminli yolda ise %50'ye çıkmaktadır.
- Travers aralığı 0.6m'den 0.75m'ye çıkması durumunda, indirgenmiş tekerlek yük oranı %39'dan %45'e çıkmaktadır.
- Ray tipinin, travers tipinin, ray altı elastik tabakanın indirgenmiş tekerlek yük oranına etkisi fazla değildir. Genelde yük oranı %34-39 arasındadır.

Çizelge 4.7 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik indirgenmiş tekerlek yükü değerleri.

Yol parametresi	Tekerlek yükü noktasında		Komşu traverste	
	İndirgenmiş yük (kN)	Oran (%)	İndirgenmiş yük (kN)	Oran (%)
Balastlı yol modeli	19,351	39	12,558	25
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	17,992	36	12,313	25
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	25,031	50	12,566	25
Travers tipi (B70W beton travers)	18,594	37	12,434	25
Ray tipi (UIC 60)	17,048	34	12,063	24
Travers aralığı (a=0.75m)	22,771	45	12,771	25
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	18,012	36	12,317	25

4.2.1.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme

Çizelge 4.8'de çift kirişli balastsız yol modeli için nümerik yöntemle statik analiz hesap sonuçları verilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Tekerlek yükü mesnet üstünde olması ve iki mesnet arasında olmasına göre hesap sonuçları değişmektedir. İki mesnet arasında ray daha elastik olduğu için ray çökmesi %8-13 daha fazla olmaktadır. Ray eğilme momenti ise %30-50 daha fazladır.
- Balastız yol modelinde selet aralığının azaltılması ray çökmesini ve iki mesnet arasındaki ray eğilme momentini azaltırken, mesnet üstündeki ray eğilme momentini artırmaktadır.
- Balastız yol modeli için statik ray çökmesini en çok etkileyen yol parametresi balast görevini sağlayan elastik tabaka rijitliğidir. Daha yumuşak elastik tabaka, ray çökmesini ve ray eğilme momentini azaltmaktadır.
- Balastsız yol modelinde selet kütle değişiminin statik ray çökme ve ray eğilme momentine hiçbir etkisi olmamıştır.

Balastsız yol modelleri için statik indirgenmiş tekerlek yükü hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Bu hesaplarda elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Balastsız yol modelinde, indirgenmiş tekerlek yükü balastlı yol modeline göre daha fazla çıkmaktadır. Zemin-balast rijitliği gibi selet altı elastomerin rijitliği arttıkça indirgenmiş tekerlek yük oranı da artmaktadır. Yol modelinde yük oranı %60 iken, daha rijit elastomer (1403-N tipi) durumunda bu oran %68'e çıkmaktadır.
- Selet aralığı 0.75m'den 0.6m'ye düşmesi durumunda, indirgenmiş tekerlek yük oranı %60'dan %52'e düşmektedir.
- Selet kütlesinin yük oranına etkisi yoktur.

Çizelge 4.8 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik hesap sonuçları.

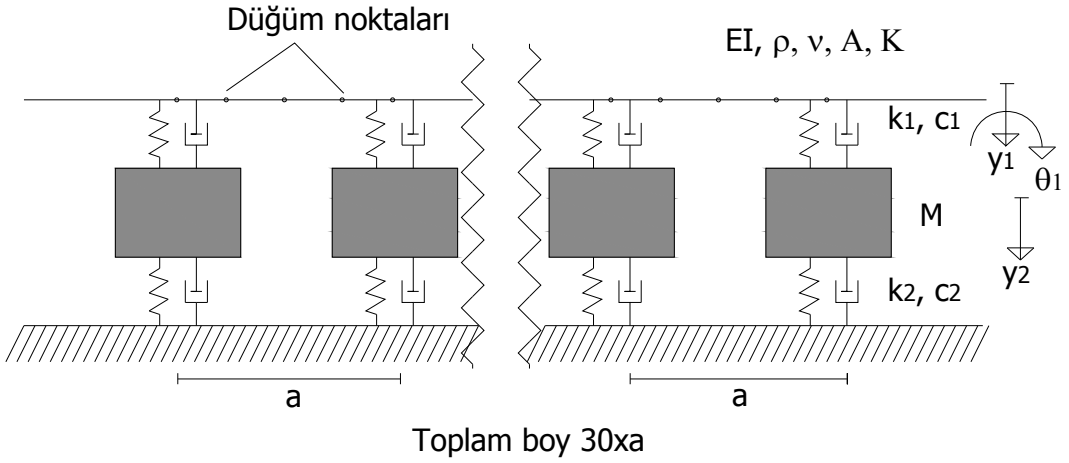
Yol parametresi	Mesnet üstünde tekerlek yükü		İki mesnet arasında tekerlek yükü	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastsız yol modeli	0,366	5,500	0,397	8,873
Selet kütlesi (m=10 kg)	0,366	5,500	0,397	8,873
Selet aralığı (a=0.60m)	0,314	5,765	0,328	8,008
Selet altı elastik tabaka tipi (1403-N)	0,234	4,196	0,271	8,873

Çizelge 4.9 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için statik indirgenmiş tekerlek yükü değerleri.

Yol parametresi	Tekerlek yükü noktasında		Komşu traverste	
	İndirgenmiş yük (kN)	Oran (%)	İndirgenmiş yük (kN)	Oran (%)
Balastsız yol modeli	30.102	60	11.407	23
Selet kütlesi (m=10 kg)	30.102	60	11.407	23
Selet aralığı (a=0.60m)	25.856	52	12.443	25
Elastik tabaka tipi (1403-N tipi)	33.990	68	9.888	20

4.2.2 Nümerik yöntemle dinamik analiz

Demiryolu üstyapısı sonlu elemanları programı olan ANSYS 9.0 eleman kütüphanesinde bulunan elemanlarla modellenmiştir. Demiryolu üstyapısı yol eksenine göre simetrik bir yapıya sahip olduğu ve hesaplamada kolaylık sağlamak için tek ray ve yarım traversten oluşan yol sistemi esas alınmıştır. Sonlu eleman modeli Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde, raylar sonlu uzunlukta iki boyutlu kiriş elemanları olarak belirlenir. Travers kütleleri kiriş elemanın düğüm noktalarına bağlanır. Raylar BEAM3 iki serbestlik dereceli (düşey öteleme ve dönme) elastik kiriş elemanları ile, traversler eşdeğer tekil kütle elemanlarıyla, elastik tabakalar ve balast tabakası COMBIN14 yay-sönüm elemanları ile modellenmiştir. Her iki mesnet arasındaki ray kısmı, dört eşit parçaya bölünmüştür. Modelde 30 travers aralığı için 183 eleman kullanılmış ve 152 düğüm noktası oluşturulmuştur. Her düğüm noktasında iki serbestlik derecesi olduğu düşünülürse bu yaklaşık olarak 304 serbestlik derecesine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.2 : Sonlu elemanlar yol modeli.

ANSYS 9.0 programı ile harmonik tepki analizi yapılmıştır. Harmonik bir yük yapısal sistemde harmonik tepkiye yol açacaktır. Harmonik tepki analizi, aracın devamlı dinamik davranışını dolayısıyla tasarımın rezonans, yorulma ve zorlanmış titreşimin diğer zararlı etkilerine başarıyla karşı koyup koyamayacağını belirleyebilmeyi sağlar.

Harmonik tepki analizi lineer bir yapının zamanla sinüzoidal (harmonik) olarak değişen yüklere karşı sürekli durum tepkisini belirlemekte kullanılan bir tekniktir. Bu analizde amaç, çeşitli frekanslarda yapının tepkisini hesaplamak ve grafiğini elde

etmektir. Uyarımın başlangıcında ortaya çıkan geçici (transient) titreşimler harmonik tepki analizinde hesaba katılmazlar.

Harmonik tepki analizi lineer bir analizdir. Her türlü gayri lineerlik (plastisite ve temas elemanları gibi) sonlu eleman modelinde bulunsa bile analizde gözardı edilir.

Harmonik analizde, dinamik tepki grafiğinde pik değerler rezonans olayını ve dolayısıyla yolun öz frekanslarını göstermektedir. Bu grafiklerden yol, ray ve mesnet öz frekansları hesaplanmıştır.

Nümerik analizde, 0-1500 Hz frekans aralığı için değişik yol parametrelerinin dinamik davranışa etkisi hesaplanmıştır. 0-1500 Hz frekans aralığında 3 Hz frekans aralığında toplam 500 frekans değerine göre dinamik hesaplama yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde, tekerlek yükü hem travers üstünde hem de iki travers ortasında uygulanarak çözüm bulunmuştur. Birim tekerlek yükü travers üstünde uygulanırken, ray ve traversin dinamik tepkisi belirlenmiş ve dinamik tepkilerinin farklı olduğu görülmüştür.

Analitik çözümde olduğu gibi 50 kN tek tekerlek yükü için, rezonans durumundaki rayın maksimum çökme değeri ve maksimum ray eğilme momenti hesaplanmıştır. Bu modelde kullanılan yol özellikleri Ek A'da verilmiştir. Balastlı ve balastsız yol modeli için harmonik yük karşısındaki frekans-dinamik tepki grafikleri ANSYS programı ile elde edilmiş ve Ek B'de sunulmuştur. Frekans-dinamik tepki grafiklerinden pik değerleri veren öz frekanslar tespit edilmiştir.

4.2.2.1 Balastlı yol modeli için parametrik irdeleme

Balastlı yol modeli için hesap sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir ve elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Harmonik tahrik yükü altında ray çökmesi ve ray eğilme momenti önemli oranda artmaktadır. Balastlı yolun öz frekansları ile tahrik yükünün frekansı aynı olduğu zaman rezonans olayı ile birlikte dinamik etkiler de artmaktadır. Çizelge 4.6'daki statik değerlere göre karşılaştırıldığı zaman, ray çökmesi balastlı yolun öz frekanslarında %60'a varan oranda artmaktadır. Travers üstündeki ray eğilme momentinde, yol öz frekansına yakın frekanslarda %40'a varan oranlarda artış olmuştur. Mesnet öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 8-9 kata varan oranlarda artmaktadır. Yani

trenin tahrik frekansı yolun mesnet öz frekansı ile çakışırsa, rezonans olayı ile birlikte ray eğilme momenti tahmin edilemeyecek aşırı düzeylerde olacaktır.

- Tekerlek yükü mesnet üstünde olması ve iki mesnet arasında olmasına göre hesap sonuçları değişmektedir. İki mesnet arasında ray daha elastik olduğu için ray çökmesi %2-4 kadar daha fazla olmaktadır. Ancak iki travers arasındaki dinamik ray eğilme momenti, travers üstündeki eğilme momentinden 7-8 kat daha fazla olmaktadır.
- Örnek yol modeline göre yol parametreleri dinamik ray çökme ve eğilme momentini çok fazla değiştirmemektedir. Dinamik ray çökme ve eğilme momentini %40 oranla en çok etkileyen yol parametresi sırasıyla zemin-balast rijitliği ve ray altı elastik tabaka tipidir.

Sonlu elemanlar yönteminde, ray ve traversin dinamik tepki davranışları ve çökme değerleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Ray ile travers arasındaki elastik tabakadan dolayı ray ve traversin çökmesi aynı olmamaktadır ve çok az da olsa bir fark olmaktadır. Ayrıca frekans-dinamik tepki grafiklerinden traversin dinamik tepki davranışı ile rayın tepki davranışının birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür.

Rayın tepki grafiğinden yol, ray ve mesnet öz frekansları, travers tepki grafiğinden yol ve travers öz frekansları belirlenmiştir. Mesnet noktasında ray ve traversin dinamik tepki grafiğinde ilk pik değer yol öz frekansını, ikinci pik değer ise, ray ve travers öz frekansını göstermektedir. Ancak balastsız yol modeli için ray ve selet öz frekansı belirlenememektedir.

Analitik çözümde, sürekli mesnetli yol modeli olduğu için, tekerlek yükü mesnet üzerindedir. Nümerik çözümde ise, tekerlek yükü mesnet üstünde ve iki mesnet arasında ayrı ayrı uygulanarak dinamik tepkiler karşılaştırılmıştır. Tekerlek yükü iki travers ortasında uygulandığı zaman dinamik tepki grafiğinde ani pik yapan mesnet öz frekansı rahatlıkla bulunabilmektedir. Sürekli mesnetli modelde ise mesnet öz frekansının hesaplanması mümkün değildir. İki mesnet ortasında ray dinamik tepki grafiğinde iki pik değer görülmekte olup, ilk değer, yol öz frekansını ve ikinci pik değer mesnet öz frekansını göstermektedir.

Çizelge 4.10 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için dinamik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Travers üstünde tekerlek yükü		İki travers arasında tekerlek yükü	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastlı yol modeli	0,889	9,264	0,906	85,007
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	1,036	9,821	1,055	85,014
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	0,552	7,584	0,897	84,953
Travers tipi (B70W beton travers)	0,867	9,457	0,883	85,477
Ray tipi (UIC 60)	0,794	11,026	0,811	44,012
Travers aralığı (a=0.75m)	1,075	9,212	0,897	72,312
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	1,036	13,003	1,079	21,912

Balastlı yolun öz frekansları Çizelge 4.11'de gösterilmiştir ve elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Balastlı yol öz frekansı, zemin-balast tabaka rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Diğer yol parametrelerinin yol öz frekansına bir etkisi yoktur.
- Ray öz frekansı ve travers öz frekansı ray tipine, travers tipine, travers aralığına, ray altı elastik tabaka rijitliğine bağlı olarak değişmektedir. Zemin-balast tabaka rijitliğinin bir etkisi yoktur.
- Mesnet öz frekansı ray tipine, mesnet aralığına ve elastik tabaka tipine bağlı olarak değişmektedir. Zemin tipinin ve travers kütlesinin bir etkisi yoktur.

Çizelge 4.11 : Balastlı yol modeli ve farklı yol parametreleri için öz frekanslar.

Yol parametresi	Yol öz frekansı	Travers öz frekansı	Ray öz frekansı	Mesnet öz frekansı
Balastlı yol modeli	48 Hz	273 Hz	951 Hz	1128 Hz
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	36 Hz	270 Hz	951 Hz	1128 Hz
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	105 Hz	288 Hz	954 Hz	1128 Hz
Travers tipi (B70W beton travers)	48 Hz	252 Hz	936 Hz	1128 Hz
Ray tipi (UIC 60)	48 Hz	312 Hz	897 Hz	1278 Hz
Travers aralığı (a=0.75m)	48 Hz	303 Hz	744 Hz	744 Hz
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	48 Hz	255 Hz	270 Hz	1194 Hz

Nümerik analiz sonucu elde edilen dinamik tepki ve ray eğilme moment grafikleri sunulmuştur ve Ek B.1-B.28 grafiklerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Şekil B.1 ve Şekil B.2 balastlı yol modeli için sırasıyla mesnet noktasındaki ray-travers dinamik tepki grafiğini ve iki mesnet arasındaki ray dinamik tepki grafiğini göstermektedir. Her iki grafikteki ilk pik değer, yol öz frekansını göstermektedir. Şekil B.1'de ikinci pik değer ise, ray öz frekansı ve travers öz frekansını ve Şekil B.2'de ikinci pik değer mesnet öz frekansını ifade etmektedir. Bu öz frekanslarından en belirgin olanı çok düşük sönümlü olan ve çok keskin pik yapan mesnet öz frekansıdır. Maksimum dinamik tepki, genelde yol ve mesnet öz frekanslarında oluşmaktadır. Şekil B.3 ve B.4 ise mesnet noktasındaki ve iki mesnet arasındaki ray eğilme moment grafiğini göstermektedir. Benzer şekilde ray eğilme momenti yol, ray ve mesnet öz frekanslarında pik değerlere ulaşmaktadır.
- Şekil B.5 ve B.6 rijitlik katsayısı 19.17 $x10^6$ N/m olan zayıf zeminli balastlı yol için dinamik tepki grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerde maksimum dinamik tepki, yol modeline göre daha yüksek çıkmıştır. Şekil B.7 ve B.8 ise

ray eğilme moment grafiklerini göstermektedir ve yol modeline göre eğilme momentleri daha fazla olmaktadır.

- Şekil B.9 ve B10 rijitlik katsayısı 77.7 x 10^6 N/m olan rijit zeminli balastlı yol için dinamik tepki grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerde maksimum dinamik tepki, yol modeline göre daha düşük çıkmıştır. Zemin rijitliği yol öz frekansını değiştirmektedir ancak diğer öz frekanslar hemen hemen aynı kalmaktadır. Şekil B.11 ve B.12 ise ray eğilme moment grafiklerini göstermektedir ve yol modeline göre eğilme momentleri daha düşük olmaktadır.
- Şekil B.13 ve B.14, UIC 60 rayı içeren yol modeli için dinamik tepki grafiklerini göstermektedir. Daha ağır raydan dolayı maksimum dinamik tepki azalmıştır. Şekil B.15 ve B.16 ise ray eğilme moment grafiklerini göstermektedir ve bu grafiklere göre yol modeline göre eğilme momentleri daha yüksek çıkmıştır.
- B 70W monoblok beton traversli yol modelinin dinamik tepki grafikleri Şekil B.17 ve B.18'de ve ray eğilme momentleri Şekil B.19 ve B.20'de görülmektedir. Bu grafiklerde dinamik tepki ve ray eğilme momentlerinin yol modeline göre hemen hemen değişmediği görülmektedir.
- Daha geniş travers aralığı (0.75 m) için dinamik tepki grafikleri ve ray eğilme momentleri grafikleri sırasıyla Şekil B.21-22'de ve Şekil B.23-24'te görülmektedir. Travers aralığının artması dinamik tepkiyi yükseltirken, eğilme momentini düşürmektedir.
- Şekil B.25-B.26, Rp 3 ray altı elastik tabaka içeren yol modelinin dinamik tepki grafiklerini göstermektedir ve bu grafiklerde yol modeline göre çok sayıda pik değerin olduğu ve travers dinamik tepkisinin azaldığı görülmektedir. Sönüm ve rijitlik katsayısı düşük elastik tabaka için dinamik tepki davranışı çok fazla değişmekte ve rayın maksimum dinamik tepki değeri artmaktadır. Benzer şekilde Şekil B.27-B.28'de eğilme moment grafiklerinde çok sayıda pik değer görülmektedir.

4.2.2.2 Balastsız yol modeli için parametrik irdeleme

Balastsız yol modeli için frekans-ray eğilme moment grafikleri Ek B'de ve hesap sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir ve elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Harmonik tahrik yükü altında, ray çökmesi ve ray eğilme momenti önemli oranda artmaktadır. Balastsız yolun öz frekansları ile tahrik yükünün frekansı aynı olduğu zaman rezonans olayı ile birlikte dinamik etkiler de artmaktadır. Çizelge 4.8'deki statik değerlere göre karşılaştırıldığı zaman, ray çökmesi, yolun öz frekanslarında 8 kata ve ray eğilme momenti 3 kata varan oranda artmaktadır. Mesnet öz frekansında iki mesnet arasındaki ray eğilme momenti 9-10 kata varan oranlarda artmaktadır. Yol ve mesnet öz frekanslarında dinamik ray çökme ve ray eğilme momenti çok fazla artmaktadır.
- Tekerlek yükü mesnet üstünde olması ve iki mesnet arasında olmasına göre hesap sonuçları değişmektedir. İki mesnet arasında ray çökmesi yakın çıkarken, iki travers arasındaki dinamik ray eğilme momenti, mesnet üstündeki eğilme momentinden 7 kat daha fazla olmaktadır.
- Dinamik ray çökme ve eğilme momentini en çok etkileyen yol parametresi elastik tabaka tipi ve daha sonra selet aralığıdır.

Çizelge 4.12 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için dinamik hesap sonuçları.

Yol parametresi	Mesnet üstünde tekerlek yükü		İki mesnet arasında tekerlek yükü	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastsız yol modeli	3,047	12,691	3,218	78,215
Selet kütlesi (m=10 kg)	3,088	12,695	3,253	82,462
Selet aralığı (a=0.60m)	1,946	16,686	2,115	95,005
Elastik tabaka tipi (1403-N)	0,936	7,243	1,037	22,311

Balastsız yolun öz frekansları Çizelge 4.13'te gösterilmiştir ve elde edilen bazı önemli sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Balastsız yol öz frekansı selet aralığı ve selet altı elastik tabakaya bağlı olarak değişmektedir.

- Mesnet öz frekansı ray tipine, mesnet aralığına ve selet altı elastik tabaka tipine bağlı olarak değişmektedir. Selet kütlesinin bir etkisi yoktur.

Çizelge 4.13 : Balastsız yol modeli ve farklı yol parametreleri için öz frekanslar.

Yol parametresi	Yol öz frekansı	Mesnet öz frekansı
Balastsız yol modeli	216 Hz	756 Hz
Selet kütlesi (m=10 kg)	213 Hz	756 Hz
Selet aralığı (a=0,60 m)	246 Hz	1161 Hz
Elastik tabaka tipi (1403-N)	282 Hz	762 Hz

Nümerik analiz sonucu elde edilen dinamik tepki ve ray eğilme momenti grafikleri sunulmuştur ve Ek B.29-B.44 grafiklerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Balastsız yol modelinin dinamik tepki davranışı Şekil B.29-B.30'da sunulmuştur ve bu grafiklerde balastsız yol modelinin tek bir pik değeri olduğu ve ray ve seletin tepki eğrilerinin aynı olduğu görülmektedir. Şekil B.31-B.32, mesnet noktasındaki ve iki mesnet arasındaki ray eğilme momentlerini göstermektedir. Şekil B.31'de balastlı yol modeline göre çok farklı bir eğilme moment grafiği vardır, çünkü çok sayıda pik değer bulunmaktadır. Şekil B.32'de de çok sayıda pik değer bulunmakla birlikte mesnet öz frekansında rayın eğilme momenti belirgin şekilde çok fazla artmaktadır.
- Şekil B.33-34 daha ağır (10 kg) selet için benzer tepki grafiklerini göstermektedir. Şekil B.35-36'daki eğilme momentleri de balastsız yol modeli ile hemen hemen aynı değerlere sahiptir.
- Şekil B.37-38'e göre, daha rijit ama sönüm oranı daha yüksek (1403-N tipi) selet altı elastik tabaka için ray ve seletin dinamik tepki davranışı aynı değildir ve seletin tepkisi raya göre daha düşüktür. Yani ray ve selet, tekerlek yükü altında beraber hareket etmemekte ve ray selete göre daha fazla düşey deplasman yapmaktadır. Elastik tabakanın sönüm oranı daha fazla olduğu

için yol modeline göre ray ve seletin dinamik tepkisi azalmıştır. Aynı şekilde Şekil B.39-40'taki eğilme momentleri de daha düşük çıkmıştır.

- Daha dar (0.6 m.) selet aralığı için dinamik tepkinin azaldığı Şekil B.41-42 grafiklerinden ve eğilme momentinin ise arttığı Şekil B.43-44 grafiklerinden görülebilmektedir.

4.3 Analitik ve Nümerik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çift kirişli sürekli mesnetli analitik modelin ve sonlu eleman modelinin mesnet noktasındaki statik ve dinamik ray çökme ve ray eğilme moment sonuçları karşılaştırılmıştır. Nümerik hesaplamada, gerçek demiryolu yapısının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapıldığı için daha doğru sonuçlar vermektedir.

4.3.1 Statik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'te her iki modelin hesap sonuçları karşılaştırıldığı zaman, ray çökme değerleri arasında %99,5 oranında uyuşma olduğu görülmektedir. Ancak ray eğilme momentleri arasında önemli farklar bulunmaktadır. Zimmermann eğilme moment değerleri, sonlu elemanlar modeline göre %10-20 arasında daha fazla çıkmaktadır. Statik ray çökmesi için Zimmermann formülü güvenli sonuçlar verirken, eğilme momenti için daha doğru sonuçlar elde etmek için, sonlu elemanlar yönteminin kullanılması gereklidir.

Çizelge 4.14 : Balastlı yol modeli analitik ve nümerik statik analiz sonuçları.

Yol parametresi	Analitik Analiz		Nümerik Analiz	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastlı yol modeli	0,766	9,706	0,768	8,654
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	0,955	10,446	0,956	9,472
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	0,349	7,468	0,348	6,065
Travers tipi (B70W beton travers)	0,694	9,392	0,695	8,654
Ray tipi (UIC 60)	0,673	11,051	0,676	10,122
Travers aralığı (a=0.75 m)	0,905	10,261	0,904	8,410
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	0,952	10,434	0,954	9,459

Çizelge 4.15 : Balastsız yol modeli analitik ve nümerik statik analiz sonuçları.

Yol Parametresi	Analitik Analiz		Nümerik Analiz	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastsız yol modeli	0,373	7,635	0,366	5,500
Selet kütlesi (m=10 kg)	0,373	7,635	0,366	5,500
Selet aralığı (a=0.60m)	0,315	7,220	0,314	5,765
Elastik tabaka tipi (1403-N)	0,243	6,624	0,234	4,196

4.3.2 Dinamik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Aynı yol modellerinin analitik ve nümerik dinamik hesap sonuçları arasında farklar vardır. Genel olarak, ray çökmesi için nümerik hesap sonuçları, analitik hesap sonuçlarından balastlı yolda %4-8 oranında, balastsız yolda %70-110 oranında daha fazla çıkmıştır, buna karşın dinamik ray eğilme momenti analitik analizde balastlı yolda %10-15 oranında, balastsız yolda %70-110 oranında daha fazla çıkmıştır, (Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17).

Farklı yol parametreleri ile analitik ve nümerik çözümlerde benzer ilişkiler elde edilmiştir. Ancak analitik hesapta, yol rijitliği ve mesnet aralığı ile ray eğilme momenti arasında doğru orantı varken, nümerik hesapta ters orantı çıkmıştır. Nümerik hesapta, statik hesapta beklendiği gibi yol rijitliği ile ray eğilme momenti arasında ters orantı çıkmıştır, yani yol rijitliği azaldıkça dinamik yol çökmesi ile birlikte ray eğilme momenti artmaktadır. Mesnet aralığı azaldıkça daha rijit bir yol çerçevesi elde edilmekte ve buna bağlı olarak ray çökmesi azalmakta ve ray eğilme momenti ise artmaktadır. Analitik hesapta ise sürekli mesnetli yol modeli olduğu için, rijitlik katsayısı mesnet aralığına bölünerek hesaba katılmaktadır. Bu nedenle mesnet aralığı ile rijitlik katsayısı arasında ters orantı ve ray eğilme momenti ile doğru orantı vardır. Nümerik hesaplamada, gerçek demiryolu yapısının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapıldığı için daha doğru sonuçlar vermektedir.

Çizelge 4.16 : Balastlı yol modeli analitik ve nümerik dinamik analiz sonuçları.

Yol parametresi	Analitik Analiz		Nümerik Analiz	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastlı yol modeli	0,844	10,690	0,889	9,264
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=19.17x10^6$ N/m)	0,990	10,826	1,036	9,821
Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı ($k=77.7x10^6$ N/m)	0,519	11,101	0,552	7,584
Travers tipi (B70W beton travers)	0,832	11,265	0,867	9,457
Ray tipi (UIC 60)	0,741	12,172	0,794	11,026
Travers aralığı (a=0.75m)	0,997	11,303	1,075	9,212
Ray altı elastik tabaka tipi (Rp 3)	1,465	16,068	1,036	13,003

Çizelge 4.17 : Balastsız yol modeli analitik ve nümerik dinamik analiz sonuçları.

Yol parametresi	Analitik Analiz		Nümerik Analiz	
	y (mm)	M (kNm)	y (mm)	M (kNm)
Balastsız yol modeli	1,437	29,433	3,047	12,691
Selet kütlesi (m=10 kg)	1,559	31,935	3,088	12,695
Selet aralığı (a=0.60m)	1,214	27,808	1,946	16,686
Elastik tabaka tipi (1403-N)	0,468	12,730	0,936	7,243

5. ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, sahada yapılan zemin etüdleri ve titreşim ölçümleri açıklanmıştır. Bu çalışma için Aksaray-Havalimanı raylı sistemi seçilmiştir.

5.1 bölümünde taşıtlardan kaynaklanan düşey yönlü ray deplasman ve titreşim ivme ölçümleri açıklanmıştır. 5.2 bölümünde, çekiç darbe testi ile tespit edilen yolun doğal titreşim davranışı açıklanmıştır. 5.3 bölümünde yolculuk konforuna yönelik taşıt içinde titreşim ivme ölçümleri açıklanmıştır.

5.1 Taşıtlardan Kaynaklanan Düşey Yönlü Ray Titreşimlerinin Ölçülmesi

5.1.1 Amaç ve kapsam

Bu çalışmanın amacı, Aksaray-Havalimanı arasında çalışmakta olan metro raylı toplu taşıma sisteminde ray-taşıt kaynaklı oluşan titreşimlerin ölçülmesi ve değerlendirilmesidir.

Bu çalışmada tornalama kilometre değerlerine göre üç farklı taşıt dizisi oluşturulmuştur. Her bir taşıt dizisi, periyodik bakım zamanları birbirine çok yakın dört taşıttan oluşacak şekilde oluşturulmuş ve ölçüm noktalarından farklı hızlarda geçmeleri sağlanmıştır. Ölçümlerin sağlıklı ve güvenli olarak yapılabilmesi için ölçümler taşıt seferlerinin sona erdiği saat 00:40'dan sonra yapılmıştır. Bu sayede taşıt dizilerinin istenilen hızlarda geçmeleri ve ayrıca taşıtlar yolcusuz olduğu için tüm aks yüklerinin sabit olması sağlanmıştır.

Taşıtların bakım periyodu 100.000 km'dir. Bakımda taşıtların tekerlekleri tornalanarak yüzey profilleri düzeltilmektedir. Tekerleğin kat ettiği mesafe arttıkça, tekerlek profili zamanla bozulmaktadır. İvmelenme, frenleme, patinaj gibi hareketler tekerlek bandajında aplati denilen düzleşmelere neden olmaktadır, ayrıca ray yuvarlanma yüzeyindeki süreksizlikler (cebireli ray contaları, ray kırıkları, makas göbek geçişleri) ve bozukluklar tekerlek yuvarlanma yüzeyi profilinin bozulmasına neden olur. Bu nedenle tekerlek profillerinin orijinal profili periyodik tornalama ile yeniden sağlanır.

Ölçümler için kullanılan 3 farklı taşıt dizisinin özellikleri Çizelge 5.1'de özetlenmiştir. Bir metro dizisi dört taşıttan ve her bir taşıt ise üç bojiden oluşmaktadır. Metro dizileri oluşturulurken tekerleklerin bakıma kalan kilometrelerinin yakın olanları seçilerek, uygun diziler oluşturulmaya çalışılmıştır. Çizelge 5.1'den görüleceği gibi; 1. Metro dizisi, bakımdan yeni çıkmış taşıtlardan oluşmaktadır. Bu bakımdan, tekerlek yüzeyi üzerinde oluşan form bozukluklarının en az olduğu veya hiç bulunmadığı kabul edilebilir. 2. Metro dizisi, bakım periyodunun ortalarında bulunan taşıtlardan oluşmaktadır. Bu dizide bulunan taşıtlarda tekerlek yüzeyleri üzerinde oluşan form bozukluklarının başladığı ve ilerlediği kabul edilmektedir. Şüphesiz, tekerlek yüzeylerinde oluşan geometrik bozuklukların artışı kat edilen kilometre ile artmaktadır, ancak bunların kat edilen kilometre ile doğru orantılı olarak arttıklarına dair bir veri yoktur. 3. Metro dizisi, tekerlek yüzeylerinde oluşan geometrik bozukluklar bakımında ölçüm trenleri içerisinde en kötü durumda olanıdır. Bu dizide bulunan taşıtlardan tamamı bakım periyodunu tamamlamış veya tamamlamak üzere olanlardan seçilmiştir. Bu dizide bulunan taşıtlarda tekerlek yüzeyleri üzerinde oluşan form bozukluklarının en ileri düzeyde olduğu kabul edilmektedir.

2. ölçümler için seçilen 1. metro dizisindeki tekerlek çapları 650-671 mm arasındadır. Tekerlek çapları 600 mm'ye düştüğü zaman değiştirilmektedir. Bu açıdan, 1.metro dizisindeki tekerlekler yarı ömre yaklaşmıştır. Tornalama kilometreleri bakımından uygun bir dizi olarak görülse de, tekerlek çaplarının düşük olması ölçüm sonuçlarını çok değiştirdiği için değerlendirmeye alınmamıştır. Tekerlek çap durumu, tornalama kilometresine göre titreşimleri daha fazla etkilediği anlaşılmıştır.

Ölçümler, Aksaray-Havalimanı yönünde gidiş için kullanılan ve İstanbul Ulaşım A.Ş. tarafından 2 nolu yol olarak isimlendirilen yol üzerinde ve iç rayda yapılmıştır.

Titreşim ölçümleri iki farklı zamanda yapılmıştır. 14 Ağustos 2005 Perşembe günü 01:00-05:00 saatleri arasında yapılan birinci ölçümlerde, üstyapı tipinin (balastlı ve balastsız yol kısımlarında), tekerleğin kat ettiği kilometreye bağlı olarak tekerlek profil bozukluğunun, altyapı durumunun (tabii zemin veya beton zemin) ve taşıt hızının titreşimlere etkileri araştırılmıştır. Daha sonra, bakım çalışmalarının ve iyileştirme çalışmalarının titreşimleri ne kadar azalttığı incelenmiştir. Bakım çalışması olarak ray taşlama çalışması öncesinde ve sonrasında ray titreşimleri

ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Taşlama sonrası ölçümler 30 Kasım 2005 Cuma günü 23:00-24:00 saatleri arasında yapılmıştır. İyileştirme çalışması olarak kullanılan daha elastik ray bağlantı sistemlerinin titreşimlere etkileri incelenmiştir.

Çizelge 5.1 : Metro dizilerinin tekerlek çap ve torna kilometre değerleri.

1.Ölçümler												
	1.Metro dizisi				2.Metro dizisi				3.Metro dizisi			
Taşıt No	567	104	522	539	541	125	132	569	561	107	131	555
Bakıma kalan mesafe (km)	94.519	94.588	84.203	87.869	67.984	53.768	46.202	42.907	9.790	18.977	4.435	1.280
Tekerlek çapı (mm)	672	680	680	673	680	680	680	680	680	680	680	680
2.Ölçümler												
	1.Metro dizisi				2.Metro dizisi				3.Metro dizisi			
Taşıt No	559	126	124	569	516	116	104	544	543	132	528	570
Bakıma kalan mesafe (km)	93.669	95.934	99.998	95.344	51.741	53.313	53.647	46.858	5.477	10.288	7.104	207
Tekerlek çapı (mm)	650	671	665	671	680	680	680	680	670	680	675	677

Çizelge 5.2 : Titreşim ölçüm noktaları.

Bölge	Taşıt hızı (km/sa)	Zemin durumu
Emniyet-Ulubatlı istasyonları arasında, 2.yol, Km 1+445	30	Beton üstünde balastlı yol
Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arasında, 2.yol, Km 2+510	30 ve 60	Tabii zemin üstünde balastlı yol
Bayrampaşa-Sağmalcılar istasyonları arasında, 2.yol, Km 4+033	30 ve 60	Tabii zemin üstünde balastlı yol
Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arasında, 2.yol, Km 5+555	60	Tabii zemin üstünde balastlı yol
Yenibosna-DTM istasyonları arasında, 2.yol, Km 9+875	30 ve 60	Balastsız yol

Bu ölçüm noktalarından sadece Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arasında kısa dalga boylu ondülasyonlar bulunmaktadır. Bu bölgede yarıçapı 275 m. olan kurbun iç rayında 0.57 mm derinlikte ve 6 cm dalga boyunda ondülasyon vardır. Genelde bir çok metro hattında olduğu gibi, İstanbul metro hattında da ondülasyon çok ciddi bir sorundur. Özellikle dar kurpların iç rayında oluşan ondülasyon hem gürültüyü hem de dinamik yükleri çok artırmaktadır. 17 Ekim 2005 tarihinde, İstanbul metro hattı yakınında ray taşlama öncesi ölçülen ondülasyon kaynaklı eşdeğer gürültü düzeyine 60 dBA iken, taşlama sonrasında bu değer 44 dBA'ya düşmüştür. Ondülasyon derinliği arttıkça, travers altında gizli boşluklar artmakta ve artan gizli boşluklar da yeniden ondülasyon oluşumunu hızlandırmaktadır.

Daha elastik ray bağlantı sistemleri ile iyileştirme çalışması Otogar-Esenler arasında 225 m yarıçaplı kurbun bir kısmında denenmiştir. Bu kısımda, ray altına elastik tabaka ilave edilmiştir. Yapılan bu iyileştirmelerin titreşime etkisini incelemek için aynı noktalarda ölçümler tekrarlanmıştır.

Balastlı metro hattında ray ile monoblok beton travers arasında rijitlik katsayısı $500x10^6$ N/m olan EVA ray altı elastik tabaka bulunmaktadır. Yeni E14 elastik sistemde ray ile beton travers arasında rijitlik katsayısı $15x10^6$ N/m olan elastik bir tabaka ve çelik selet ilave edilmektedir. Çift kütle (ray ve çelik selet)-çift yay sistemi titreşimleri önemli oranda azalttığı kabul edilmektedir. 25.02.2006 tarihinde Otogar-Esenler arasında işletme sırasında yolculu taşıtlar geçerken rayın düşey titreşimleri

ölçülmüştür. Yeni elastik ray bağlantılı kısımda bir nokta ve eski ray bağlantılı kısımda bir nokta olmak üzere iki ayrı ölçüm noktası belirlenmiştir. Belli bir taşıt dizisi 40 km/saat sabit hızla geçerken ölçümler tekrarlanmıştır.

5.1.2 Ölçüm yöntemi

Ölçümler için, Brüel&Kjaer PULSE ölçüm sistemi, titreşim sinyallerini kuvvetlendirmek için bir sinyal yükseltici ve bir ivme ölçer kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilmiş ve analizleri yapılmıştır.

Ölçümler, Çizelge 5.2'de listelenen noktalarda iki traversin tam orta noktasında rayların alt kısmına manyetik olarak yapıştırılan ivme ölçer ile düşey doğrultularda yapılmıştır. Ölçümlerde seçilen noktalarda, düşey doğrultuda titreşim sinyallerinin, taşıt dizisinin ölçüm noktasına ulaşmasına takiben, 10 sn süreyle yer değiştirmelerinin zamanla değişimleri ve aynı zamanda söz konusu titreşim sinyallerinin 1500 Hz'e kadar ivme değerlerinin FFT analizleri yapılmıştır.

5.1.3 Ölçümlerin değerlendirilmesi

Emniyet ve Ulubatlı istasyonları arasında, aç-kapa tünelin içinde, ölçüm noktasında 1, 2 ve 3.nolu metro dizileri sırasıyla 30 km/saat hızla geçerken yapılan deplasman ve ivme ölçümleri sırasıyla Şekil C.1, C.2 ve C.3'de gösterilmiştir. Ölçümlerde, ivme değerleri 100 Hz ile 1500 Hz frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Maksimum ray ivmesi 30 km/saat hızda 4,5 ila 6,5 m/s^2 dolayındadır ve maksimum ray deplasmanı her üç metro dizisi için 0,17 mm dir.

Ulubatlı ve Bayrampaşa istasyonları arasında ölçüm noktasında metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken yapılan deplasman ölçüm sonuçları Şekil C.4 ve C.5'te ve ivme ölçüm sonuçları Şekil C.6'da gösterilmiştir. Ölçümlerde, ivme değerleri 600 Hz ile 1000 Hz frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Maksimum ray ivmesi 30 km/saat hızda 1,2 ila 1,8 m/s^2 dolayında iken, 60 km/saat hızda 4 ila 13 m/s^2'ye çıkmıştır. Maksimum ray deplasmanı 30 km/saat hızda 0,15 mm dolayında iken, 60 km/saat hızda 0,2 mm'ye çıkmıştır.

Bayrampaşa ve Sağmalcılar istasyonları arasında ölçüm noktasında metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken yapılan deplasman ölçüm sonuçları Şekil C.7 ve C.8'de ve ivme ölçüm sonuçları Şekil C.9'da gösterilmiştir. Ölçümlerde, 1. nolu ve 3.nolu metro dizileri için ivme değerleri 450 ile 900 Hz frekans aralığında ve 2.nolu metro

dizisi için 1200 ile 1500 Hz frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Maksimum ray deplasmanı 30 km/saat hızda 0,1 mm dolayında iken, 60 km/saat hızda 0,6-0,8 mm'ye çıkmıştır. Maksimum ray ivmesi 30 km/saat hızda 0,45 ila 1,4 m/s^2 dolayında iken, 60 km/saat hızda 5 ila 20 m/s^2 dolayına çıkmıştır. Ancak 1.nolu metro dizisi için diğerlerinin aksine hız artışı karşın, ray ivmesinin 0.45 m/s^2'den 0.4 m/s^2'ye dştüğü görülmüştür. Ölçüm sonuçları arasındaki farkların hangi nedenlerden kaynaklandığına dair bir neticeye ulaşılamamıştır.

Yenibosna ve DTM (Dünya Ticaret Merkezi) istasyonları arasında ölçüm noktasında metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken yapılan deplasman ölçüm sonuçları Şekil C.10 ve C.11'de ve ivme ölçüm sonuçları Şekil C.12'de gösterilmiştir. Ölçümlerde, ivme değerleri 50 Hz ile 1500 Hz frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Maksimum ray deplasmanı 30 km/saat hızda 0,15 mm dolayında iken, 60 km/saat hızda 0,2-0,4 mm'ye çıkmıştır. Maksimum ray ivmesi 30 km/saat hızda 0,8 ila 1,6 m/s^2 dolayında iken, 60 km/saat hızda 4-4,8 m/s^2 olmuştur.

Sağmalcılar ve Kartaltepe istasyonları arasında ölçüm noktasında 2.nolu ve 3.nolu metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken taşlama öncesinde ve taşlama sonrasında yapılan ray deplasman ölçüm sonuçları Şekil C.13 ve C.14'te ve titreşim ivme ölçüm sonuçları Şekil C.15'te gösterilmiştir. Ölçümlerde, ivme değerleri 1000 Hz ile 1500 Hz frekans aralığında yoğunlaşmaktadır. Ondülasyonlar taşlandıktan sonra, rayın ivme değerleri ve yer değiştirmeleri ciddi oranda azalmıştır. Taşlama öncesinde maksimum ray ivmesi 12 ila 24 m/s^2 ve maksimum ray deplasmanı 26 ila 29 mm mertebelerinde iken, taşlama sonrasında aynı değerler 2 ila 9 m/s^2 ve 0,1 ila 0,2 mm mertebelerine düşmüştür.

Titreşim ivme grafiğinde bazı frekanslarda pik değerler görülmektedir. 80, 114, 405, 420, 580, 640, 650, 670, 730, 745, 780, 800, 980 Hz frekanslarda ivme değerlerinin artmasının nedeni bu tahrik frekansların yolun öz frekansları ile çakışması ile açıklanabilir.

Otogar-Esenler arasında bulunan ölçüm sonuçları Şekil C.16'da gösterilmiştir. Şekilde titreşim ivmeleri 6 Hz ve 14 Hz frekanslarında pik değerlere ulaşmaktadır. Bu frekanslar taşıtın tahrik frekanslarını oluşturmaktadır. 40 km/saat (11,1 m/sn) hızla giden aracın dingil (dingil aralığı 1.8m) geçiş frekansı 6 Hz ve travers geçiş frekansı 14 Hz olmaktadır. Bu tahrik frekansların yapısal öz frekanslarla rezonansa geçmesi nedeniyle titreşimlerin arttığı anlaşılmaktadır. Şekil C.16 (a)'da 110 Hz

frekanstan sonra elastik ray bağlantı olan bölgede titreşim ivmelerinin daha az olduğu görülmektedir. Şekil C.16 (b)'de 6 Hz frekansta eski ray bağlantı sisteminin olduğu bölgede titreşim hızı 2,75 mm/sn iken, elastik ray bağlantı bölgesinde bu değerin 1,14 mm/sn'ye düştüğü görülmektedir. Elastik ray bağlantı sisteminin rayın düşey yöndeki titreşimlerini önemli ölçüde azalttığı anlaşılmaktadır.

5.1.4 Sonuçlar

Ölçümlerle ilgili elde edilen bazı sonuçlar şunlardır:

- Taşıt hızının 30 km/saat'ten 60 km/saat değerine artması titreşim ivmelerini ve deplasmanlarını yaklaşık 3-4 kat artırmaktadır.
- 2. ve 3.nolu taşıt dizilerinin neden olduğu titreşim ivmeleri, 1.nolu araca göre daha fazladır. Tekerleklerin kat ettikleri mesafe arttıkça titreşimler de artmaktadır, ancak kilometre değeri ile titreşim ivmeleri arasında doğrusal bir ilişki yoktur.
- Tabii zemin üstündeki balastlı yol kısımlarındaki (Şekil C.4-C.9'da gösterilen Sağmalcılar-Bayrampaşa arası ve Ulubatlı-Bayrampaşa arasındaki ölçümlerde) ivme ve yer değiştirme değerleri balastsız yol kısmındaki (Şekil C.10-C.12'de gösterilen Yenibosna ve DTM istasyonları arasındaki ölçümlerde) değerlere yakın çıkmıştır. Ancak, beton zemin üstündeki balastlı yol kısmında (Şekil C.1-C.3'te gösterilen Emniyet-Ulubatlı arasındaki ölçümlerde) titreşim ivme ve yer değiştirme sonuçları daha fazla çıkmıştır. Bu ölçüm sonuçlarına göre, kaya ve beton gibi rijit zeminler ray titreşimlerini artırmaktadır.
- Sağmacılar-Kartaltepe istasyonları arasında ray mantarındaki ondülasyonlar ray titreşim ivmelerini ve yer değiştirmelerini çok fazla artırmıştır. Ancak, Şekil C.13-C15'te görüldüğü gibi, ray taşlama sonrasında bu değerler önemli oranda azalmıştır.
- Şekil C.16'da görüldüğü gibi, Otogar-Esenler istasyonları arasında yapılan ölçümlerde 6 Hz ve 14 Hz frekanslarda titreşimlerde pik değerlerin görülmesi, bu frekansların taşıt tahrik frekansları olması ve bu frekanslarda rezonans olayının gerçekleşmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, diğer bölgelerdeki

titreşim ölçümlerinde genelde bazı frekanslarda pik değerler görülmüştür. Bu frekanslarda aracın tahrik frekansları yolun öz frekansları ile çakışmaktadır.

- Şekil C.16'da görüldüğü gibi, Otogar-Esenler istasyonları arasında elastik ray bağlantı sistemlerinin montajından sonra titreşimler yarı yarıya azalmıştır.

5.2 Çekiç Darbe Testi İle Demiryolunun Doğal Titreşim Frekanslarının Ölçülmesi

5.2.1 Amaç ve kapsam

Bu çalışmanın amacı, demiryolunun öz frekanslarını ve dinamik tepki davranışını tespit etmektir. Ayrıca ölçüm sonuçlarına göre sonlu eleman modelini doğrulamaktır. Balastlı ve balastsız yol modelinde elastik tabakaların ve balast tabakasının dinamik özellikleri bilinmediği için bazı kabuller yapılmıştır. Daha sonra arazide ray mantarına çekiç darbe yükü uygulanarak rayın ve mesnetin (çelik selet veya beton travers) dinamik tepki davranışı ölçülmüştür.

Bir demiryolunun tepki davranışını belirlemek için, ray üstüne yük uygulanır ve bu yük altında ray ve traversteki yer değiştirme ölçülür. Yük ve titreşim sensörleri ile frekansa bağlı olarak uygulanan yük ve ivme verileri elde edilir. Sonra bu verilerin Fourier dönüşümleri ile yolun yer değiştirmesinin yüke oranı olan tepki fonksiyonları bulunur. Frekans tepki fonksiyonları yol yapısının rijitlik özelliğini gösterir. Demiryolunun tepki fonksiyonu bulunurken, taşıt yükünden bağımsız olduğu kabul edilir. Yani, yolun rijitlik ve sönüm özelliklerinin taşıt yükünden bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Ancak, Almanya'da yapılan ölçümlerde tren yükünün yolun rijitliğini ve sönümünü artırdığı sonucuna varılmıştır. 1991 yılında Berlin Teknik Üniversitesi balastlı bir yolda statik tren yükü ile yüklenmiş ve yüklenmemiş yol için ayrı ayrı tepkileri ölçmüştür. Öz frekanslar çok değişmemekle birlikte ön yüksüz durumda iken, maksimum tepki değerlerinin yüklü duruma göre %10-20 daha fazla çıktığı görülmüştür, (Auersch, 2005b).

Yük, 200 Hz frekansa kadar hidrolik pistonla sinüsoidal bir şekilde uygulanırken, daha yüksek frekanslar için çekiç darbe yükü uygulanır. Çekiç darbe testi, yol yapısını veya numuneyi titreştirmeyi amaçlar. Belli bir yönde ve belli bir noktada uygulanan darbe yükü kısa bir süre için yapının dengesini bozar. Yükün süresi ve büyüklüğü tüm frekans aralığında darbe enerjisinin dağılımını belirler. Ayrıca çekiç

ile yapı arasındaki temas yüzeyi ve çekiç ucunun bu dağılımda bir rolü vardır. Çekiç darbesi data kaydının başlamasına neden olur ve titreşim durup, denge konumu tekrar oluşana kadar kayıt devam eder. Titreşimler bir veya daha fazla ivme ölçerle kaydedilir.

İvme ve yük ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini ve güvenirliliğini ölçmek için koheransına (tutarlılığına) bakılır. Eğer koherans değeri 1'e yakın ise iyi bir koherans, eğer 0-0,8 arasında ise koheransın iyi olmadığı yani sonuçların kullanılmasının uygun olmadığı anlaşılır. Rezonans frekansları normalde 1'e çok yakın korelasyon değeri verir, anti-rezonans frekansları genelde sıfıra yakın korelasyon verir. 40 Hz'in altında küçük çekiç testi, 1400 Hz üstünde büyük çekiç testi yetersiz korelasyon verir.

5.2.2 Ölçüm yöntemi

Ölçümler için, Brüel&Kjaer PULSE çok kanallı ölçüm sistemi, Dytran 5803 A Sledge Hammer darbe çekici ve kuvvet sensörü ve Brüel&Kjaer Tip 4396 ivme ölçer kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri bir bilgisayar yardımıyla kaydedilmiş ve analizleri yapılmıştır.

Ölçümler, Çizelge 5.3'te listelenen noktalarda rayların alt kısmına, seletin ve traversin üst kısmına manyetik olarak yapıştırılan ivme ölçer ile düşey doğrultularda kaydedilmiştir.

Ölçümlerde her çekiç darbesinde koherans grafiği incelenmiş ve eğer uygun koherans değeri yakalandıysa titreşim tepki davranışı kaydedilmiş, uygun değer yakalanmadı ise uygun koherans değerleri elde edilene kadar darbe denemeleri tekrarlanmıştır. Ölçümler büyük çekiç ile 0-1600 Hz frekans aralığında yapılmıştır.

Ölçümler, trenden kaynaklanan tahrik titreşimlerinin olmaması için işletme seferlerinin olmadığı 01.00-05.00 saatlerinde yapılmıştır. Balastsız yolda ölçümler 21.07.2007 tarihinde, balastlı yolda ise 03.08.2007 tarihinde yapılmıştır. Ölçümlerle ilgili bazı resimler Şekil 5.1-5.3'te gösterilmiştir. Ölçüm noktaları balastsız yol için Şekil 5.4'te ve balastlı yol için Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : Aksaray-Havalimanı metro hattı titreşim ölçüm noktaları.

Bölge	Hat üstyapısı
DTM istasyonu önü, 2.yol, Km 10+190	Çelik seletli balastsız hat, mesnet aralığı a=0.75 m
Bahçelievler istasyonu önü, 2.yol, Km 7+000	Beton zeminli, beton traversli balastlı hat, mesnet aralığı a=0.75 m
Esenler-Otogar istasyonları arası, Km 7+920	Beton zeminli, ahşap traversli balastlı hat, mesnet aralığı a=0.65 m
Bakırköy-Zeytinburnu arası 2.yol, Km 5+510	Tabii zeminli, beton traversli balastlı hat, mesnet aralığı a=0.75 m



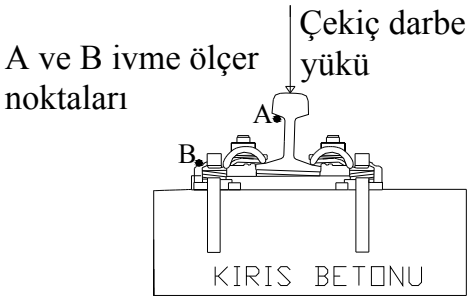
Şekil 5.1 : Balastsız yolda çekiç darbe testi.



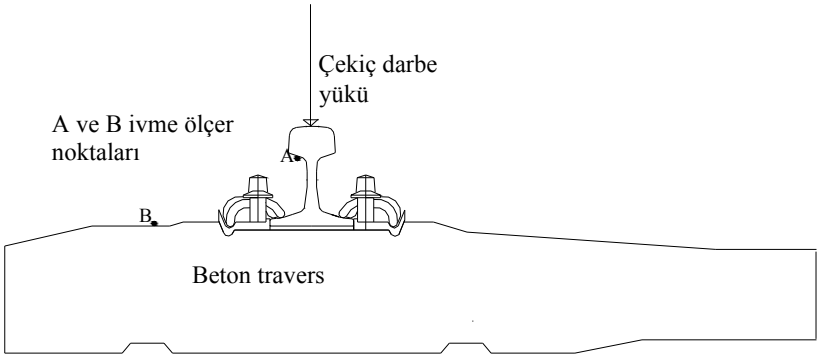
Şekil 5.2 : Balastlı yolda mesnet noktasında çekiç darbe testi.



Şekil 5.3 : Balastlı yolda iki mesnet ortasında çekiç darbe testi.



Şekil 5.4 : Balastsız Yolda Ölçüm Noktaları



Şekil 5.5 : Balastlı yolda ölçüm noktaları.

5.2.3 Ölçüm sonuçları

Balastlı ve balastsız hatlarda ray ve mesnetin (çelik selet/beton travers) frekans tepki grafikleri ve koherans (tutarlılık) grafikleri Ek D'de verilmiştir. Şekil D.1 ve D.2'de balastsız yolda sırasıyla ölçümün ve doğrulanmış modelin dinamik tepki grafikleri verilmiştir. Şekil D.3 ve D.4'te Esenler depo sahasında tabii zeminli balastlı yolun sırasıyla ölçümün ve doğrulanmış modelin dinamik tepki grafikleri verilmiştir. Şekil D.5 ve D.6'da aynı yol için iki mesnet arasında ölçüm ve doğrulanmış modelin dinamik tepki grafikleri verilmiştir. Şekil D.7 ve D.8 Otogar-Esenler istasyonları

arasında beton zeminli ve ahşap traversli yolda mesnet noktasında ve iki mesnet arasında ölçülen dinamik tepki grafikleri verilmiştir. Şekil D.9 ve D.10 Bahçelievler istasyonunda beton zeminli ve beton traversli yolda mesnet noktasında ve iki mesnet arasında ölçülen dinamik tepki grafikleri verilmiştir. Şekil D.11 balastsız yolda ve Şekil D.12 Bahçelievler istasyonunda balastlı yolda ray altında elastik tabaka yokken yapılan ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Şekil D.13'te Bahçelievler istasyonunda balastlı yolda ray altında yeni elastik tabaka varken yapılan ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Şekil D.14-D.23 arasında ölçümlerin koherans grafikleri verilmiştir. Genelde 0-20 Hz arasında ölçüm sonuçları koherans değeri düşük olduğu için kabul edilemez. Ayrıca bazı frekans aralıkları için koherans değerlerinin 0,8'den düşük olması nedeniyle kabul edilemeyeceği düşünülmektedir. Mesela Şekil D.16'da 1200 Hz üstünde koherans uygun olmadığı için dinamik tepki sonuçlarının hatalı olduğu kabul edilmiş ve Şekil D.13 grafiğinden çıkartılmıştır. Grafiklerden yolun ve rayın öz frekansları elde edilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir. Ayrıca ray elastik tabakanın öz frekanslara etkisi ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Aksaray-Havalimanı metro hattı öz frekans ölçüm değerleri.

Üstyapı tipi	Öz frekans		
	Yol öz frekansı (Hz)	Ray öz frekansı (Hz)	Mesnet öz frekansı (Hz)
Çelik seletli balastsız yol	210	-	Ölçülmedi
Beton zeminli balastlı yol (a=0.65m)	48	241	845
Beton zeminli balastlı yol (a=0.75m)	92	283	729
Tabii zeminli balastlı yol (a=0.75m)	100	640	674

Çizelge 5.5 : Ray altı elastik tabakanın yol öz frekansına etkisi.

Üstyapı tipi	Ray altı elastik tabaka	Öz frekans	
		Yol öz frekansı (Hz)	Ray öz frekansı (Hz)
Çelik seletli balastsız yol	Mevcut	210	-
	Yerinden çıkartıldı	144	-
Beton zeminli balastlı yol	Mevcut	92	283
	Yerinden çıkartıldı	63	1299
	Yeni tabaka ile değiştirildi	70	557

Ölçüm sonuçlarına göre;

- Şekil D.1'de görüldüğü gibi, çelik seletli balastsız yolun dinamik tepki grafiğinde tek bir pik değer görülmektedir ve bu değer yol öz frekansının ifade etmektedir. Ray öz frekansı belirgin olmadığı için tespit edilmesi çok zordur.
- Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi, beton zeminli balastlı yolda iki ayrı noktada (Esenler-Otogar arasında ve Bahçelievler istasyonunda) ölçüm yapılmış ve öz frekanslar farklı çıkmıştır. İki ölçüm noktası arasında görünen fark, travers tipi (beton veya ahşap) ve travers aralığının farklı olmasıdır. Ancak Şekil D.3, Şekil D.7 ve Şekil D.9'daki dinamik tepki davranışının farklı çıkmasının en önemli nedeni görünmeyen bir çok değişken parametrenin olmasıdır. Bu parametreler bağlantı eleman ve balast sıkılığı, değişken zemin karakteristiği, balast granülometrisi, balast tabaka kalınlığı, drenaj kalitesi gibi değişken parametrelerdir.
- Mesnet öz frekansını belirleyen en önemli faktör mesnet aralığıdır. Beton zeminli yolda farklı mesnet aralığı için mesnet öz frekansı da farklı çıkmıştır. Ancak Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi, aynı ray ve aynı mesnet aralığı (0.75m) için mesnet öz frekanslarının 729 Hz ve 674 Hz gibi farklı çıkmasından, balast-zemin tabakasının da sonucu etkilediği anlaşılmaktadır. Mesnet öz

frekansları Şekil D.5, Şekil D.8 ve Şekil D.10'da iki mesnet arasındaki dinamik tepki grafiklerinden elde edilmektedir.

- Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi, balastsız yolda ray altındaki esnek tabaka çıkartılarak yapılan ölçümde yol öz frekansının azaldığı tespit edilmiştir.
- Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi, beton zeminli balastlı yolda mevcut ray altı elastik tabakanın çıkartılması ve yeni tabaka eklenmesi durumunda yol ve ray öz frekansları çok farklı çıkmıştır.
- Şekil D.13'te görüldüğü gibi Bahçelievler istasyonunda beton zeminli balastlı yolda yeni ray altı elastik tabaka dinamik tepki değerini yani rayın çökme miktarını yaklaşık %35 arttırmıştır. Çünkü eski ray altı elastik tabaka zaman içinde sertleşmekte ve rijitlik katsayısı artmaktadır. Rijitlik katsayısı daha düşük olan yeni ray altı tabaka ray çökmesini de artırmaktadır. Ancak Şekil D.11'de balastsız yol için ve Şekil D.12'de balastlı yol için görüldüğü gibi ray altı tabaka yerinden çıkarıldığı zaman ray ile travers arasında boşluk kaldığı için, rayın dinamik tepkisi 6-8 kat gibi çok artmıştır. Bu durum demiryolu koruyucu bakımın önemini göstermektedir. Periyodik olarak yapılan kontrollerde eksik ray elastik tabaka veya bağlantı elemanın tamamlanması üstyapıya gelen dinamik yükleri azaltmak için önemlidir.

5.2.4 Ölçüm sonuçlarına göre nümerik modelin doğrulanması

Balastlı ve balastsız yol modelleri için elastik tabakaların dinamik özellikleri haricindeki diğer parametreler bilinmektedir. Ancak balast ve ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayı ve sönüm oranları bilinmemektedir. Sonlu eleman modelimizdeki ray altı elastik tabakanın ve balast tabakasının rijitlik katsayısı ve sönüm oranı değerleri değiştirilerek, ölçülen öz frekans değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Modelin öz frekansı ile ölçülen öz frekansın hemen hemen aynı olması için en uygun rijitlik ve sönüm parametreleri belirlenmiştir. Çelik seletli balastsız hat ve tabii zeminli balastlı hat için sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır. Doğrulanmış modelin öz frekansları ve maksimum dinamik tepki katsayıları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Doğrulanmış modellerin yol parametreleri Çizelge D.1 ve D.2'de verilmiştir.

Arazi ölçüm sonuçlarına göre sonlu elemanlar modelinin doğrulanması ile Çizelge 5.6'dan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Balastsız yol için ölçüm sonuçları ile çok uyumlu bir sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Öz frekans ve dinamik tepki değerleri çok yakın çıkmıştır. Çünkü bu üstyapıda balast ve zemin gibi dinamik özellikleri çok bilinmeyen granüler malzeme yoktur. Sadece ray altında ve çelik selet altında elastik tabakalar vardır. Özellikle balastsız yol modelleri için ölçümleri yüzde yüz uyumlu olarak dinamik özellikleri belirlemek mümkündür. Buradan değişik taşıt ve yol parametreleri için yolun dinamik davranışı çok doğru bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Tabii zeminli balastlı yol için, mesnet noktasında ölçüm sonuçları ile çok uyumlu bir sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir. Öz frekans ve dinamik tepki değerleri hemen hemen aynı, ancak mesnet öz frekansı ve bu frekanstaki dinamik tepki değeri biraz farklı çıkmıştır. E-B kirişi ile hesaplanan mesnet öz frekansı, gerçek öz frekanstan %9 daha büyük çıkmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi, balastlı yolun kontrol edilemeyen çok sayıda parametresinin olmasından dolayı bazı farkların çıkması muhtemeldir. Ray bağlantı elemanlarının sıkılığı, travers altında boşluk olup olmaması, balast tabakasının temiz olması, balast malzemesinin köşeli veya oval olması gibi bir çok parametre sonuçları etkilemektedir. Bu nedenle dinamik tepki değerleri arasında kabul edilebilecek bir farkın olması kaçınılmazdır.

Çizelge 5.6 : Ölçülen ve doğrulanmış sonlu elemanlar modelinin öz frekans değerleri

Üstyapı tipi		Öz frekans		
		Yol öz frekansı (Hz)	Ray öz frekansı (Hz)	Mesnet öz frekansı (Hz)
Çelik seletli balastsız yol	Ölçüm	210	-	Ölçülmedi
	Model	210	-	
Tabii zeminli balastlı yol	Ölçüm	100	640	674
	Model	100	640	736

5.3 Yolculuk Konforuna Yönelik Taşıt Titreşimlerinin Ölçülmesi

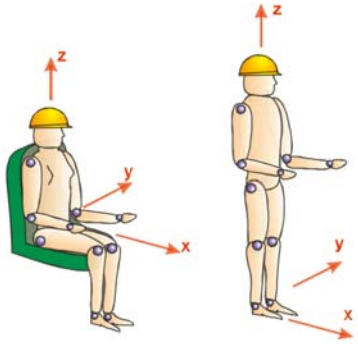
5.3.1 Amaç ve kapsam

Tezin bu bölümünün amacı, yolcuların ve sürücünün maruz kaldığı titreşimleri, konfor seviyesini belirlemek amacıyla incelemek ve yolculuk konfor düzeyi ile yol kalitesi arasında bir ilişki kurabilmektir. Bu amaçla Aksaray-Havalimanı hafif metro hattında 17 Nisan 2008 saat 12^{00}-19^{30} arasında gidiş ve dönüş süresince, ardışık istasyonlar arasında ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde taşıt içerisindeki gürültü düzeyleri, görsel etkiler, sıcaklık, nem oranı, taşıtların yolcu yoğunlukları ve taşıt hızları kontrol edilmemiştir.

5.3.2 Ölçüm yöntemi

Ölçümlerde kullanılan cihaz olan 3 eksenli ivme ölçer, demiryolu aracının içinde en uzun süre bulunmak zorunda kalan sürücünün oturduğu koltuğun altına yerleştirilmiştir. Yolcu ve sürücü konforunu belirlemek amacıyla, ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi için, ISO 2631-1 ve ISO 2631-4 standartlarından yararlanılmıştır. Ölçümler ve analizler için Brüel&Kjaer firmasının bilgisayar tabanlı PULSE Type 3560C sistemi kullanılmıştır. PULSE, Brüel&Kjaer firmasının bilgisayar tabanlı analiz sisteminin genel adı olup, bilgisayar, uygulama yazılımı, analizör ve transdüserlerden meydana gelmektedir. Ölçümlerde, 3 eksenli ivme ölçer

kullanılarak, yatay ve düşey yönlerde, titreşim hızının (rms) değerleri, frekansa bağlı olarak ölçülmüştür, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7.



Şekil 5.6 : Titreşim yönleri.



Şekil 5.7 : Titreşim ölçümü.

5.3.3 Ölçümlerin değerlendirilmesi

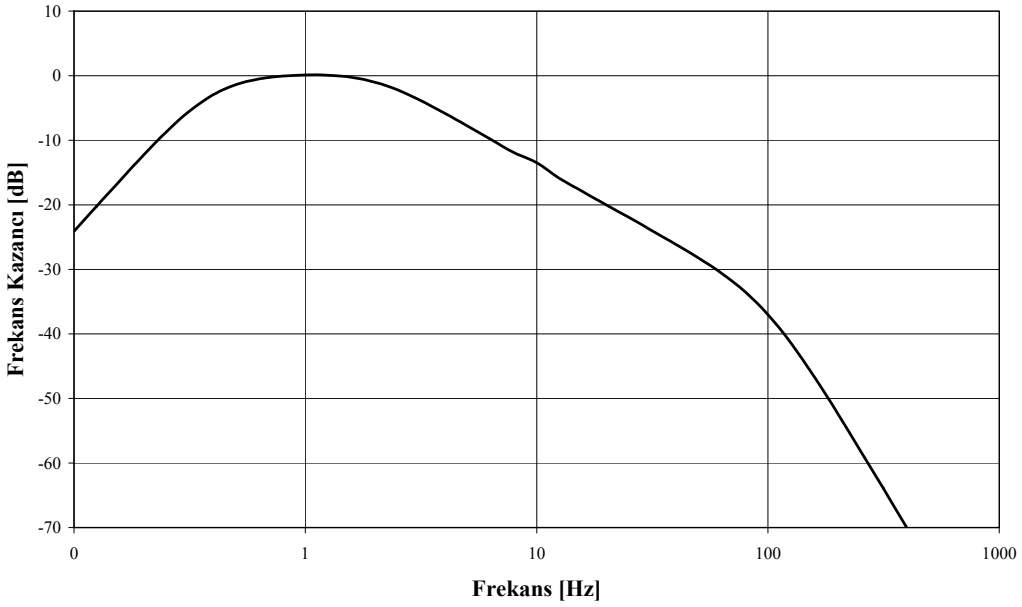
İnsan faktörleri (yaş, deneyim, zihinsel aktivite, alkol, konfor beklentisi, aktivite vb.), fiziksel faktörler (sıcaklık, duman, gürültü, koltuk şekli, koltuk hacmi vb.), taşıt hızı, hat parametreleri (kurp yarıçapı, bozukluklar, parabol boyu vb.) ve taşıt parametreleri (süspansiyon, araç gövdesi, koltuk, yana yatma kontrolü vb.) yolculuk konforunu etkilemektedir. Taşıt-hat etkileşiminden kaynaklanan boyuna, enine ve düşey yönlerde dinamik hareket faktörleri (yanal ivme, ivme değişimi, açısal hareket, ani hareketler) yolculuk konforunun değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Çok farklı konfor değerlendirme yöntemi olmakla birlikte, burada ISO 2631 standartına göre 0.5-80 Hz frekans aralığında ve 1/3 oktav bantlarında ivmeye dayanarak hesaplanan ortalama konfor seviyesi kullanılmıştır.

Ölçülen ivme değerlerine, ilgili standartlarda açıklanan taşıtın;

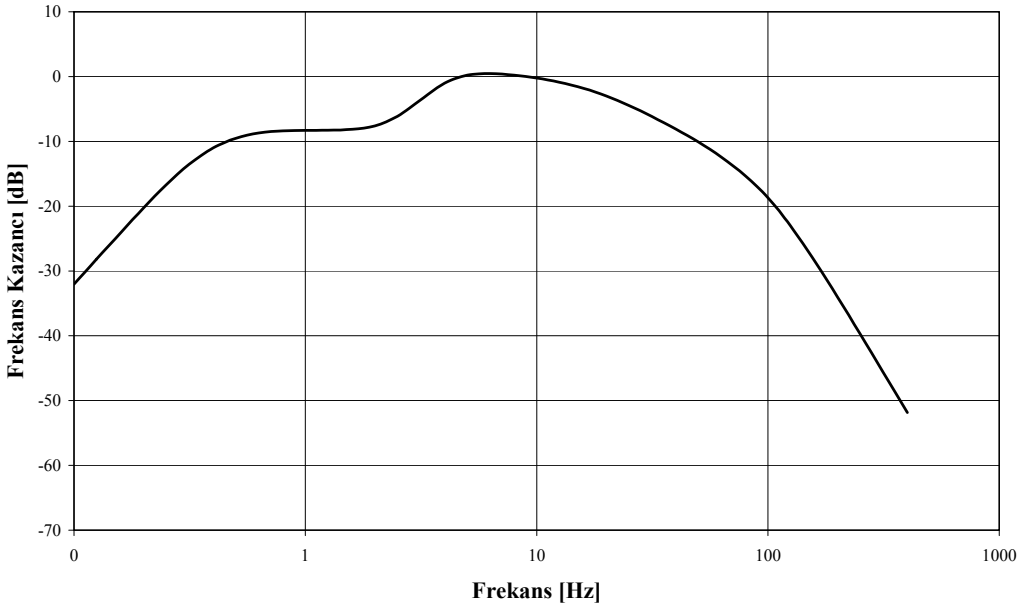
- boyuna titreşimlerine (x ekseni), W_d
- enine titreşimlerine (y ekseni), W_d

- düşey yöndeki titreşimlerine (z ekseni), W_b

frekans ağırlık filtreleri uygulanmıştır. Bu frekans filtrelerinin kazancının frekansa bağlı olarak değişimleri, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : W_d frekans ağırlık filtresinin kazancının frekansa bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.9 : W_b frekans ağırlık filtresinin kazancının frekansa bağlı olarak değişimi.

Ölçümler sonucunda 1/3 oktav bantlarında elde edilen ivme değerlerine (a_i), frekans ağırlık filtrelerinde tanımlanan faktörleri (W_i) uygulanarak, ilgili eksen

doğrultusunda ağırlıklandırılmış toplam değerler (a_w) bağıntı (5.1) den elde edilmiştir.

$$a_W = \sqrt{\sum_i (W_i a_i)^2} \qquad \textbf{(5.1)}$$

Her üç eksen için bu işlemler ayrı ayrı tekrarlandıktan sonra, üç dik eksenden elde edilen ivme düzeyleri (a_w) ve çarpma faktörleri (k) kullanılarak, titreşimlerin toplam ivme düzeyleri (a_v) bağıntı (5.2) den elde edilmiştir.

$$a_v = \sqrt{(k_x\, a_{Wx})^2 + (k_y\, a_{Wy})^2 + (k_z\, a_{Wz})^2} \qquad \textbf{(5.2)}$$

Uluslararası Standartlar Birliği (ISO) yolculuk konforu ile ilgili titreşim ivme ölçüm yöntemini ve sonuçlarını değerlendirme esaslarını ISO 2631-1:1997 standartı ile belirlemiştir. Ancak konforla ilgili belirli limit değerler belirlenmemiştir. Çünkü konfor, yolcuların okuma, yazma, içme, uyuma gibi etkinlikleri ile ilgili olarak bir çok faktöre bağlıdır. Bunun yerine titreşim ivme değerlerine karşı muhtemel tepkiler belirlenmiştir, (Çizelge 5.7). Yolculuk tepkileri yolculuk süresine, yolcunun ilgili olduğu etkinliğe ve akustik gürültü, sıcaklık, nem gibi daha bir çok faktöre bağlıdır. Genelde ölçümler oturan yolcunun koltuğunun altına yerleştirilen bir ivme ölçerle 0,5-80 Hz frekans aralığında yapılır. Taşıt üzerinde ölçülen ivme değerleri tek bir frekansa sahip olmayıp, aracın doğal frekanslarını içine alan bir spektrum şeklindedir.

Çizelge 5.7 : Titreşim düzeyine göre yolculuk tepkisi.

Titreşim İvme Değeri (m/s^2)	Yolculuk Tepkisi
<0,315	Konforlu
0,315-0,63	Çok az konforsuz
0,5-1,0	Biraz konforsuz
0,8-1,6	Konforsuz
1,25-2,5	Çok konforsuz
>2,0	Aşırı konforsuz

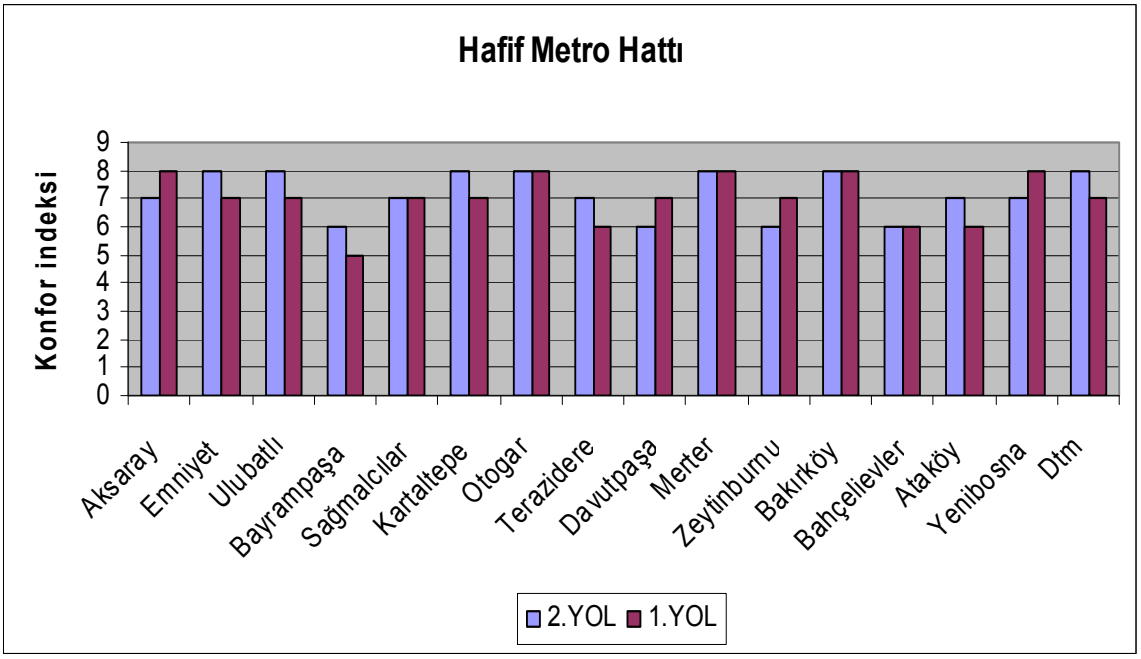
ISO standardında göreceli konfor değerlendirmesini sayısal olarak yapabilmek için, Çizelge 5.8'de özetlenen 1'den 10'a puanlama yöntemi uygulanmıştır. Bu çizelgede

1 rakamı konfor bakımından en kötü durumu ifade ederken, 10 rakamı titreşimler açısından taşıtın konforlu olduğunu belirtmektedir, (Öztürk ve Erol, 2008).

Çizelge 5.8 : Konfor puanları

Titreşim İvme Değeri (m/s^2)	Konfor puanı
2.5<	1
2.0-2.5	2
1.6-2.0	3
1.25-1.6	4
1.0-1.6	5
0.8-1.0	6
0.63-0.8	7
0.5-0.63	8
0.315-0.5	9
>0.315	10

Konfor indeksi hafif metro hattındaki her iki istasyon arası için Şekil 5.10'da sunulmuştur.



Şekil 5.10 : Aksaray-Havalimanı metro hattı yolculuk konforu.

5.3.3 Ölçüm sonuçları

Çalışmadan elde edilen bazı önemli sonuçlar şunlardır:

- İncelenen metro hattında Sağmacılar-Bayrampaşa istasyonları arası en düşük konfora sahip kesimdir ve konfor indeksi 5'tir. Bu kesimi, Davutpaşa-Merter istasyonları arası, Z.burnu-Bakırköy istasyonları arası ve Bahçelievler-Ataköy istasyonları arası 6 konfor indeksi ile izlemektedir. Bu bölgelerde yolculuk konforunun diğer kısımlara göre bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Konfor düzeyinin daha düşük olmasının nedeni, bu kısımlarda balast tabakasında ve muhtemelen altyapı tabakasında önemli bozulmalar nedeniyle yol stabilitesinin yeterli olmamasıdır. Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı düşük olan kesimlerde yol geometrisinin daha çabuk bozulduğu ve yolculuk konforunun daha düşük olduğu görülmektedir.
- Yenibosna-Havaalanı istasyonları arasındaki balastsız üstyapı kısmında yolculuk konforu yüksek çıkmıştır. Balastsız üstyapıda trafik yükü altında bozulma olmadığı için konfor düzeyi yüksek çıkmaktadır.
- Tünel ve viyadük gibi alt tabakası beton olan kısımlarda yolculuk konforunun daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak altyapı kalitesinin yolculuk konfonu doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır.

6. TİTREŞİM AZALTMA YÖNTEMLERİ

Özellikle yüksek hızlı demiryollarında titreşimlerden dolayı yolda ve taşıtta gerilmeler ve deformasyolar çok fazla artmaktadır. Bu nedenle titreşimleri azaltmak için bazı önlemlerin alınması gereklidir. Bu bölümde genel titreşim izolasyonundan bahsedildikten sonra demiryolunda titreşim azaltma yöntemleri açıklanacaktır. Özellikle titreşim kaynakları olan taşıtta ve yolda alınabilecek etkili yöntemler izah edilecektir. Daha sonra demiryolu dinamiği açısından optimum yol rijitliği açıklanacaktır. Demiryolu rijitlik katsayısı titreşimler açısından en etkili parametredir ve taşıt stabilitesi, konfor, yol bakım maliyeti ve dinamik yükler açısından optimum bir değeri olmalıdır. Tasarım aşamasında optimum yol rijitlik katsayısına göre balast-zemin tabakası ve elastik tabakalar belirlenmektedir.

6.1 Titreşimlerin İzolasyonu

Mekanik titreşimlerin izolasyonu iki ana grupta incelenmektedir;

- Aktif izolasyon: Gidip gelme hareketi ve genel hareket yapan dengelenmemiş kütlelerden yapıya gelen kuvvetlerin azaltılmasıdır.
- Pasif izolasyon: Yüksek hassasiyetli makinelerin ve hassas cihazların üzerinde bulunduğu yapı zeminin titreşimlerden korunmasıdır.

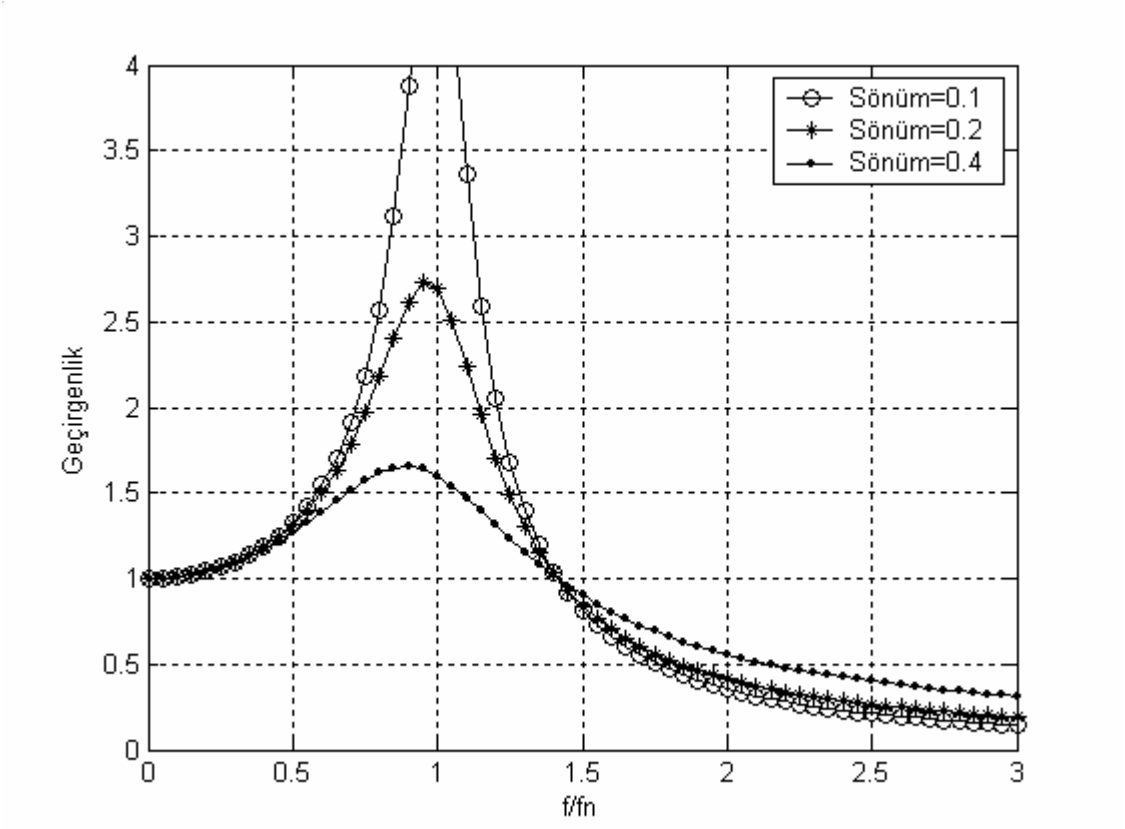
Aktif ve pasif titreşim izolasyonu için üniversal çözüm, makine veya ekipmanları yaylar üzerine oturtmaktır. Yay ve sönüm elemanı kullanılması durumunda zemine geçen kuvvetin genliğinin zorlayıcı kuvvetin genliğine oranına, geçirgenlik denilir. Geçirgenlik, tek kütle-yay sistemi için sönüm oranı (ξ) ve tahrik frekansının yapının öz frekans oranına (η) bağlı olarak aşağıdaki formülden bulunur,(Pasin, 2000).

$$\text{Geçirgenlik } G' = \sqrt{\frac{1+4\xi^2\eta^2}{(1-\eta^2)^2+4\xi^2\eta^2}} \qquad \textbf{(6.1)}$$

(6.1) formülünden bazı sönüm oranları için frekans oranı-geçirgenlik grafiği elde edilmiştir. Şekil 6.1 grafiğinden aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır:

- Frekans oranı η>1,4 olduğu zaman geçirgenlik 1'den küçüktür, dolayısıyla yaylar üzerine oturtmak faydalıdır.
- Frekans oranı 1,4'ten ne kadar büyükse geçirgenlik o kadar küçüktür, dolayısıyla zemine iletilen kuvvetler küçüktür.
- Frekans oranının 1,4'ten büyük olduğu aralıkta sönüm oranı arttıkça geçirgenlik dolayısıyla zemine geçen kuvvet artmaktadır.

Bu sonuçlara göre aktif titreşim izolasyonu için yumuşak yay, büyük kütle ve az sönüm gereklidir. Yumuşak yay kullanılması durumunda, statik yük altındaki deplasman da artmaktadır. Statik deplasmanın artması ekipmanın tahribine veya bağlantıların kopmasına neden olduğu için yumuşak yay kullanımının bir sınır değeri vardır. Sönümün küçük olması veya ideal halde sıfır olması geçirgenliği azaltmaktadır ancak rezonans durumunda geçirgenlik çok fazla artmaktadır. Bu nedenle rezonans olayından kaçınmak için bir miktar sönüm olmalıdır. Bunun dışında pratikte en çok kullanılan yöntem kütlenin artırılmasıdır.



Şekil 6.1 : Frekans oranı-geçirgenlik oranı.

6.2 Demiryolunda Titreşim Azaltma Yöntemleri

Titreşimin ölçü birimi dBv'dir ve titreşim hızının referans titreşim hızına (v_{ref}) oranına bağlı olarak aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$L_V = 20\log\frac{v}{v_{ref}} \qquad \textbf{(6.2)}$$

(6.2) bağıntısında referans titreşim hızı v_{ref} =5x10^{-8} m/s kabul edilmektedir. Titreşim düzeyindeki azalma, yani izolasyon performansı şöyle hesaplanır:

$$\Delta Lv = -20\log\left(\frac{1}{(f/f_n)^2 - 1}\right) \qquad \textbf{(6.3)}$$

(6.3) bağıntısında f, raylı taşıtın tahrik frekansı ve f_n yolun öz frekansıdır. (6.1) bölümünde bahsedildiği gibi, titreşim izolasyonu için tahrik frekansı yolun öz frekansından çok büyük olmalıdır.

f>>f_n için, (6.3) formülü basitleştirilebilir.

$$\Delta Lv \cong 40\log\left(\frac{f}{f_n}\right) \qquad \textbf{(6.4)}$$

(6.4) denkleminde $f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_d}{m}}$ ve dinamik yol rijitliğin statik yol rijitliğe oranı r=k_d/k_s yerine konulursa,

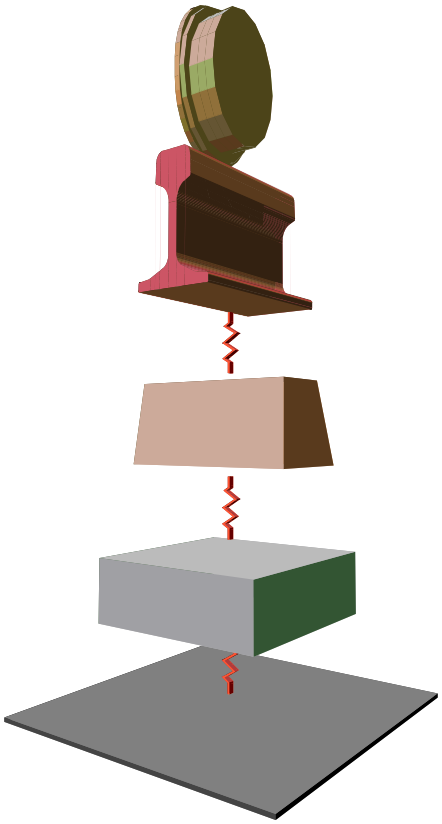
$$\Delta Lv \cong 40\log(2\pi f) + 20\log\left(\frac{m}{k_d}\right) = 40\log(2\pi f) + 20\log\left(\frac{m}{rk_s}\right) \qquad \textbf{(6.5)}$$

elde edilir. (6.5) denkleminde statik rijitlik yerine Q statik tekerlek yükü ve x ray deplasmanı olmak üzere $k_s = \frac{Q}{x}$ yazıldığında,

$$\Delta Lv = 40\log(2\pi f) + 20\log\left(\frac{m\ x}{rQ}\right) \qquad \textbf{(6.6)}$$

elde edilir. (6.6) denkleminde titreşim izolasyonu için, asılı yol kütlesi, ray deplasmanı artırılabilir veya rijitlik oranı azaltılabilir. Ray deplasmanının kabul edilebilir limitler dahilinde olması gerekmektedir. Çünkü ray deplasmanı fazla olursa, ray mantarında dönme ve buna bağlı olarak iki ray arası açıklığında artış, ayrıca yol stabilitesinde sorunlar olabilir. Bu nedenle titreşim izolasyonu için değişebilecek parametreler asılı kütle ve rijitlik oranıdır. Demiryolunda asılı kütle,

yaylandırılan yol kütlesi ve yaylandırılmayan tekerlek kütlesinin toplamıdır. Yaylandırılmayan tekerlek kütlesi yaklaşık olarak taşıt kütlesinin %10'u kadarıdır. Sonuç olarak demiryolu titreşim izolasyonu için yapılması gereken çözümler asılı yol kütlesini artırmak ve rijitlik oranını düşürmektir. Elastik tabakanın yolun daha alt katmanlarına yerleştirilmesi ile daha fazla kütle yaylandırılmış olur ve bu sayede daha fazla sönümleme sağlanır. Farklı seviyelerde elastik tabaka kullanılır. Şekil 6.2'de üç seviyede tabaka kullanımı gösterilmektedir. Birinci seviyede ray altına elastik tabaka ilave edilir. Bu sayede yaylandırılan yol kütlesi sadece ray olur. İkinci seviyede selet veya travers altına elastik tabaka ilave edilir ve bu durumda yaylandırılan yol kütlesi ray ve travers (veya selet) olur. Üçüncü seviyede balast tabakası altına veya beton döşeme altına elastik tabaka ilave edilir ve bu durumda tüm yol üstyapısı yaylandırılmış kütle olur.



Şekil 6.2 : Demiryolunda farklı elastik tabaka seviyeleri.

Rijitlik oranı düşük olan elastik malzeme seçmek titreşimleri azaltmaktadır. Rijitlik oranı 1 olan elastik tabaka en iyi çözüm olarak görülebilir ancak bu durumda sönüm olmayacaktır. Ancak belli bir miktar sönüm, tren yükü kalktıktan sonra yolun

stabilitesini tekrar kazanması için gereklidir. Pratikte, rijitlik oranı 1.5-2.5 arasındadır, (Carels, 2006).

Rijitlik oranı, titreşim sönümleme için kilit parametredir. Statik rijitlik katsayısı ise ray deplasmanı için kilit parametredir.

Demiryolu titreşimlerini azaltmak için titreşim kaynağında, iletim hattında veya titreşim alıcısında bazı önlemlerin alınması gereklidir. Kaynağında alınan önlemler en ekonomik ve en efektif önlemlerdir.

Demiryolunda titreşim kaynakları demiryolu taşıtı ve yoldur. Burada titreşimleri azaltmak için taşıtta ve yolda alınacak bazı önlemler açıklanacaktır.

6.2.1 Taşıtta alınabilecek titreşim azaltma yöntemleri

Taşıttan kaynaklanan titreşimleri azaltmak için alınacak başlıca önlemler şunlardır:
a-)Yaylandırılmayan kütleleri azaltmak

Yaylandırılmayan kütlenin azaltılması yol titreşimlerinde 10-15 dBv'ye varan azalma sağlar, (Wilson ve diğ., 1983). Buna karşın, bazı durumlarda yaylandırılmayan kütlenin artırılması taşıt-yol sisteminin rezonans frekansını azaltabilir ve bu sayede yapısal gürültünün baskın frekansı daha az rahatsız edici frekans alanına doğru ötelenebilir.

b-) Birincil süspansiyon (amortisör) rijitliğini düşürmek

Daha yumuşak birincil süspansiyonlara sahip taşıt, daha az titreşime neden olur.

c-) Uygun damper sistemi seçmek

Bazı sürtünme damperleri efektif yaylandırılmayan kütleyi azaltabilir.

d-) Esnek tekerlek kullanmak

Aks yüklerinin düşük olduğu bazı metro sistemlerinde kullanılan esnek tekerlekler 50-60 Hz frekans aralığının üstündeki frekanslarda titreşimi ve yapısal gürültüyü azaltır, (Wilson ve diğ., 1983).

e-) Tekerlekleri tornalamak

Tekerlek tornalama, aplati gibi tekerleğin yuvarlaklık hatalarını temizler. Tekerlek aplatisi titreşimi ve yapısal gürültüyü 10-15 dB kadar artırır, (Wilson ve diğ., 1983).

f-) Kayma kontrol (anti-slip) sistemi kullanmak

Kayma kontrol sistemi taşıtın kayması sırasında tekerlek aplati oluşumunu minimize eder.

g-) Taşıt hızını değiştirmek

Genelde hız artışı doğrusal olmayan bir şekilde titreşim düzeyini artırır. Tipik taşıt hızları için taşıt hızını iki kat artırmak, zemin titreşimlerini 4-6 dBv artırır, (Kurtzweil, 1979). Ancak bazı lokal yol şartlarından dolayı yüksek titreşimlere neden olan rezonans frekanslarını aşmak için taşıt hızını artırmak gerekebilir. Bu durumda rezonansa neden olan taşıt frekansı taşıt hızına bağlı olarak değişmiş olur.

6.2.2 Yolda alınabilecek titreşim azaltma yöntemleri

Yoldan kaynaklanan titreşimleri azaltmak için alınacak önlemler şunlardır :

a-) Uzun kaynaklı ray kullanmak

Demiryolunda, contalı raylar yerine uzun kaynaklı rayların kullanılması darbe yüklerini azaltır.

b-) Oynar göbekli makas kullanmak

Makaslar ve kruvazmanlar zemin titreşimlerini 10-15 dBv artırır, (Kurtzweil, 1979). Bu nedenle özellikle yüksek hızlı hatlarda oynar göbekli makaslar darbe yüklerini ve titreşimleri önemli miktarda azaltır.

c-) Rayları düzleştirmek

Rayların daha yüksek standartlarda üretilmesi haddeleme işleminden kaynaklanan düşük frekanslı titreşimleri azaltır. Avrupa'da yüksek hızlı hatlar için daha yüksek standartlarda ray düzleştirme prosesi kullanılmaktadır.

d-) Ray taşlaması yapmak

Özellikle kentiçi raylı sistemlerde titreşimlere neden olan en önemli faktör ray mantarındaki ondülasyon denilen dalgalı aşınmalardır. Ondülasyonların azaltılmasında en yaygın ve en efektif yöntem rayları periyodik olarak taşlamaktır. Ray ondülasyonları titreşimleri ve yapısal gürültüyü 10-15 dBv artırır, (Wilson ve diğ., 1983).

Optimum ray taşlama stratejisi yüzey kusurlarının gelişimi hakkındaki bilgilere göre hazırlanır. Ondülasyon dalga derinliği arttıkça gerekli taşlama pas sayısı daha hızlı artmaktadır; yani taşlama işlemini dalga derinliği az iken yapmak daha ekonomik olmaktadır. Bu konuda, büyük dalga derinliklerinin üst yapıda telafisi mümkün olmayan zararlara yol açabileceği gözönünde tutulmalıdır. Metalürjik araştırmalar sonucunda optimum taşlama derinliği olarak 0,1 mm'lik bir yükseklik ve yeni ray taşlama için 0,3mm'lik bir yükseklik bulunmuştur, (Erel, 1996).

e-) Elastik ray bağlantı elemanlarını kullanmak

Esnek tabakalar, rayın altında veya selet altında kullanılabilir. Standart tabakalardan daha esnek tabakalar 30-40 Hz frekansın üstünde yaklaşık 5 dBv titreşimi azaltabilir. Ancak daha düşük frekanslarda (<30 Hz) zemin titreşimlerini 2-3 dBv artırabilir. Düşük rijitlik katsayısı aynı zamanda ray gerilmesini ve iki ray arası açıklığı artırdığı için sınırlandırılmaktadır, (Nelson, 1996).

f-) Travers altı elastik tabaka kullanmak

Balast ile travers arasına yerleştirilen esnek tabaka yol çökmesini azaltır. Balast ile travers arasındaki temas alanını %20-35 artırır ve balast basıncını travers tipine bağlı olarak %15-35 azaltır. Hat geometrisi bozulma hızını 3-4 kat azaltır, (Lichtberger, 2005). Ayrıca 30 Hz frekansın üstünde zemin titreşimlerini azaltır. Travers altı elastik tabakalar titreşim düzeyini 8-12 dBv azaltabilir, (Carels, 2006).

g-) Bohçalı travers kullanmak

Özellikle, tünellerde yol yüksekliğini düşürmek için balastlı hat yerine tercih edilen balastsız hatlarda beton traverslerin etrafı kauçuk botlarla sarılır, bohçalanır. Kauçuk botlar sayesinde titreşim düzeyi 8-12 dBv azaltılabilir, (Carels, 2006). Ancak bu sistem, açık yollarda travers ile esnek bot arasına suyun sızması ve suyun donması sonucu hacimsel genişleme ile birlikte betonda çatlama gibi sorunlara neden olduğu için tercih edilmemektedir.

h-) Balast kalınlığını artırmak

Balast tabakası, traverslerle beraber tren yüklerini taşır ve normal yüksekliği 30 cm'dir. Alman Demiryolları testlerde balast yüksekliğini 75 cm'ye çıkartarak 10 Hz'in altındaki frekanslarda 6 dBv titreşim azaltmıştır ama bu çözüm maliyet, ilave yükseklik ve ağırlıktan dolayı uygun değildir. Tabaka kalınlığını artırmanın

hissedilebilir bir etkisi yoktur ama balast tabakası kalınlığının 30 cm'den az olması önemli stabilite bozulmalarına neden olur, (ORE, 1982).

ı-) Balast altı beton döşeme kullanmak

Açık yollarda zemin yumuşak ise balast altına beton döşeme kullanılabilir. Beton döşeme rezonans frekansını artırdığı için düşük frekanslı titreşimleri azaltır, ancak bu sefer de yüksek frekanslı titreşimleri artırma ihtimali kontrol edilmelidir.

i) Balast altı elastik tabaka kullanmak

Tipik kalınlığı 25-60 mm olan esnek tabakalar balast altında zemin üstüne (veya alt balast tabakası üstüne) serilebilir. Ancak esnek tabakanın yatak modülü zeminle karşılaştırıldığı zaman hemen hemen hiçbir faydası yoktur. Alternatif olarak, beton döşemeli balastlı hatlarda kullanıldığı zaman, klasik balastlı hatta göre 30 Hz frekansın üstünde titreşimleri 10 dBv azaltır, ancak 30 Hz altında kütle-yay rezonans frekansı civarında titreşimleri bir miktar artırır. Açık hatlara göre, tünel beton rijitliği daha yüksek olduğu için balast altı elastik tabakaların performansı daha iyidir. Daha homojen balast çökmesi sağlar ve daha düzgün araç geçişi sağlar. Yüksek elastikiyete sahip elastik tabakalar titreşimi 16-18 Hz frekansta azaltmaya başlar ve 50 Hz'de titreşimi 20 dBv azaltır ve bu da yapısal gürültü düzeyini 30-35 dBA kadar azaltır. Elastik tabaka rayda ilave eğilme gerilmelerine ve balast stabilite bozulmalarına neden olabilir. Ayrıca elastik tabakayı balast tanelerinden korumak için üzerine kum koruma tabakası serilmeli veya elastik tabakanın üzeri sertleştirilmelidir, (ORE, 1982).

j-) Zemini iyileştirmek

Zemin bazı yöntemlerle sıkılaştırılır. Çimento bazlı groutlar granüler zemin içine enjekte edilir. Kil-organik zeminlerde çimento ve kireç karışımı kullanılır. Eğer zemin çok yumuşak ise zemin iyileştirme yöntemi düşük frekanslı titreşimleri azaltır. Ancak öz frekansının artması daha yüksek frekanslarda titreşimde artışa neden olabilir.

k-) Sürekli mesnetli ray döşeme kullanmak

Ayrık mesnetli yol üstyapısı mesnet geçiş frekansından dolayı düşük frekanslı tahrike neden olur. Bu tahrik frekansını önlemek için sürekli mesnetli yollar kullanılmaktadır. Sürekli döşeme sistemle titreşim düzeyi 10 dBv kadar azaltılır,

(Carels, 2006). Sürekli mesnetli yol döşeme için değişik yöntemler kullanılır. Mesela Edilion sisteminde beton içine açılan kanala raylar yerleştirilmekte ve rayların etrafına mantar ve polimer karışımı malzeme sıvı halde dökülmektedir.

l-) Kütle-yay sistemi kullanmak

Özellikle tünel içindeki balastsız üstyapıda titreşimi azaltmak için en çok kullanılan yöntem kütle-yay sistemidir. Titreşim düzeyi 18-20 dBv kadar azaltılabilir, (Carels, 2006). Burada yol çerçevesi esnek yay elemanları ile desteklenerek istenmeyen titreşimleri ve yapısal gürültüyü önlemek mümkündür. Bunun için tünel tabanı ile prekast veya yerinde döküm beton döşemeli yol çerçevesi arasına sentetik, doğal kauçuk tabaka veya çelik yay malzemeleri ilave edilir. Beton döşeme, kütleyi oluştururken, elastik tabakalar da yay gibi davranır.

Kütle-yay sistemi için en bilinen örnek Stedef V.S.B (Voie Sans Ballast) balastsız üstyapı tipidir. Bu sistemde beton ikiz blokları ile tünel beton tabanı arasına yerleştirilen nitrojen dolgulu çok ufak hücrelerden teşekkül eden elastomer tabaka, balastın yaptığı hizmeti sağlamaktadır. Ray altı elastik tabakaları yüksek frekanslı titreşimleri azaltırken, alçak frekanslı titreşimleri elastomer tabaka azaltır. Bu şekilde çift kütle (ray ve travers) ve çift yaydan (ray elastik tabaka ve elastomer tabaka) oluşan bir kütle-yay sistemi elde edilmiş olmaktadır.

Kütle-yay sistemi tüm gürültü ve titreşim sorunlarını azaltmak için kullanılan en etkin çözüm yöntemidir, fakat bunun için öz frekansın doğru aralıkta olması gerekir. Elastik malzemenin sönümlendirmesi ihmal edilirse, kütle-yay sisteminin öz frekansı (6.7) bağıntısına göre hesaplanır.

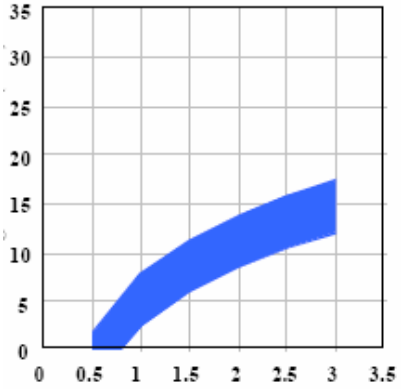
$$f = \frac{5}{\sqrt{y}}, Hz \qquad \textbf{(6.7)}$$

(6.7) bağıntısında y (cm), sistemin kendi ağırlığı altındaki yer değiştirmesidir. Aslında gerçek doğal frekans elastomerik malzemenin özelliklerine bağlı olarak lineer olmayan etkilerden dolayı %10-20 daha fazladır. Rayların ve elastomerik malzemelerin aşırı basınca maruz kalmamaları için dingil yüklerinden kaynaklanan dinamik yer değiştirmenin, statik ön yüklemeden dolayı oluşan yer değiştirmenin iki katına ulaşmaması gerekir.

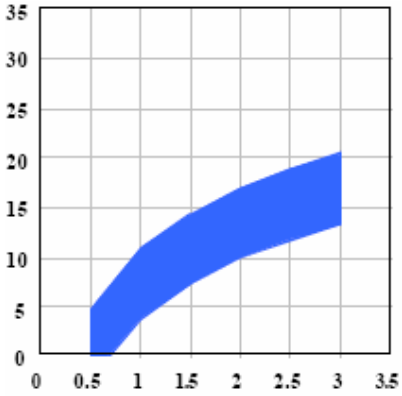
Düşük frekanslı titreşimleri sönümlemek için üstyapının öz frekansı mümkün oldukça düşük olmalıdır. Pratik sınırlandırmalardan dolayı sistem temel frekansının 5

Hz'den az olmasına izin verilmez ve 14 Hz'e de ulaşması istenmez. Normalde hesaplanan doğal kütle-yay sistem frekansı 8-12 Hz arasındadır ve bu da taşıtların öz frekansları (1-2 Hz) ile öte yandan yapısal kaynaklı gürültü frekansları arasında önemli bir boşluk sağlar. Üstyapının öz frekansını düşürmek için en uygun yöntem esnek tabaka üstündeki kütleyi artırmaktır. Bunun için yüksek yoğunluklu betonlar kullanılabilir.

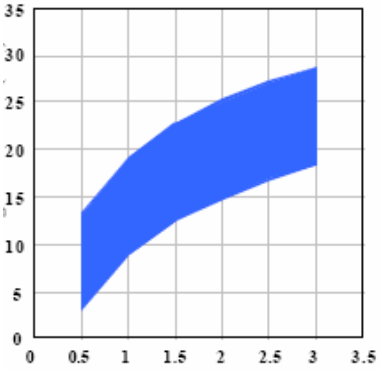
Tipik aks yükleri ve farklı seviyede elastik tabakalar için ortalama titreşim sönümleme değerleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Şekil 6.3'te yatay eksen maksimum ray deplasmanını (mm) ve düşey eksen ortalama titreşim sönümleme değerlerini (dB) göstermektedir, (Carels, 2006).



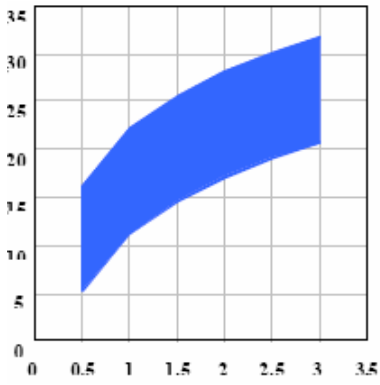
Seviye 1.Ray altı elastik tabaka



Seviye 2. Selet veya travers altı elastik tabaka



Seviye 3. Balast altı elastik tabaka



Seviye 4. Kütle-yay sistemi

Şekil 6.3 : Maksimum ray deplasmanı- titreşim sönümleme değerleri.

6.3 Demiryolu Dinamiği Açısından Optimum Yol Rijitlik Katsayısı

Balastlı yol modeli için, statik ray çökmesini en çok etkileyen yol parametresi zemin-balast rijitliğidir. Yol rijitliği, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri

belirleyen en önemli parametre olduğu için analiz yapılarak en uygun değer belirlenmelidir.

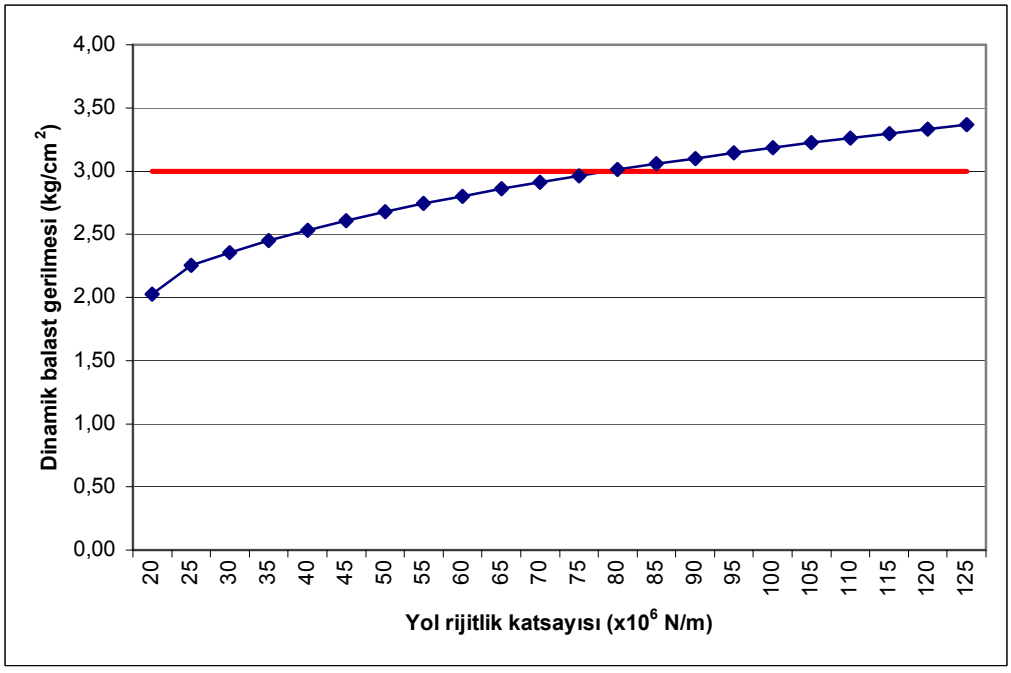
Yol rijitliğinin düşük olmasının bazı avantajları olduğu gibi yüksek yol rijitliğinin bazı avantajları vardır. Düşük yol rijitlik katsayısının avantajları şunlardır:

a-) Düşük yol rijitliği balast ve zemin tabakasına gelen eğilme momenti ve gerilmeyi azaltmaktadır. Genel olarak bir tabakanın rijitlik katsayısı azaldıkça, üzerine gelen gerilmeler de azalmaktadır. Balast tabakasına gelen gerilme 3 kg/cm^2'nin altında kalmalıdır.

Balast tabakasına gelen gerilme Hanker yöntemi ile,

$$\sigma = \frac{Qa}{2A\sqrt[4]{\frac{4EIa}{k}}} \qquad \textbf{(6.8)}$$

(6.8) bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada Q tekerlek yükü, a travers aralığı, A travers mesnet alanı, EI ray eğilme rijitliğidir. Proje hızı 250 km/saat, aks yükü 17 ton ve tipik bir yol (S49 ray, a=0.60 m, B70 W beton travers) için balast tabakasına gelen dinamik gerilme hesaplanmış ve yol rijitlik katsayısına bağlı olarak Şekil 6.4 grafiği elde edilmiştir. İyi bakımlı bir hat için Eisenman dinamik büyütme faktörü 1,94 hesaplanmıştır. Grafiğe göre, balast gerilmesinin limitin altında olması için, yol rijitlik katsayısı 80 x10^6 N/m'nin altında olması gereklidir.

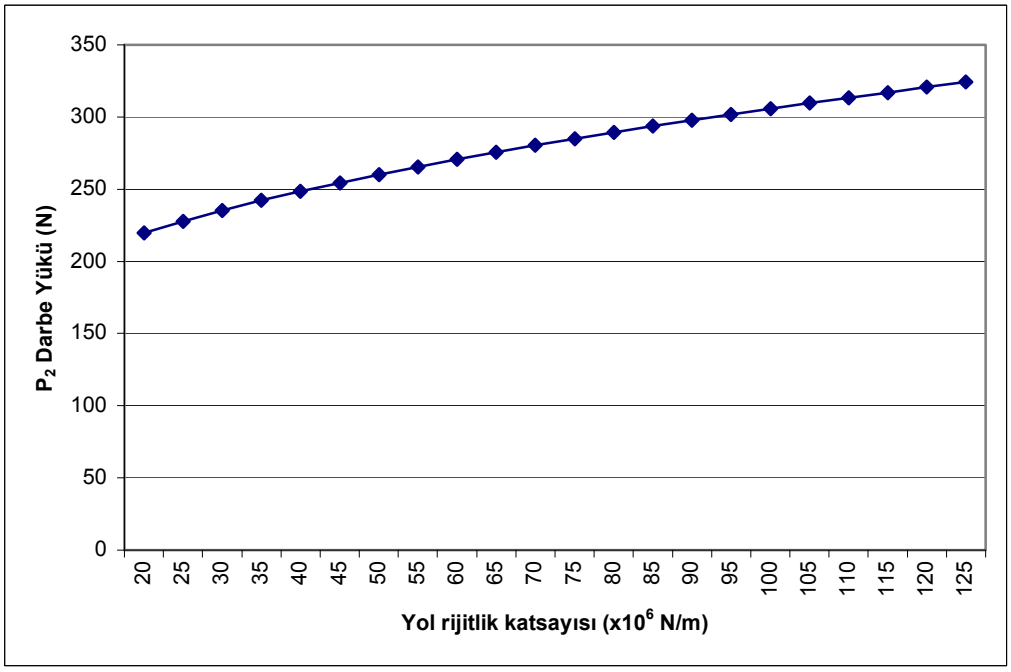


Şekil 6.4 : Yol rijitlik katsayısı- dinamik balast gerilmesi.

b-) Düşük yol rijitliği ray contalarından geçen trenlerin darbe yükünü azaltmaktadır. Darbe kuvvetinin önemli bir kısmı formasyon tabakasına iletilir. Ayrıca bu darbe kuvveti, travers ve balast tabakasının bozulmasının başlıca nedenidir. İngiltere'de ray contalarından geçen lokomotiflerin darbe kuvvetlerinin ölçülmesi ile ilgili kapsamlı testler yapılmıştır, (Frederick, 1978). Ray-tekerlek temasında oluşan darbe kuvvetinin (P_2) ampirik formülü şöyledir:

$$P_2 = Q_{aks} + V\alpha_e\sqrt{M_t k} \qquad \textbf{(6.9)}$$

(6.9) denklemine göre, Q_{aks}=150 kN statik aks yükü, M_t=1230 kg yaylandırılmayan taşıt kütlesi, α_e=0.02 rad contanın eğilme açısı ve V=80 km/saat tren hızı için, yol rijitliğine bağlı olarak darbe kuvveti hesaplanmış ve aşağıdaki Şekil 6.5 grafiği elde edilmiştir.



Şekil 6.5 : Yol rijitlik katsayısı- darbe kuvveti.

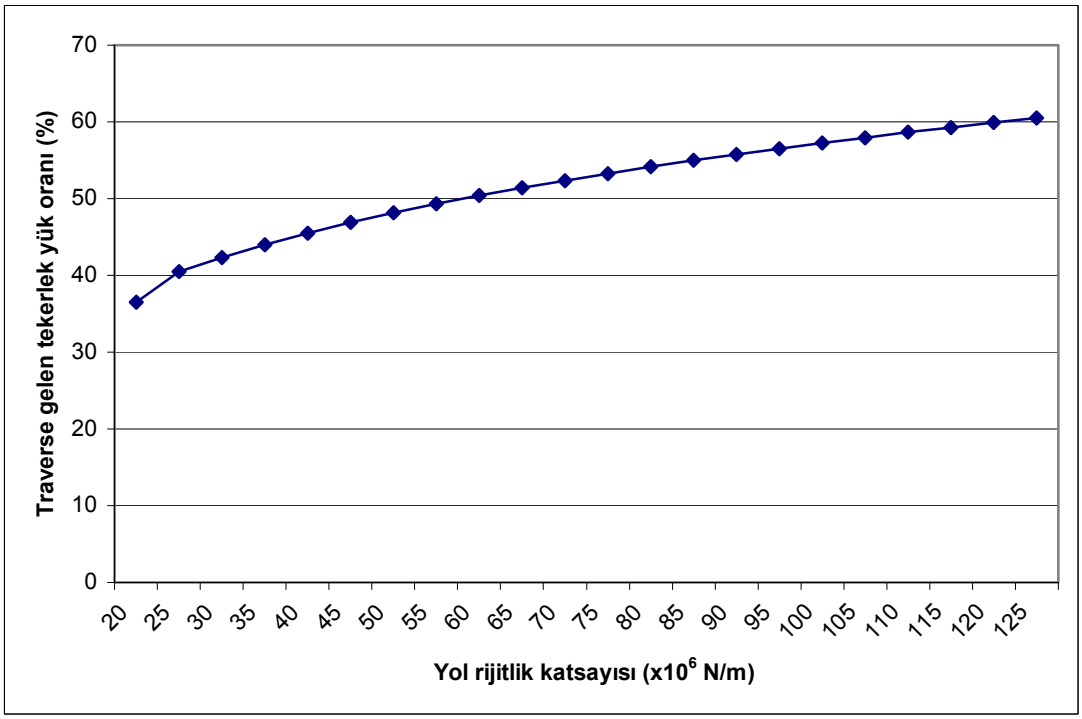
c-) Düşük yol rijitliği taşıtın düşey titreşimlerini azaltmaktadır ve bu sayede yolculuk konforu artmaktadır. EN 1990-A1 normuna göre, "Çok İyi" seviyede yolculuk konforu için taşıtın düşey titreşim ivmesi 1m/s^2'in altında olmalıdır.

d-) Yol rijitliğinin düşük olması durumunda yaylandırılmayan tekerlek kütlelerinden kaynaklanan ilave dinamik gerilmeler azalmakta ve daha iyi bir yük dağılımı sağlanmaktadır. Yol rijitliği azaldıkça tekerlek yükünden traverse gelen indirgenmiş

yük de azalmaktadır, (Şekil 6.6). Traverse gelen yükün tekerlek yüküne oranı, Hanker yöntemi ile hesaplanabilir.

$$\text{İndirgenmiş tekerlek yük oranı (\%)} = \frac{a}{2\sqrt[4]{\frac{4EIa}{k}}} \qquad \textbf{(6.10)}$$

Şekil 6.6'da yol rijitlik katsayısına bağlı olarak (6.10) bağıntısına göre hesaplanan indirgenmiş tekerlek yük oranı gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : Yol rijitlik katsayısı-traverse gelen tekerlek yük oranı.

Bunlara karşın yüksek yol rijitlik katsayısının avantajları şunlardır:

a-)Yüksek yol rijitliği ray eğilme momentini ve dolasıyla ray gerilmesini azaltmaktadır. Çünkü ray eğilme momenti yol rijitliğinin ¼ üssü ile ters orantılı olarak değişmektedir.

b-) Yüksek yol rijitliği balast titreşimlerini azaltmaktadır.

Belli frekans aralığında, özellikle 25-100 Hz arasında, balast titreşim düzeyi balast stabilitesi açısından önemlidir. Maksimum balast titreşim hızı 15-18 mm/sn'nin altında olmalıdır, (Banimahd and Woodward, 2007). Mesela 40 Hz frekansın üstünde balast titreşimlerinin yüksek olması balast malzemesinin kenarlarına yayılarak akmasına neden olmaktadır. Yüksek balast titreşimleri 200 km/saat tren hızının

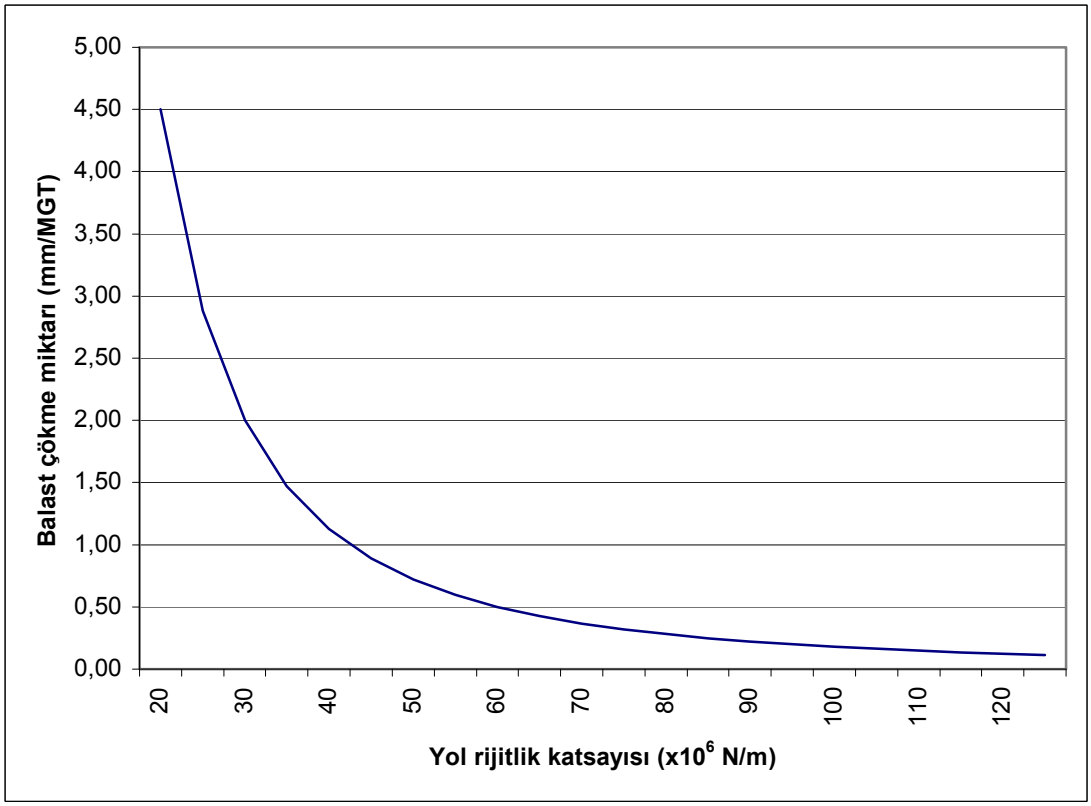
üstünde olmaktadır. İstenmeyen balast titreşim düzeyi özellikle yüksek hızlarda ulaşıldığı için bazı önlemlerin alınması gerekebilir. Balast tabaka yüksekliğini artırmak balast tane titreşim düzeyini azaltır. Özellikle elastik ray altı veya travers altı pedleri sayesinde balast tanelerinin titreşim hızı azalmaktadır. Mesela Alman Demiryollarında rijitlik katsayısı 500 x10^6 N/m olan elastik tabaka yerine 60 x10^6 N/m olan elastik tabakalar kullanıldığı zaman balast titreşimlerinde %20 azalma sağlanmıştır.

c-) Yüksek yol rijitliği trenin harcadığı çekim gücünü azaltmaktadır.

d-) Yüksek yol rijitliği, ray-travers çökmesini azaltmaktadır.

Ray çökmesinin taşıt stabilitesine ve geometrik bakım maliyetine etkisi vardır. Ray deplasmanı fazla olursa, ray mantarında dönme ve buna bağlı olarak iki ray arası açıklığında artış olabilir ve taşıt stabilitesinde sorunlara neden olabilir. Yol rijitliği ile yol çökmesi arasında ters orantılı bir ilişki vardır, (Lichtberger, 2005). Yol rijitlik katsayısı k (10^6 N/m) ile yol çökme oranı d (mm/MGT) arasındaki bağıntı şöyledir;

$$d = \frac{1800}{k^2} \qquad \textbf{(6.11)}$$

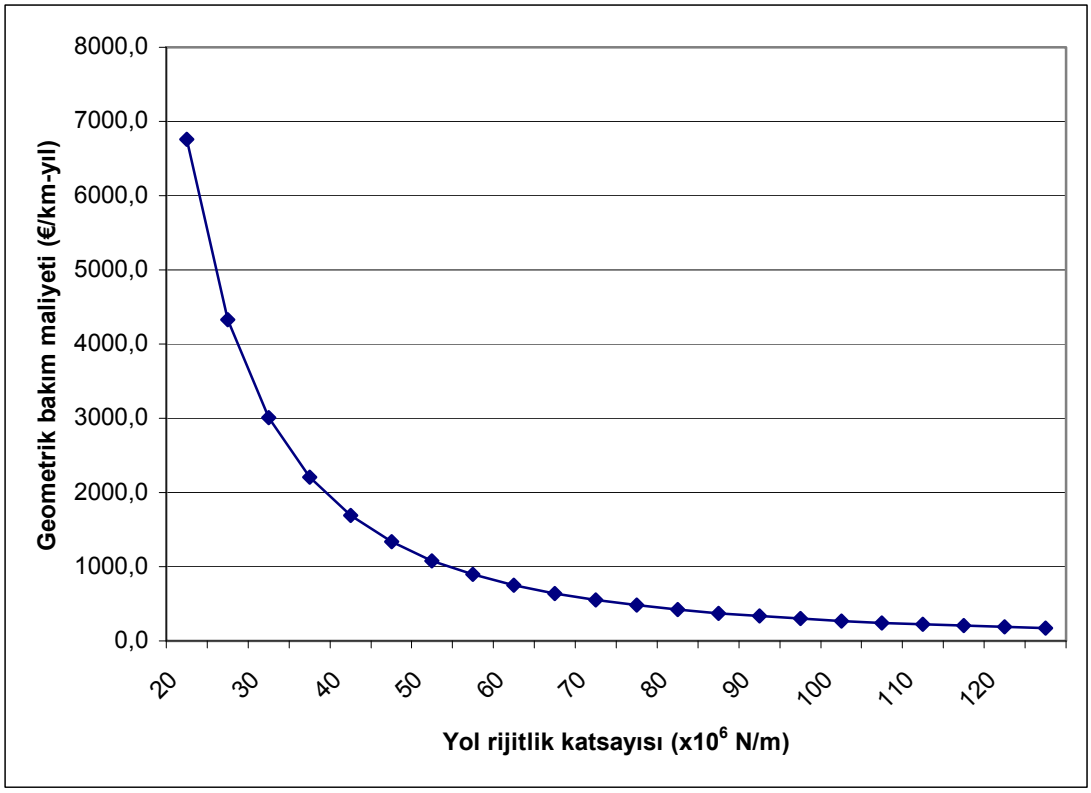


Şekil 6.7 : Yol rijitlik katsayısı- balast çökme miktarı.

(6.11) bağıntısına göre yol rijitlik katsayısına bağlı olarak yol çökme eğrisi Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, yol rijitlik katsayısı 2 kat artarsa, balast çökmesi 4 kat azalır. Yol çökme hızı ile yol geometrik bakım aralığı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Balast çökmesi durumunda yani yolun yatay ve düşey geometrisi bozulduğu zaman dresajlı ve nivelmanlı buraj makineleri ile tamirat yapılmalıdır.

İstanbul Aksaray-Havalimanı metro hattı için yol rijitlik katsayısı ile yol geometrik bakım maliyeti arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Metro hattı 1989 yılında işletmeye açılmış ve ilk buraj 8 yıl sonra yapılmıştır. Hattın bazı kesimlerinde aynı trafik yükü geçmesine karşın, yol çökme miktarı farklı olduğu için buraj bakım aralığı da farklı olmuştur. Buraj aralığı tabii zeminli kısımlarda 1 yıl, uzun tünel kısımlarında 3-4 yıl ve viyadük kısımlarında 1-2 yıl arasında değişmektedir. Tünel ve viyadüklerde beton zemin olduğu bilindiğine göre, bu kısımlarda buraj aralığının tabii zeminli yol kısmına göre 2-4 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Tünel ve viyadüklerde aynı trafik yükü ve aynı beton zemin bulunmasına karşın, buraj aralığının dolayısıyla balast çökme hızının farklı olmasının nedeni, viyadüklerde yağmur ve çevreden gelen toz ve yaprak gibi pisliklerden dolayı balastın kirlenmesi ve balastın daha fazla çökmesi ile açıklanabilir.

Metro hattındaki yıllık trafik yükü yaklaşık 10 MGT (milyon gros ton) ve 1 km yolun buraj maliyeti 1700 € olarak hesaplanmıştır. Yol rijitlik katsayısı ile buraj bakım maliyeti arasında genel bir ilişki kurulduğu zaman Şekil 6.8'deki grafik elde edilmiş olur.



Şekil 6.8 : Yol rijitlik katsayısı- geometrik bakım maliyeti.

Bu çalışmalara göre yol rijitliğinin optimum bir değeri olmalıdır, çünkü

- Dinamik yüklerin azalması, daha iyi bir yük dağılımı ve daha düşük balast titreşimleri açısından düşük yol rijitliği gerekir,
- Enerji tüketimini azaltmak, ray gerilmelerini düşürmek, balast çökmesini azaltmak ve buna bağlı olarak geometrik bakım ihtiyacını azaltmak için yüksek yol rijitliği gerekir.

Alman Demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi olarak 1.2-1.5 mm ve buna göre optimum yol rijitliği 50-100 $x10^6$ N/m belirlenmiştir, (Lichtberger, 2005). Optimum yol rijitliği tren hızına bağlı olarak değişmektedir. 200 km/saat tren hızı için k=50 $x10^6$ N/m ve 300 km/saat tren hızı için k=78 $x10^6$ N/m belirlenmiştir, (Wang, 2005).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tezi kapsamında, ray-tekerlek titreşimlerinin demiryolu elemanlarına etkisi çok yönlü olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir. İlk üç bölümde, titreşimlerin genel teorisinden başlayarak, demiryolu titreşimlerinin nedenleri, etkileri, modelleri ve özellikleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, balastlı ve çelik plakalı balastsız üstyapıları içeren örnek hatta statik ve dinamik analiz uygulanmış ve üstyapıdaki tüm elemanların farklı hesap yöntemlerine ve farklı değerlere göre dinamik etkileri, ray çökmeleri, ray eğilme momentleri ve doğal frekansları araştırılmıştır.

Demiryollarında genelde kabul gören hesaplama yöntemi, statik hesap yapılarak, dinamik etkileri hesaba katmak için sonuçları dinamik büyütme faktörü ile çarpmak şeklindedir. Ancak bu yaklaşım özellikle yüksek hızlı hatlarda yetersiz kaldığı ve titreşimlerin de dahil edilmesi gerekli görüldüğü için dinamik analize ihtiyaç duyulmuştur. Trenin neden olduğu tahrik (uyartı) frekansı ile demiryolunun öz (doğal) frekanslarından birinin eşit olması durumunda ortaya çıkan rezonans olayını anlamak ve aşırı düzeyde artan dinamik etkileri hesaplamak için dinamik analiz gereklidir. Bu çalışmanın bir bölümünde, yukarıda tanımlanan her iki yol modeli üzerinde dinamik analiz yapılarak, özellikle rezonans olayı irdelenmekte, analitik analiz ve nümerik analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

Analitik analiz sürekli elastik mesnet üzerine oturan sonsuz kiriş modeline göre, nümerik analiz ise, ayrık mesnetler üzerine oturan sonlu (otuz mesnet aralığı boyunda) kiriş modeline göre yapılmıştır. Analitik yöntemde demiryolu tek ve çift kiriş olarak modellenmiş ve MATLAB 6.5 paket programı ile, nümerik yöntemde ise çift kirişli yol modeli ANSYS 9.0 sonlu elemanlar paket programı ile çözümlenmiştir. Her iki yöntemde, tek ray ve yarım traversten oluşan yarım yol sistemi modellenmiş ve lineer elastik kabulü yapılmıştır. Ray Euler-Bernoulli kirişi, travers (veya çelik plaka) rijit kütle, balast-zemin tabakası ve elastik tabakalar yay ve viskoz sönümleyici olarak modele katılmıştır. Tekerlek yükü hareketsiz ve 0-1500 Hz frekans aralığında harmonik değişen tek yük olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar analizi, daha karmaşık ve daha fazla zaman gerektirmesine karşın, gerçeğe daha

yakın olduğu için çok daha doğru sonuçlar vermektedir. Sonlu elemanlar yönteminde, ray ve mesnetin (traversin veya çelik plakanın) dinamik tepki davranışı ve deplasmanları ayrı ayrı hesaplanmış ve mesnetin dinamik tepki davranışı ile rayın tepki davranışının birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür.

Analitik çözümde, sürekli mesnetli yol modeli olduğu için, tekerlek yükü mesnet üzerindedir. Nümerik çözümde ise, tekerlek yükü mesnet üstünde ve iki mesnet arasında alınarak heriki durumdaki dinamik tepkiler belirlenip, karşılaştırılmıştır. Tekerlek yükü iki travers ortasında alındığında, dinamik tepki grafiğinde ani pik yapan mesnet öz frekansı rahatlıkla bulunabilirken, sürekli mesnetli modelde mesnet öz frekansının hesaplanması mümkün olmamaktadır.

Analitik ve nümerik analizle elde edilen diğer önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Nümerik analizde iki mesnet arasındaki dinamik ray eğilme momentinin mesnet noktasındaki ray eğilme momentinin 8 katına kadar çıkabildiği görülmüştür. Analitik analizde sürekli mesnetli bir yol modeli olduğu için, sadece mesnet noktasındaki eğilme momenti hesaplanabilmektedir. Ayrıca her iki analizin mesnet noktasındaki eğilme momentleri çok farklı çıkmıştır. Özellikle balastsız yol modelinde analitik analizde eğilme moment değerleri iki kata varan değerde olmaktadır. Bu nedenle demiryolu üstyapı hesabı için analitik analiz yerine nümerik analiz kullanılması gerektiği ve iki mesnet arasındaki eğilme momentinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Klasik demiryolu hesabında, statik analiz yapılarak elde edilen sonuçlar, Eisenmann dinamik büyütme faktörü ile çarpılmaktadır. Bu faktör hıza ve yolun durumuna bağlı bir değerdir. Demiryolunda rezonans durumunda ortaya çıkan dinamik etkiler, Eisenmann dinamik büyütme faktöründen daha büyük olmaktadır. Eisenmann'a göre büyütme faktörü en fazla 2-3 gibi değer alırken, dinamik analize göre bu faktör mesnet öz frekansında 9-10 gibi değer almaktadır. Bu nedenle taşıt hızlarının yüksek olduğu ve çevresel etkilerin önemli olduğu demiryolu hatları için statik analiz yerine dinamik analiz yapılması gerekmektedir.
- Analiz sonuçlarına göre, demiryolu dinamik davranışını en çok etkileyen parametrenin zemin-balast tabakası rijitliği olduğu görülmektedir. Zemin

rijitliği arttıkça, ray-travers çökmesi ve dolayısıyla geometrik bakım ihtiyacı azalmaktadır. Dinamik analiz sonucuna göre killi-siltli zayıf kalitedeki zemine nazaran kaya zeminli bir hatta ray çökmesi yarı yarıya azalmaktadır. Zemin-balast tabakanın rijitlik katsayısı en az $25x10^6$ N/m (yatak modülü en az 100x $x10^6$ N/m^3) olarak seçilmesi uygundur.

- Analiz sonuçlarına göre, zemin rijitliği arttıkça traverse gelen indirgenmiş tekerlek yükü artmaktadır. Dinamik analize göre killi-siltli zayıf kalitedeki zeminde, travers üstünde etkiyen tekerlek yükünün yaklaşık üçte biri traverse iletilirken, kaya ve beton zeminde tekerlek yükünün yaklaşık yarısı traverse iletilmektedir. Yani konfor, taşıt stabilitesi ve bakım maliyeti açısından zemin-balast rijitliğinin veya yol rijitliğinin bir optimum değeri olmalıdır.

- Balastsız üstyapıda, balastın görevini yapan selet altı elastik tabakanın rijitlik ve sönüm katsayısı arttıkça, dinamik ray çökme ve ray eğilme momenti önemli oranda azalmaktadır. Fc 14 (rijitlik katsayısı $90x10^6$ N/m, sönüm katsayısı 4,1x 10^3 Ns/m) elastik tabaka tipine göre 1403-N (rijitlik katsayısı $171x10^6$ N/m, sönüm katsayısı 17,1x 10^3 Ns/m) elastik tabaka için dinamik ray çökme yaklaşık %70 ve dinamik ray eğilme momenti yaklaşık %50 azalmıştır.

- Her iki yol modelinin öz frekansları ve farklı yol parametrelerinin öz frekanslara etkisi tespit edilmiştir. Özellikle yol öz frekansında ve mesnet öz frekansında ortaya çıkan rezonans durumunda dinamik ray çökme ve ray eğilme momentinin statik değerlere göre 8-9 kat arttığı görülmüştür. Rezonans durumundan kaçınmak için taşıttan kaynaklanan tahrik frekansını veya yolun öz frekansını değiştirmek gereklidir. Bunun için yol öz frekansını etkileyen parametreleri belirlemek önemli bir husustur. Analize göre yol öz frekansının balast-zemin tabaka rijitlik katsayısına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Mesnet öz frekansı ise ray tipine, mesnet aralığına ve ray-selet altı elastik tabaka tipine bağlı olarak değişmektedir. Mevcut demiryolunda uygulama açısından mesnet öz frekansını değiştirmek için travers aralığı azaltılabilir veya arttırılabilir ya da ray altındaki elastik tabaka tipi değiştirilebilir.

Aksaray-Havalimanı hafif metro hattında bir dizi titreşim ölçümü yapılmıştır. Öncelikle, belirli tren hızlarında ve belirli derecede aşınmış tekerleklere sahip araçlardan oluşan dizilerin rayda oluşturdukları yer değiştirme ve titreşim ivmeleri ölçülmüştür. Ayrıca çekiç darbe testi ile demiryolunun öz frekansları belirlenmiştir. Bu öz frekanslara göre sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır. Modelde kabul edilen balast ve elastik tabakanın rijitlik katsayısı ve sönüm katsayısı değerleri her seferinde değiştirilerek ölçümle elde edilen frekans-dinamik tepki grafiğine en yakın grafik elde edilmeye çalışılmaktadır. Ölçüm sonucu ile aynı doğal frekanslar ve dinamik tepki değerleri elde edildiğinde model doğrulanmış olmaktadır. Balastsız yol modeli ölçüm sonucuna göre tam olarak doğrulanabilirken, balastlı yol modelinde rezonans durumundaki dinamik tepki farklı çıkmaktadır. Bunun nedeni, muhtemelen sahada yapılan ölçümlerde kontrol edilemeyen travers aralığı, bağlantı elemanı ve balast sıkılığı, değişken zemin karakteristiği, balast granülometrisi, balast tabaka kalınlığı, drenaj kalitesi gibi bazı parametrelerin bulunmasıdır. Konforla ilgili olarak İstanbul hafif metro hattında sürücü koltuğunun altına yerleştirilen üç eksenli ivme ölçerle taşıt titreşim ivmeleri ölçülmüş ve konfor düzeyi ile yol kalitesi arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Arazi titreşim ölçümlerinden elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Taşıt hızının 30 km/saat'dan 60 km/saat'e çıkması durumunda ray titreşim ivme ve yer değiştirmeleri yaklaşık 3-4 kat artmaktadır.
- Tekerleklerin kat ettikleri mesafe arttıkça ray titreşimleri de artmaktadır ancak kilometre değeri ile titreşim ivmeleri arasında doğrusal bir ilişki kurulamamıştır. Ölçümden, tekerlek tornalama ile tekerlek profil düzeltme bakımının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- Ray mantarındaki ondülasyonlar ray titreşimlerini çok fazla arttırmaktadır. Ray taşlama sonrasında ondülasyondan kaynaklanan titreşimlerde önemli seviyede azalma sağlanmıştır. Maksimum ray ivmesi 12 m/sn^2'den 9 m/sn^2 düzeyine inmiştir. Bu nedenle ondülasyon derinliği 0,5 mm'ye ulaşmadan önce raylar periyodik olarak taşlanmalıdır.
- Balastlı hatlarda ray titreşimlerini azaltmak için Vossloh E14 elastik ray bağlantı sistemi denenmiş ve titreşim hızının bu bağlantı elemanı ile neredeyse yarı yarıya azaldığı görülmüştür. Bu sistemde ray altına ilave

olarak rijitlik katsayısı $15x10^6$ N/m olan bir esnek elastik tabaka eklenmektedir.

- Balastsız yolda elastik tabakanın dinamik özellikleri çekiç darbe testi ile belirlenebilmektedir. İstanbul hafif metro hattında balastsız üstyapıda çelik plaka altındaki elastik tabakanın rijitlik katsayısının $85x10^6$ N/m ve sönüm katsayısının $3.55x10^3$ Nsn/m olduğu belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre çok iyi uyumlu bir sonlu eleman modeli elde etmek ve bu modele göre dinamik analiz yapmak mümkündür.
- Ölçüm sonuçlarına göre, zemin-balast tabaka rijitlik katsayısının ve travers aralığının yol ve mesnet öz frekanslarını değiştirdiği görülmüştür.
- Ray altı elastik tabaka yerinden çıkarıldığında, dinamik tepkinin arttığı ve dolayısıyla dinamik büyütme faktörünün 6-8 arasında olduğu ölçülmüştür. Bu nedenle ray altı elastik tabakanın yerinde olup olmadığı, periyodik olarak kontrol edilmeli ve yerinden çıkmış olanlar hemen yerine yerleştirilmelidir.
- Balastlı yolda, kontrol edilemeyen çok sayıda parametre (balast tabakası kalınlığı, travers altı gizli boşluklar, balast malzemesinin köşeli veya oval olması) olduğu için elastik tabakaların dinamik özelliklerinin belirlenmesinde arazi ölçümlerinin yeterli olmadığı, laboratuvarda kontrollü titreşim ölçümlerinin de yapılması gerektiği görülmektedir.
- Yolculuk konforu ölçümlerine göre, balast ve muhtemelen altyapı tabakasındaki önemli bozulmaların yolculuk konforunu olumsuz etkilediği düşünülmüştür. Zemin-balast tabaka rijitlik katsayısı düşük olan kesimlerde yol geometrisinin daha çabuk bozulduğu ve yolculuk konforunun daha düşük olduğu görülmektedir.
- Yenibosna-Havalimanı istasyonları arasında bulunan balastsız üstyapıda ve alt tabakası beton olan tünel ve viyadük üstündeki balastlı hat kısımlarında yolculuk konforunun (taşıt titreşim ivmesi 0,5-0,8 m/s^2 arasında) diğer tabii zeminli balastlı hat kısımlarına (taşıt titreşim ivmesi 0,8-1,6 m/s^2 arasında) göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Son bölümde, titreşimi azaltmak için taşıtta ve yolda alınabilecek önlemler açıklanmıştır. Taşıtta alınabilecek önlemler; yaylandırılmayan kütleyi azaltmak,

birincil süspansiyon rijitliğini düşürmek, uygun damper sistemi seçmek, esnek tekerlek kullanmak, tekerlekleri tornalamak, kayma kontrol (anti-slip) sistemi kullanmak ve taşıt hızını değiştirmektir. Yolda alınabilecek önlemler ise, uzun kaynaklı ray kullanmak, oynar göbekli makas kullanmak, rayları düzleştirmek, ray taşlaması yapmak, elastik ray bağlantı elemanlarını kullanmak, travers altı elastik tabaka kullanmak, bohçalı travers kullanmak, balast kalınlığını arttırmak, balast altı beton döşeme kullanmak, balast altı elastik tabaka kullanmak, zemini iyileştirmek, sürekli elastik mesnetli döşeme ve kütle-yay sistemi kullanmaktır. Titreşim izolasyonu için rijitlik oranı düşük olan elastik tabaka yolun daha alt katmanlarına (travers altı, balast altı) yerleştirilmelidir. Tünel ve viyadüklerde balast altı elastik tabaka ve tabii zeminli hatların kurba kesimlerinde travers altı elastik tabaka kullanılması titreşimleri ve ondülasyonları azaltmak için faydalı yöntemlerdir.

Sonuç olarak, bu çalışmada ülkemizde ilk defa doktora düzeyinde ray-tekerlek titreşimleri çok yönlü olarak incelenmiştir. Burada iki önemli husus karşımıza çıkmaktadır: Yeni demiryolu projelerinin dinamik tasarımında ve mevcut hatlar için titreşim analizi yapılarak gerekli kesimlerde ihtiyaç duyulan titreşim önlemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Demiryolu titreşimlerinin taşıt-yol-çevre sistemindeki istenmeyen etkilerini azaltmak için, yeni yolların tasarım aşamasında dinamik analiz yapılarak elastik tabakalarının özellikleri belirlenmelidir. Özellikle demiryolunun tarihi yapı, hastane, konser salonu, okul gibi titreşime duyarlı yapıların yakınlarında geçmesi durumunda, bu yapılara gelen titreşim değerlerinin belli limit değerlerin altında kalması için titreşim sönümleyici özel elastik ray bağlantı sistemleri seçilmelidir. Ayrıca, mevcut hatlarda titreşimlerden kaynaklanan konfor kaybı, yapısal gürültü, bakım maliyetlerinin artması gibi sorunların optimum çözümü için, ölçümlere dayalı dinamik analiz yapılmalıdır.

Bu tezin literatürdeki çalışmalardan farklı yönleri şunlardır:

- Literatürdeki benzer çalışmalarda analitik veya nümerik analizle birlikte saha ölçümleri yapılarak model doğrulanmaktadır. Ancak bu çalışmada balastlı ve balastsız yol modeli için analitik ve nümerik analiz birlikte kullanılmış ve sonuçlar saha ölçümleri ile doğrulanmıştır. Analitik çözüm tek kiriş ve çift kiriş olarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Benzer çalışmalarda, genelde ana demiryolu hatlarında titreşim ölçümleri yapılmaktadır. Ancak bu çalışmada, balastlı ve balastsız üstyapı bulunan bir kentiçi raylı sistem hattında çok değişik yol parametrelerinin (üstyapı tipi, ray tipi, travers tipi, selet kütlesi, elastik tabaka tipi, zemin tipi, mesnet aralığı) yolun dinamik davranışa etkisi modelleme ve titreşim ölçümleri ile belirlenmiştir.
- Burada, özel koşullar altında tren geçişi sırasında ray titreşim ölçümleri yapılmıştır. Bunun için ivme ölçümleri; gece saatlerinde, belirli hızlardaki yolcusuz metro dizileri ölçüm noktasından geçerken yapılmıştır. Ayrıca tekerlek aşınma oranları farklı olan üç farklı metro dizisi oluşturulmuş ve herbiri için ölçümler tekrarlanmıştır. Bu diziler oluşturulurken, tornalama kilometre değerleri birbirine yakın araçlar seçilmiştir. Buradaki amaç, yeni torna bakımından çıkmış, yani tekerlek bandaj yüzeyi düzgün metro dizisi, torna bakım zamanı gelmiş, tekerlek profili bozuk metro dizisi ve bu ikisi arasında kalan bir metro dizisi için titreşim değerlerinin nasıl değiştiğini incelemektir. Literatürde buna benzer olarak tekerlek profil bozukluğunun ray titreşimlerine etkisinin ölçüldüğü bir çalışmaya rastlanmamıştır.
- Ayrıca çalışmada, ray taşlama bakımının ve elastik ray bağlantı elemanının titreşimleri azaltmadaki faydası ölçümler yapılarak tespit edilmiştir. Aynı koşullar altında, ray taşlama öncesinde ve sonrasında ayrıca elastik ray bağlantısı monte edilmiş ve edilmemiş kısımlarda ray titreşimleri ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde, sadece bir bakım çalışmasının veya bir iyileştirme yönteminin faydasına yönelik çalışma yapılmış olup, bu da tez kapsamında gerçekleştirilen yeni bir ölçüm işlemidir.

Her hattın işletme şartları, geometrisi, malzeme karakteristiği, atmosfer şartları, taşıt özellikleri farklı olduğu için, kendine özgü bir davranışı vardır. Yani, benzer çalışmalardan faydalanılmakla birlikte her yeni demiryolu projesinde dinamik davranışı belirlemek için dinamik analiz yapılmalıdır. Bu çalışma, bu konuda çalışacaklar için bir başlangıç olup, bu tezi geliştirici akademik çalışmaların yapılması, özellikle laboratuvar ortamında kontrollü ölçümlerle birlikte titreşim önlemlerinin optimizasyonuna yönelik araştırmalara önem verilmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

Ahlbeck D.R, Meacham H.C, Prause R.H, 1975. The development of analtical models for railroad track dynamics, *Proc. Symp. On Railroad Track Mechanics*, Pergamon Press, Princeton University, April 21-23

Andersson C and Dahlberg T, 1999. Load impacts at railway turnout crossing. *Vehicle System Dynamics,* **33**(Supplement), 131-142.

Auersch L., 2005a. The excitation of ground vibration by rail traffic:theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines, *Journal of Sound and Vibration*, **284**, 103-132.

Auersch L., 2005b. Dynamics of the railway track and the underlying soil:the boundary-element solution, theoretical results and their experimental verification, *Vehicle System Dynamics*, **43** , 671-695.

Banimahd M and Woodward P.K, 2007. Numerical Study of Train Speed Effect on Railway Track Response, 9. Railway Engineering Conference, *Proceedings of the RailwayEngineering Conference,* London, June 20-21.

Bruel and Kjaer, 1989. Human vibrations, Aplications Notes, Revision, DK BR 0456-12.

Carels Patrick, 2006. Low vibration&Noise track systems with tunable properties for modern LRT/Street car track on surface in urban areas, CDM Inc.

Dahlberg T and Nielsen J C O, 1991. Dynamic behaviour of free-free and in-situ concrete railway sleepers, *International Symposium on Precast Concrete Railway Sleepers,* Madrid 1991, 393-416.

Dahlberg T , 1995. Vertical dynamic train-track interaction - verifying a theoretical model by full-scale experiments, *Vehicle System Dynamics,* **24**(Supplememt), 45-57.

Dahlberg T, 2002. Dynamic interaction between train and non-linear railway track model. *In Grundmann and Schuëller (editors), Proceedings of the 4th Internatiuonal Conference on Structural Dynamics, EURODYN2002,* Munich, Germany, 2-5 September, 2002. Swetz &Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 510X.

De Man Amy, 2002. Dynatrack, A survey of dynamic railway track properties and their quality, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda.

Diana G, Cheli F, Bruni S and Collina A, 1994. Interaction between railroad superstructure and railway vehicles. *Vehicle System Dynamics,* **23**(Supplememt), 75-86.

Dörr J, 1948. Das Schwingungsverhalten eines federnd gebetteten,unendlich langen Balkens, Ingenieur-Archiv, **16**, 287-298.

Dukkipati Rao V. and Dong Renguang, 1999. Impact Loads due to Wheel Flats and Shells, *Vehicle System Dynamics*, **31**, 1-22.

EN 1991-2, 2003. Europaische Norm, Eurocode1: Actions on structures-Part 2:Traffic loads on bridges, Brussels.

Erel A., 1996. Raylarda Dalgalı Aşınma, *1.İstanbul Ulusal Ulaşım Sempozyumu ve Sergisi*, İstanbul

Esveld C, 2001. Modern railway track. MRT-Productions, Duisburg, Germany, ISBN 90-800324-3-3 (2nd edition 2001).

Esveld C, 1980. A numerical Butterworth filter for digital data processing, with applications to the analysis of track geometry, *Rail International/Schinen der Welt*.

Fermér M and Nielsen J C O, 1993. Wheel-rail contact forces for flexible versus solid wheels due to tread irregularities, *Proceedings of the 13th IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks,* Chengdu, Sichuan, China, August 23-27, **23**, 142-157.

Frederick C.O, 1978. The effect of wheel and rail irregularities on the track, heavy haul railşways congerence, Perth, Avustralya.

Fremion N, Gaudard J.P, Vincent N, 1996. Improvement of ballast and sleeper description in TWINS:experimental characterization of ballast properties, *Vibratec Report*, **072.028a**

Fröhling R D, 1997. Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spacially varying track stiffness. *PhD thesis*, Faculty of Engineering, University of Pretoria, Pretoria, South Africa.

Fryba L, 1972. Vibration of solids and structures under moving loads. 1rd edition, Noordhoff International Publishing, Groningen, Hollanda, ISBN 90-01-32420-2

Garg Vijay .and Dukkipati Rao V.,1984. Dynamics of Railway Vehicle Sytems, Academic Pres, Ontario, Kanada, ISBN 0-12-275950-8, 1984

Grassie S L, Gregory R W, Harriswon D and Johnson K L, 1982. The dynamic response of railway track to high frequency vertical excitation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science,* **24**(2), 77-90.

Grassie S.L and Cox S.J, 1984. The dynamic response of railway track with flexible sleepers to high frequency vertical excitation, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, IMechE,* **198(D7)**, 117-123.

Grassie S .L and Kalousek J, 1993. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit,* **207(F1)**, 57-68.

Grassie S.L, 1995. Riffeln-Grunde und Gegenmaβnahmen, Der Eisenbahn İngeniur 10,714-723

Grassie S L, 1996. Models of railway track and train-track interaction at high frequencies: Results of benchmark test. *Vehicle System Dynamics,* **25**, 243-262

Jacobsson L, 1998. Review of research on railway ballast behaviour - Experimental findings and constitutive models. *Report F208*, Dept of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, ISSN 0349-8107.

Kaess G, 1983. Ergebnisse von Riffelversuchsstrecken der Deutschen Bundesbahn, Eishenbahntechnische Rundschau ,**10**,701-707

Kargarnovin M.H, Thompson D. and Jones C,.2005. Ride comfort of high-speed trains travelling over railway bridges, *Vehicle System Dynamics*, **43**, 173-199.

Kisilowski J and Knothe K, 1991. Advanced Railway Vehicle System Dynamics, Varşova.

Knothe K L and Grassie S L, 1993. Modelling of railway track and vehicle-track interaction at high frequencies, *Vehicle System Dynamics,* **22**, 209-262.

Knothe K., 1998. Wechelwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg. *Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik,* **122(5)**, 173-180.

Knothe K., 2001. Gleisdynamik;Verlag Ernst&Sohn, Berlin, ISBN 3-433-01760-3, 50

Knothe K. and Wu Y. 2000. Einfluss der Elastizitatsanordnung im Gleis auf die Beanspruchung durch Radunrundheiten, *ETR Eisenbahntechnische Rundschau*, **49**, 150-158

Kurtzweil L.G, 1979. Ground-borne noise and vibration from underground rail systems, Journal of Sound and vibration, **66(3)**, 363-370.

Li D and Selig E T, 1995. Wheel/track dynamic interaction: track substructure perspective. Vehicle System Dynamics, **24**, 183-196.

Lichtberger B., 2005. Track Compendium; Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics, Hamburg, Germany, ISBN 3-7771-0320-9 (1st edition 2005)

Madshus C and Kaynıa A.M, 2000. High-speed railway lines on soft ground:Dynamic behaviour at critical train speed, *Journal of Sound and Vibration* , **231(3)**,689-701.

Müller B. and Frank H., 1994. Ebersbach, dietrich:Elastische Zwischenlagen im Glesi lösen Schwingungsprobleme, Vorabdruck.

Nelson J.T, 1996. Recent development in ground-borne noise and vibration control, *Journal of Sound and Vibration*, **193(1)**, 367-376.

Nielsen J.C.O, 1993. Train-track interaction. Coupling of moving and stationary systems —theoretical and experimental analysis of railway structures considering wheel and track imperfections. *PhD thesis*, Division of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

ORE, 1982. Effects of vibrations on buildings and their occupants analysis of the literature and commentary, **D151 Report 2**, Utrecht, Hollanda

ORE, 1983. Design charts for the track/foundation system, **D117 Report 28,** Utrecht, Hollanda

Oscarsson J, 2001. Dynamic train-track interaction: linear and non-linear track models with property scatter. *PhD thesis*, Dept of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, ISSN 0346-718X.

Öztürk Z. ve Arlı V., 2006. İstanbul kentiçi raylı sistemlerde gürültü sorunu ve çözüm yöntemleri , *Kentiçi Raylı Sistemler Bülteni*.

Öztürk Z. ve Erol H., 2008. Aksaray-Havalimanı hafif metro ve Kabataş-Zeytinburnu tramvay titreşimlerinin yolcu konforu amacıyla ölçülmesi ve değerlendirilmesi, İTÜ Makine Fakültesi.

Pasin F., 2000. Mekanik Titreşimler, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN 975-511-264-2.

Peplow A T, Oscarsson J and Dahlberg T ,1996. Review of research on ballast as track substructure. Report F189, Dept of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, ISSN 0349-8107.

Popp K, Kruse H and Kaiser I, 1999. Vehicle-track dynamics in the mid-frequency range. *Vehicle System Dynamics,* **31(5-6)**, 423-464.

Popp K and Schiehlen W, 2003. System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-43892-0.

Profillidis V.A., 1995. Railway Engineering, Ashgate Publishing Company, Brookfield, UK

Rayleigh J.W.S, 1894. Theory of Sound, McMillian Co., Londra.

Sato Y, Odaka T and Takai H, 1988. Theoretical analyses on vibration of ballasted track. *Quarterly Reports of Railway Technical Research Institute (Japan),* **29(1)**, 30-32.

Sun Y Q and Dhanasekar M, 2002. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system. *International Journal of Solids and Structures,* **39**, 1337-1359.

Thompson D J, van Vliet W J and Verheij J W, 1998. Development of the indirect method for measuring the high frequency dynamic stiffness of resilient elements. *Journal of Sound and Vibration,* **213**, 169-188.

Thompson D J and Verheij J W, 1997. The dynamic behaviour of rail fasteners at high frequencies. *Applied Acoustics,* **52**, 1-17.

Timoshenko S.P, 1927 .Methods of analysis of statical and dynamical stresses in rails, *In Proceedings of the Second International Congress of Applied Mechanics,* Zürih, İsviçre ,.407-420.

Timoshenko S.P, and Young D.H, 1955. Vibration problems in Engineering, 3.edition, D.van Nostrand Co., New York.

Wang Hong, 2005. Research on Rational track structure stiffness and track part stifness of passenger-dedicated railway line, Railway Engineering Conference, London.

Wilson G.P, Sourenman H.J and Nelson J.T, 1983. Control of ground-borne noise and vibration, Journal of Sound and Vibration, **87(2)**, 339-350.

Wu T X and Thompson D J, 2001. Vibration analysis of railway track with multiple wheels on the rail. *Journal of Sound and Vibration,* **239(1)**, 69-97.

Zand J, 1988. Experimental evaluation of dynamic properties of rail pads at lower temperatures, TU-Delft.

Zhai W and Cai Z, 1997. Dynamic interaction between a lumelastik tabaka mass vehicle and a discretely supported continuous rail track. *Computers & Structures,* **63(5),** 987-997.

EKLER

Ek A: Dinamik Titreşim Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları, Örnek Yol Model Parametreleri ve Analitik Yöntem İle Dinamik Analiz Grafikleri

Ek A.1 Matlab programı

MATLAB, ilk defa 1985 yılında C.B Moler tarafından matematik ve özellikle de matris esaslı matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş etkileşimli bir paket programlama dilidir.

MATLAB'da yazılan programlar, MATLAB'ın kendine özgü dili kullanılarak yazılmakta ve MATLAB içinde çalıştırılmaktadır. Ayrıca yazılan programlar DLL ve EXE olarak oluşturulmakta veya C/C++ kodlarına çevrilmektedir. Problemler, MATLAB'da komut satırında çalışan programlar yazarak çözülebilmekte veya MATLAB GUI geliştirme aracı kullanılarak, formlar ve butonlar gibi nesnelerden oluşan görsel yazılımlar geliştirilebilmektedir.

MATLAB mühendislik alanında sayısal hesaplama, veri çözümleri ve grafik işlemlerinde kullanılabilecek genel amaçlı bir program olmakla beraber özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. CONTROL TOOLBOX, SIGNAL TOOLBOX gibi paket programlar CACSD (Bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımı) paketler olup bunlar denetim sistemlerinin tasarımında çok etkili araçlardır. Ayrıca WINDOWS ortamında çalışan SIMULINK, etkileşimli benzetim programlarının hazırlanması ve çalıştırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. FORTRAN ve C dili gibi yüksek seviyeden programlama dilleri ile yapılabilen hesaplamaların pek çoğunu MATLAB ile yapmak mümkündür. Buna karşılık MATLAB fonksiyon kütüphanesi sayesinde FORTRAN ve diğer programlama dillerine göre daha az sayıda komutla çözüm üretmek mümkündür. Gerçekte MATLAB, M-dosyaları (M-files) olarak bilinen pek çok sayıda fonksiyon dosyalarından (alt programlardan) ibarettir. M dosyaları ASCII formatında olup okunabilirliği olan, MATLAB programlama dili kodlarından oluşmuştur. Bu yüzden M-dosyaları kütüphanesi kullanıcı tarafından müdahale edilebilir. Ancak bu kodlara zorunlu olunmadıkça müdahale edilmemesi, değiştirilmemesi gerekir.

MATLAB kullanım yerleri, denklem takımlarının çözümü, doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerinin çözümü, integral hesabı gibi sayısal hesaplamalar, veri çözümleme işlemleri, istatistiksel hesaplamalar ve çözümlemeler, grafik çözümlemeler ve bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımıdır.

Ek A.2 Ansys programı

ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimini simule etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simule edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simulasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. Modüler yapısı sayesinde ANSYS yazılımı sadece ihtiyaç duyulan özelliklerin alınmasına fırsat vererek ilave edilebilen CAD ve FEA bağlantı modülleri ile masa üstünde kullanılan diğer mühendislik yazılımları ile entegre bir şekilde çalışabilmektedir.

ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içindeki ön işlemci imkanları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Ayrıca hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analizde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilmektedir.

ANSYS yazılımı ile özellikle temas algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı yükleme özellikleri ve lineer olmayan malzeme modelleri sayesinde yüksek mühendislik seviyedeki analizleri hızlı, güvenilir ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Çizelge A.1 : Rayların mekanik özellikleri.

Ray tipi	Kesit Alanı A_k (mm^2)	Birim uzunluk kütlesi m (kg/m)	Atalet momenti I($x10^{-8}m^4$)	Eğilme rijitliği EI($x10^6$ Nm^2)	Kesme faktörü γ
S49	6297	49.43	1819	3,82	1,33
S54	6948	54.54	2073	4,35	1,29
UIC54	6934	54.43	2127	4,93	1,14
UIC60	7687	60.34	3055	6,42	0,97
BS113A	7183	56.39	2349	4,90	1,18

Çizelge A.2 : Travers kütleleri.

Travers tipi	Travers alanı A_t (m^2)	Yarım travers kütlesi (kg)	Yarım traversin birim uzunluk kütlesi (kg/m)			
			Travers aralığı 60cm	Travers aralığı 65cm	Travers aralığı 70cm	Travers aralığı 75cm
B70W monoblok beton travers	0,593	151,5	252,5	233,1	216,4	202,0
B58 monoblok beton travers	0,518	124,5	207,5	191,5	177,9	166,0

Çizelge A.3 : Balastlı yol modeli parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Ray özellikleri			
Ray tipi	S49		
Rayın atalet momenti	I	1819×10^{-8}	m^4
Rayın kesit alanı	A_k	6297×10^{-6}	m^2
Rayın kesme katsayısı	K	0.35	-
Ray çeliğinin elastisite modülü	E	$2{,}1 \times 10^{11}$	N/m^2
Ray çeliğinin yoğunluğu	ρ	7850	kg/m^3
Rayın poisson oranı	ν	0,3	-
Rayın birim kütlesi	m	49,43	kg/m
Mesnet özellikleri			
Travers aralığı	a	60	cm
Travers tipi		B58 monoblok beton	
Yarım travers kütlesi	m	124.5	kg
Rp 1 Ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayısı	k	970×10^6	N/m
Rp 1 Ray altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	32×10^3	Ns/m
İyi zeminli balast tabakasının rijitlik katsayısı	k	$25{,}86 \times 10^6$	N/m
Balast tabakasının sönümleme katsayısı	c	57×10^3	Ns/m

Çizelge A.4 : Balastlı yol modeli ray altı elastik tabakaları dinamik özellikleri.

Referans	Ray altı elastik tabaka tipi	Rijitlik katsayısı (10^6 N/m)	Sönüm katsayısı (10^3 Ns/m)
Zand (1988)	Rp 1	970	32
Zand (1988)	Rp 2	2990	29
Knothe ve Grassie (1993)	Rp 3	70	7
Knothe ve Grassie (1993)	Rp 4	250	6

Çizelge A.5 : Zemin yatak modülü, (Lichtberger, 2005).

Zemin Sınıfı	Yatak modülü (x10^7 N/m^3)
Çok zayıf zemin (bataklık,ince kum)	2
Zayıf zemin (kohesif, kil)	5
İyi zemin (iri kum-çakıl)	10
Çok iyi zemin (çakıl-kaya)	15-20
Beton temel (tünel, köprü), kayalık zemin	25-30

Çizelge A.6 : Zemin-balast rijitlik katsayıları (X10^6 N/m).

Monoblok beton travers tipi	Zayıf zemin	İyi zemin	Çok iyi zemin	Beton veya kaya zemin
B58	19,17	25,90	51,8	77,70
B70 W	21,94	29,65	59,3	88,95

Çizelge A.5'teki zemin yatak modülleri ve elastisite modülü 150x10^6 N/m^2 olan balast tabakası (h=30cm) kabulü yapılarak Odemark eşdeğer tabaka teorisinden

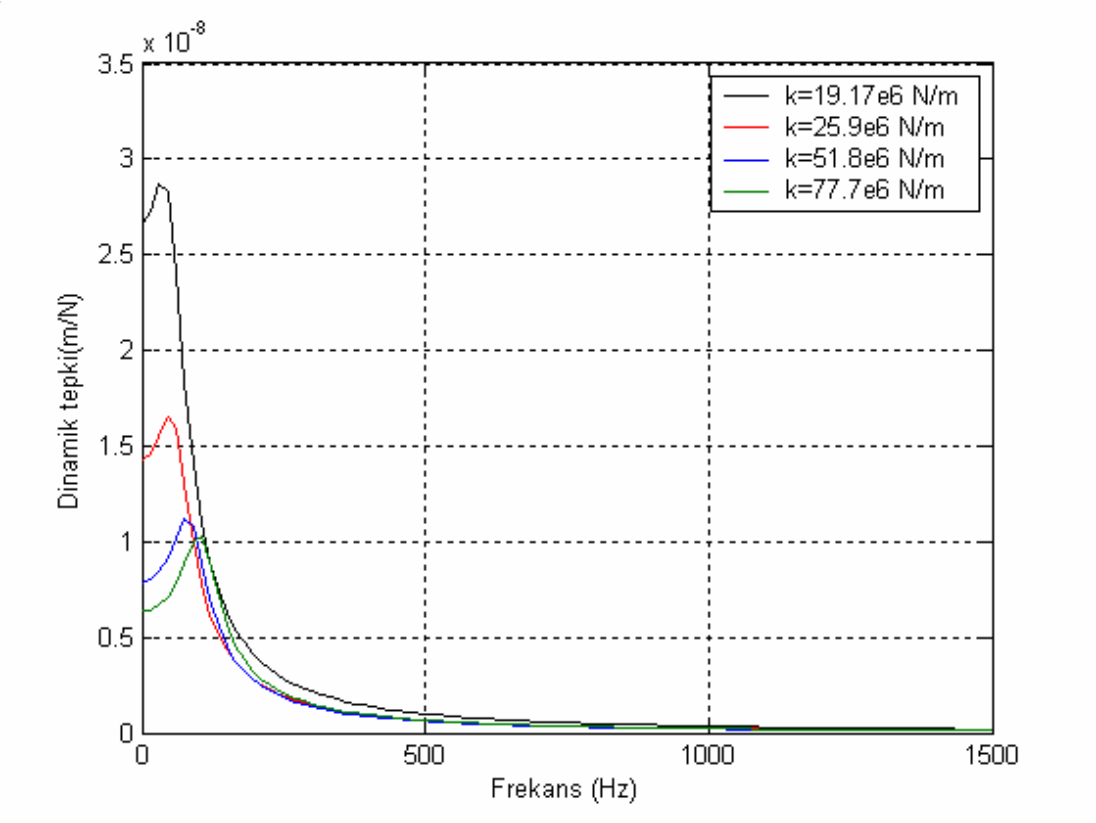
zemin-balast rijitlik katsayıları hesaplanmıştır ve sonuçları Çizelge A.6'da verilmiştir.

Çizelge A.7 : Çelik seletli balastsız yol model parametreleri.

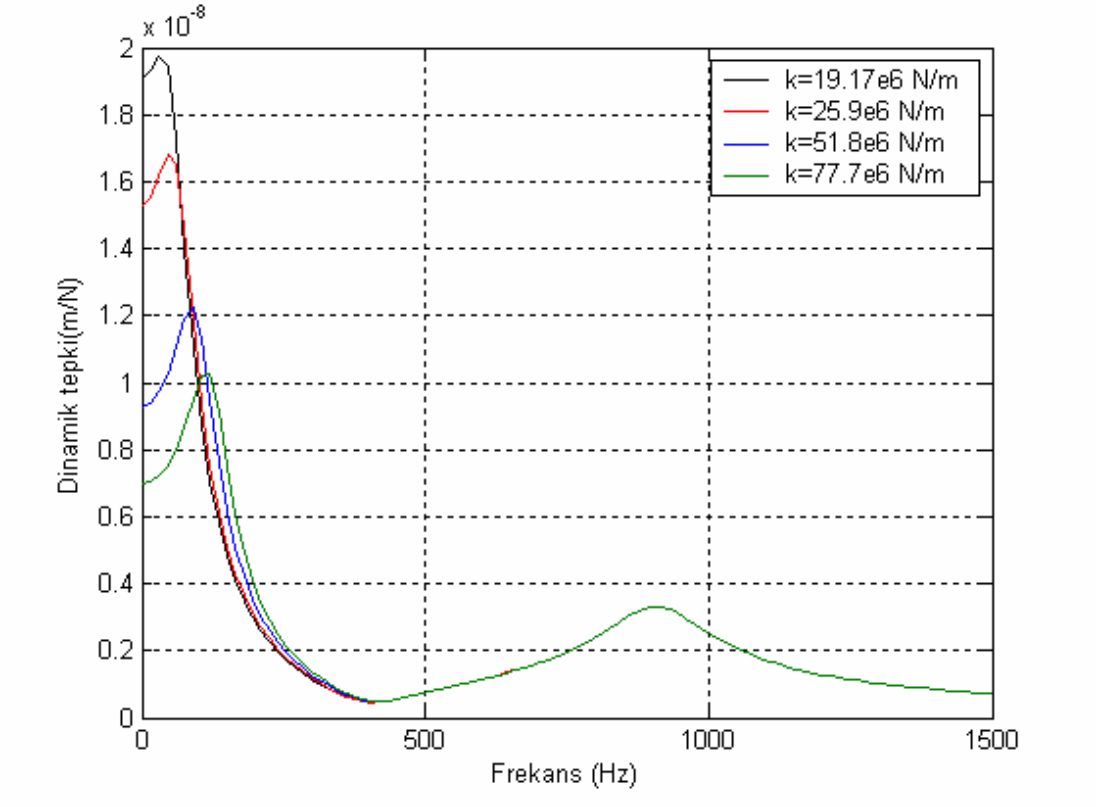
Parametre	Sembol	Değer	Birim
	Ray özellikleri		
Ray tipi	S49		
Rayın atalet momenti	I	1819×10^{-8}	m^4
Rayın kesit alanı	A	6297×10^{-6}	m^2
Rayın kesme katsayısı	K	0.35	-
Ray çeliğinin elastisite modülü	E	$2{,}1 \times 10^{11}$	N/m^2
Ray çeliğinin yoğunluğu	ρ	7850	kg/m^3
Rayın poisson oranı	ν	0,3	-
Rayın birim kütlesi	m	49,43	kg/m
	Mesnet özellikleri		
Selet aralığı	a	75	cm
Çelik selet kütlesi	m	8	kg
Fc584 Ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayısı	k	970×10^6	N/m
Fc584 Ray altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	32×10^3	Ns/m
Fc 14 Selet altı elastik tabakanı rijitlik katsayısı	k	90×10^6	N/m
Fc 14 Selet altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	$4{,}1 \times 10^3$	Ns/m

Çizelge A.8 : Bazı selet altı elastik tabakaların rijitlik ve sönüm katsayıları.

Selet altı elastik tabaka tipi	Fc14	Fc864	1403-N
Rijitlik katsayısı (10^6 N/m)	90	125	171
Sönüm katsayısı (10^3 Ns/m)	4,1	8	17,1

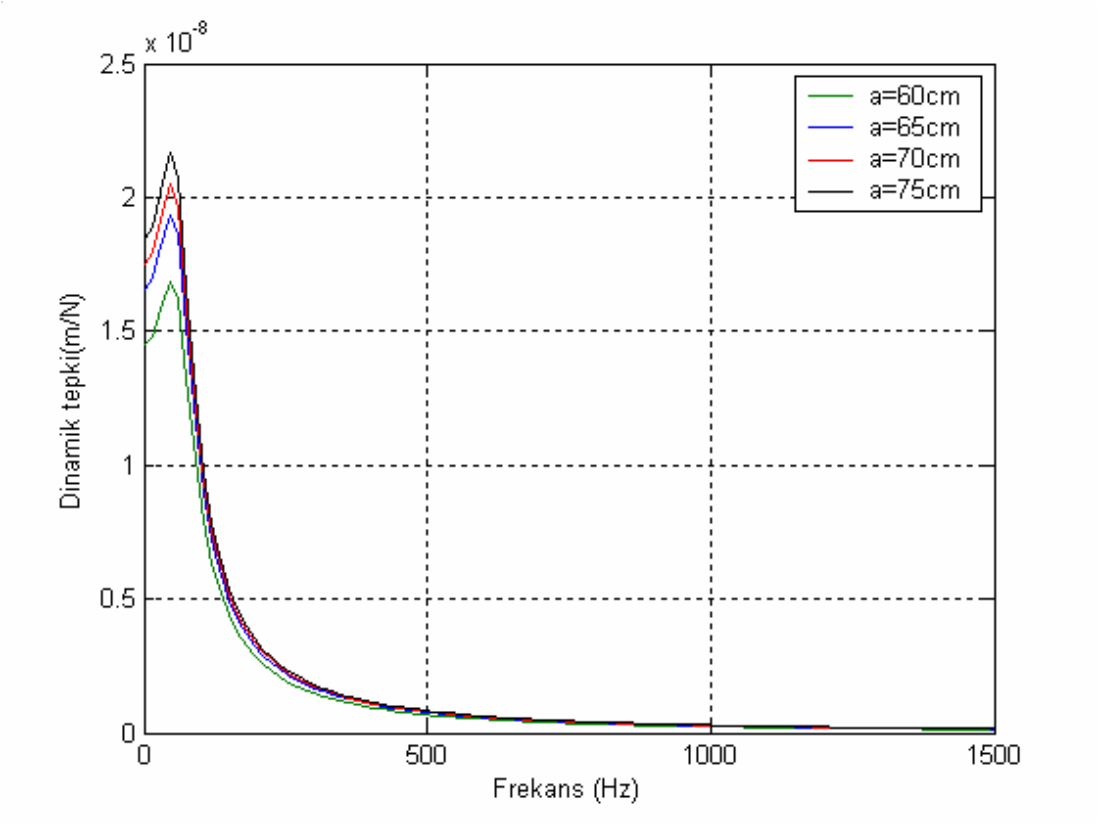


(a)

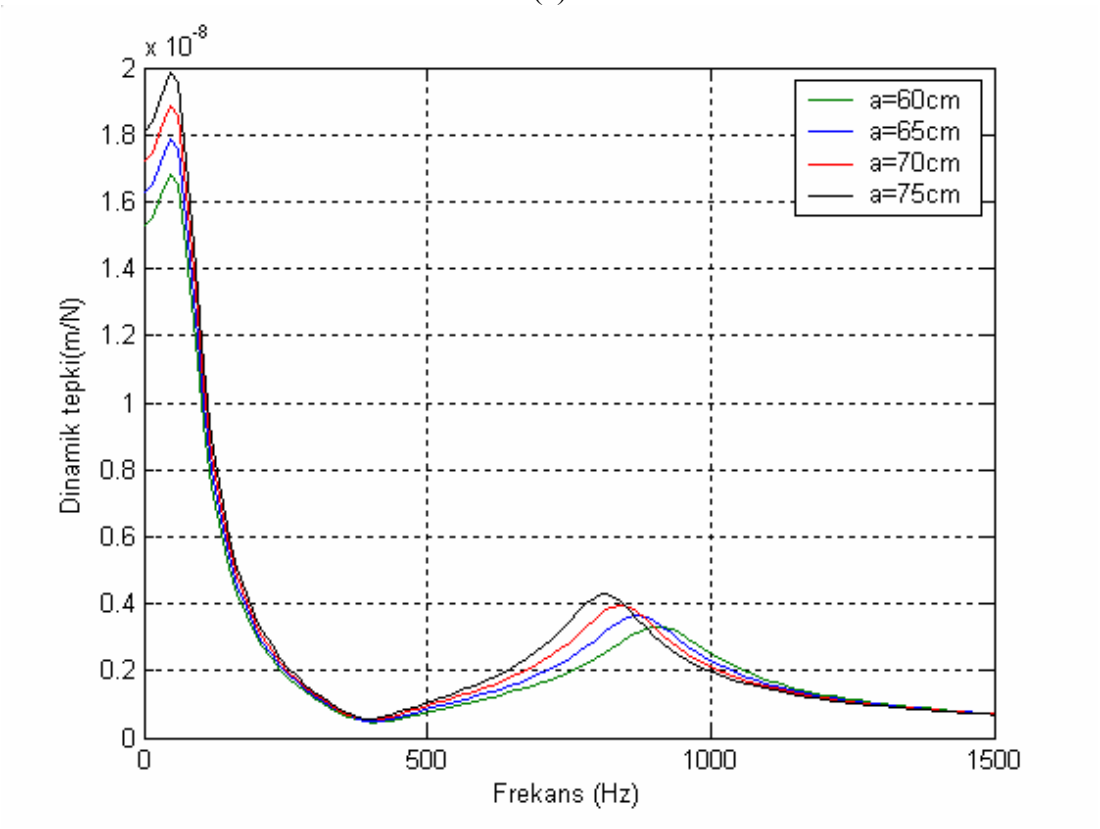


(b)

Şekil A.1 : Farklı zemin tipleri için tek kirişli model (a) ve çift kirişli model (b) frekans-dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli).

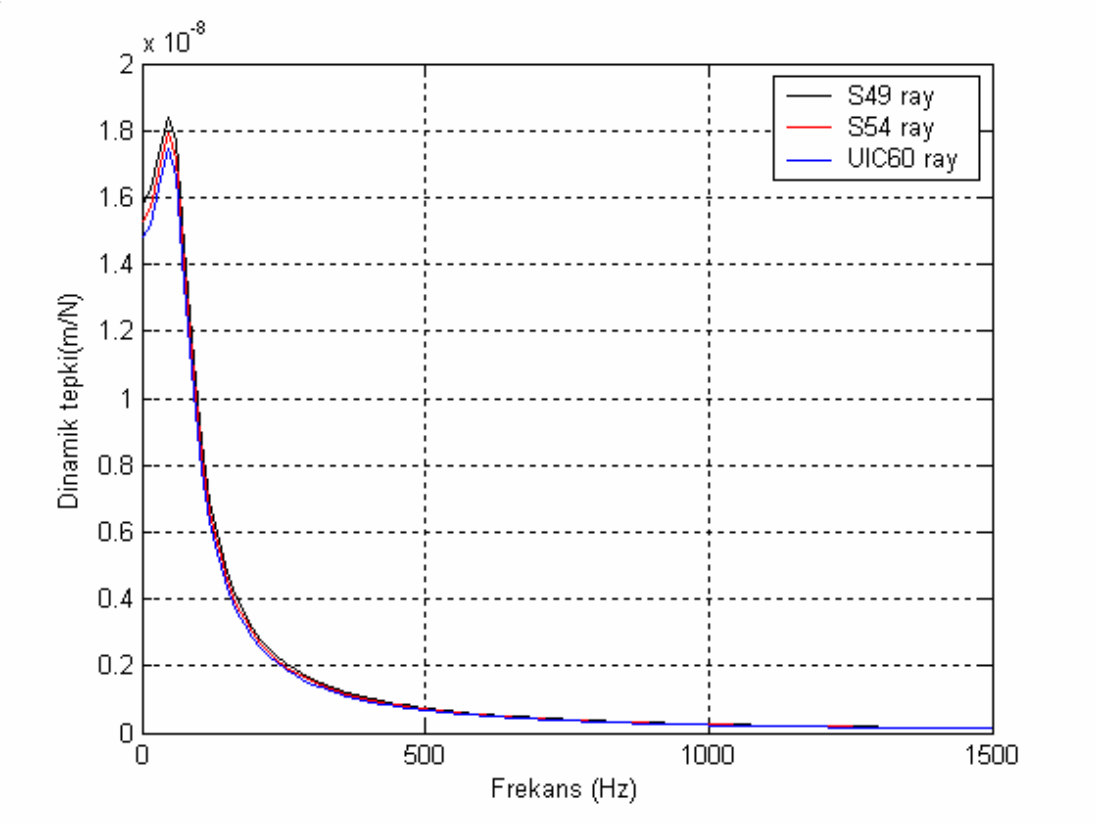


(a)

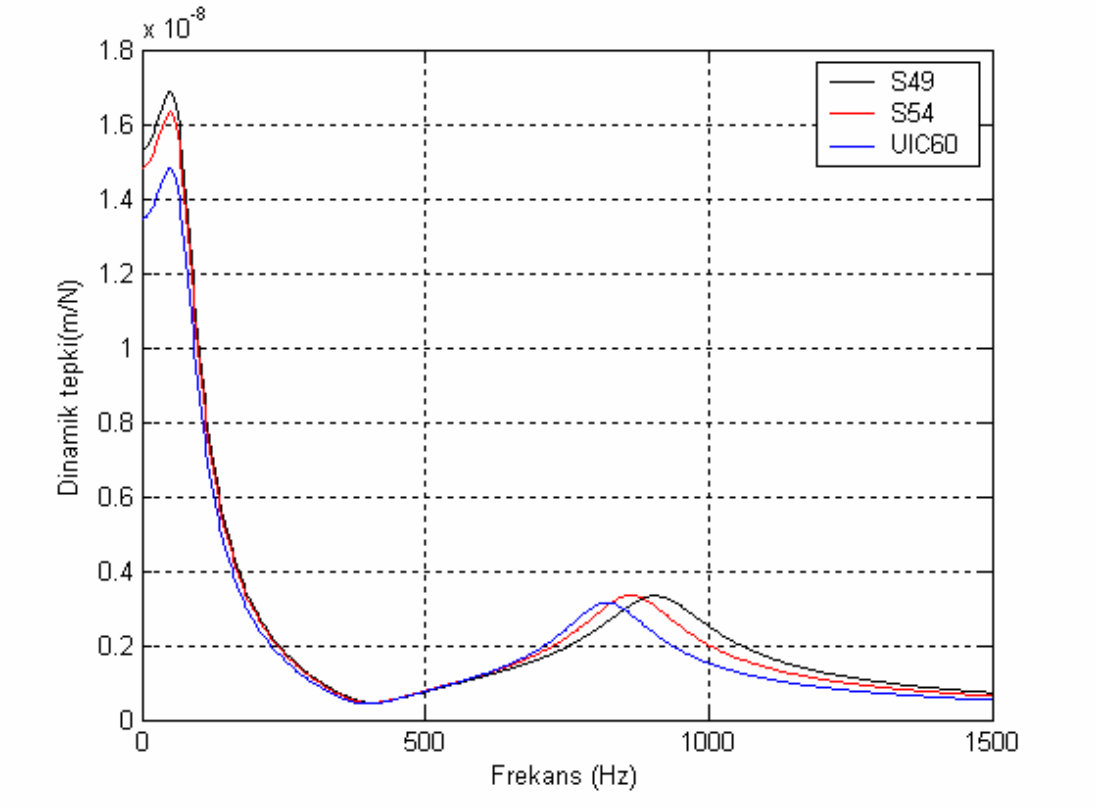


(b)

Şekil A.2 : Farklı travers aralıkları için tek kirişli model (a) ve çift kirişli model (b) frekans-dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli).

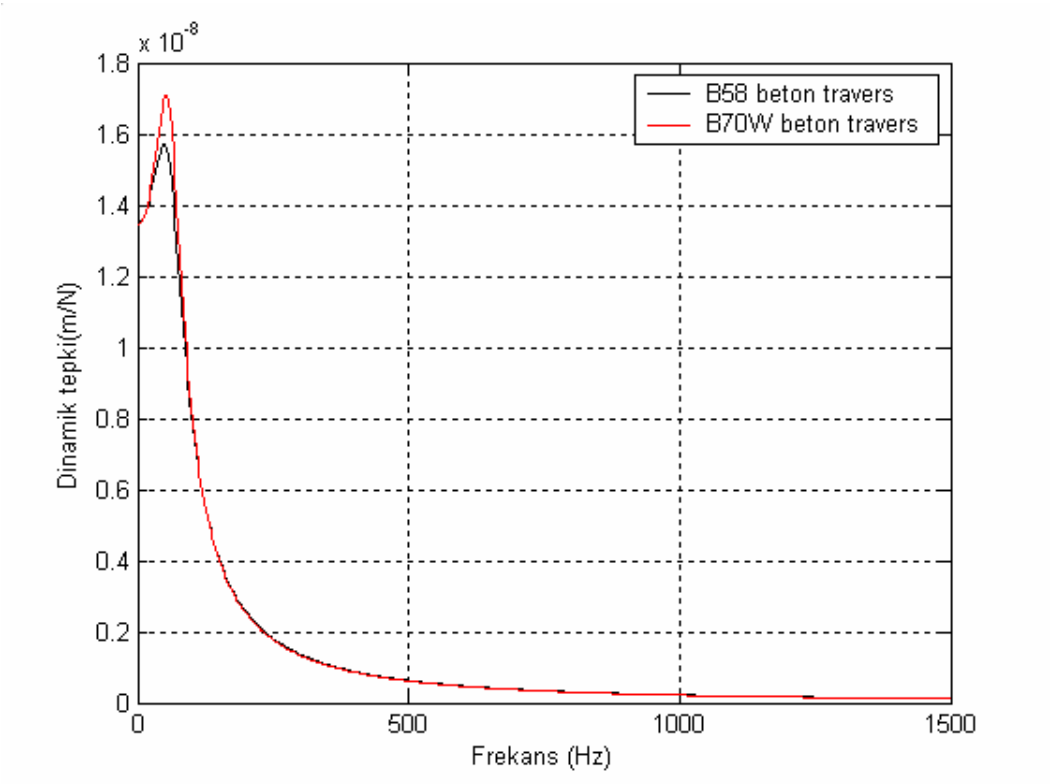


(a)

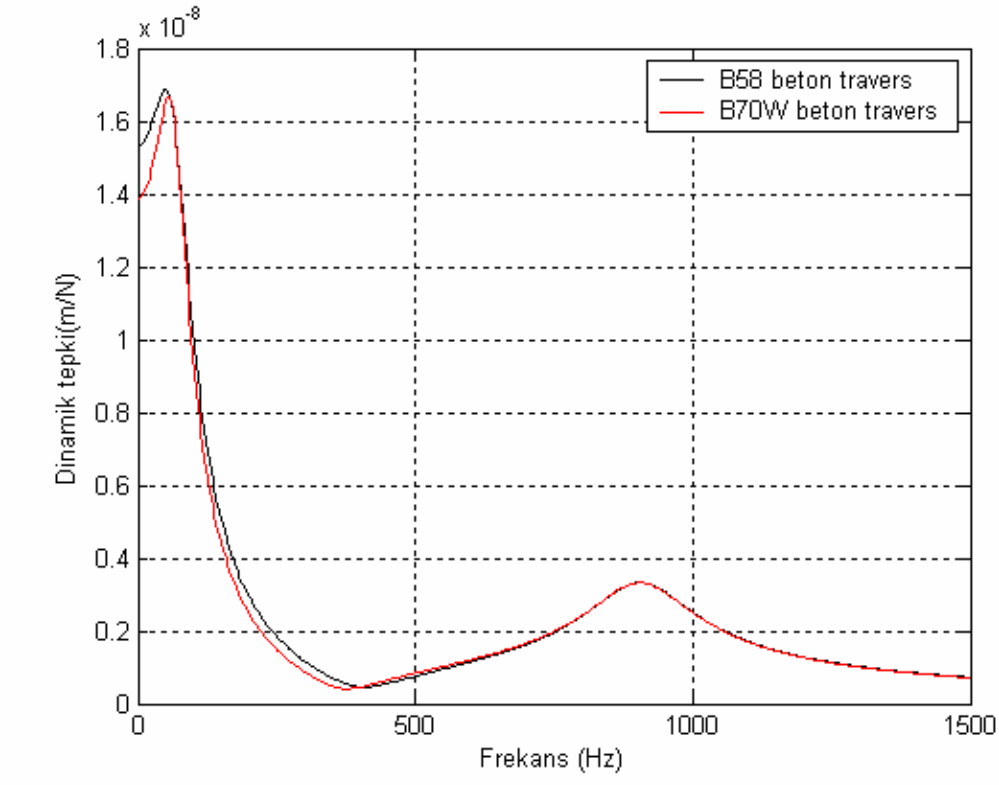


(b)

Şekil A.3 : Farklı ray tipleri için tek kirişli model (a) ve çift kirişli model (b) frekans dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli).

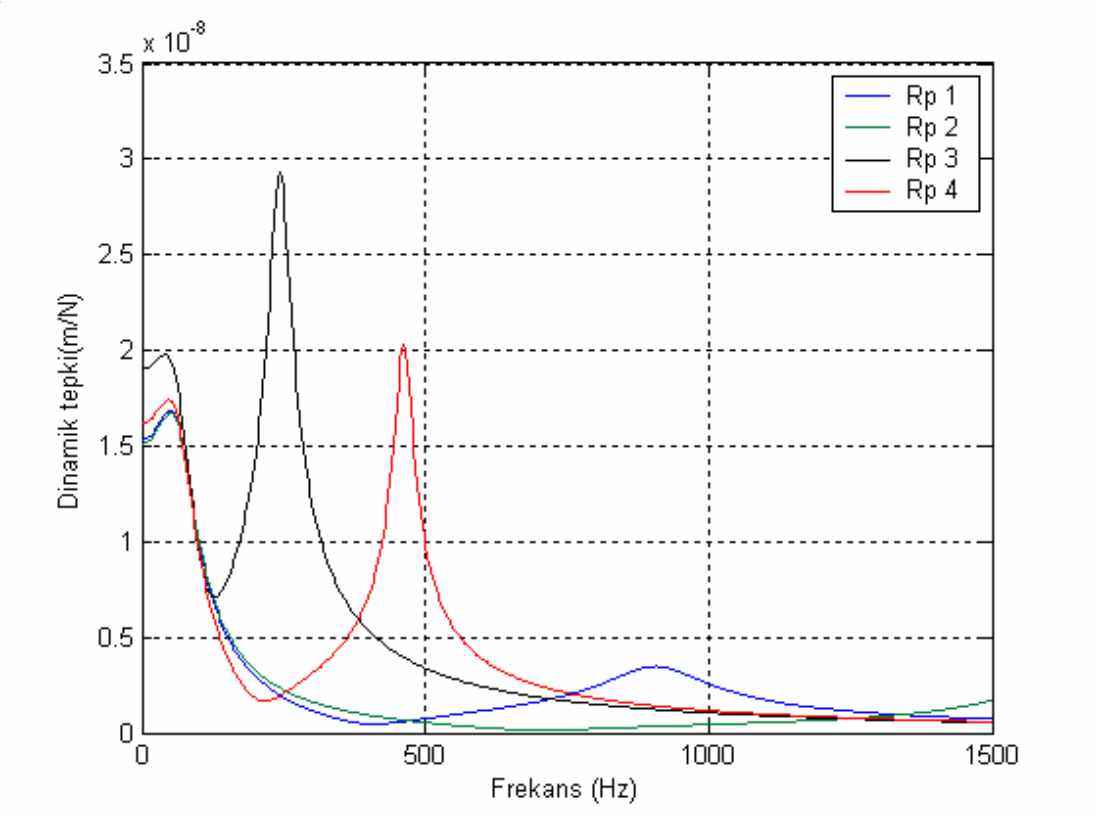


(a)

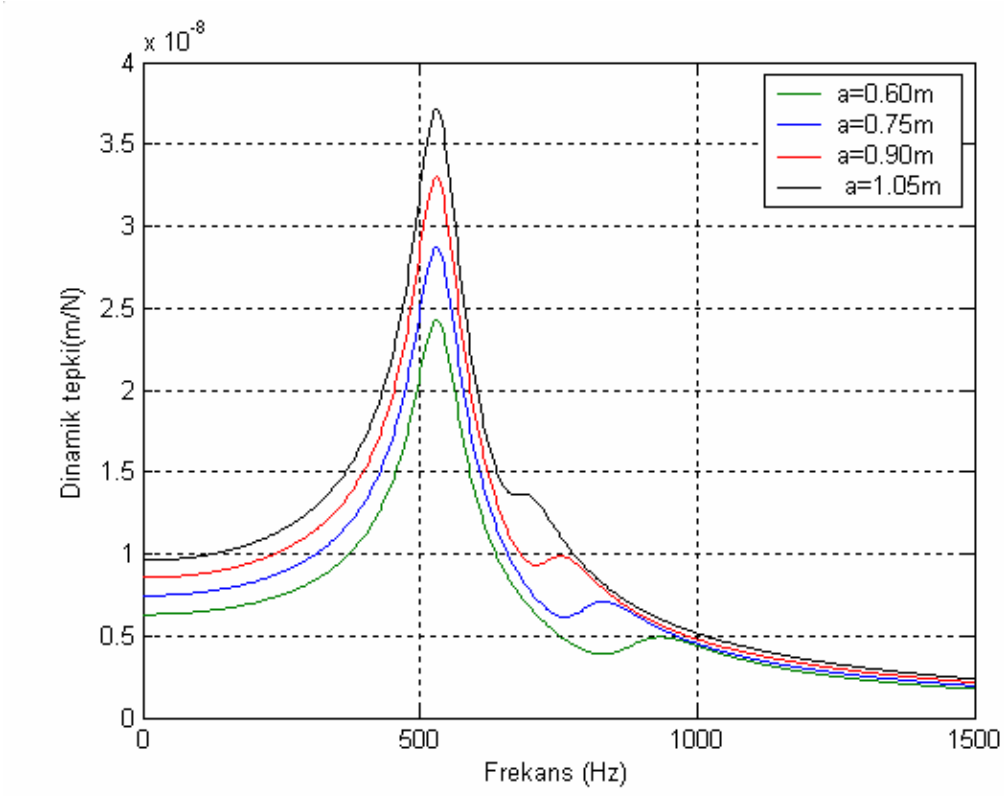


(b)

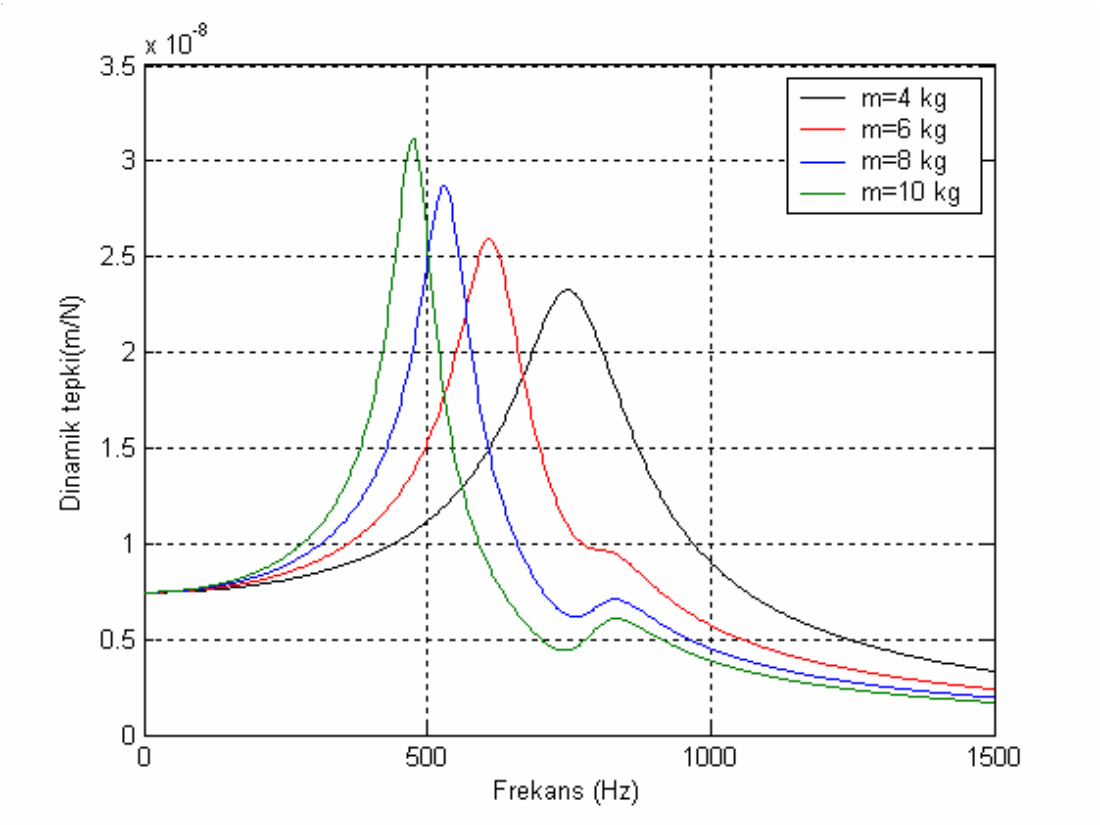
Şekil A.4 : Farklı travers tipleri için tek kirişli model (a) ve çift kirişli model (b) frekans-dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli).



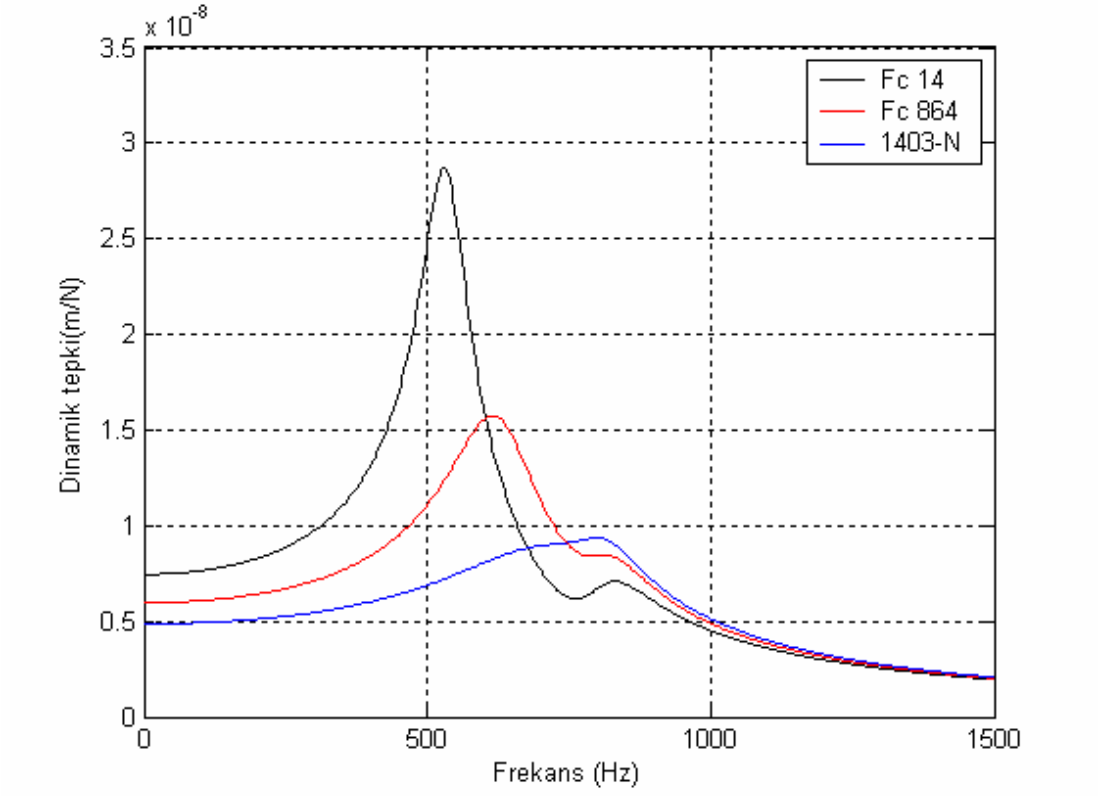
Şekil A.5 : Farklı ray altı elastik tabaka tipleri için frekans-dinamik tepki (balastlı yol modeli).



Şekil A.6 : Farklı selet aralıkları için frekans-dinamik tepki (balastsız yol modeli)

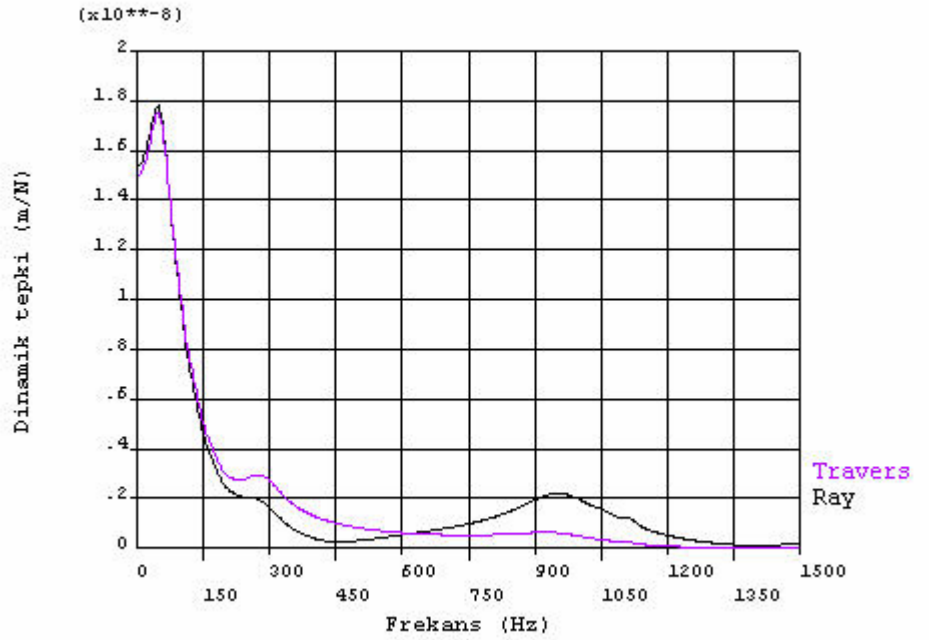


Şekil A.7 : Farklı selet kütleleri için frekans-dinamik tepki (balastsız yol modeli).

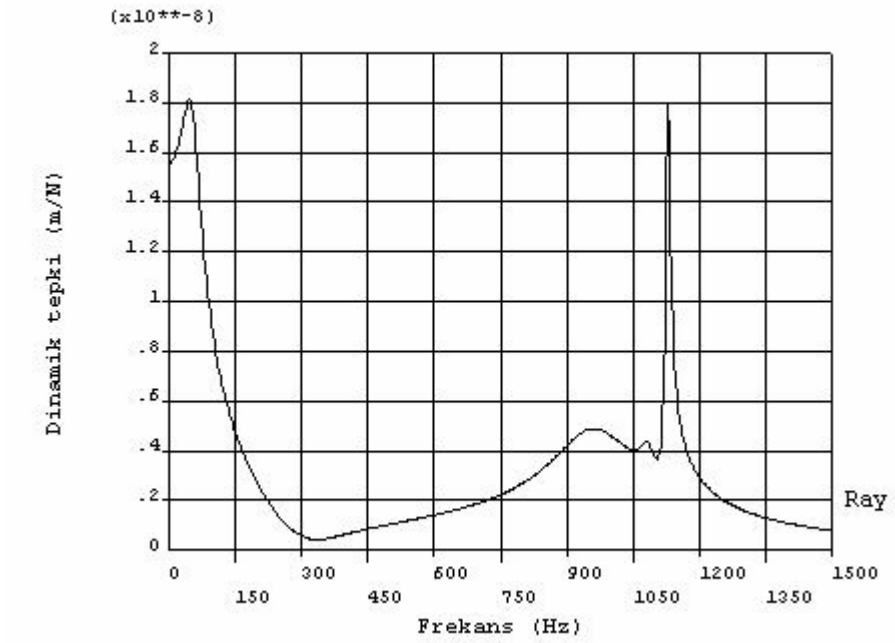


Şekil A.8 : Farklı selet altı elastik tabaka tipleri için frekans-dinamik tepki (balastsız yol modeli).

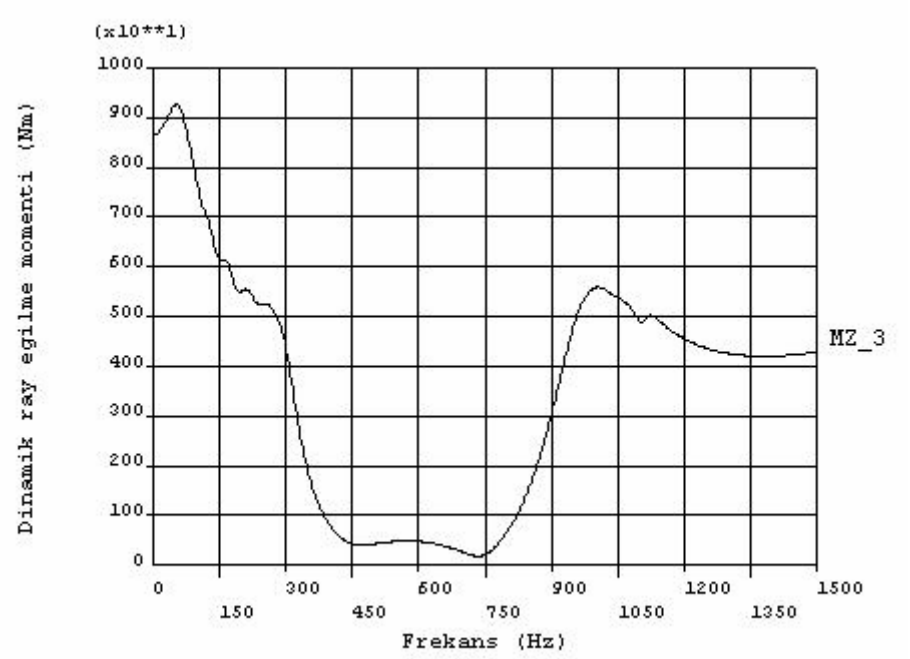
Ek B : Balastlı Yol Modeli İçin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Dinamik Analiz Grafikleri



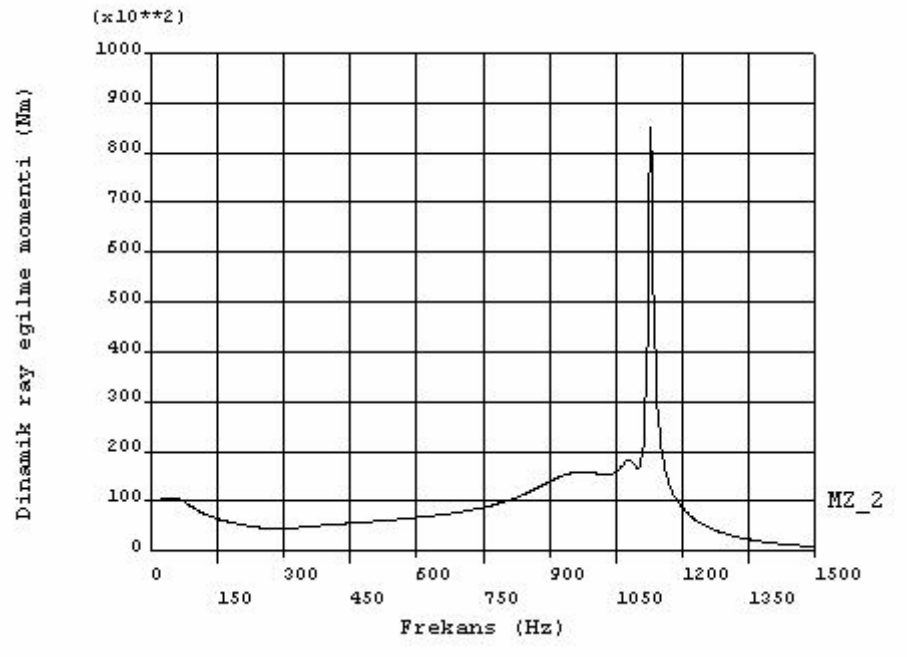
Şekil B.1 : Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli)



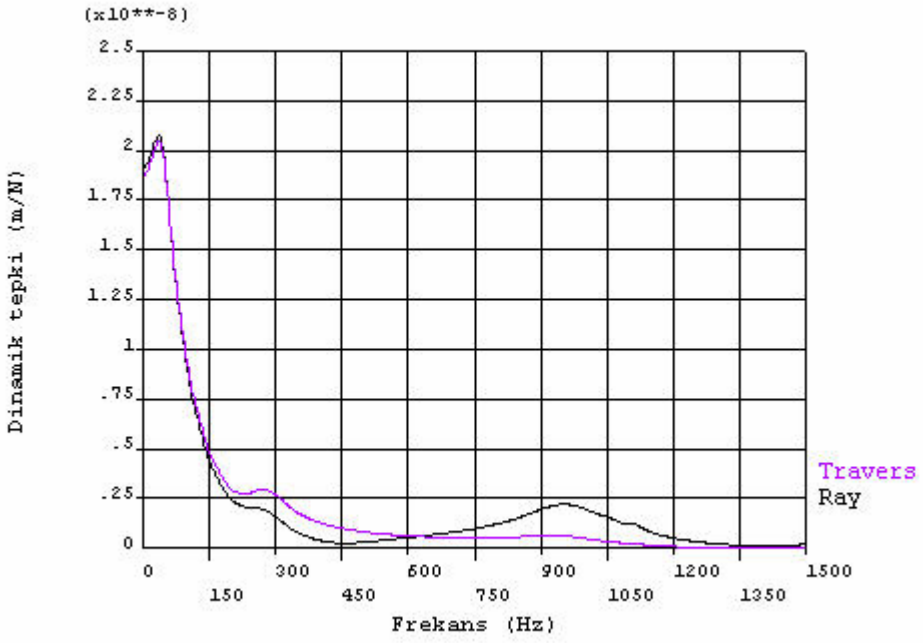
Şekil B.2 : İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (balastlı yol modeli).



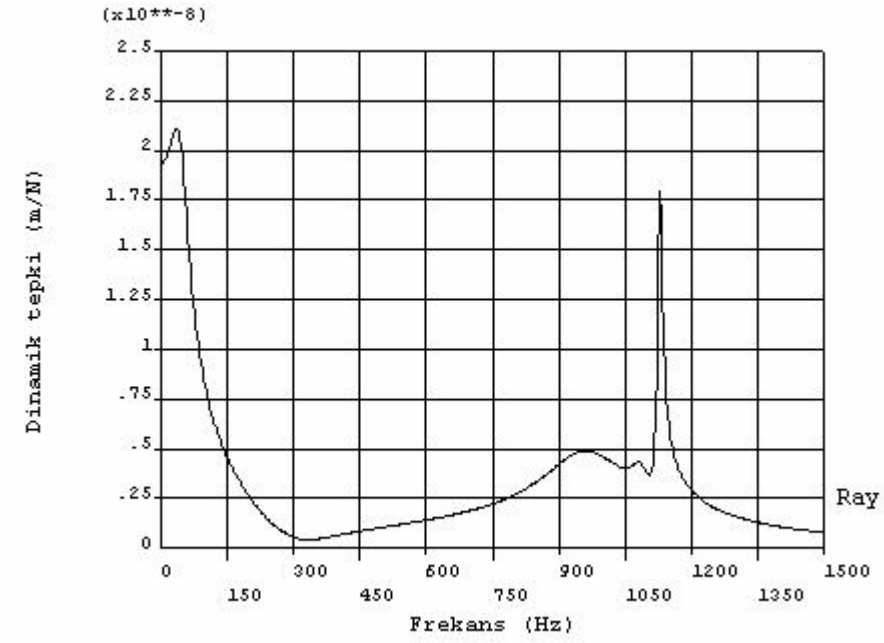
Şekil B.3 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti (balastlı yol modeli).



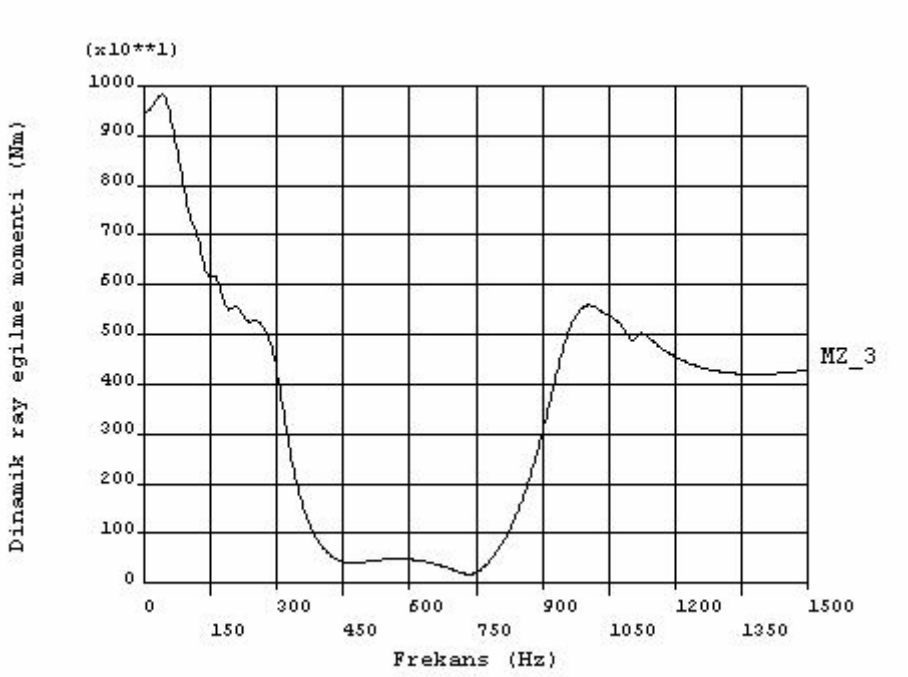
Şekil B.4 : İki mesnet ortasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (balastlı yol modeli).



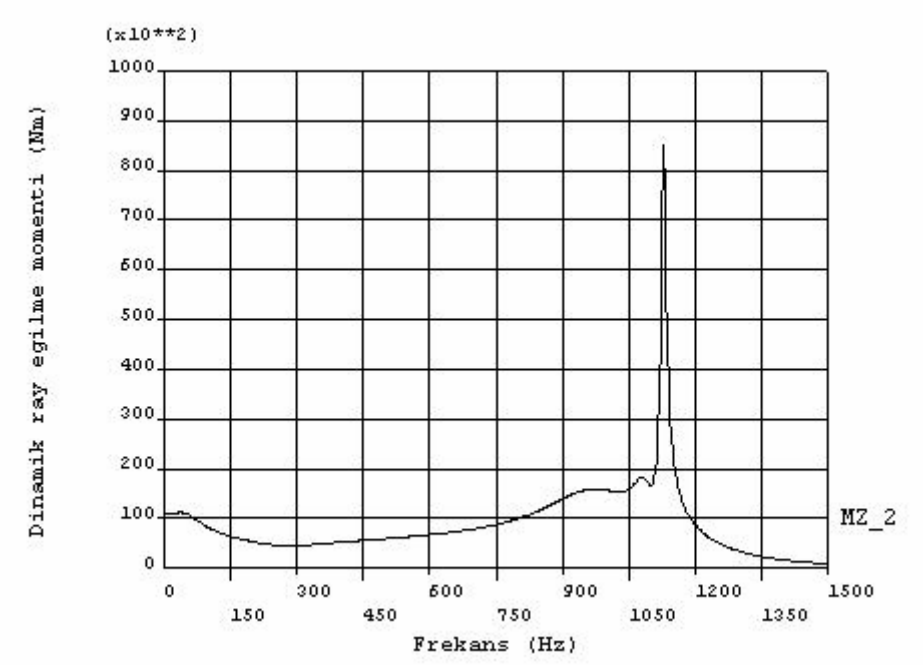
Şekil B.5 : Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m).



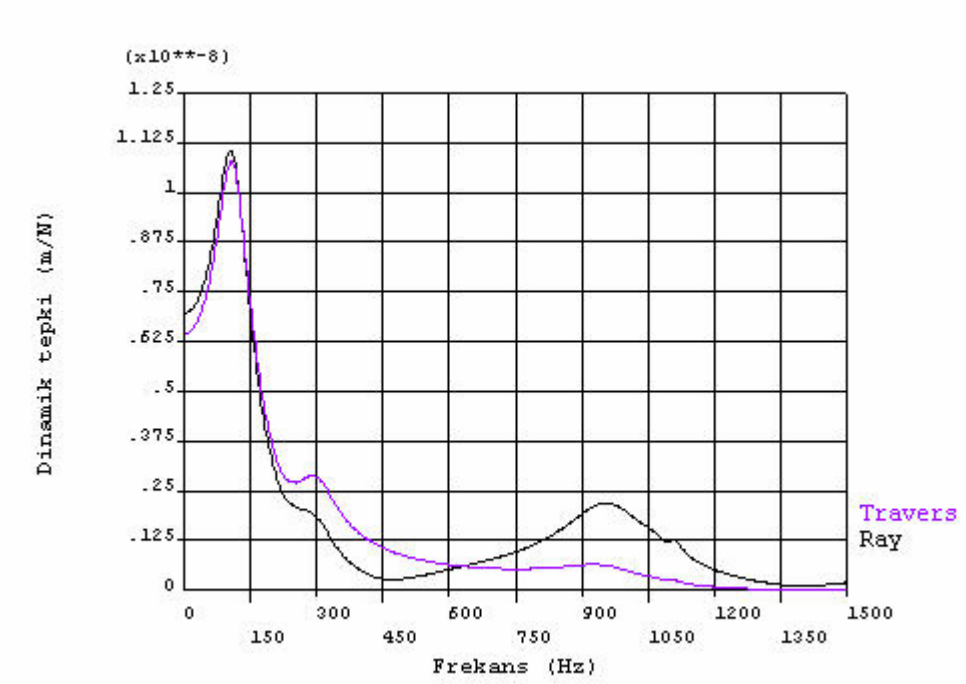
Şekil B.6 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m).



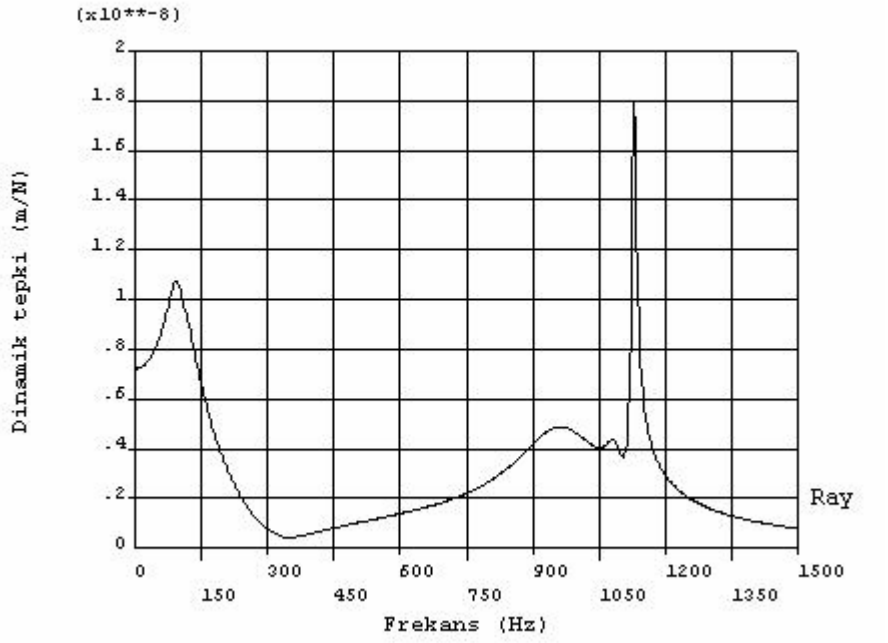
Şekil B.7 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m).



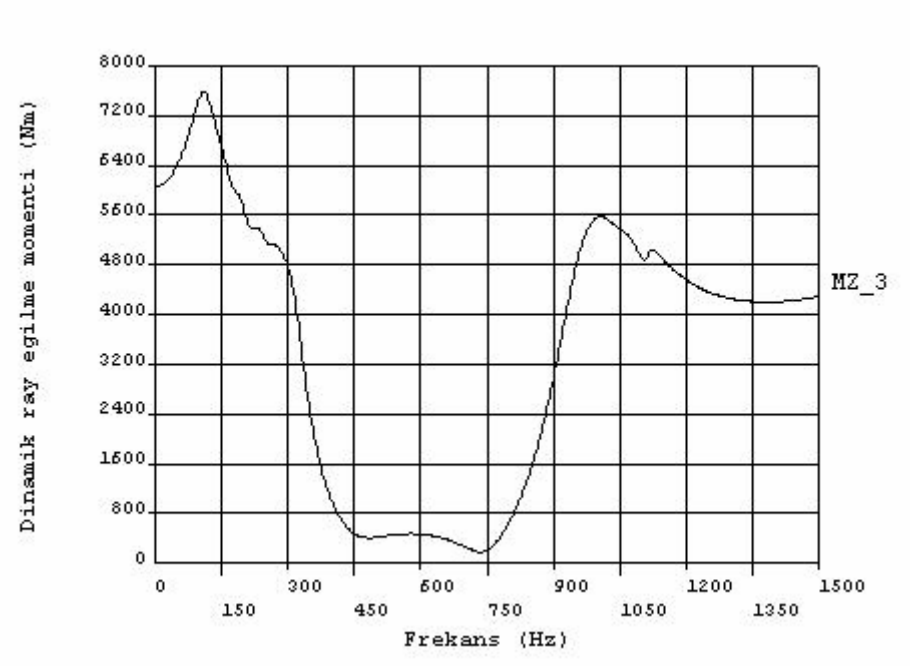
Şekil B.8 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme moment grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=19.17 x10^6 N/m).



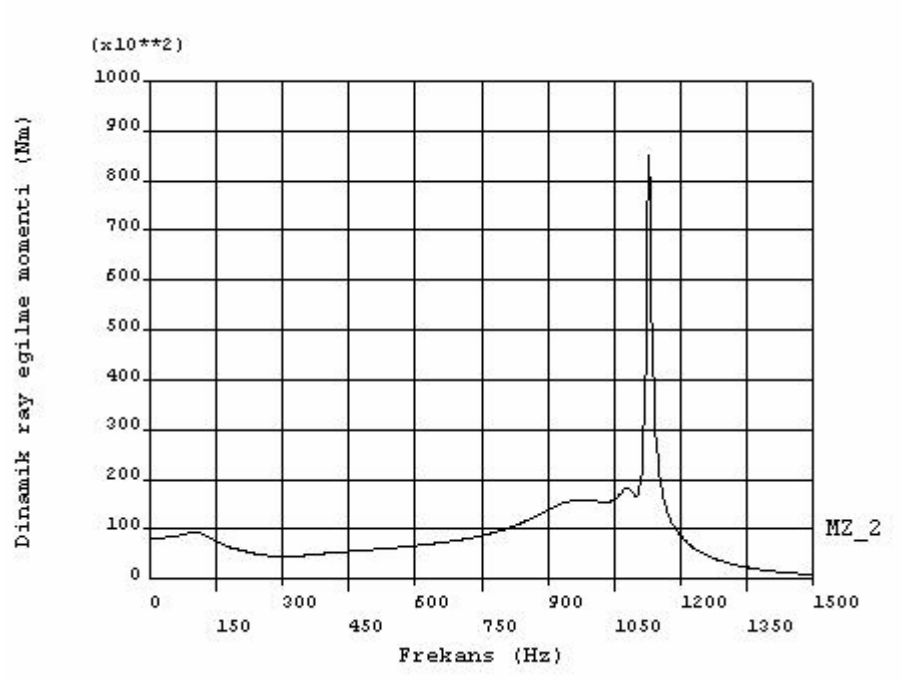
Şekil B.9 : Mesnet noktasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)



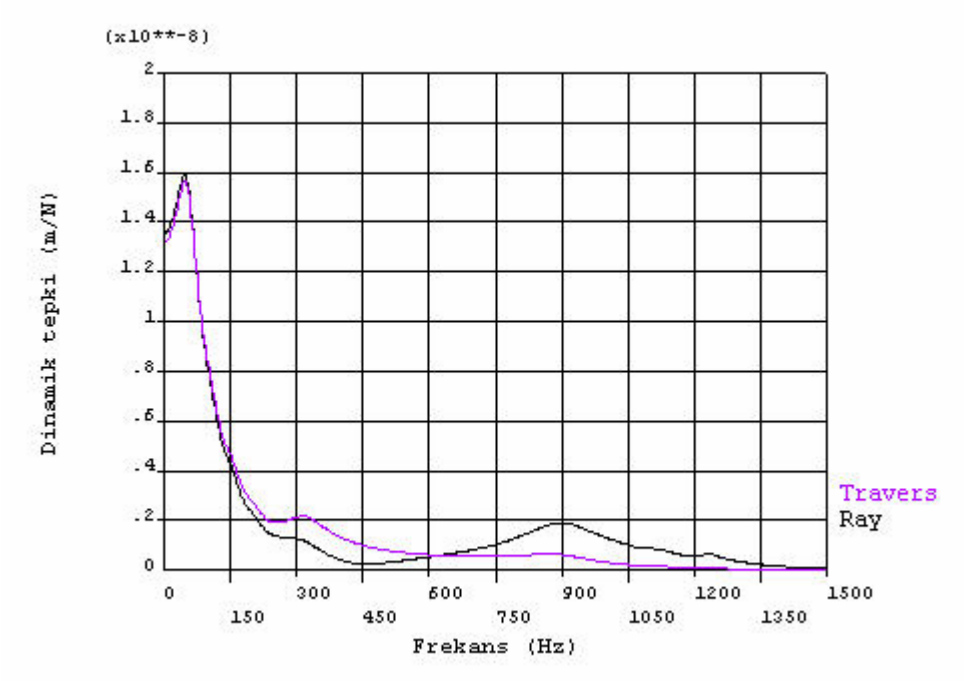
Şekil B.10 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)



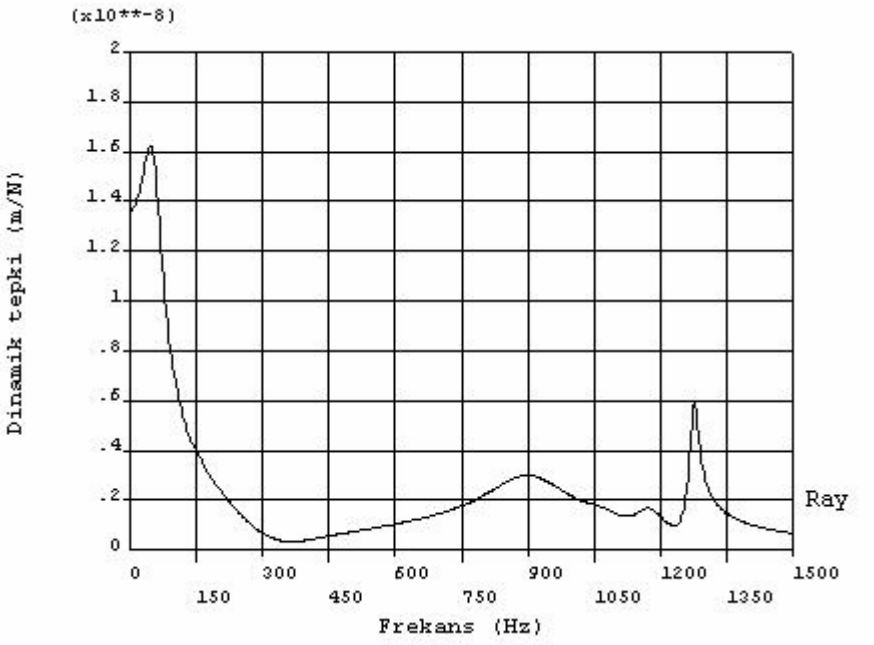
Şekil B.11 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)



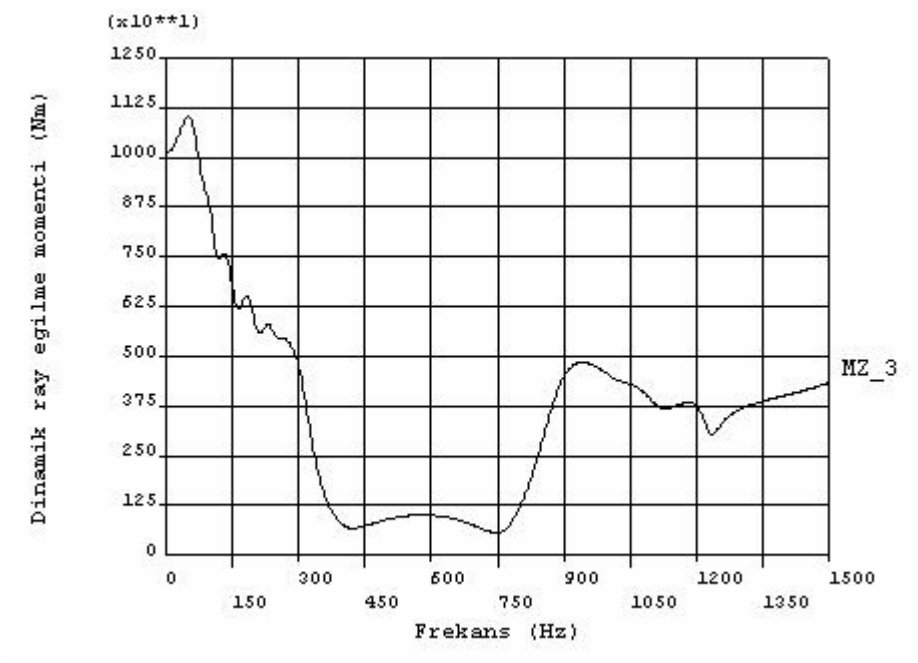
Şekil B.12 : İki Mesnet Arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi zemin rijitlik katsayısı k=77.7 x10^6 N/m)



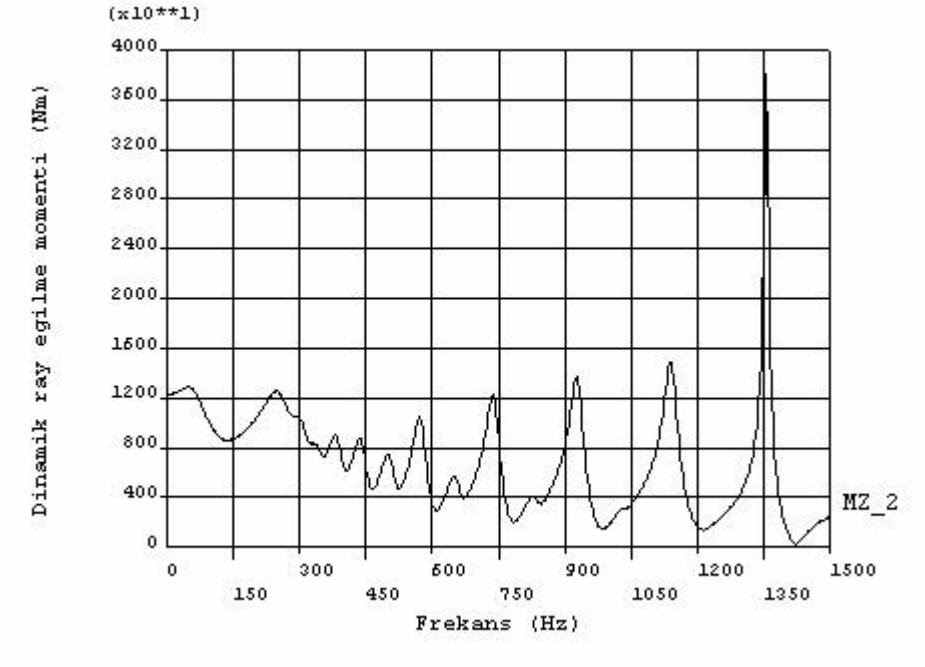
Şekil B.13 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray tipi, UIC 60 rayı).



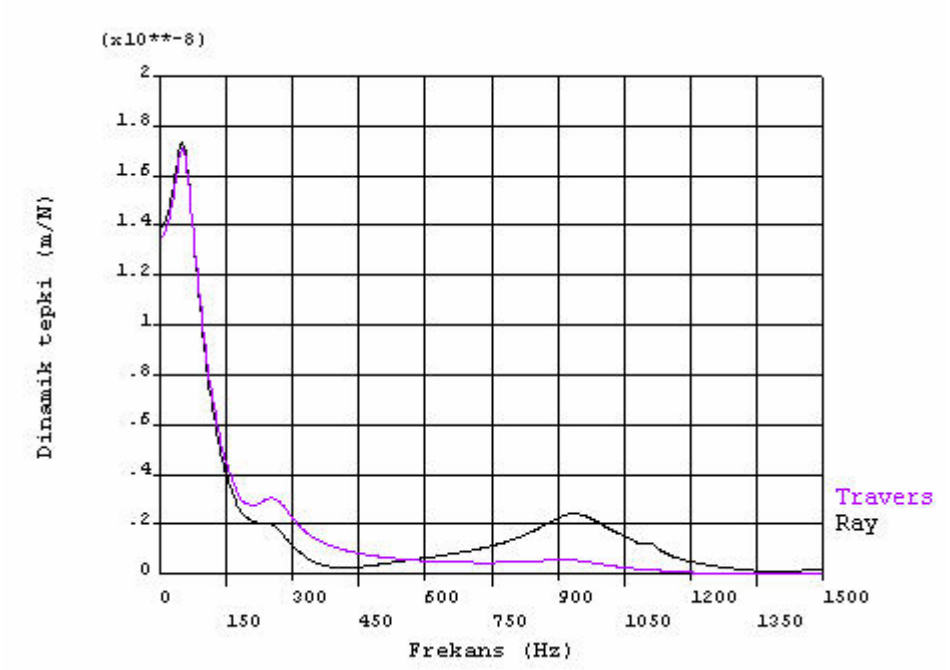
Şekil B.14 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi ray tipi, UIC 60 rayı).



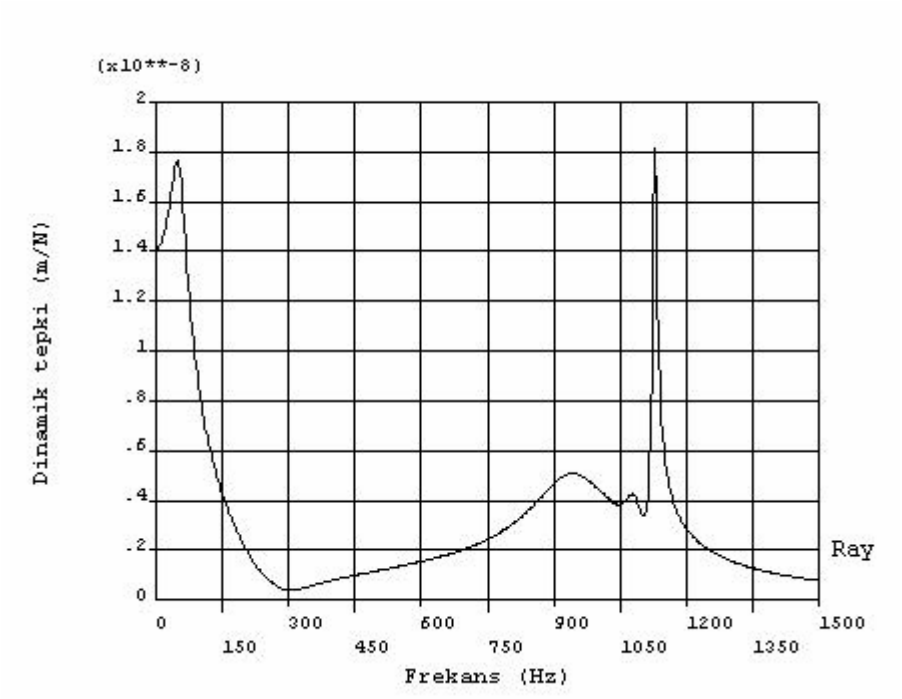
Şekil B.15 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray tipi, UIC 60 rayı).



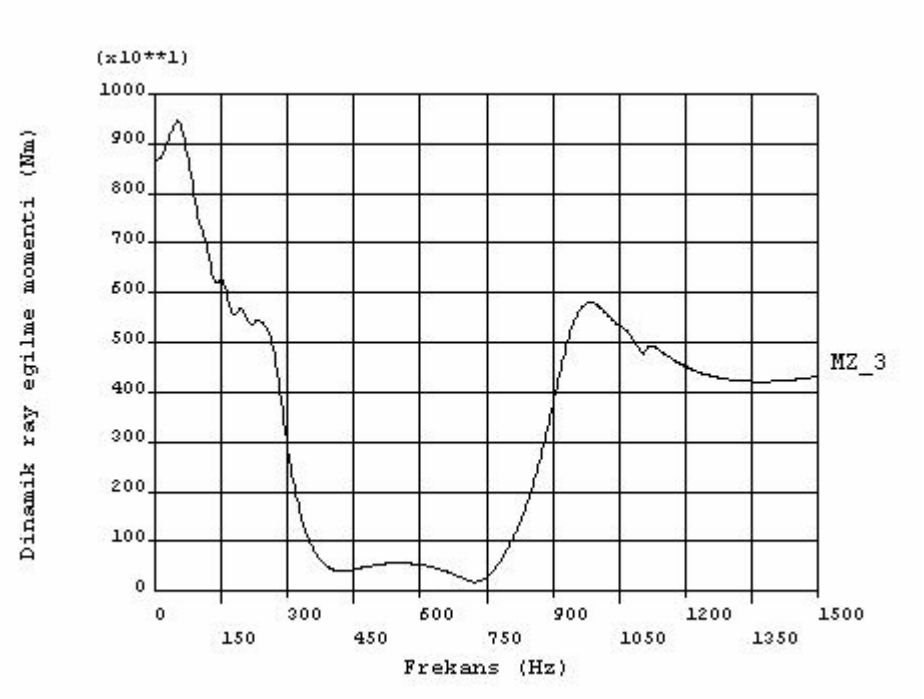
Şekil B.16 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray tipi, UIC 60 rayı).



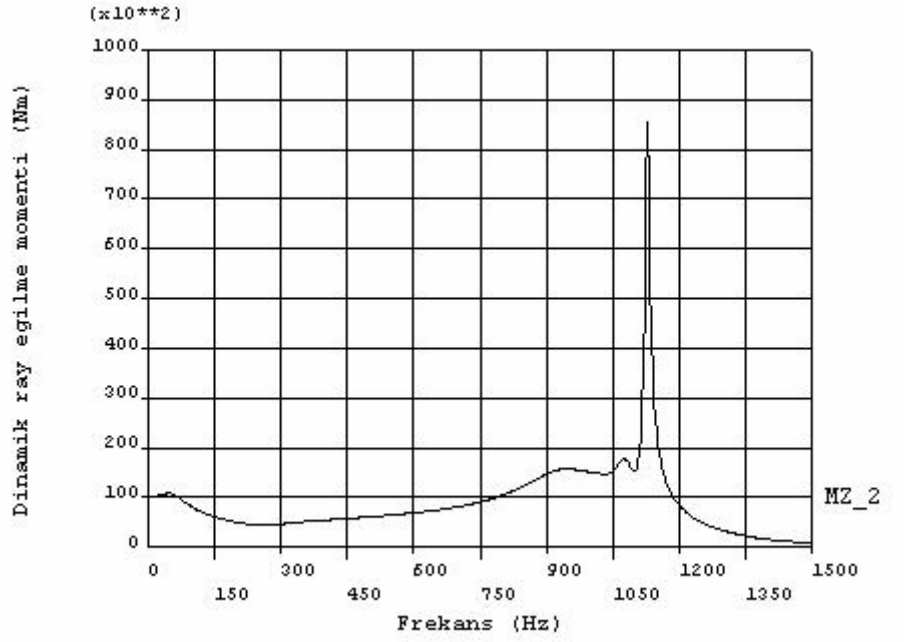
Şekil B.17 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers tipi, B70W beton travers).



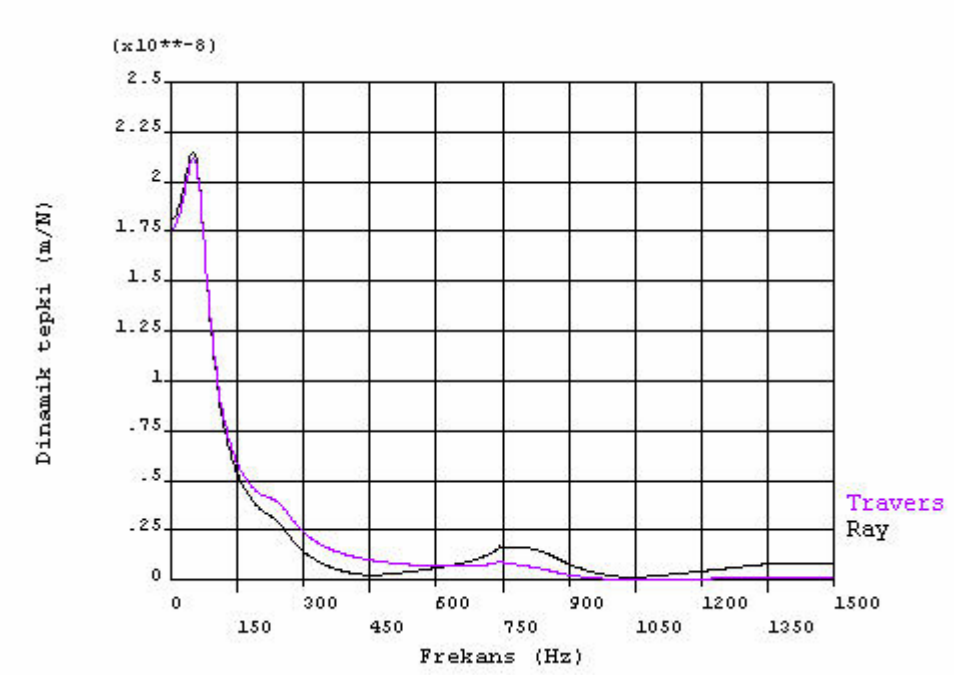
Şekil B.18 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi travers tipi, B70W beton travers).



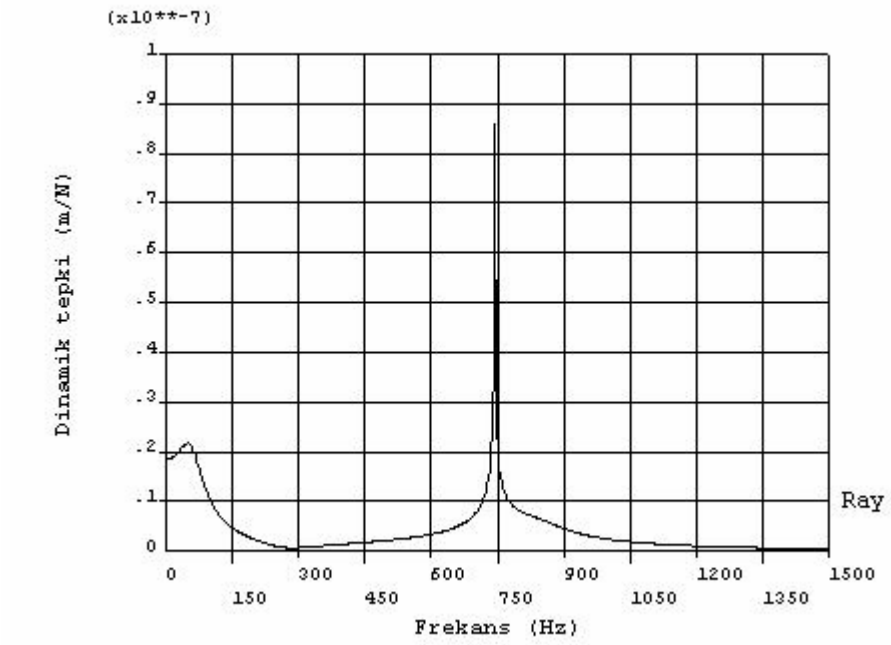
Şekil B.19 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers tipi, B70W beton travers).



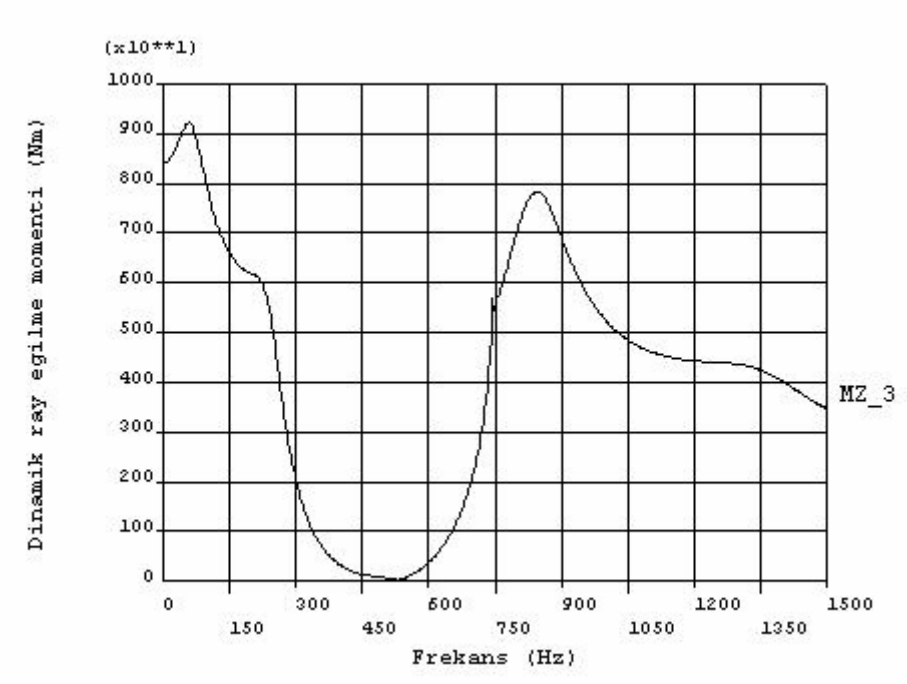
Şekil B.20 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers tipi, B70W beton travers).



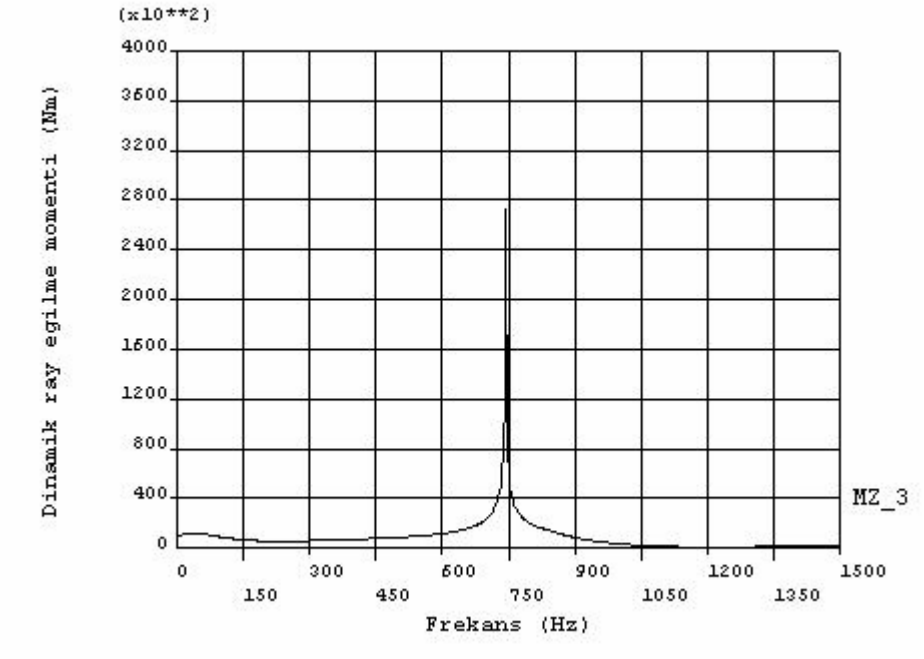
Şekil B.21 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers aralığı, a=0.75 m).



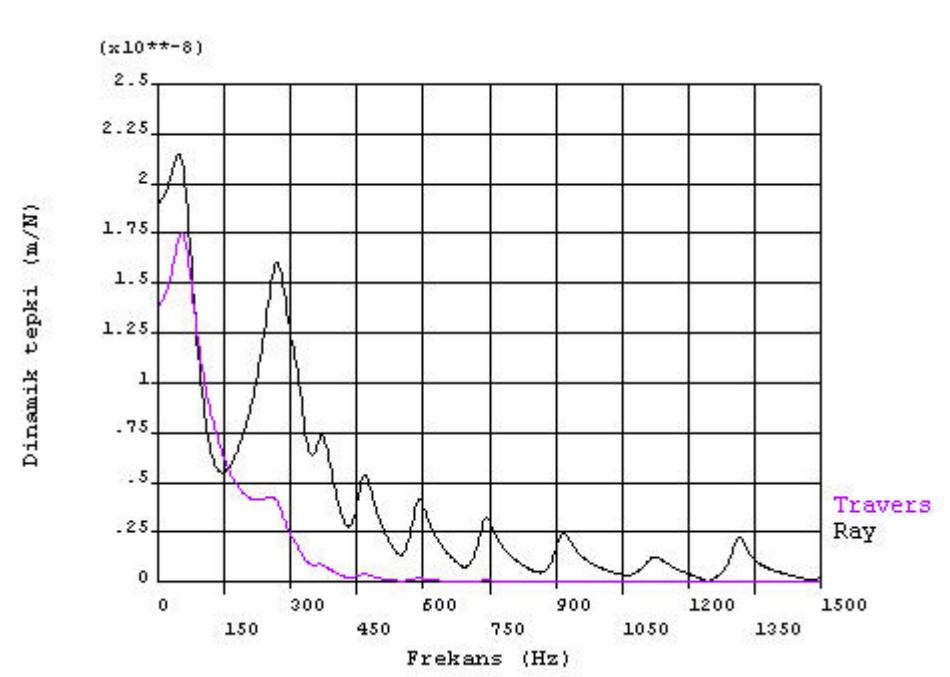
Şekil B.22 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi travers aralığı, a=0.75 m).



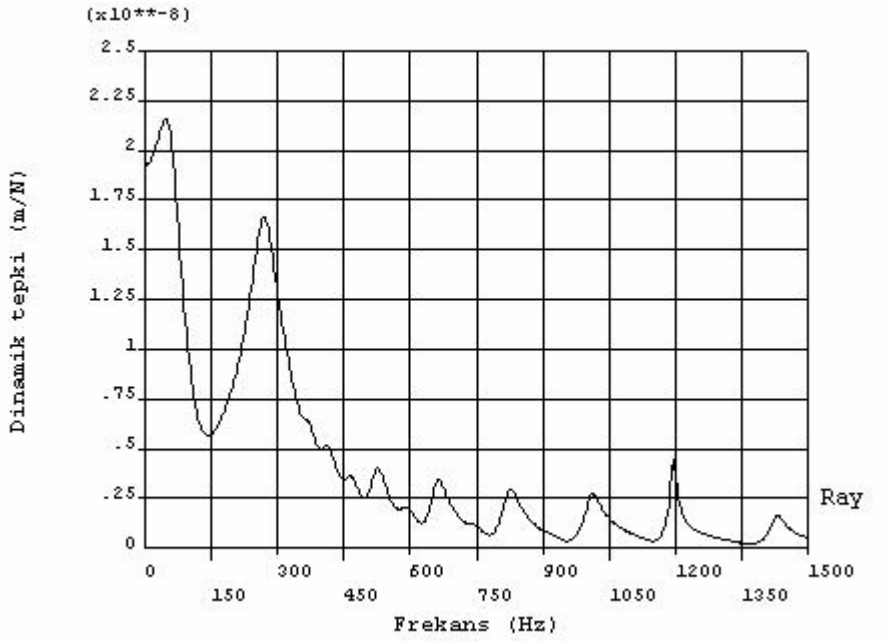
Şekil B.23 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers aralığı, a=0.75 m).



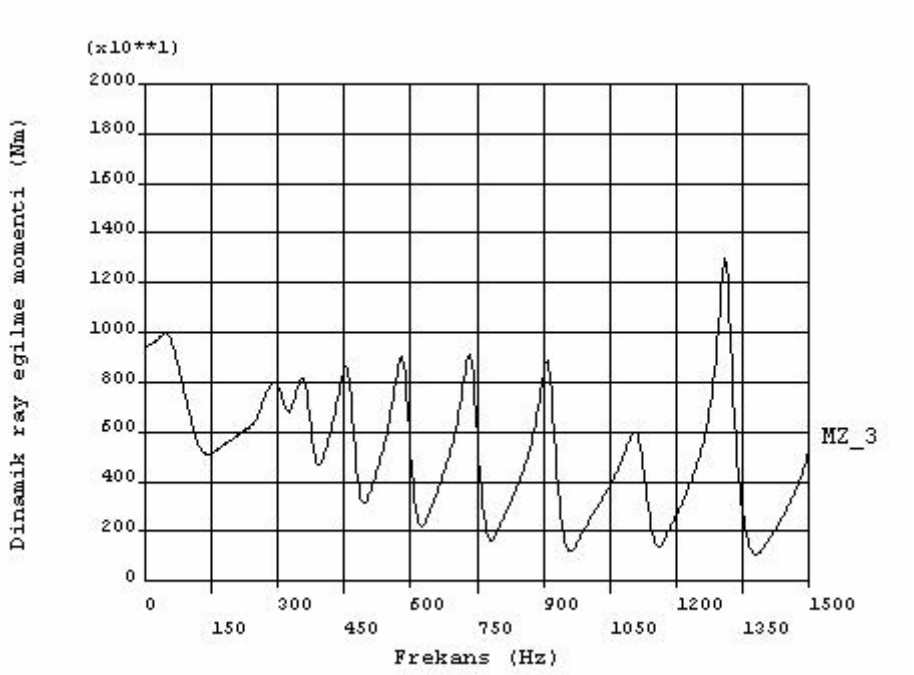
Şekil B.24 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi travers aralığı, a=0.75 m).



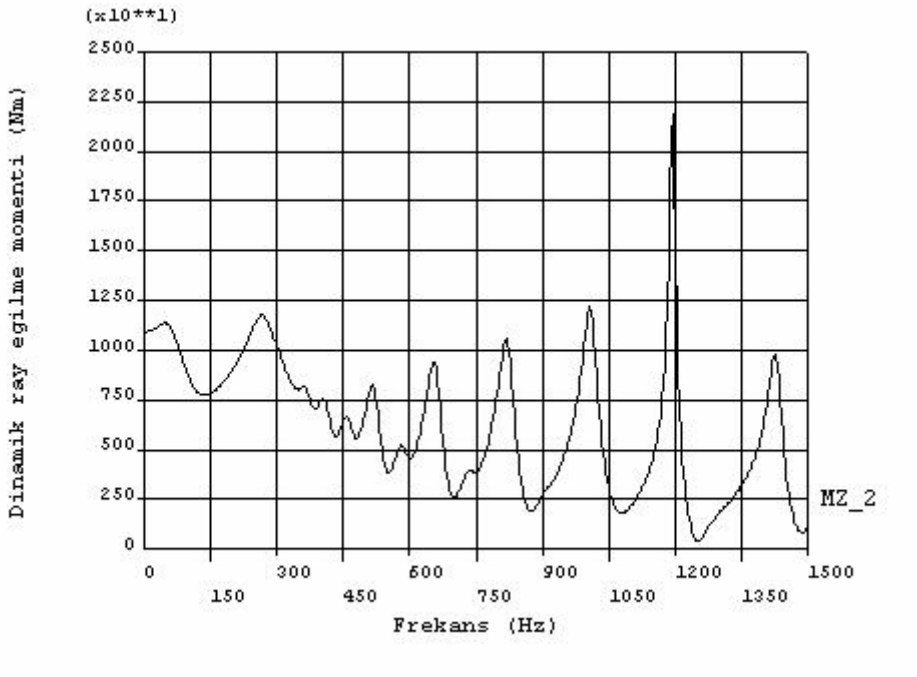
Şekil B.25 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi).



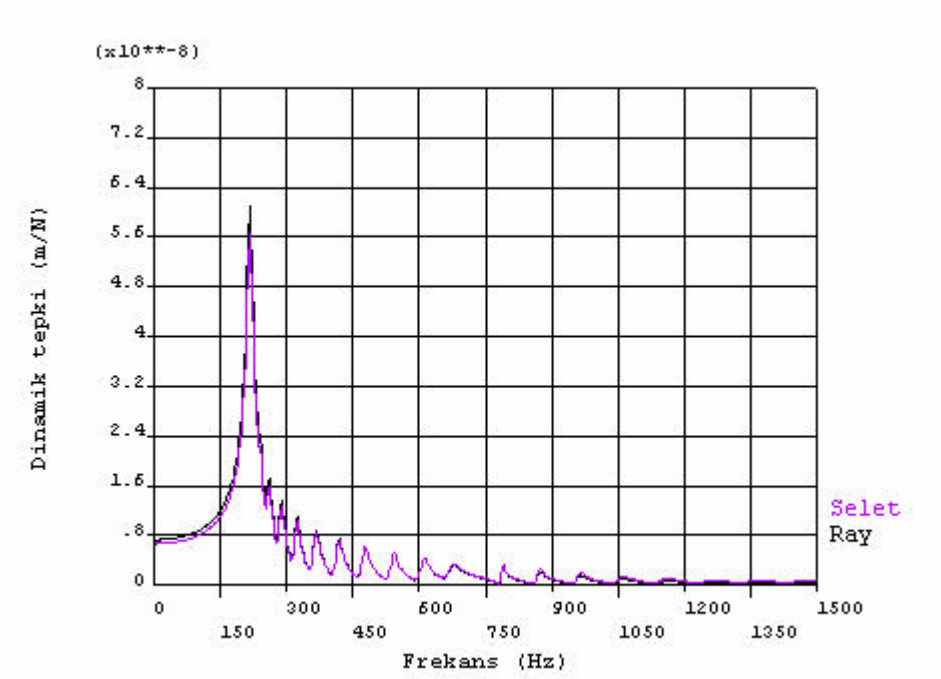
Şekil B.26 : İki mesnet ortasında ray ve travers frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi).



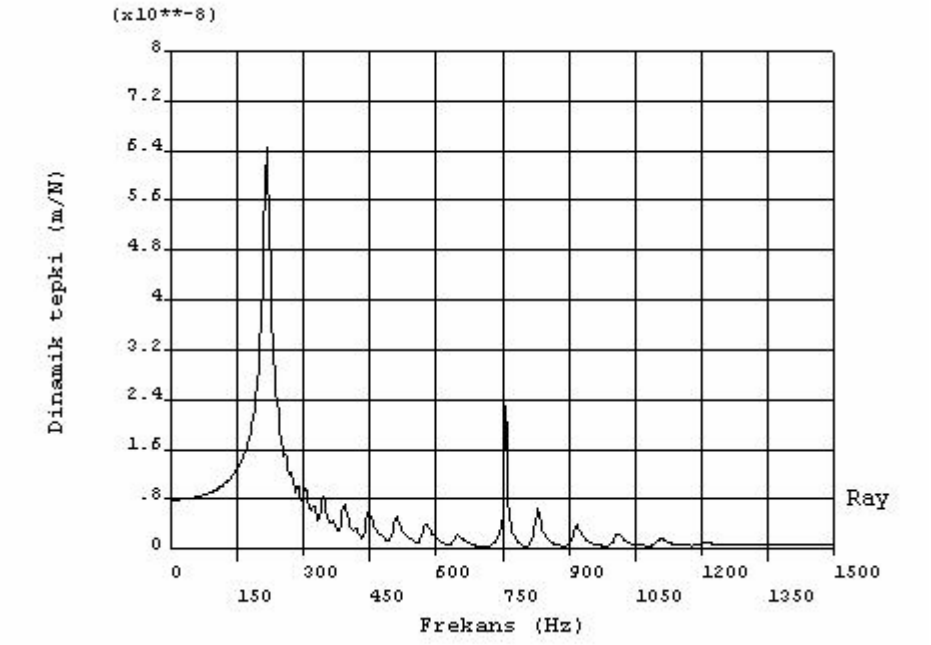
Şekil B.27 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi).



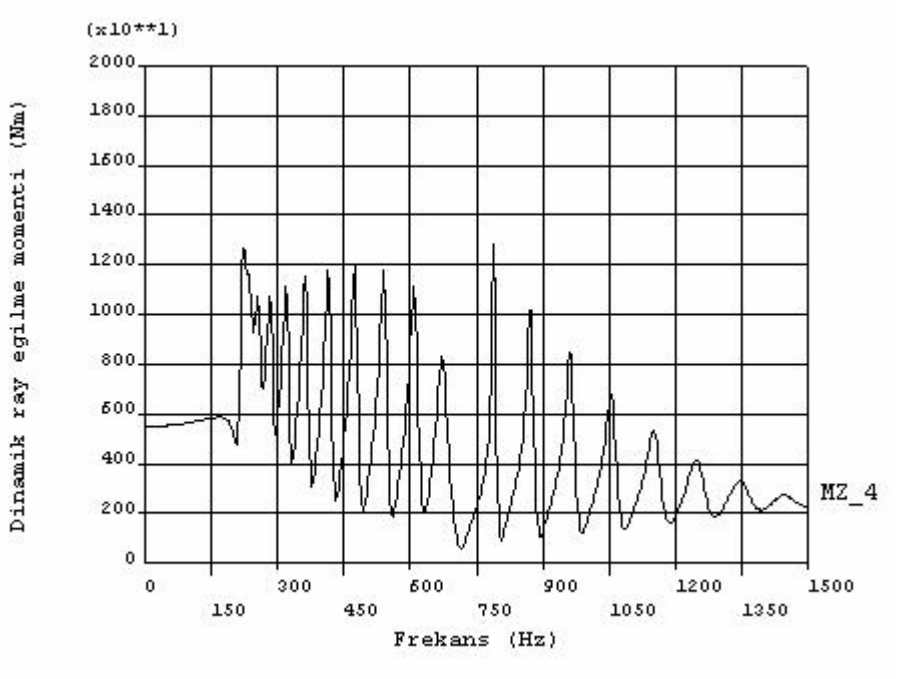
Şekil B.28 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi ray altı elastik tabaka, Rp 3 tipi).



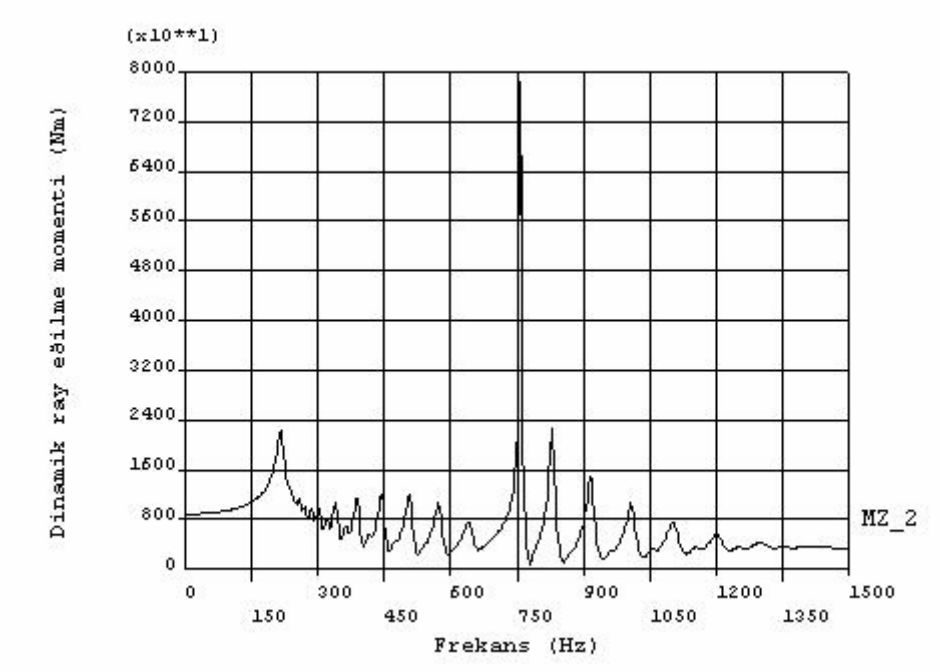
Şekil B.29 : Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki grafiği (balastsız yol modeli).



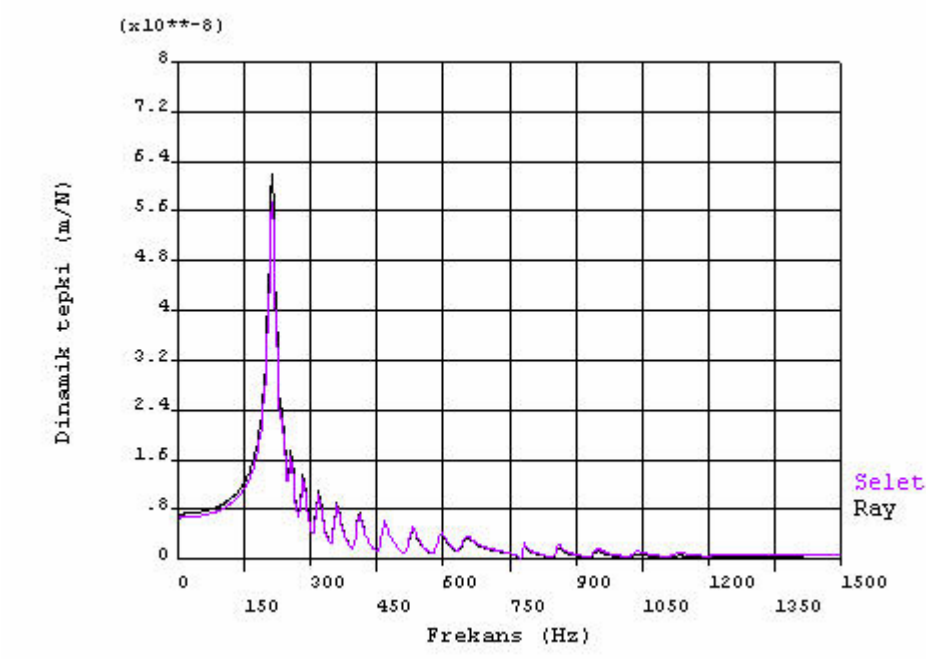
Şekil B.30 : İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (balastsız yol modeli).



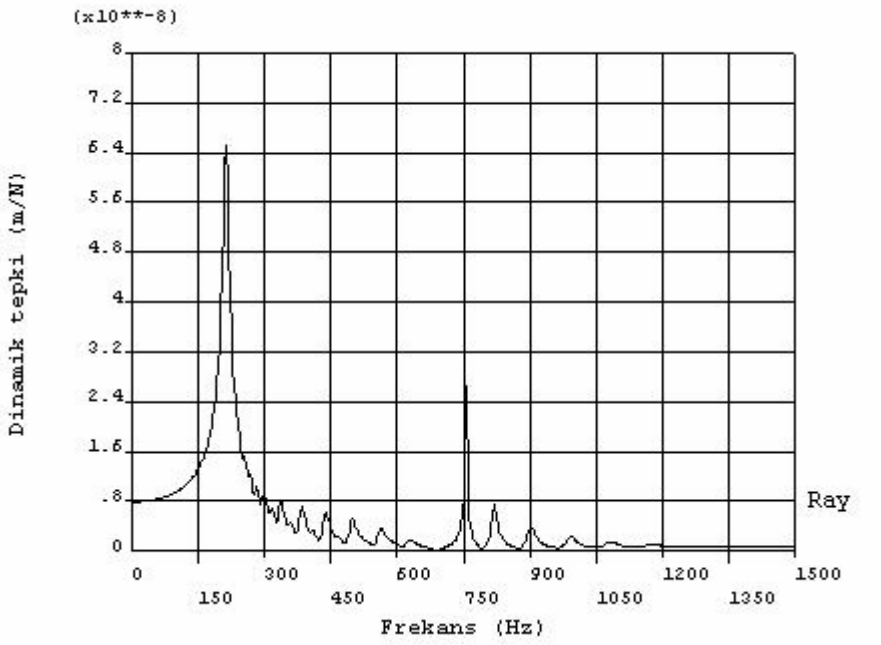
Şekil B.31 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment grafiği (balastsız yol modeli).



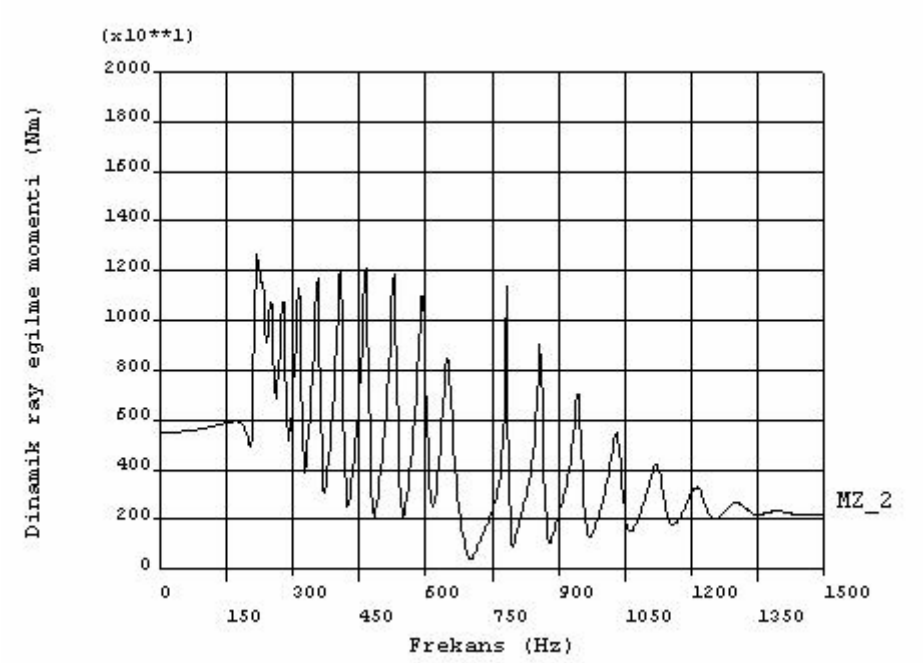
Şekil B.32 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (balastsız yol modeli).



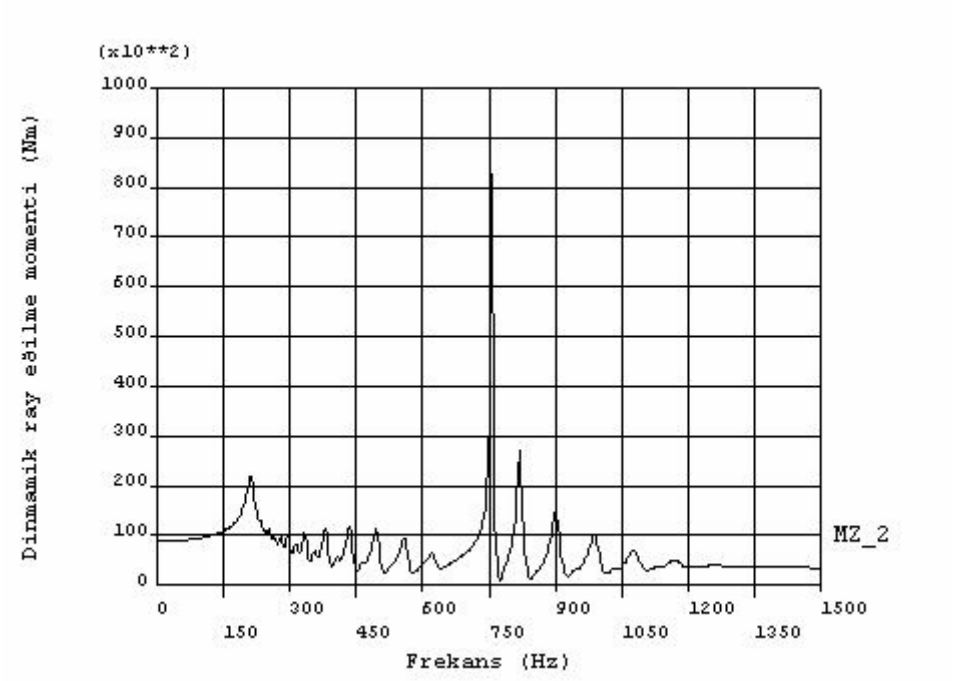
Şekil B.33 : Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet kütlesi, m=10 kg).



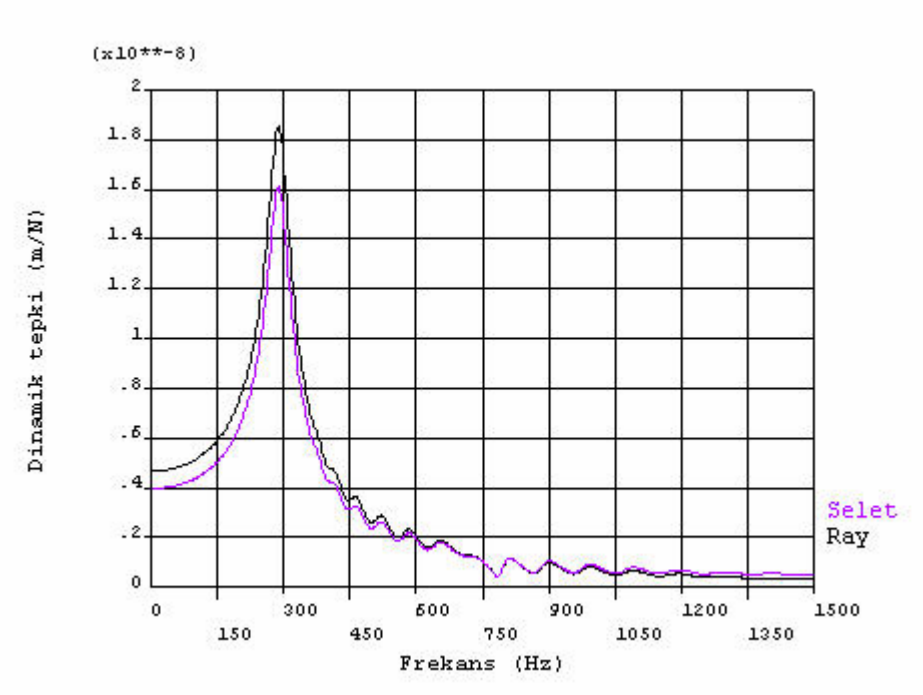
Şekil B.34 : İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet kütlesi, m=10 kg).



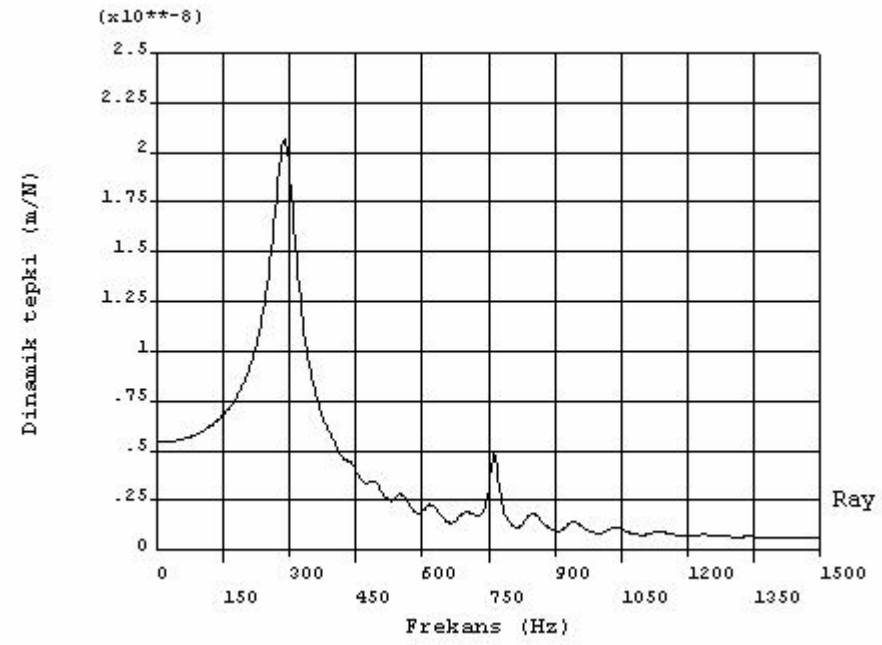
Şekil B.35 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment grafiği (değişken yol parametresi selet kütlesi, m=10 kg).



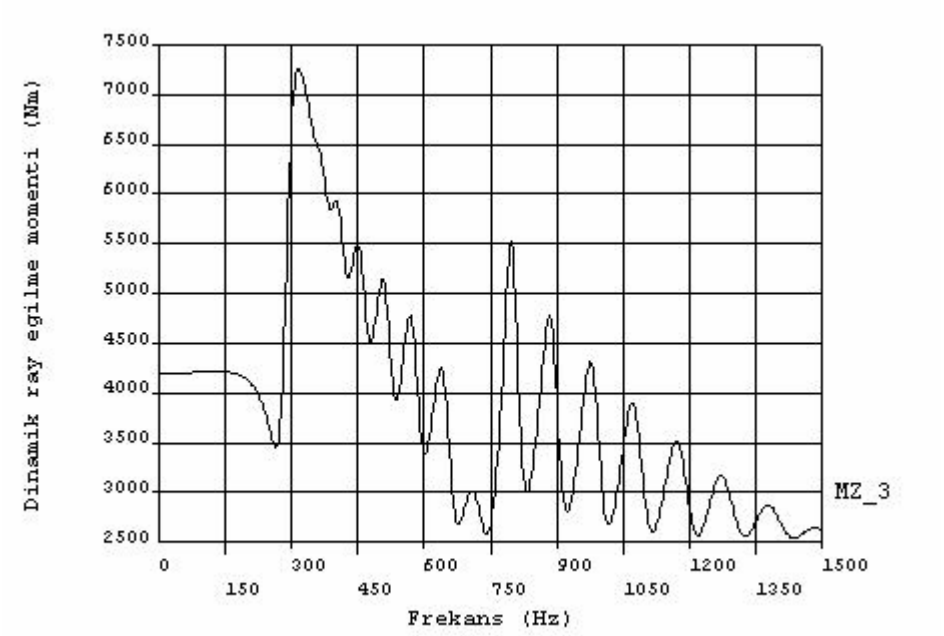
Şekil B.36 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi selet kütlesi, m=10 kg).



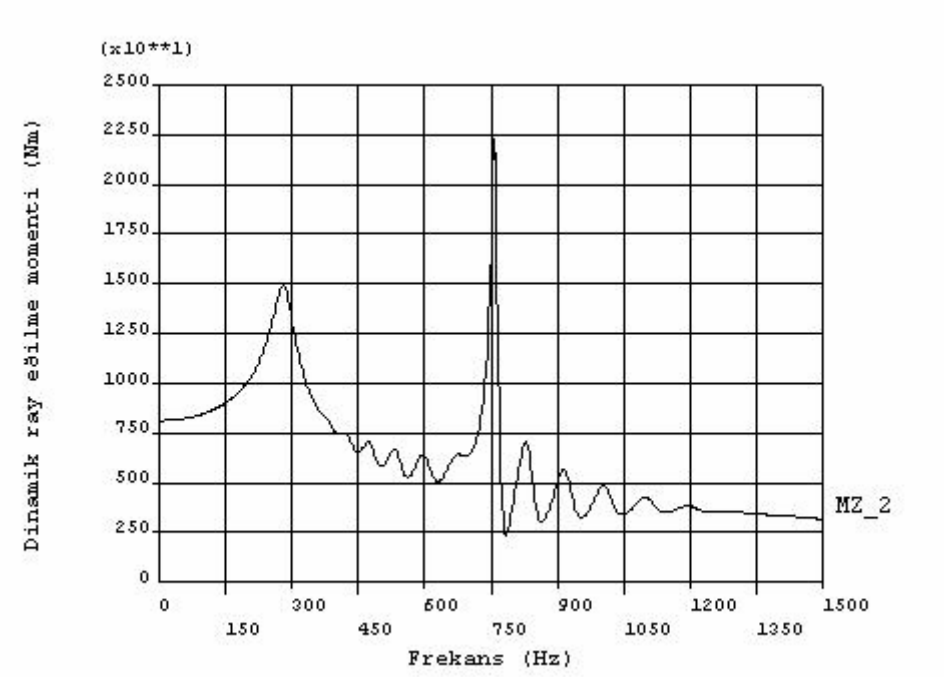
Şekil B.37 : Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi).



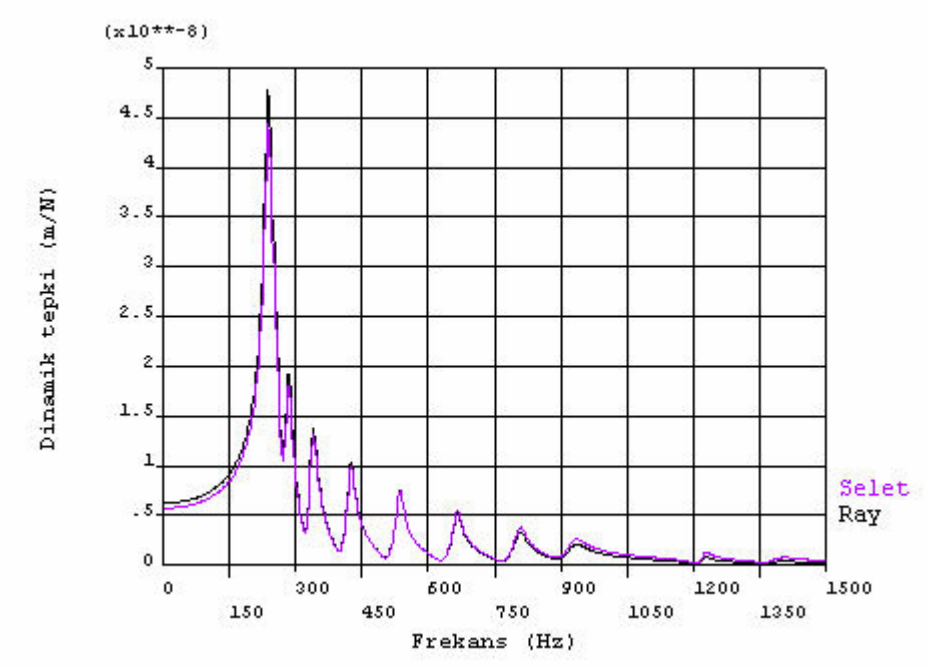
Şekil B.38 : İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi).



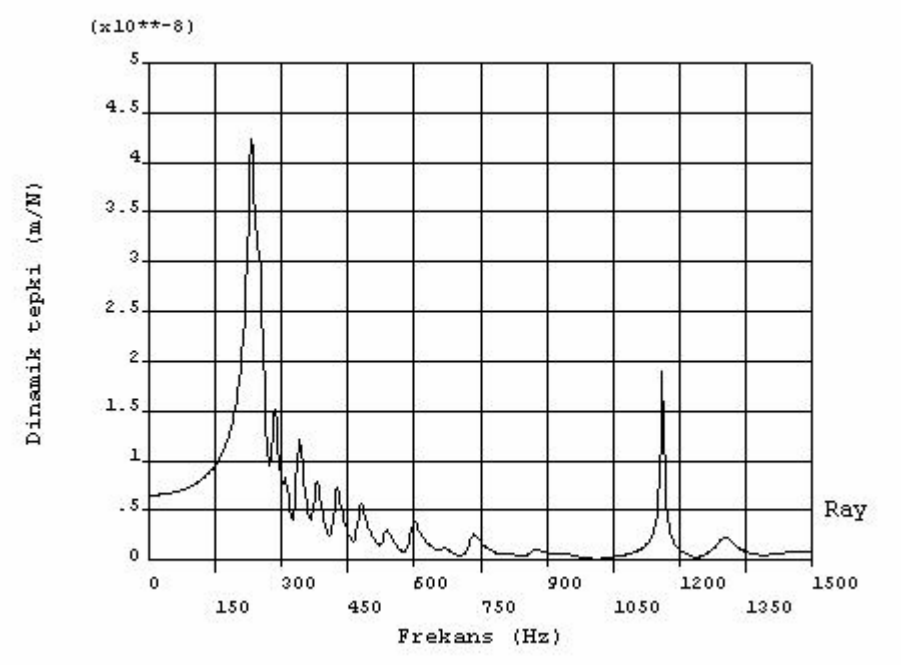
Şekil B.39 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment grafiği (değişken yol parametresi selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi).



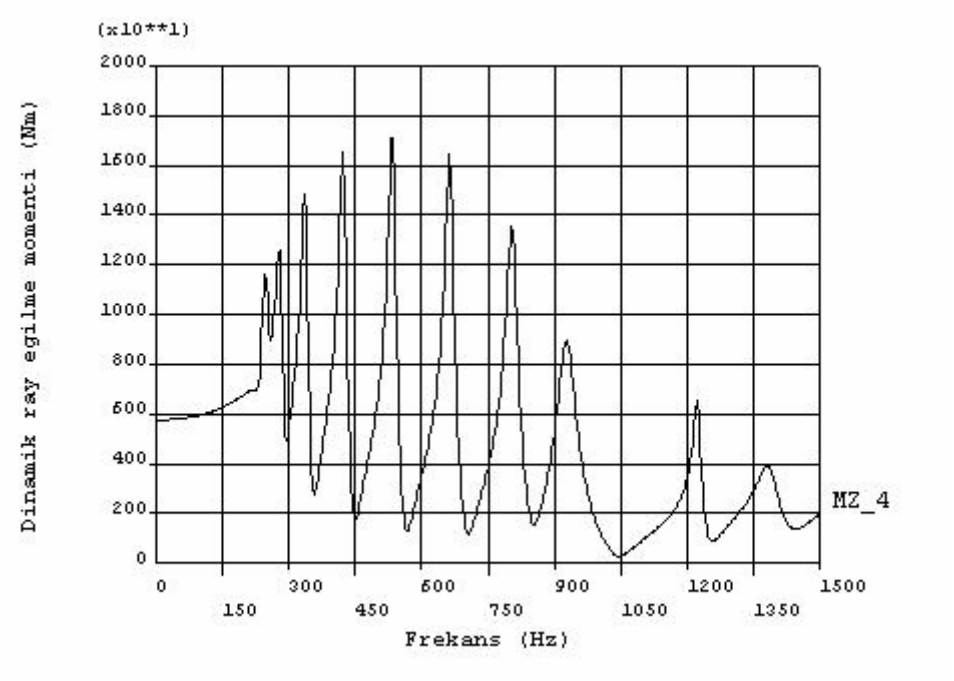
Şekil B.40 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi selet altı elastik tabaka, 1403-N tipi).



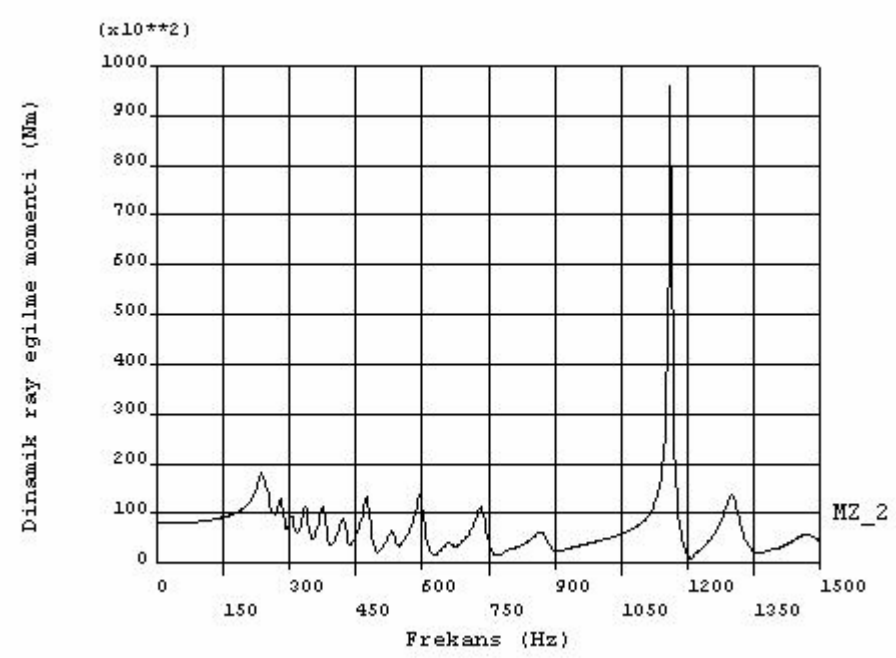
Şekil B.41 : Mesnet noktasında ray ve selet frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet aralığı, a=0.60 m).



Şekil B.42 : İki mesnet ortasında ray frekans-dinamik tepki grafiği (değişken yol parametresi selet aralığı, a=0.60 m).

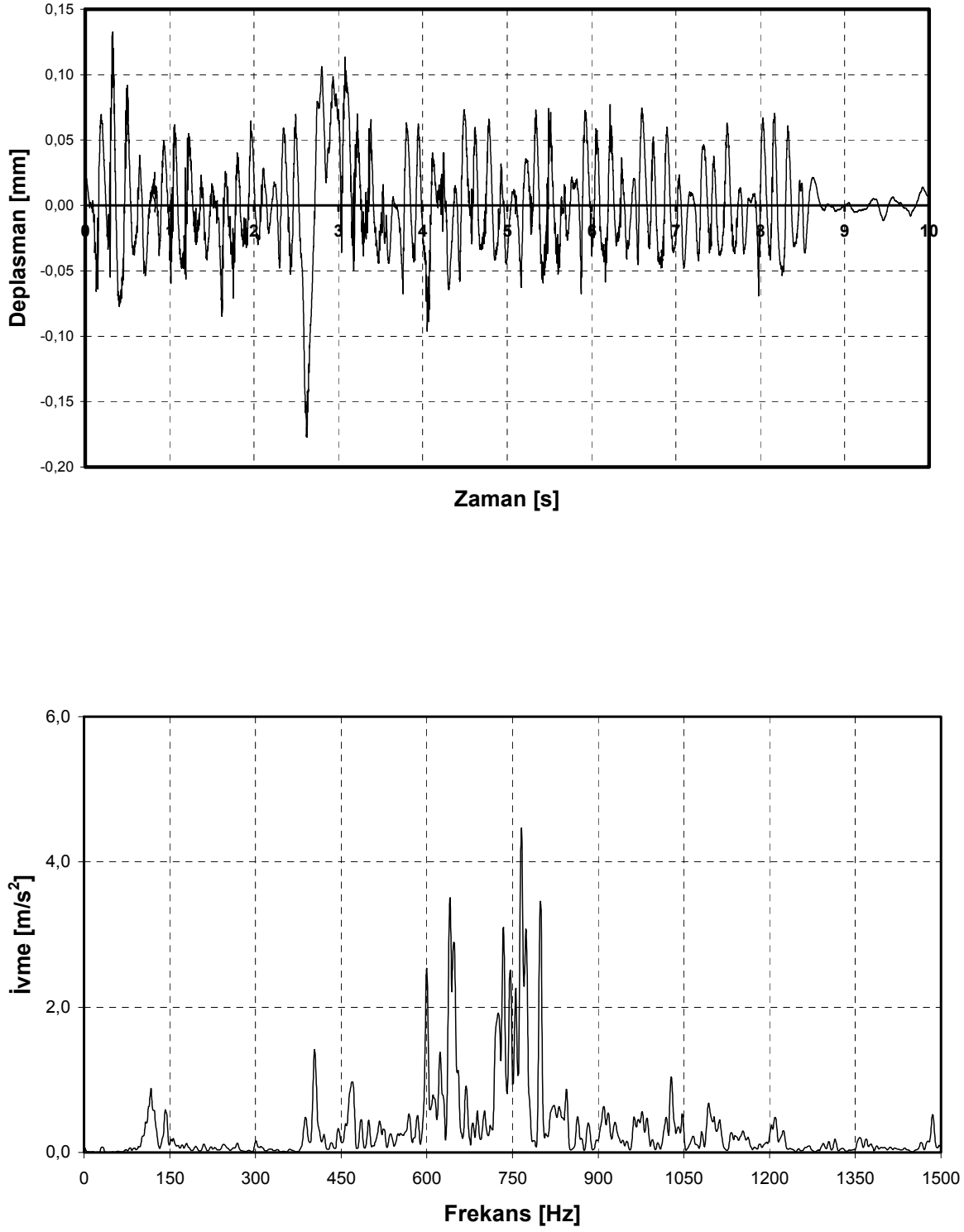


Şekil B.43 : Mesnet noktasında dinamik ray eğilme moment grafiği (değişken yol parametresi selet aralığı, a=0.60 m).

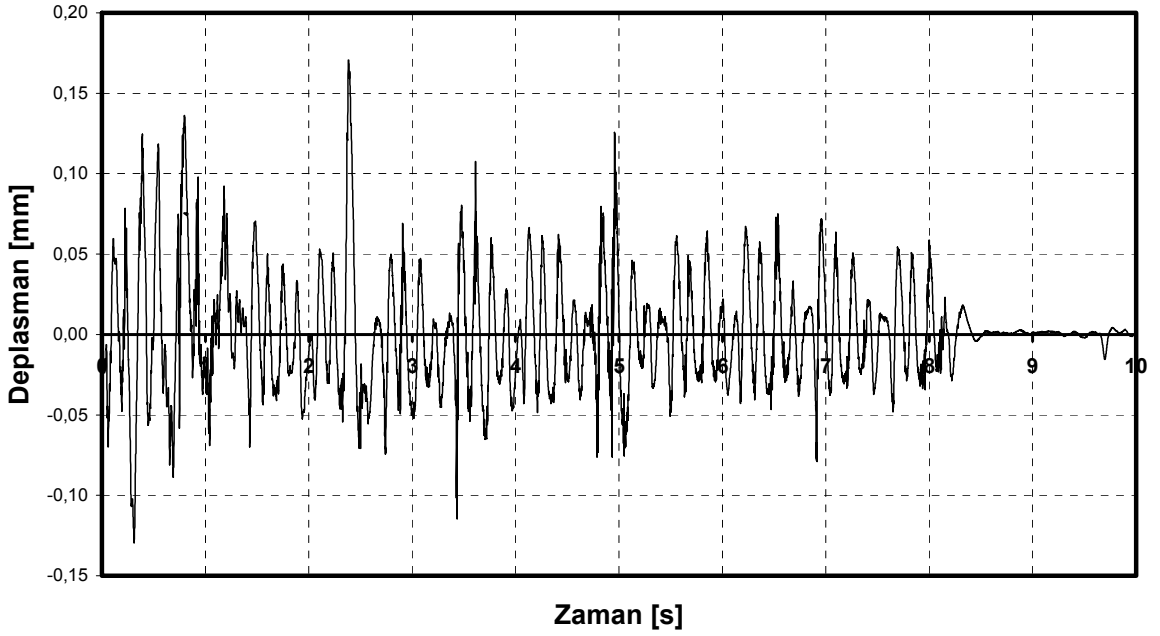


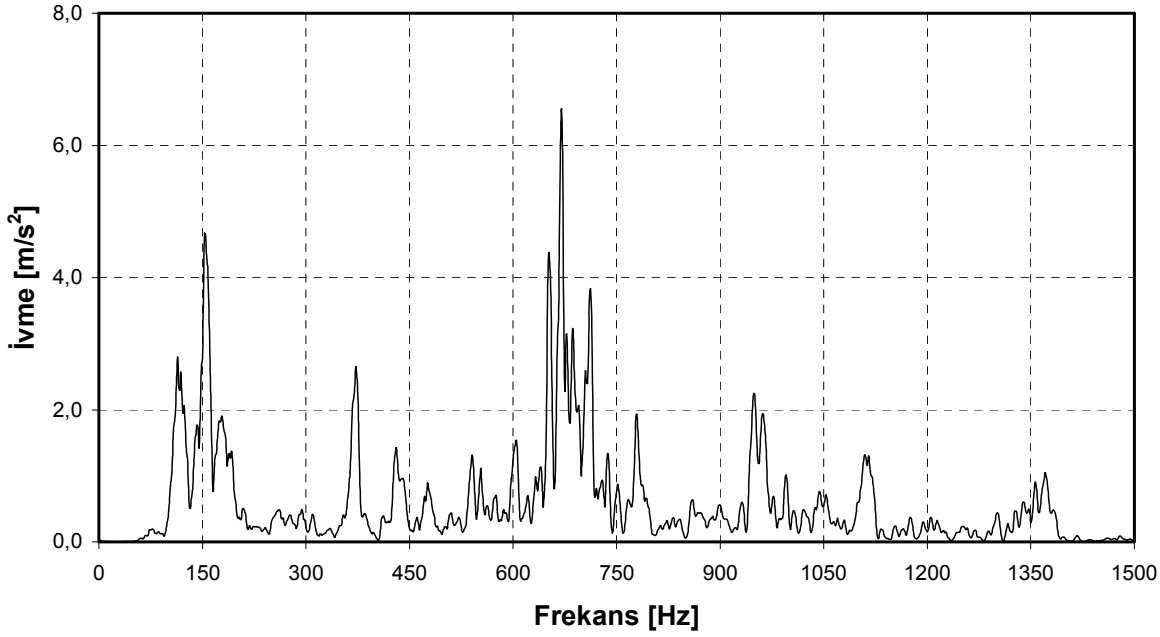
Şekil B.44 : İki mesnet arasında dinamik ray eğilme momenti grafiği (değişken yol parametresi selet aralığı, a=0.60 m).

Ek C. Aksaray-Havalimanı Metro Hattında Metro Dizisi Geçerken Kaydedilen Ray Deplasman Ve İvme Ölçüm Grafikleri

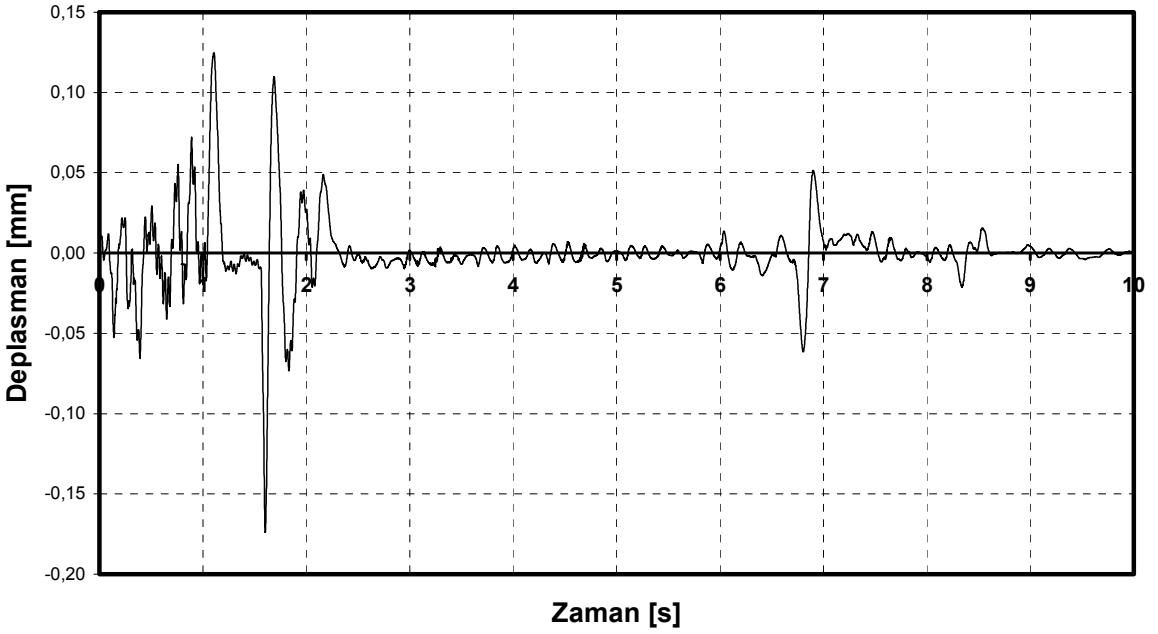


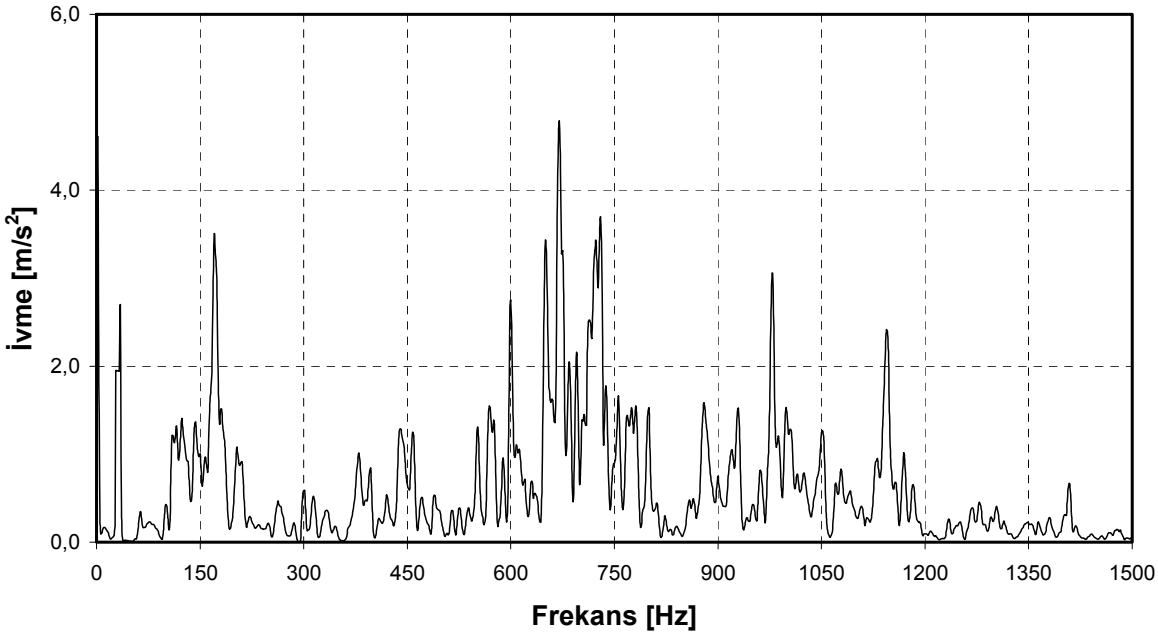
Şekil C.1 : Emniyet-Ulubatlı istasyonları arasında 1.nolu metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman ve ivme grafiği.



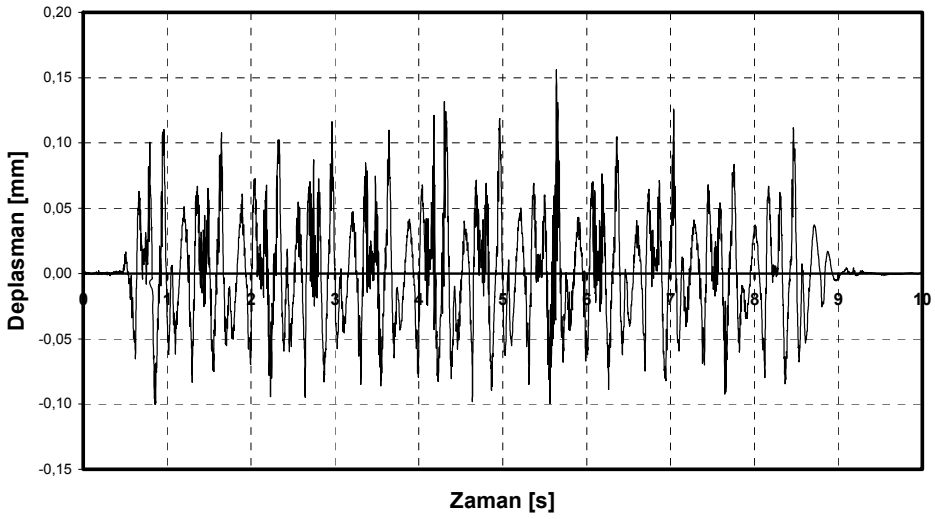


Şekil C.2 : Emniyet-Ulubatlı istasyonları arasında 2.nolu metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman ve ivme grafiği.

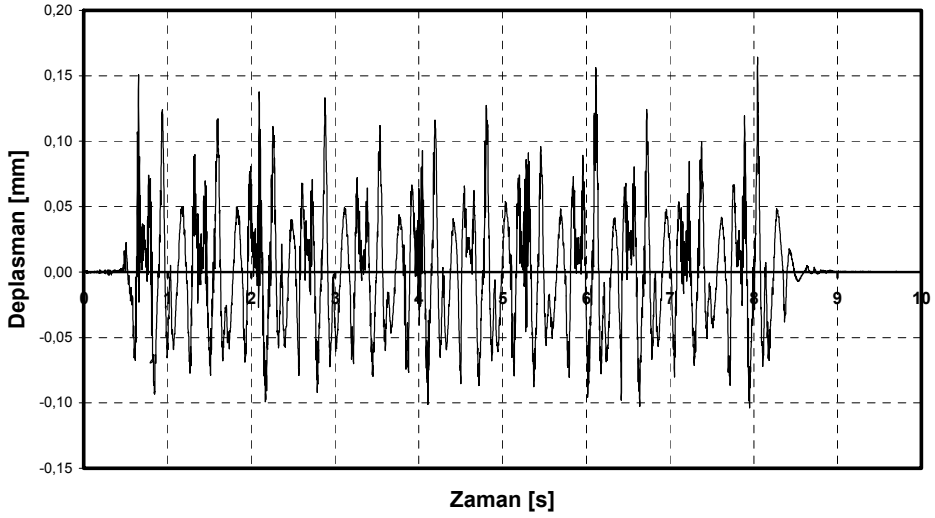




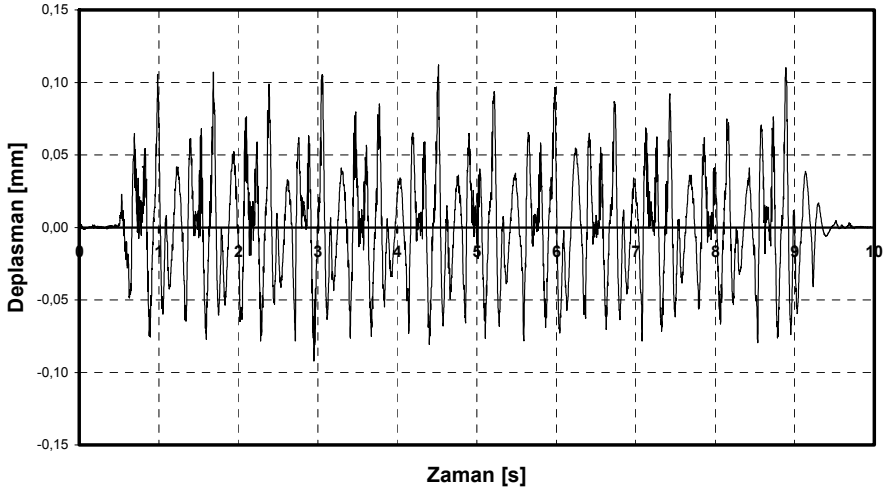
Şekil C.3 : Emniyet-Ulubatlı istasyonları arasında 3.nolu metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman ve ivme grafiği.



(a)

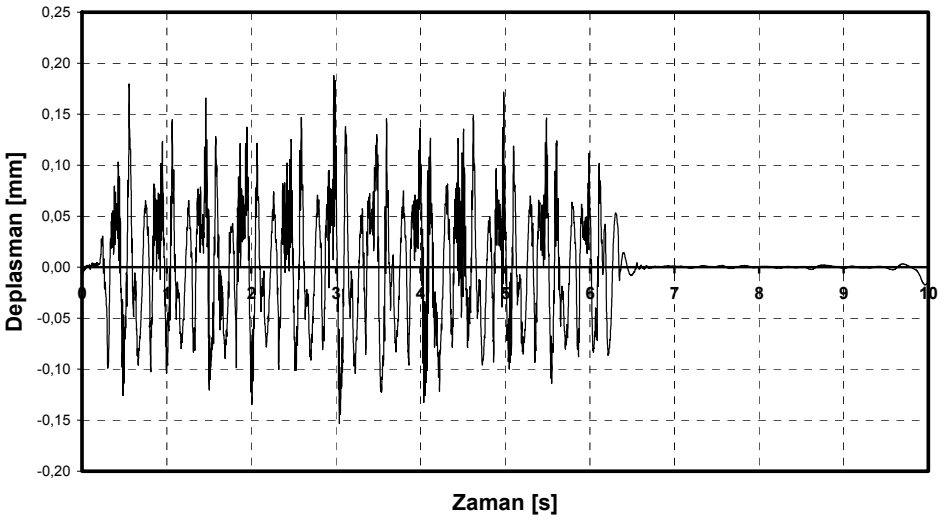


(b)

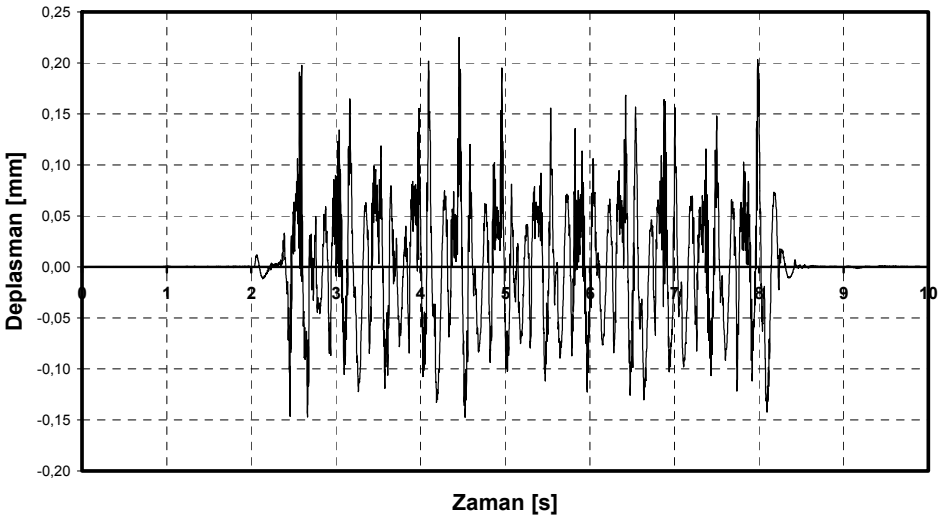


(c)

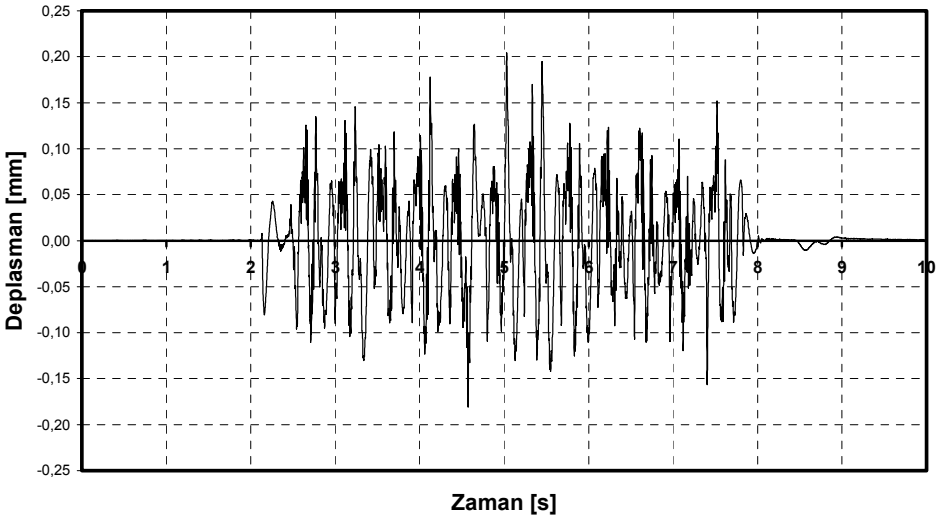
Şekil C.4 : Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

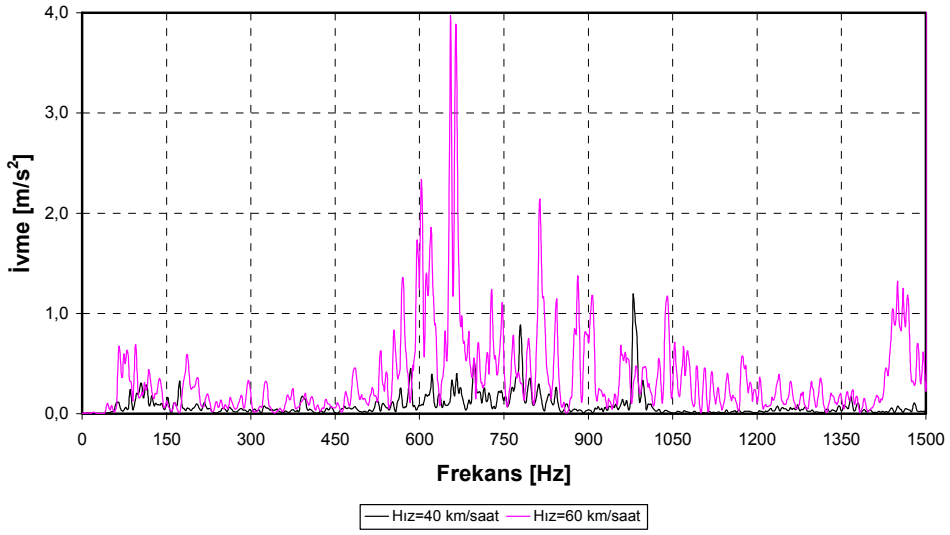


(b)

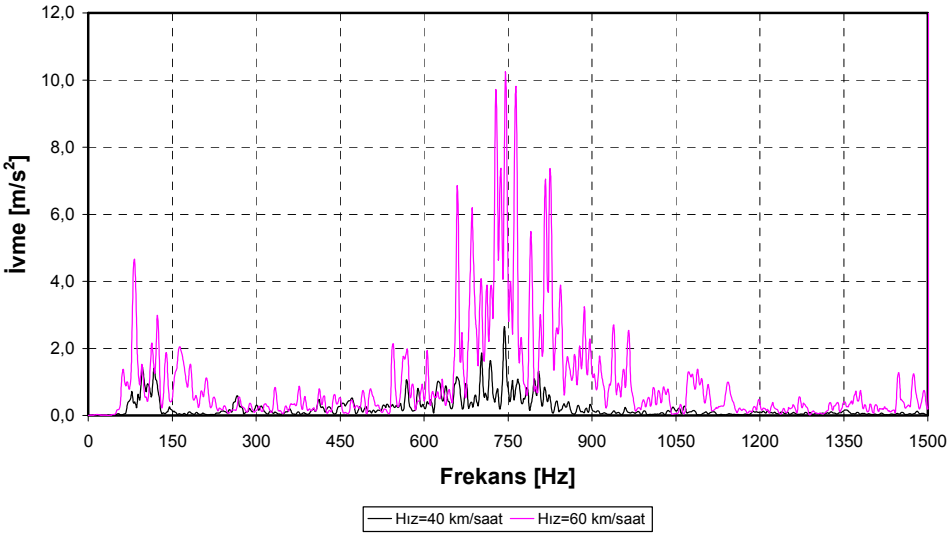


(c)

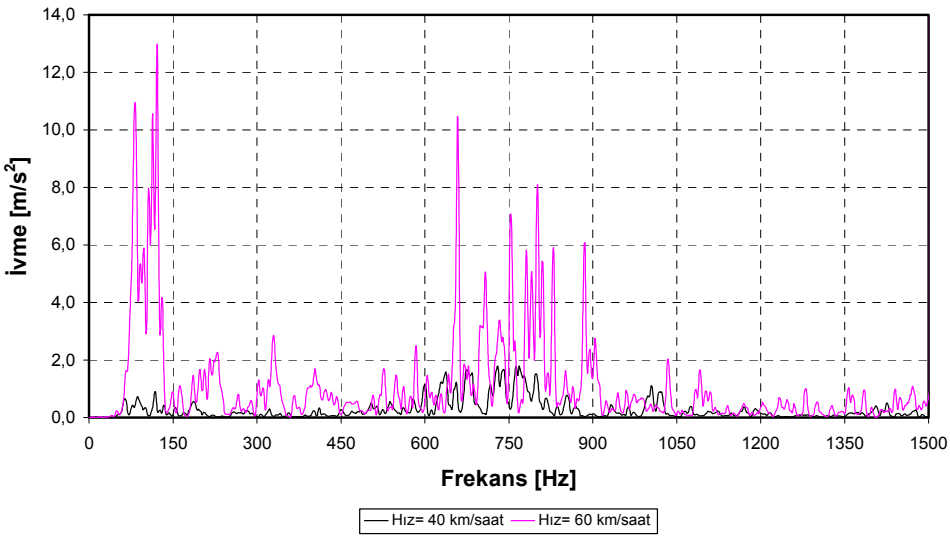
Şekil C.5 : Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

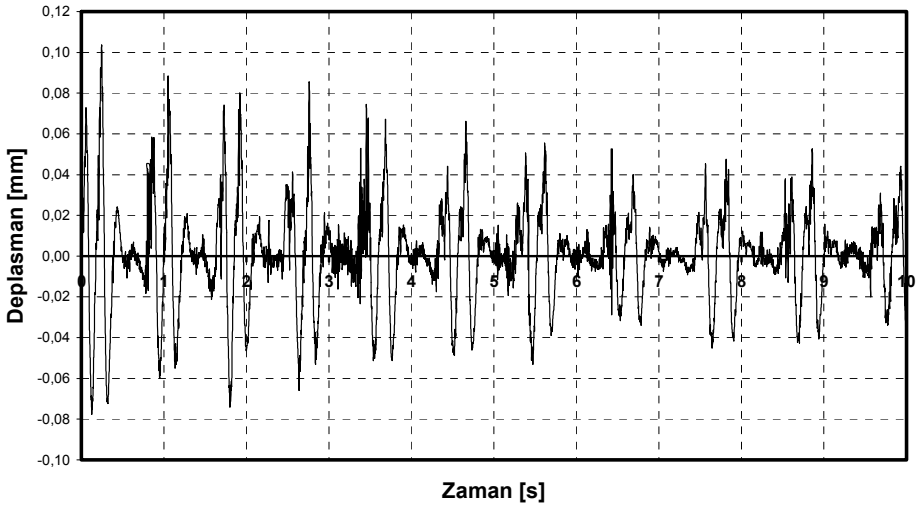


(b)

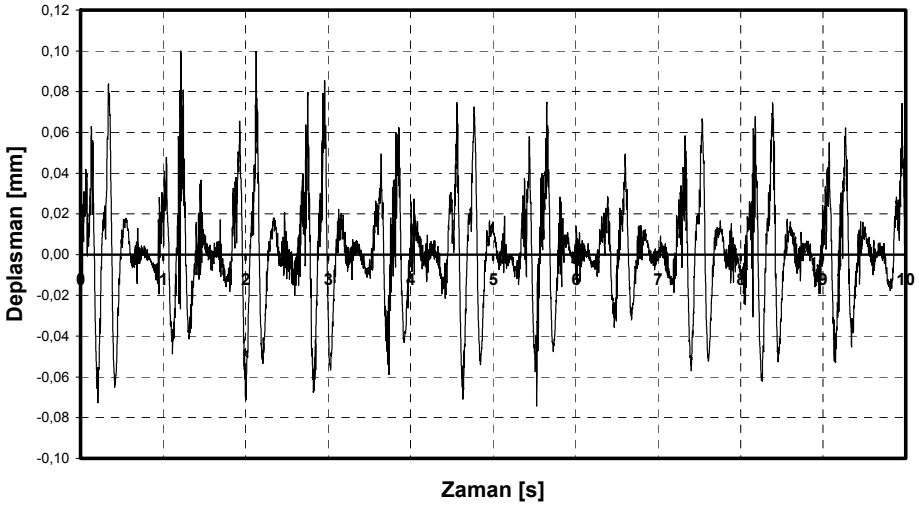


(c)

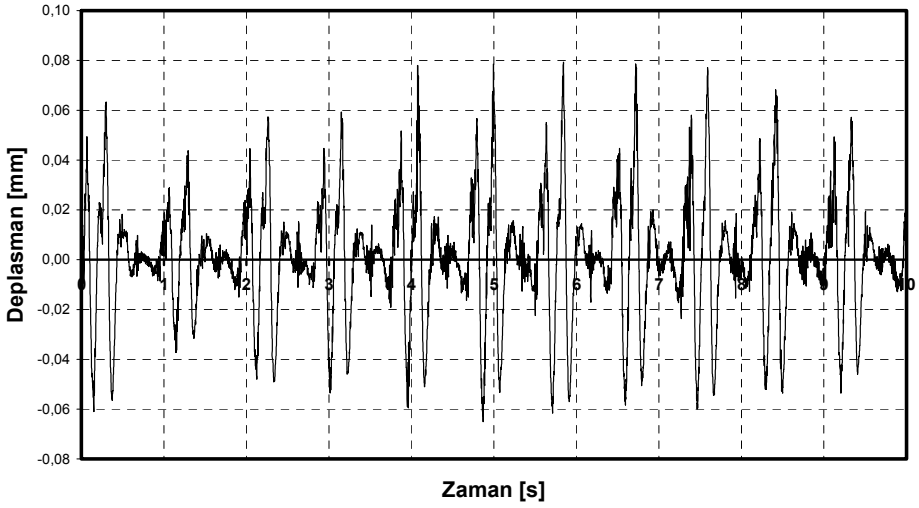
Şekil C.6 : Ulubatlı-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken geçerken kaydedilen ray ivme grafiği.



(a)

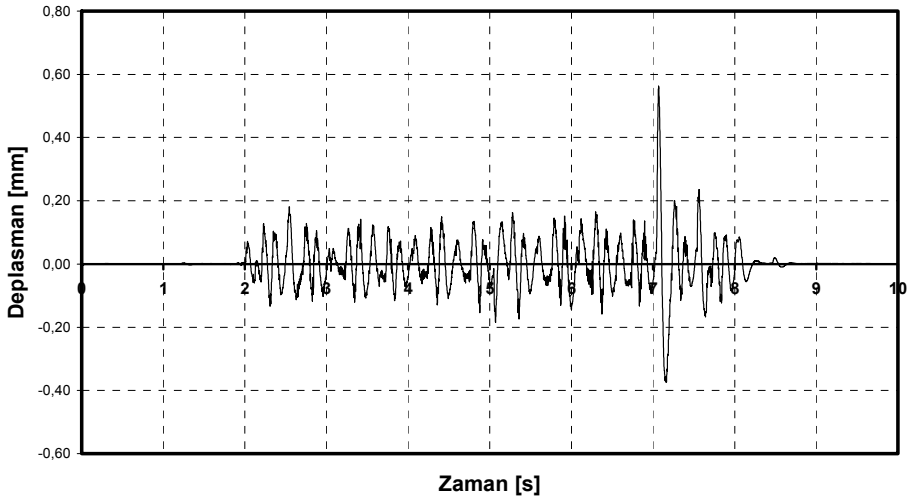


(b)

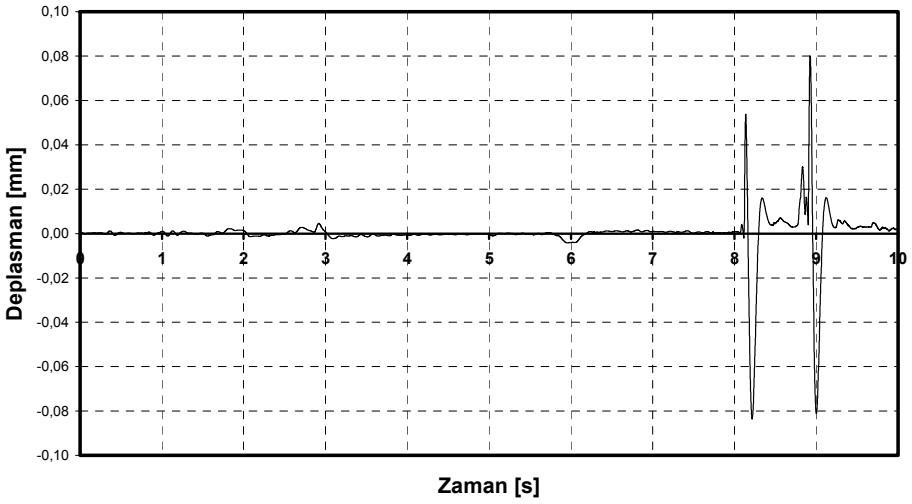


(c)

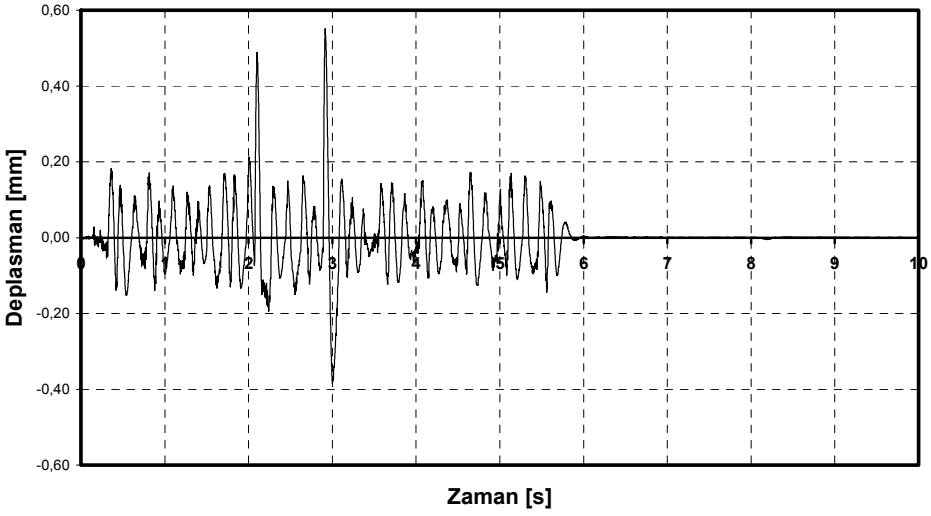
Şekil C.7 : Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

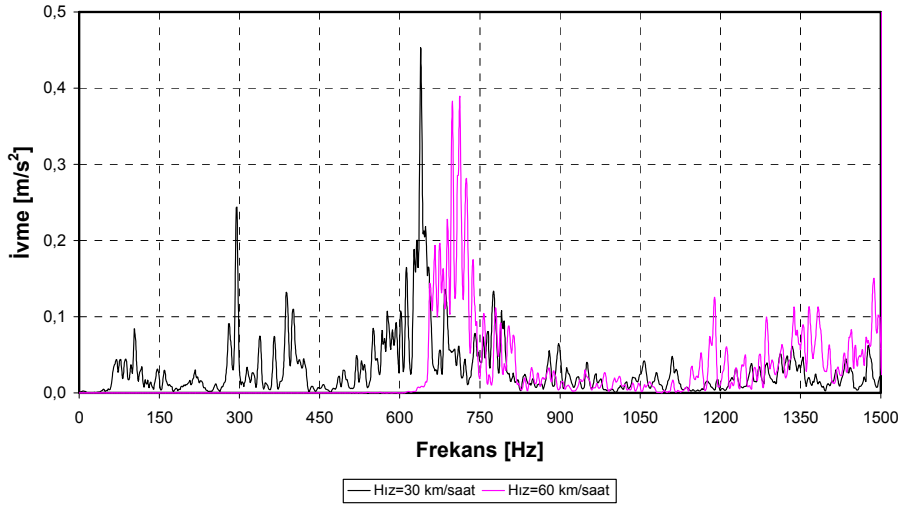


(b)

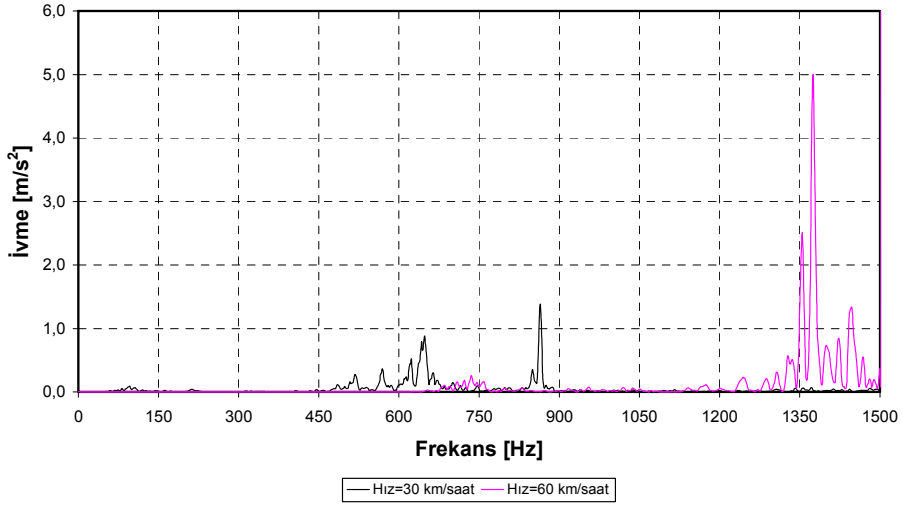


(c)

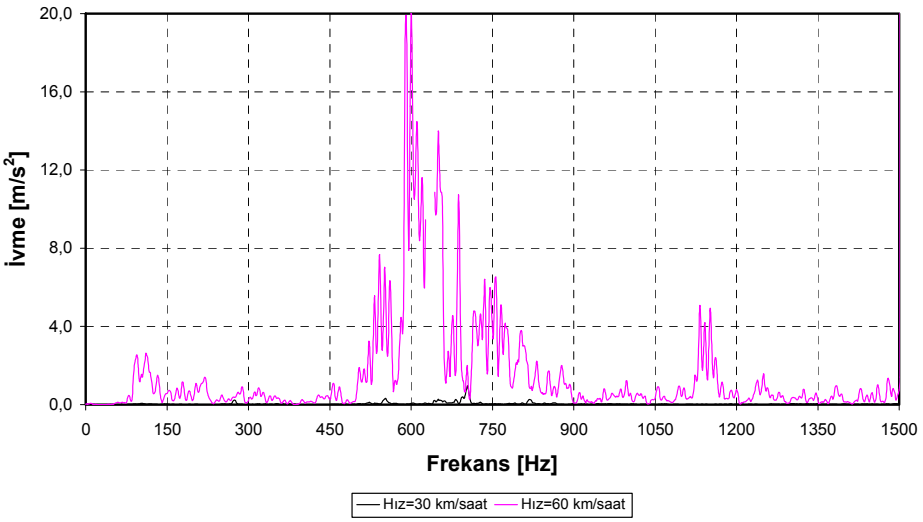
Şekil C.8 : Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

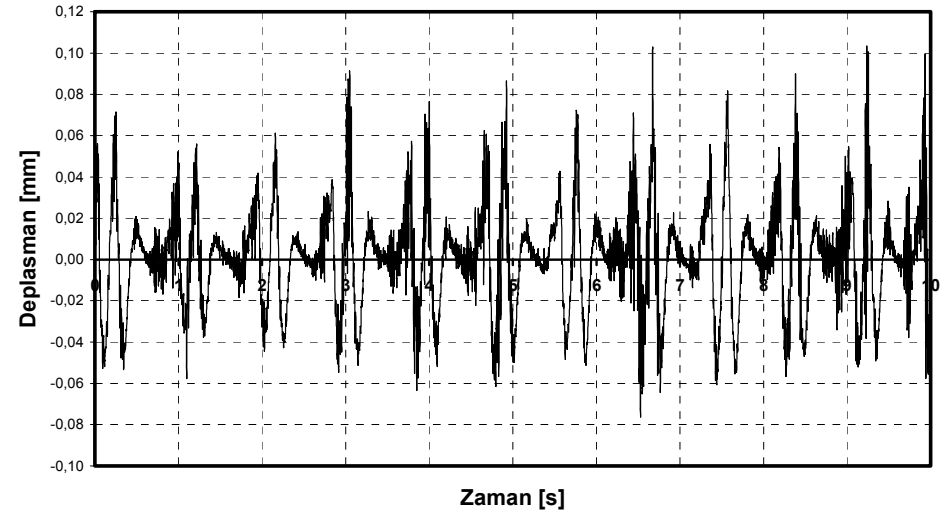


(b)

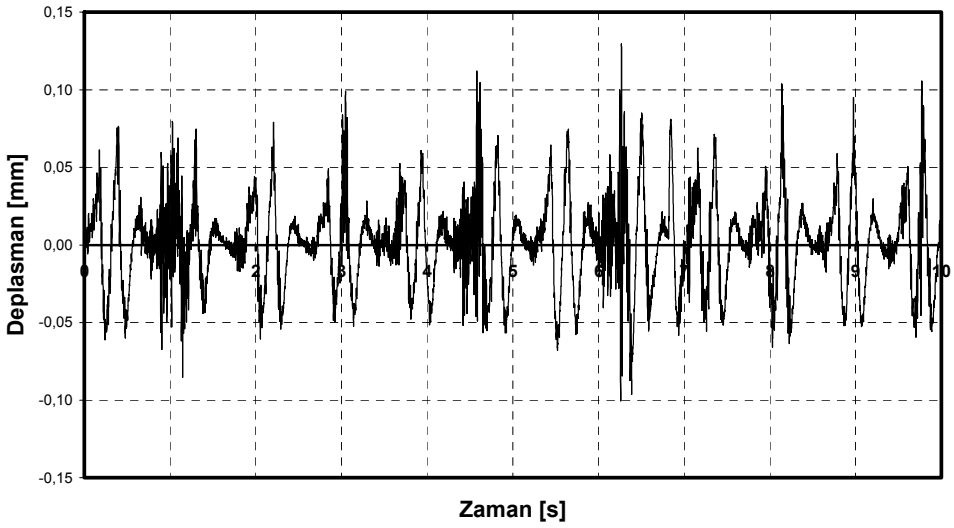


(c)

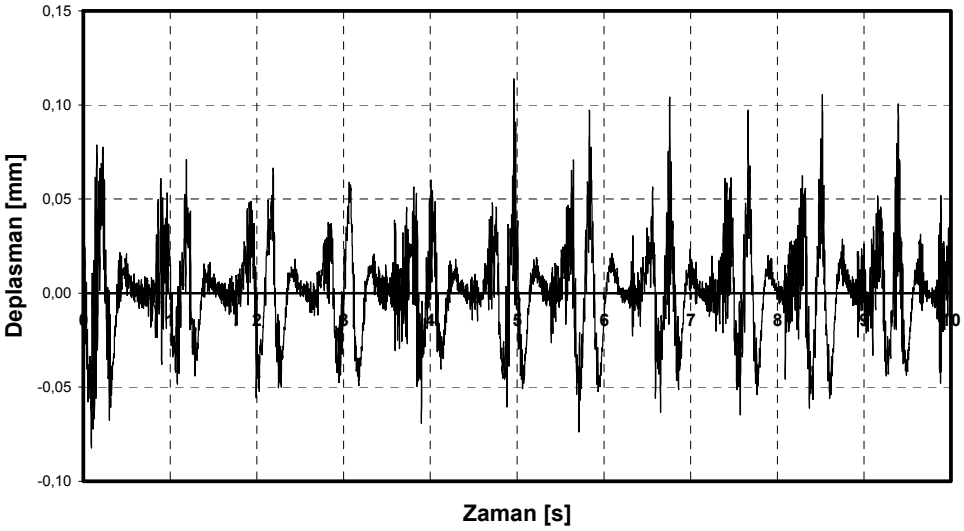
Şekil C.9 : Sağmalcılar-Bayrampaşa istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray ivme grafiği.



(a)

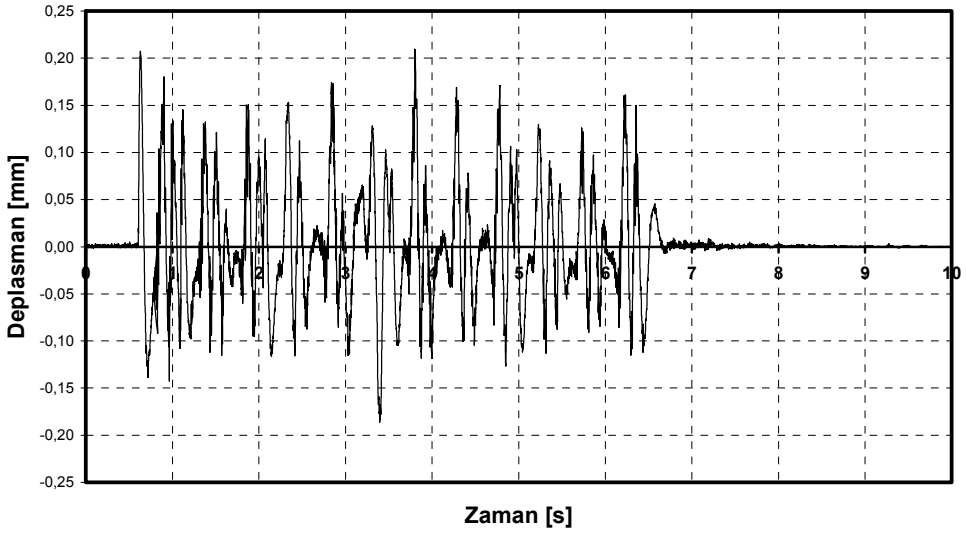


(b)

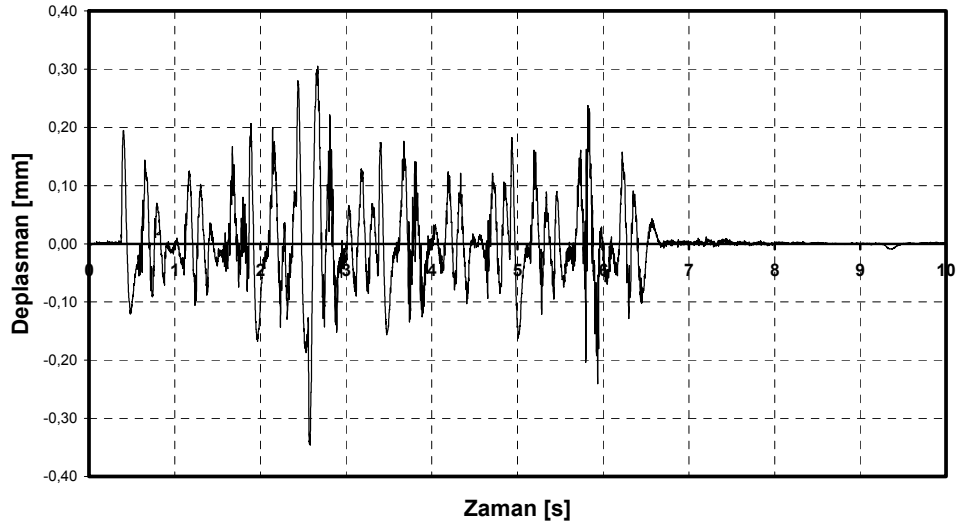


(c)

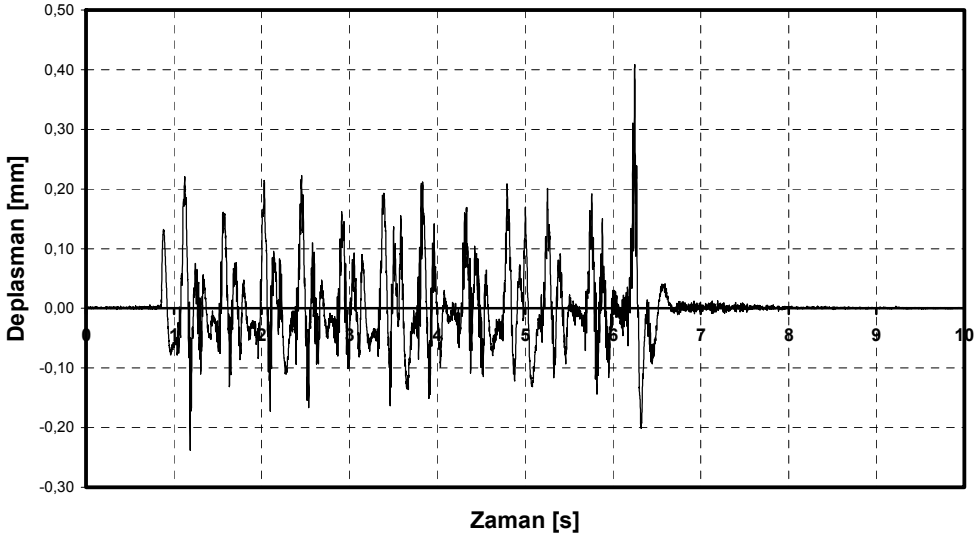
Şekil C.10 : Yenibosna-DTM istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

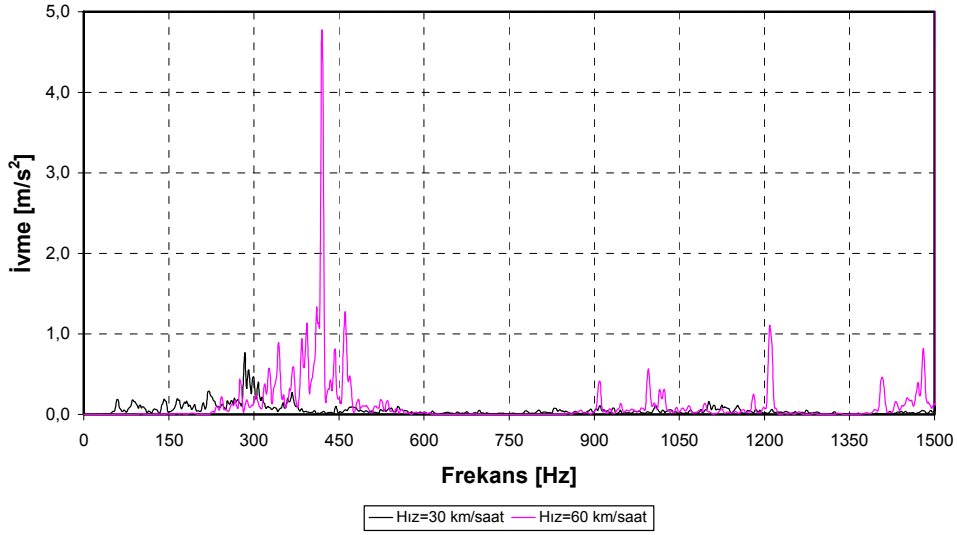


(b)

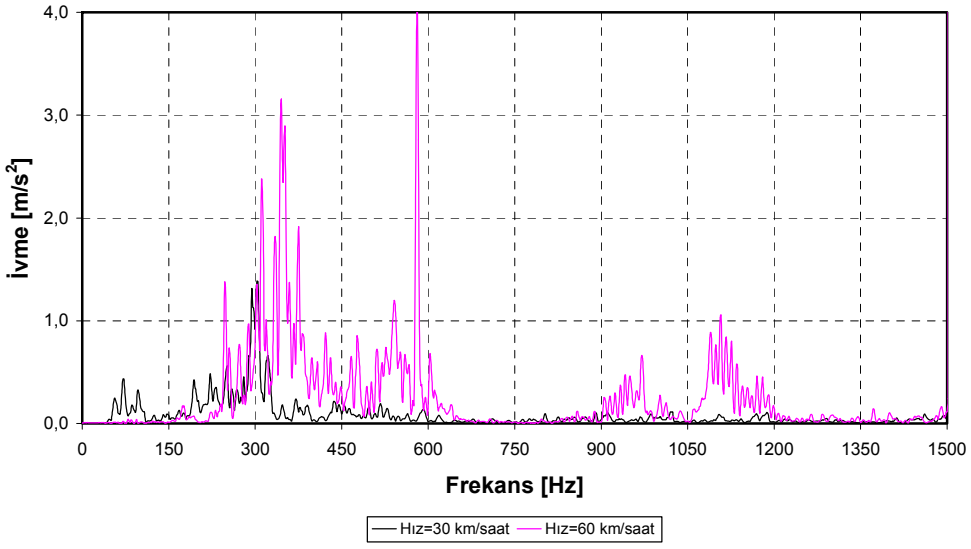


(c)

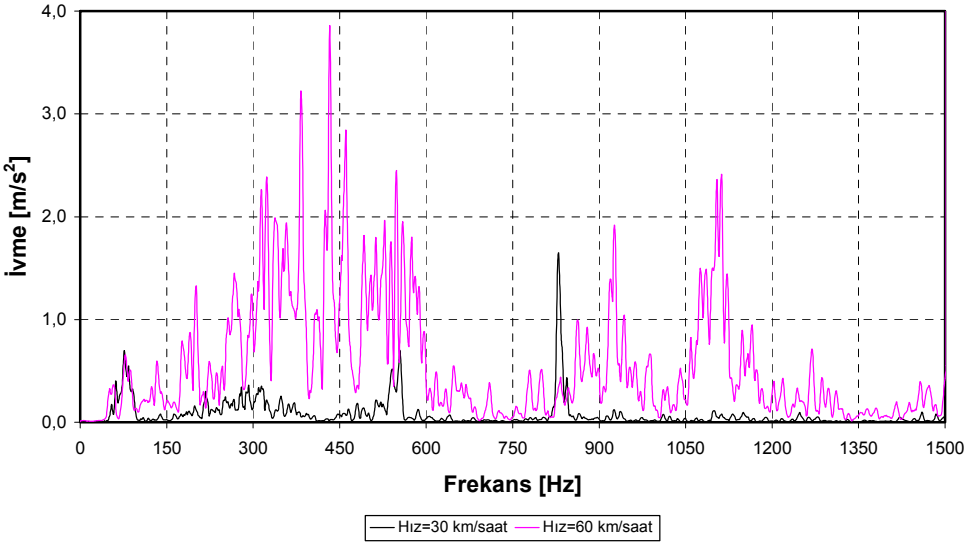
Şekil C.11 : Yenibosna-DTM istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray deplasman grafiği.



(a)

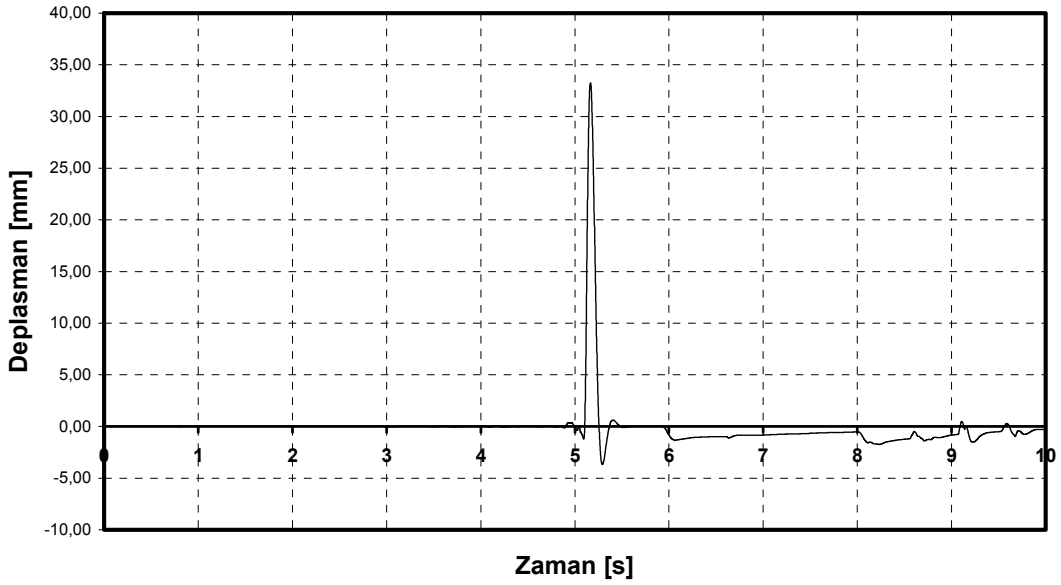


(b)

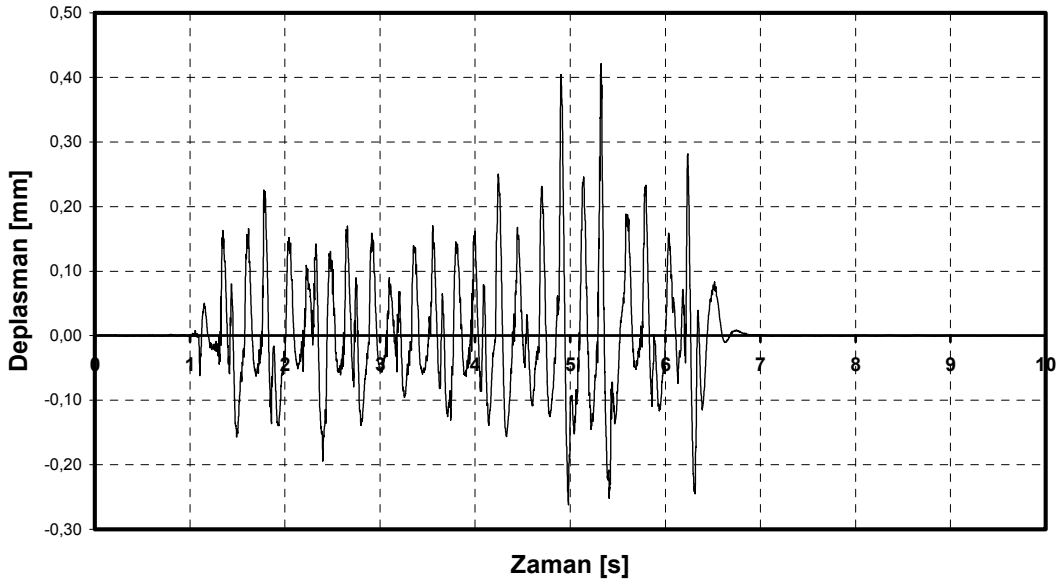


(c)

Şekil C.12 : Yenibosna-DTM istasyonları arasında 1.nolu (a), 2.nolu (b), 3.nolu (c) metro dizisi 30 ve 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen ray ivme grafiği.

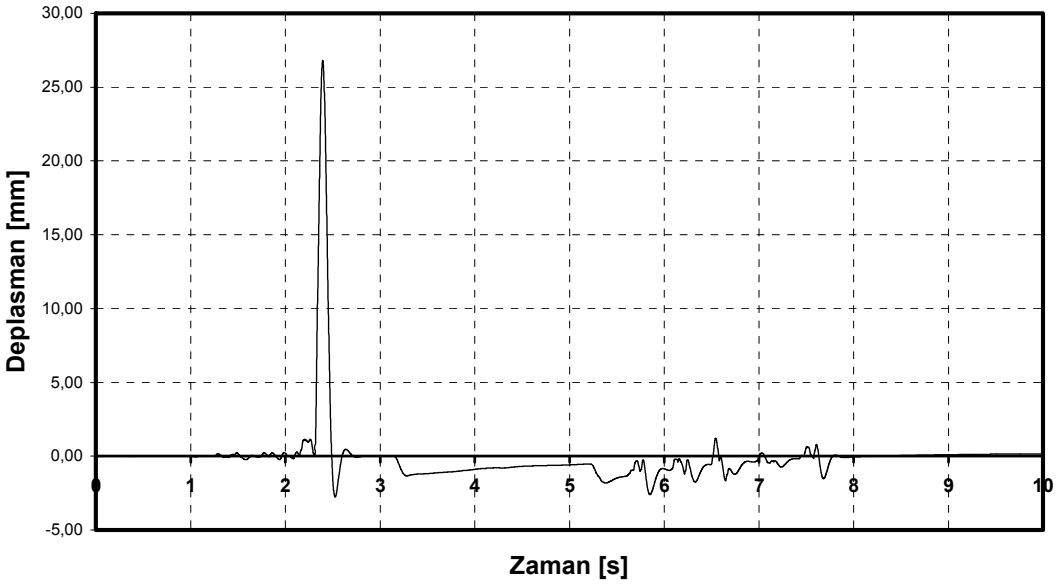


(a)

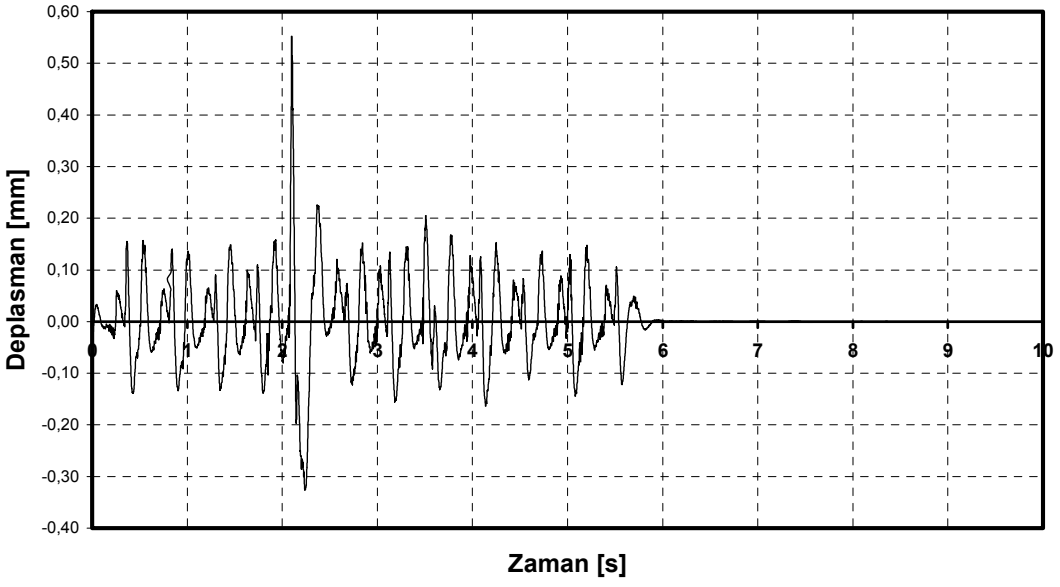


(b)

Şekil C.13 : Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arasında taşlamadan önce (a) ve sonra (b) 2.nolu metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen zaman-deplasman grafiği.

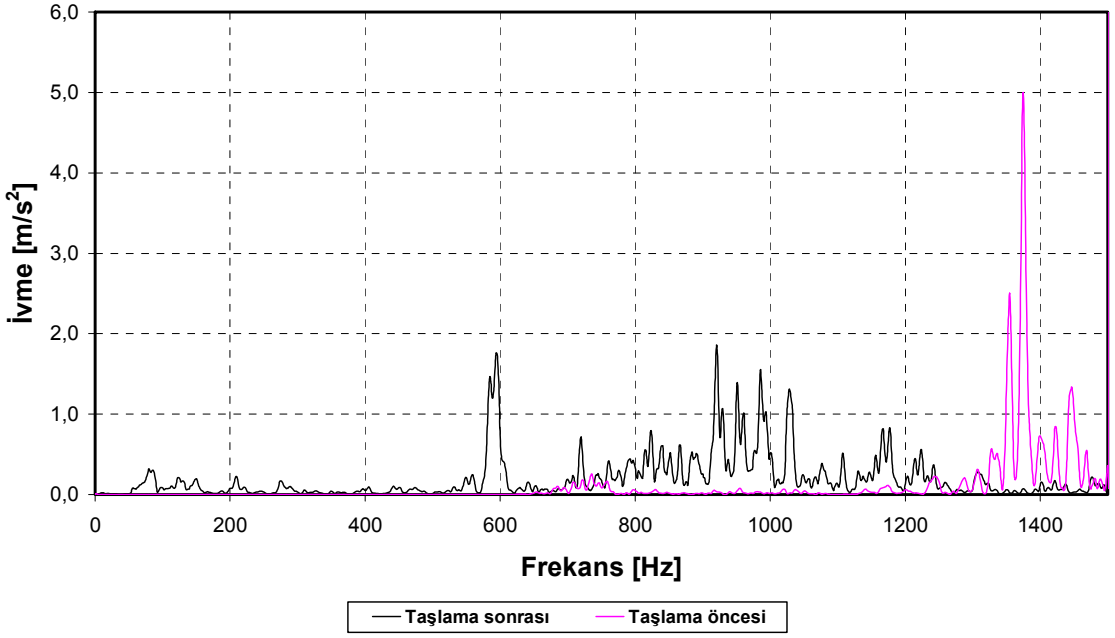


(a)

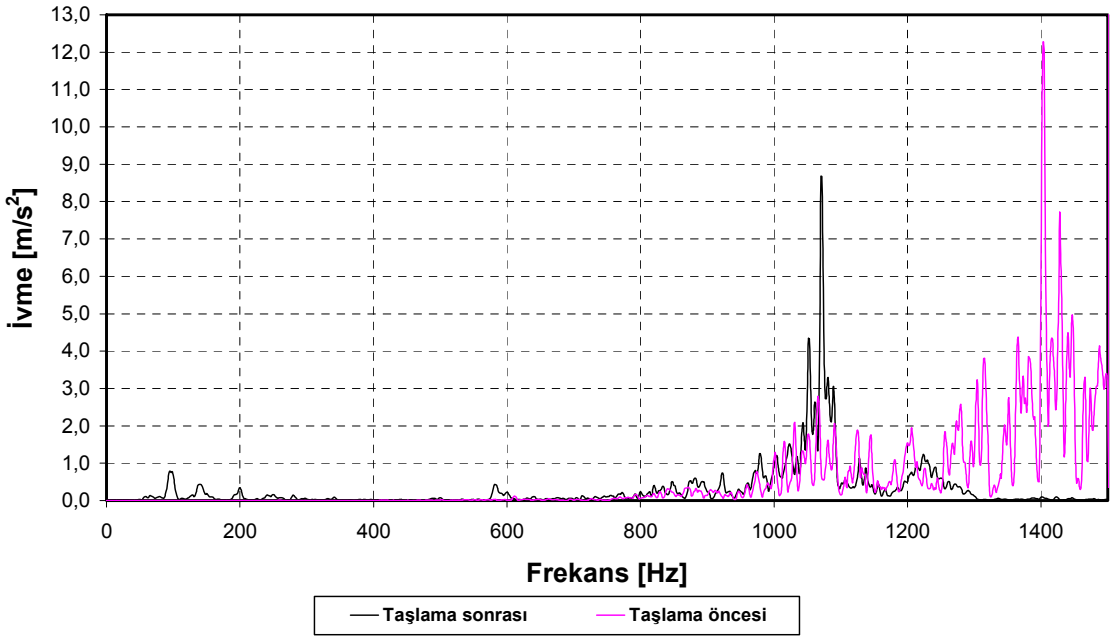


(b)

Şekil C.14 : Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arasında taşlamadan önce (a) ve sonra (b) 3.nolu metro dizisi 60 km/saat hızla geçerken kaydedilen zaman-deplasman grafiği.

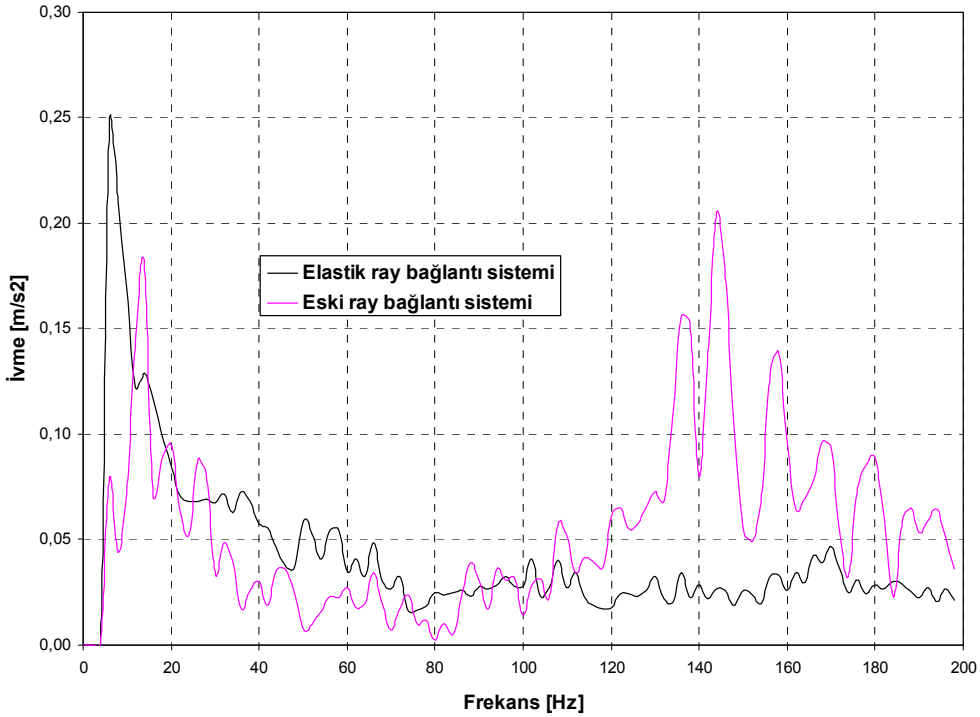


(a)

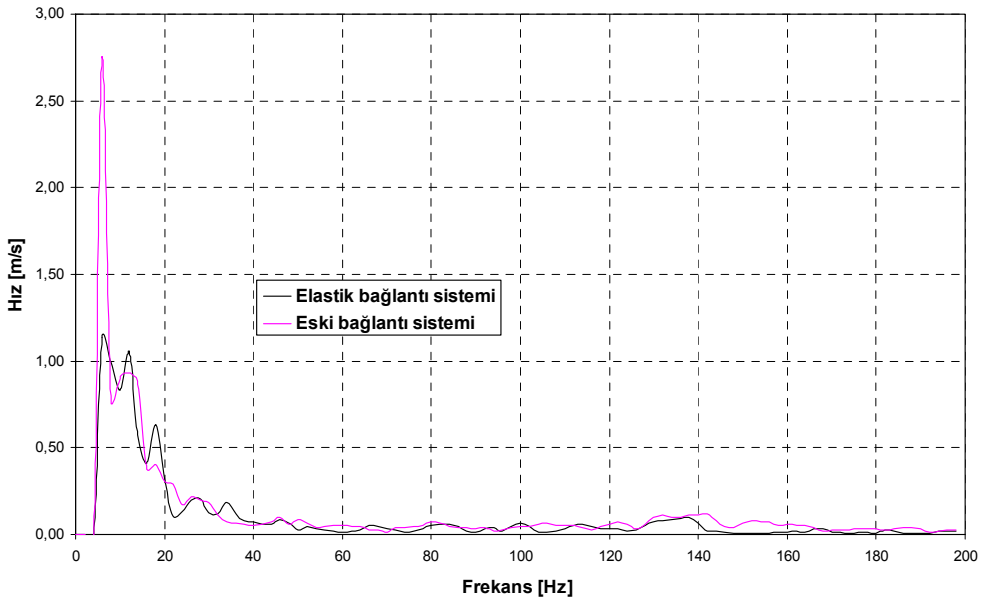


(b)

Şekil C.15 : Sağmalcılar-Kartaltepe istasyonları arasında taşlama önce (a) ve sonra (b) frekans-titreşim ivme grafiği.



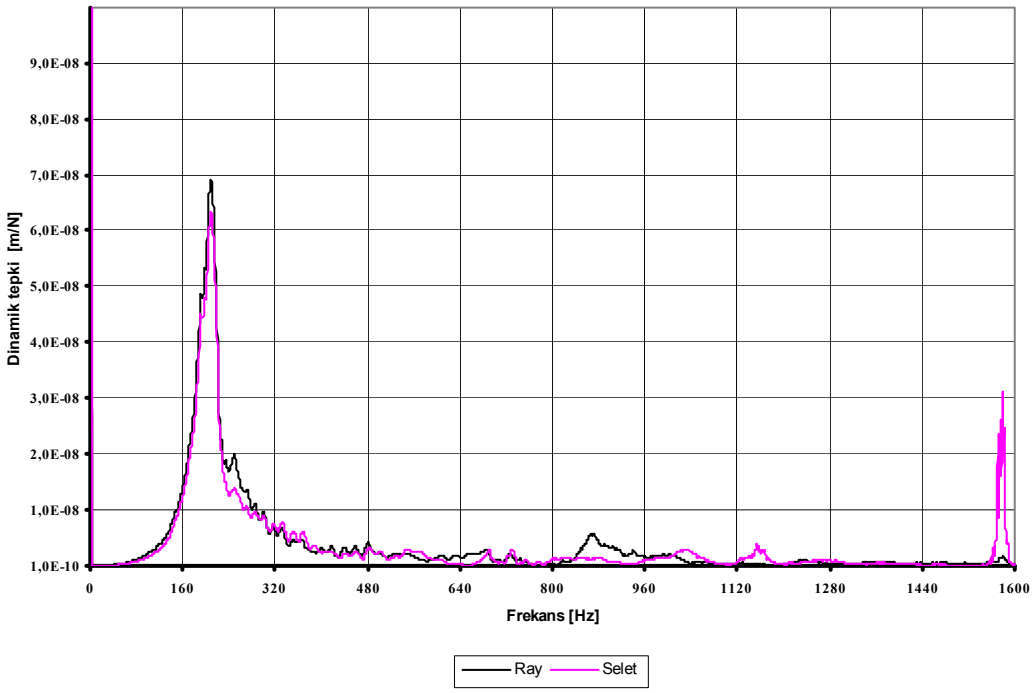
(a)



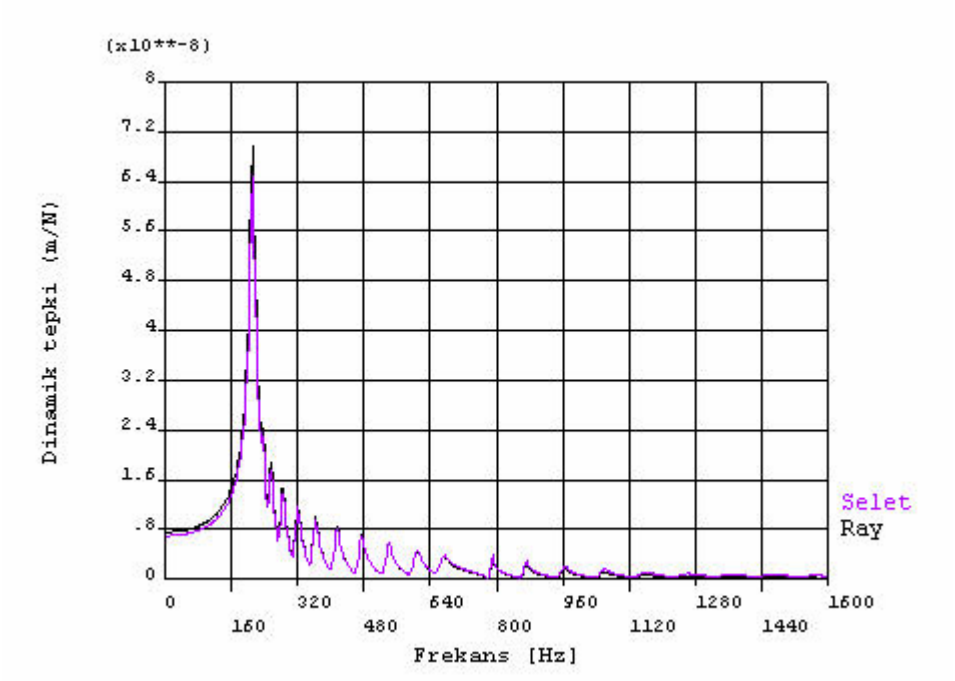
(b)

Şekil C.16 : Otogar-Esenler istasyonları arasında frekans- titreşim ivme (a) ve hız grafiği (b).

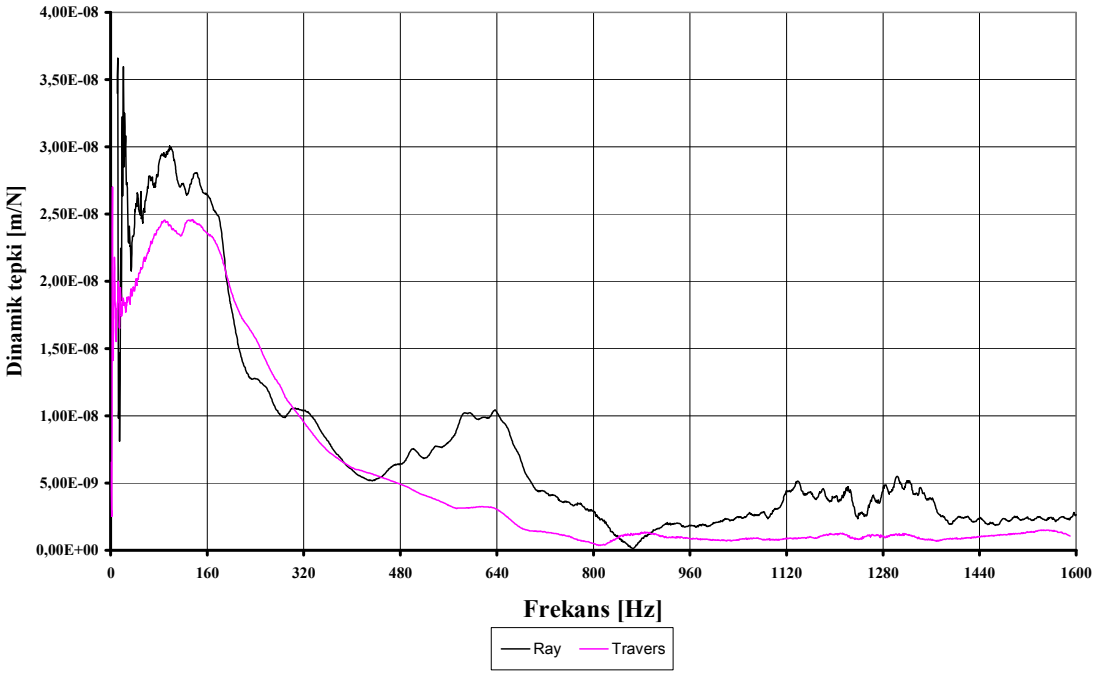
Ek D. Balastlı ve Balastsız Yol Modelleri İçin Arazide Ölçülen ve Doğrulanmış Sonlu Elemanlar Modelin Parametreleri ve Sonuçları



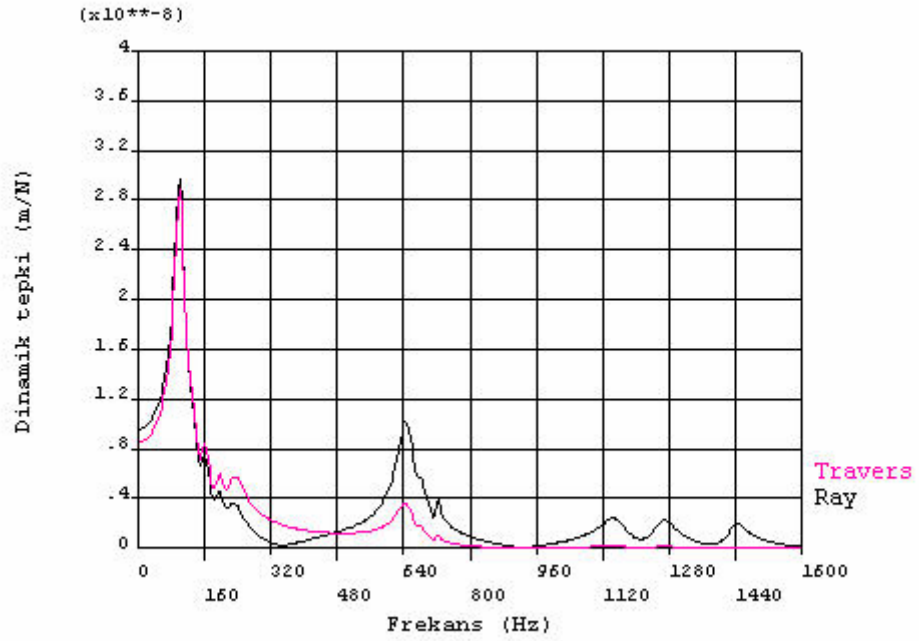
Şekil D.1 : Balastsız yolda mesnet noktasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



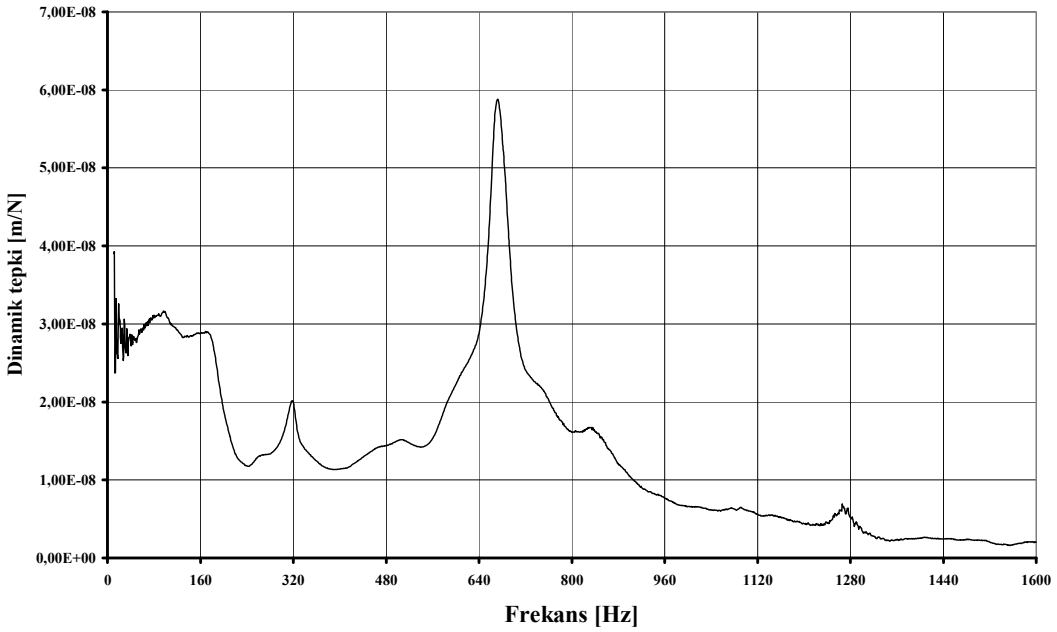
Şekil D.2 : Doğrulanmış sonlu elemanlar balastsız yol modeli dinamik tepki değerleri.



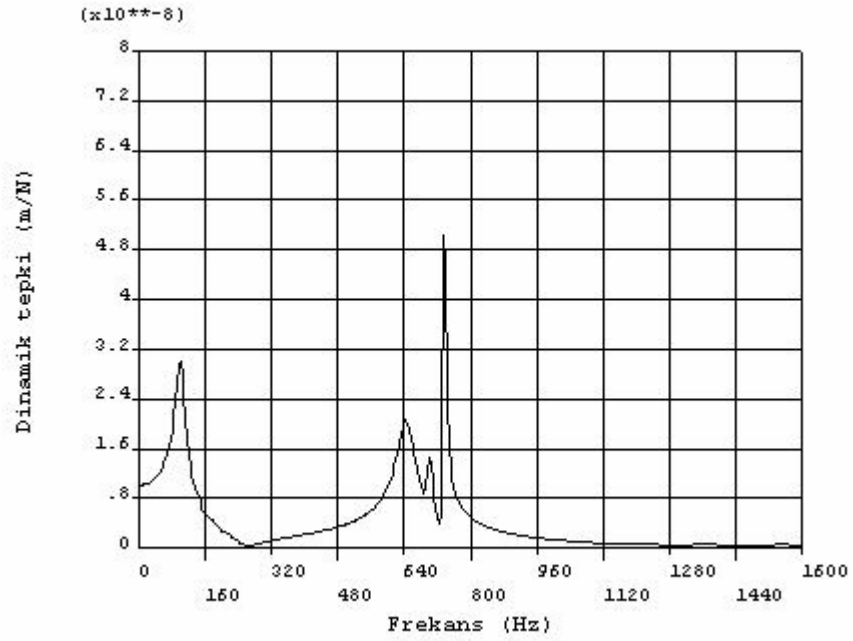
Şekil D.3 : Esenler depo sahası tabii zeminli beton traversli balastlı yolda mesnet noktasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



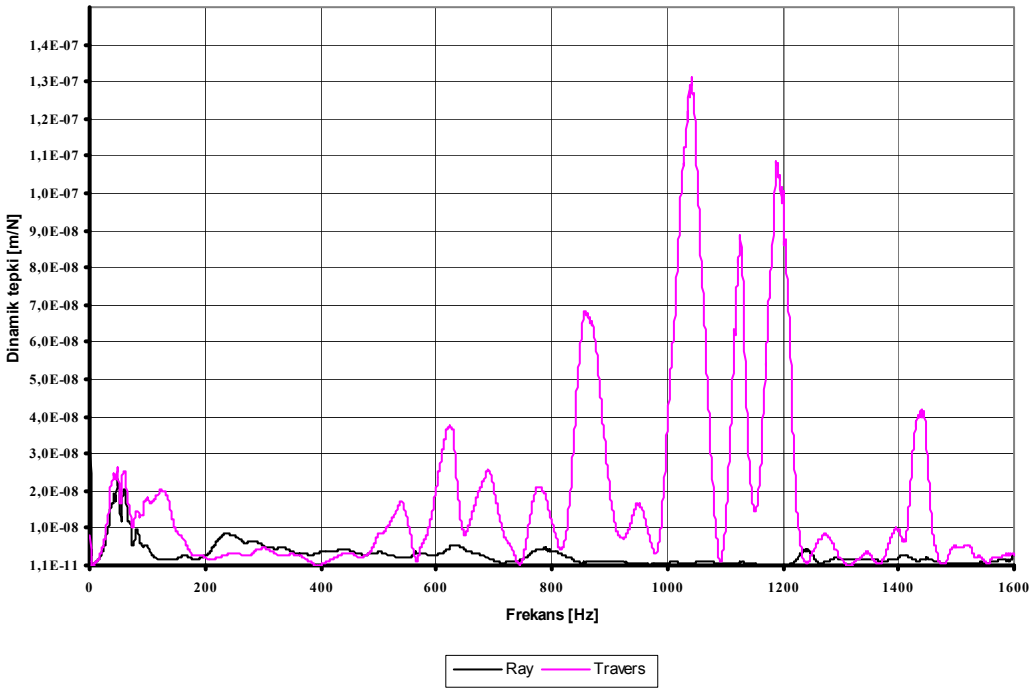
Şekil D.4 : Doğrulanmış sonlu elemanlar balastlı yol (tabii zeminli beton traversli) modeli dinamik tepki değerleri.



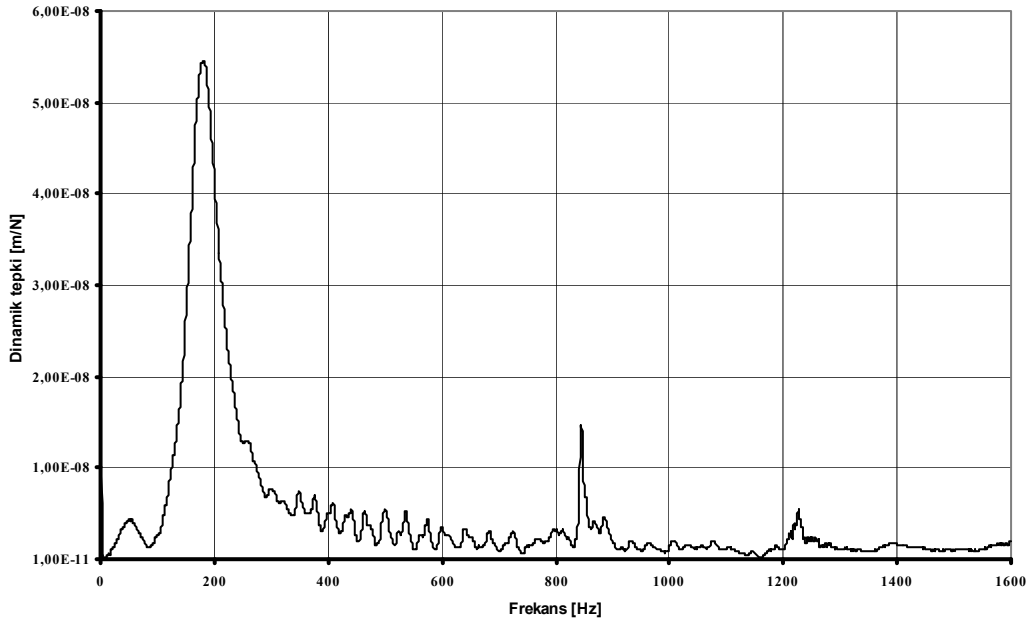
Şekil D.5 : Esenler depo sahası tabii zeminli beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında ray dinamik tepki ölçüm değerleri.



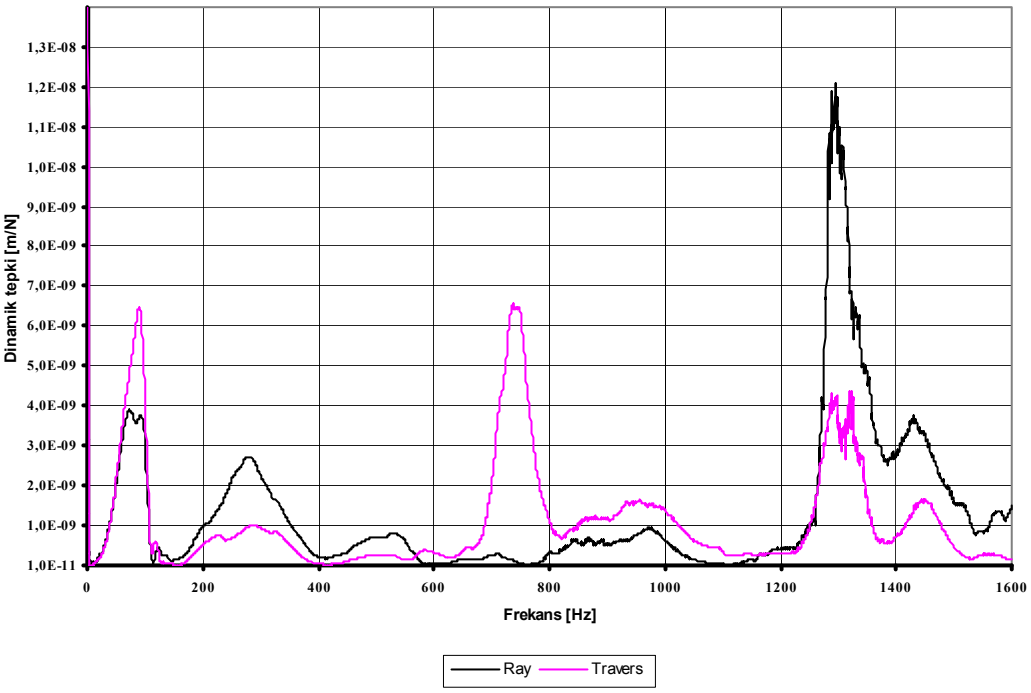
Şekil D.6 : Doğrulanmış sonlu elemanlar balastlı yol (tabii zeminli beton traversli) modeli ray dinamik tepkisi.



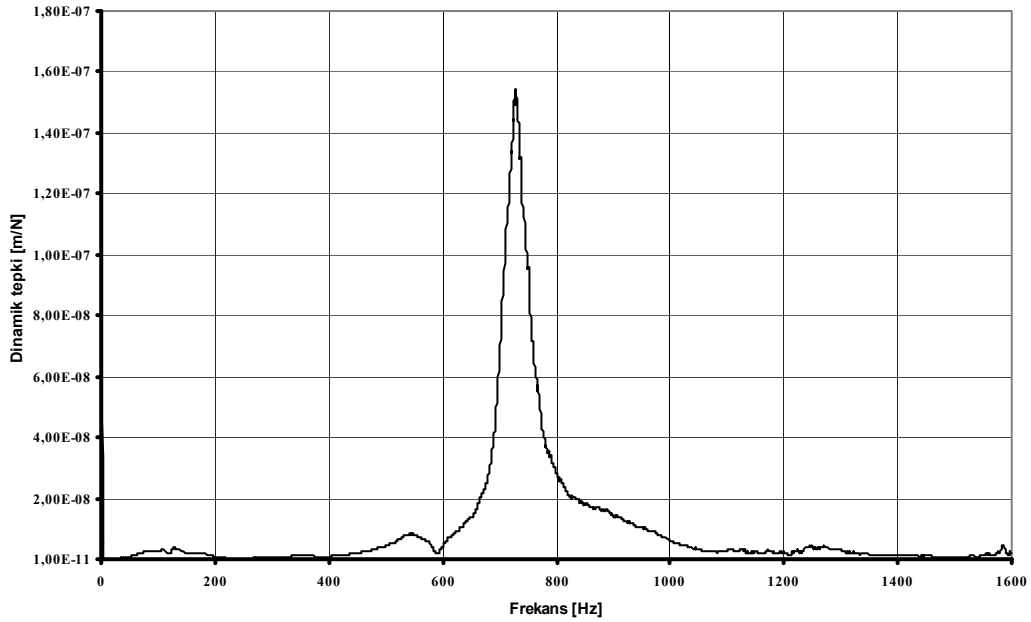
Şekil D.7 : Esenler-Otogar istasyonları arası beton zeminli ve ahşap traversli balastlı yolda mesnet noktasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



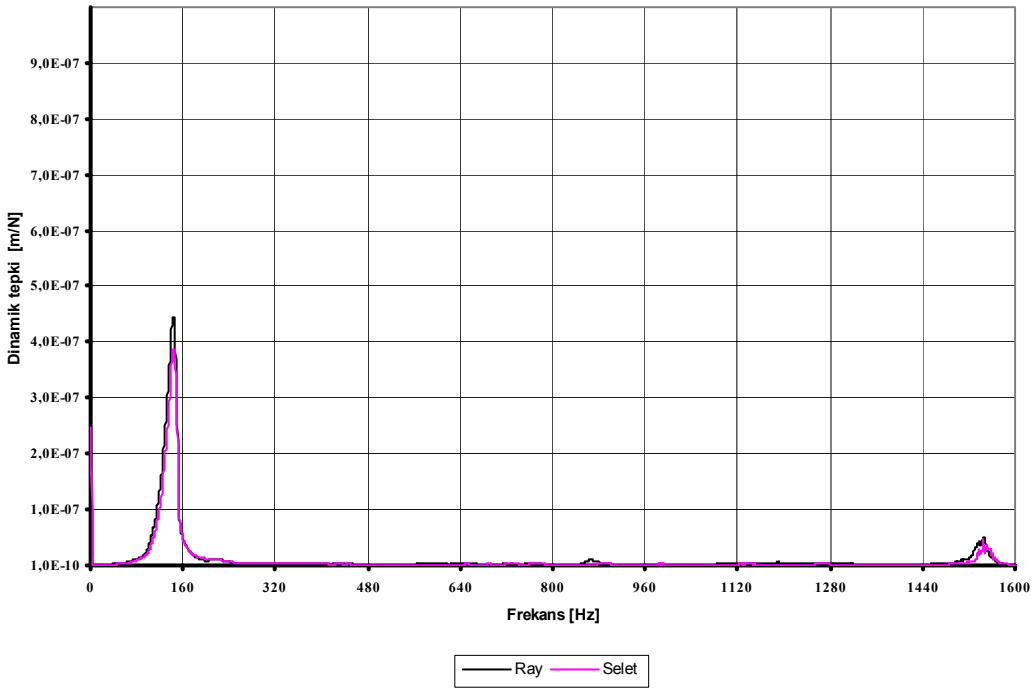
Şekil D.8 : Esenler-Otogar arası tabii zeminli ve ahşap traversli balastlı yolda iki mesnet arasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



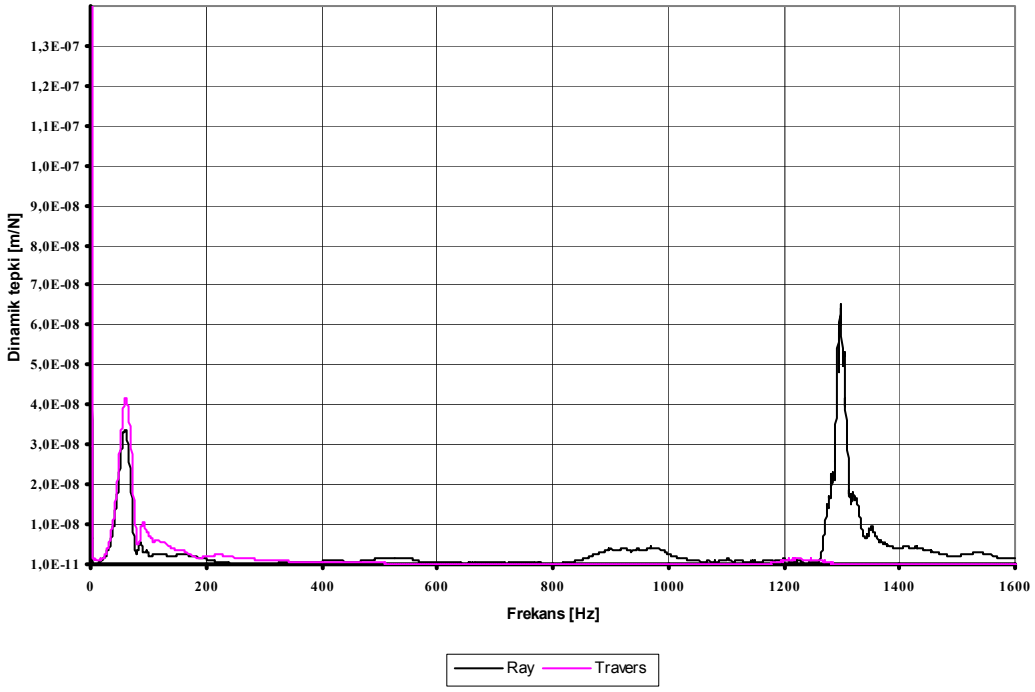
Şekil D.9 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda dinamik tepki ölçüm değerleri.



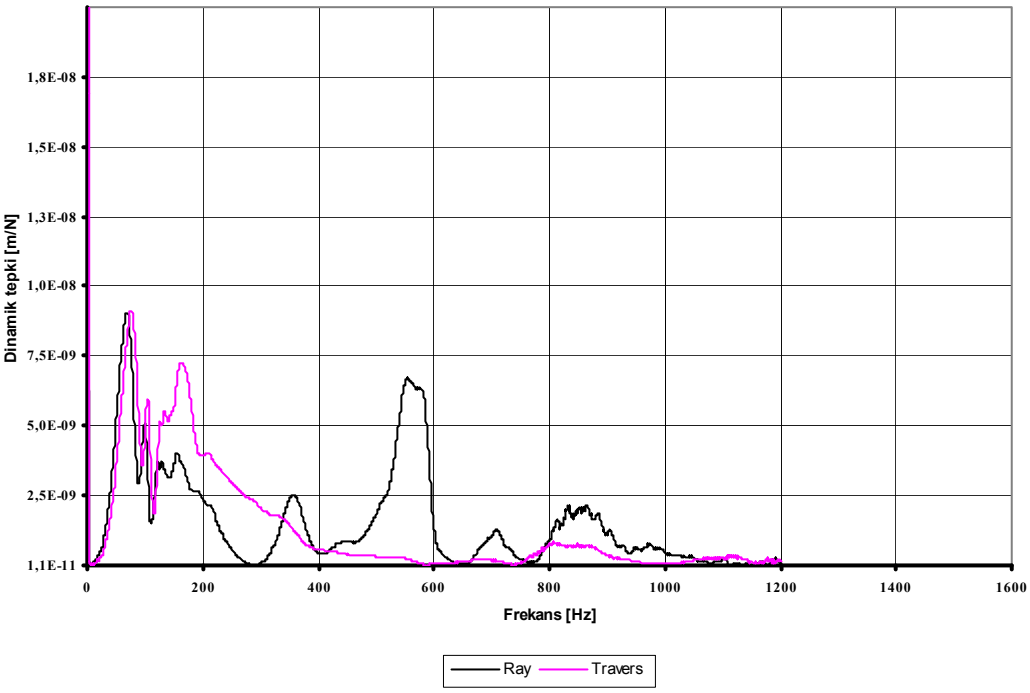
Şekil D.10 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında dinamik tepki ölçüm değerleri.



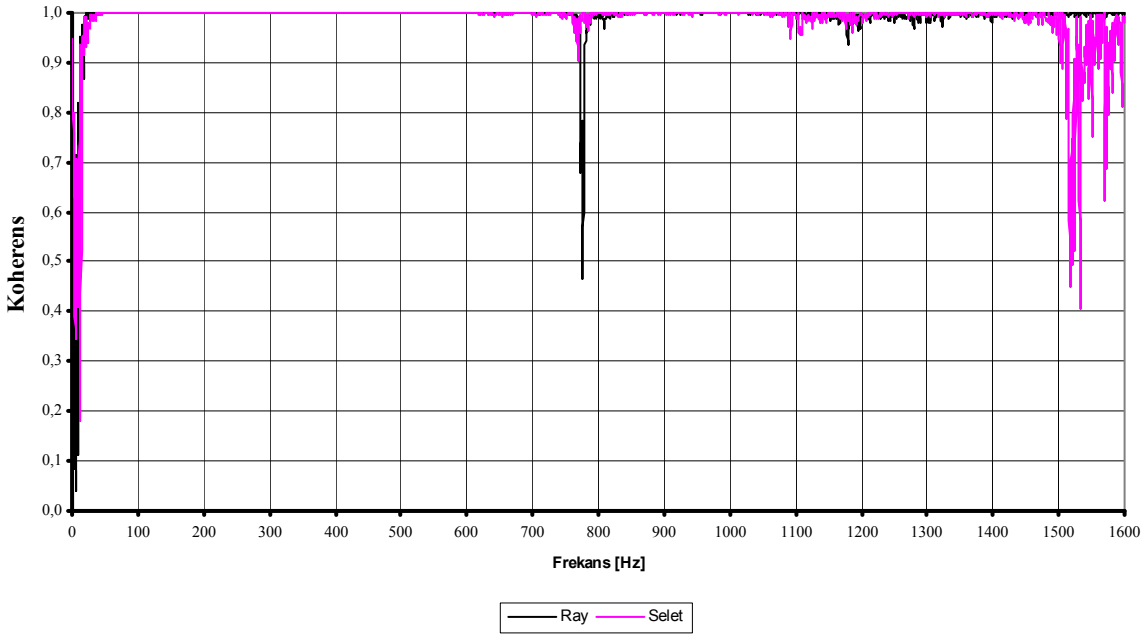
Şekil D.11 : Balastsız yolda mesnet noktasında ray altı elastik tabakasız durumda dinamik tepki ölçüm değerleri.



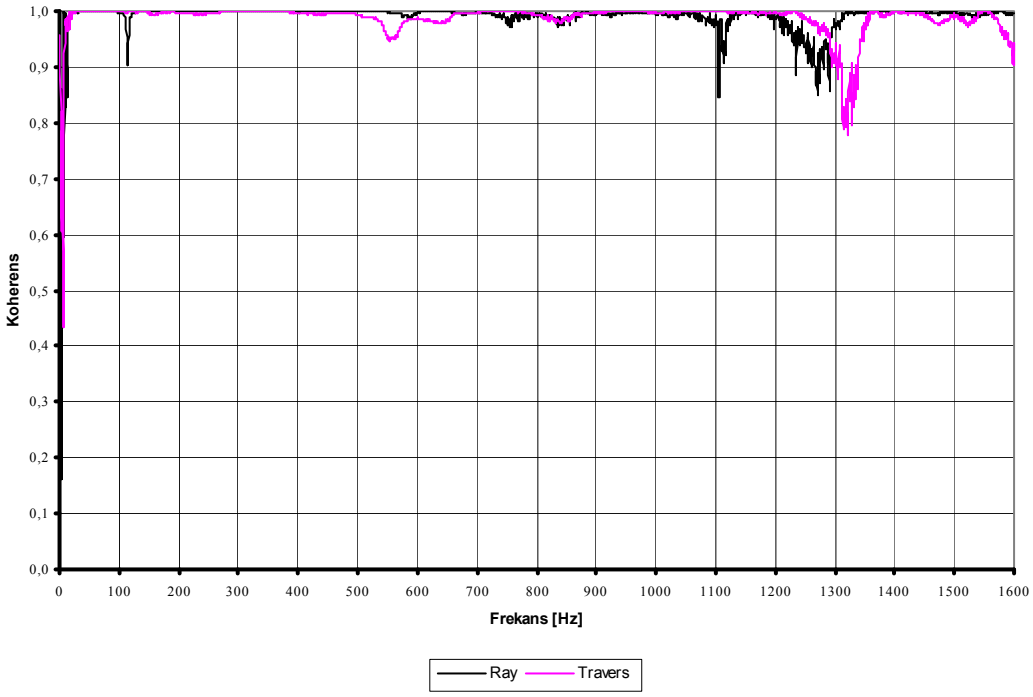
Şekil D.12 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda ray altı elastik tabakasız durumda dinamik tepki ölçüm değerleri.



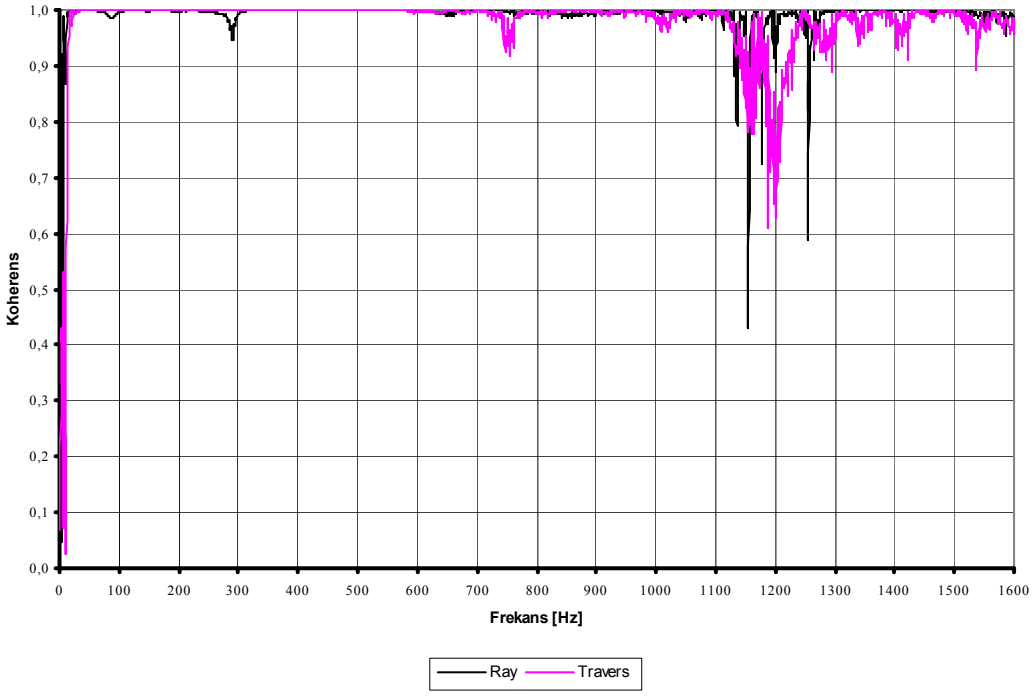
Şekil D.13 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda yeni ray altı elastik tabaka için dinamik tepki ölçüm değerleri.



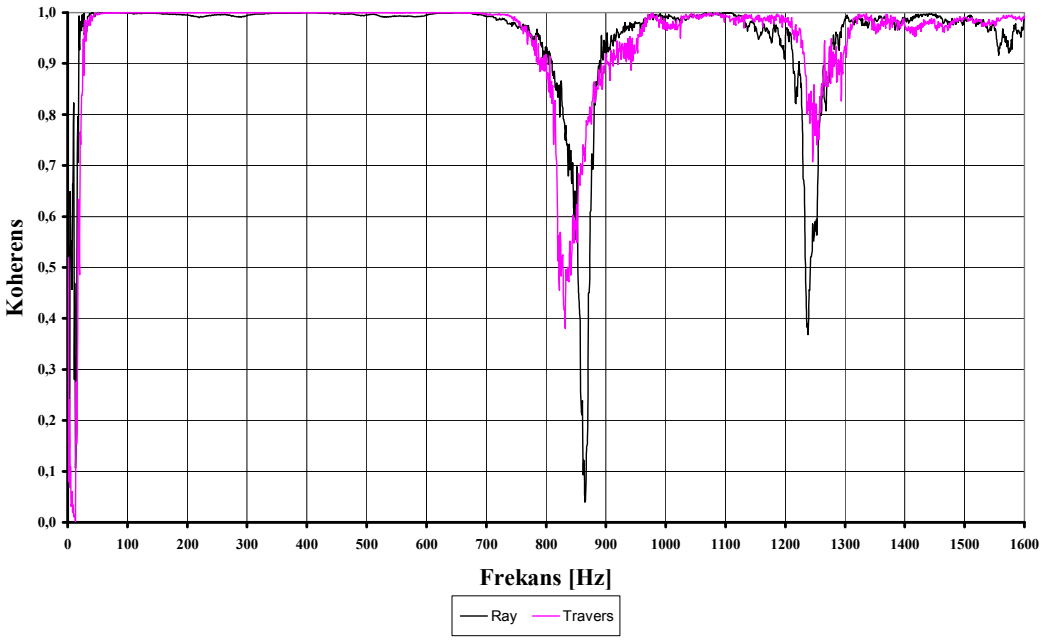
Şekil D.14 : Balastsız yolda mesnet noktasında ölçümün koherans grafiği.



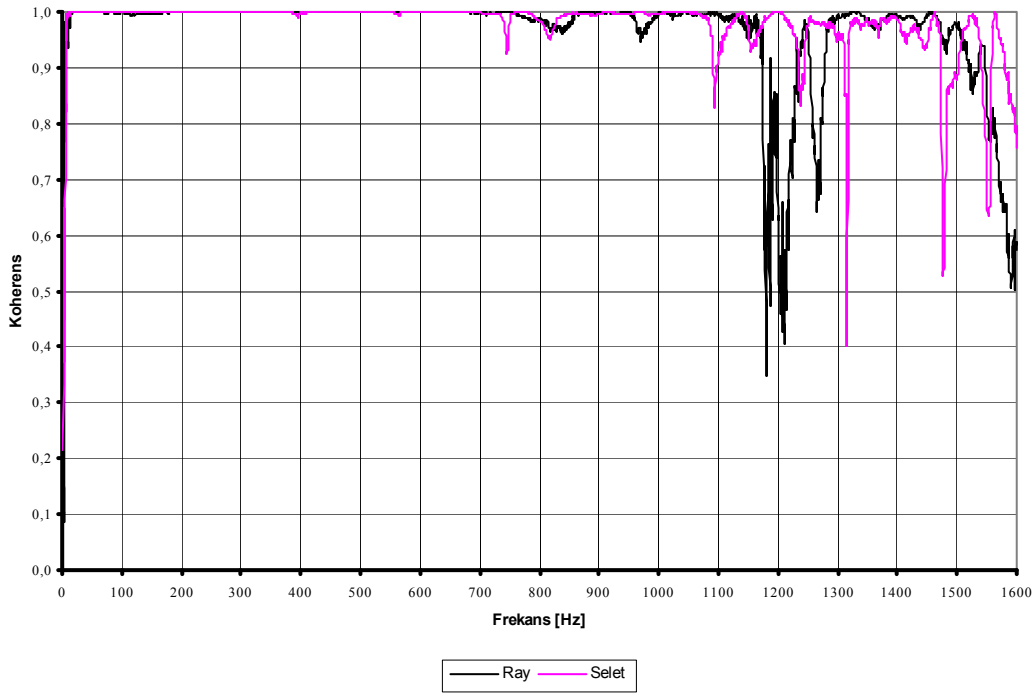
Şekil D.15 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda mesnet noktasında ölçümün koherans grafiği.



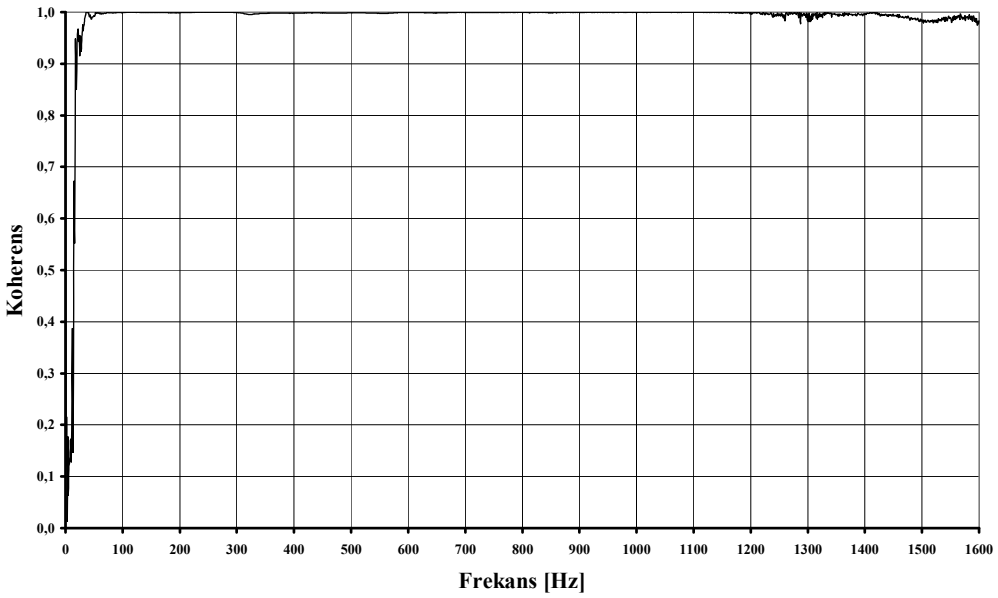
Şekil D.16 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda yeni ray altı elastik tabaka durumunda ölçümün koherans grafiği.



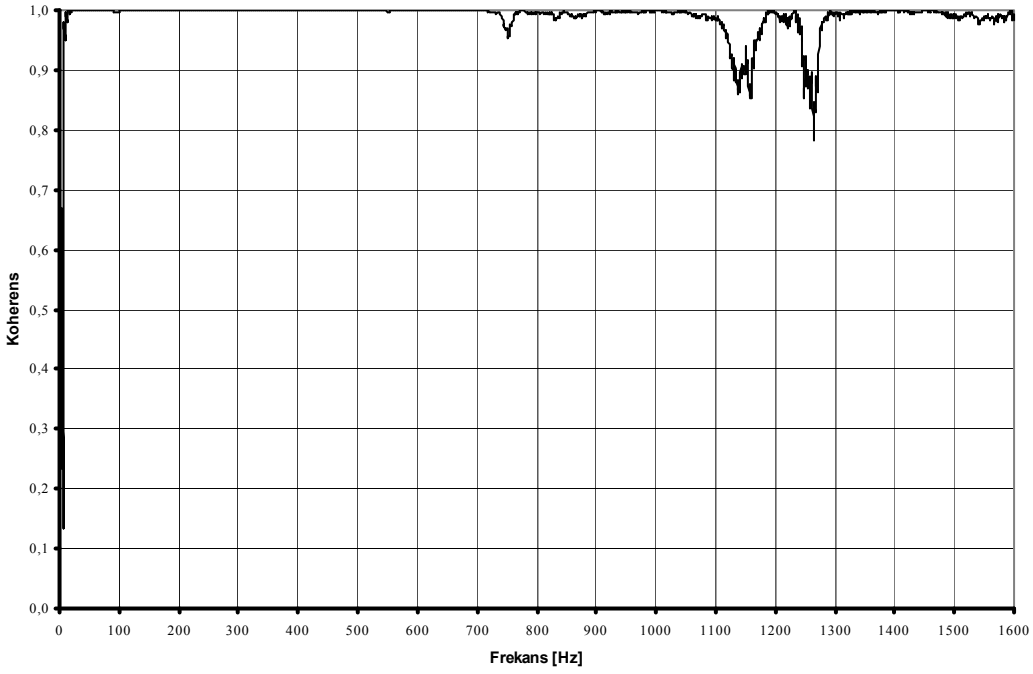
Şekil D.17 Esenler depo sahası tabii zeminli, beton traversli ve balastlı yolda ölçümün koherans grafiği



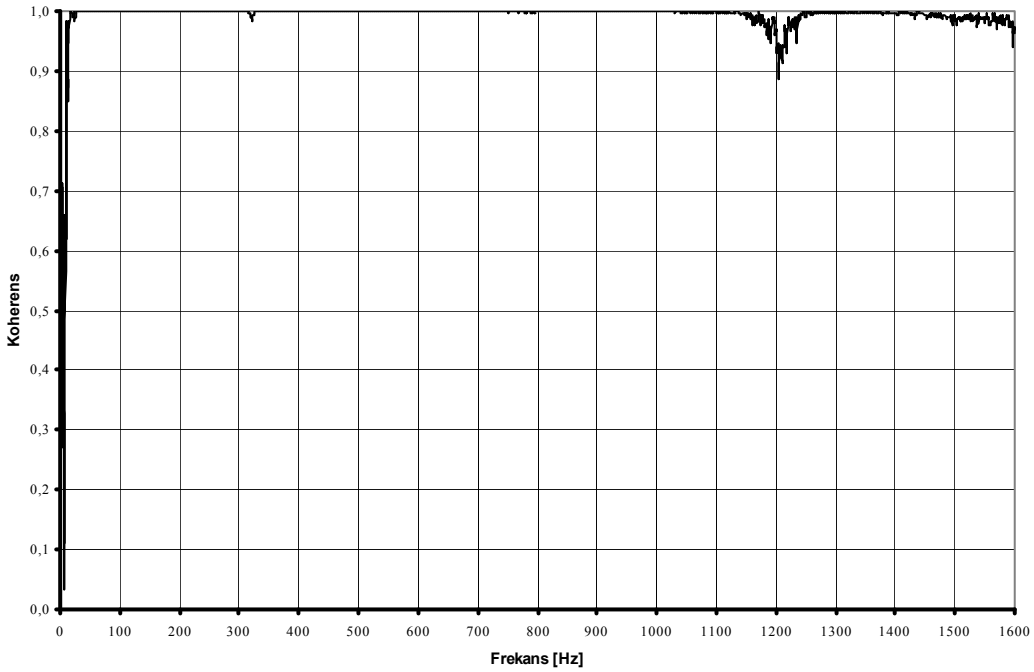
Şekil D.18 : Esenler-Otogar istasyonları arası beton zeminli, beton traversli balastlı yolda ölçümün koherans grafiği.



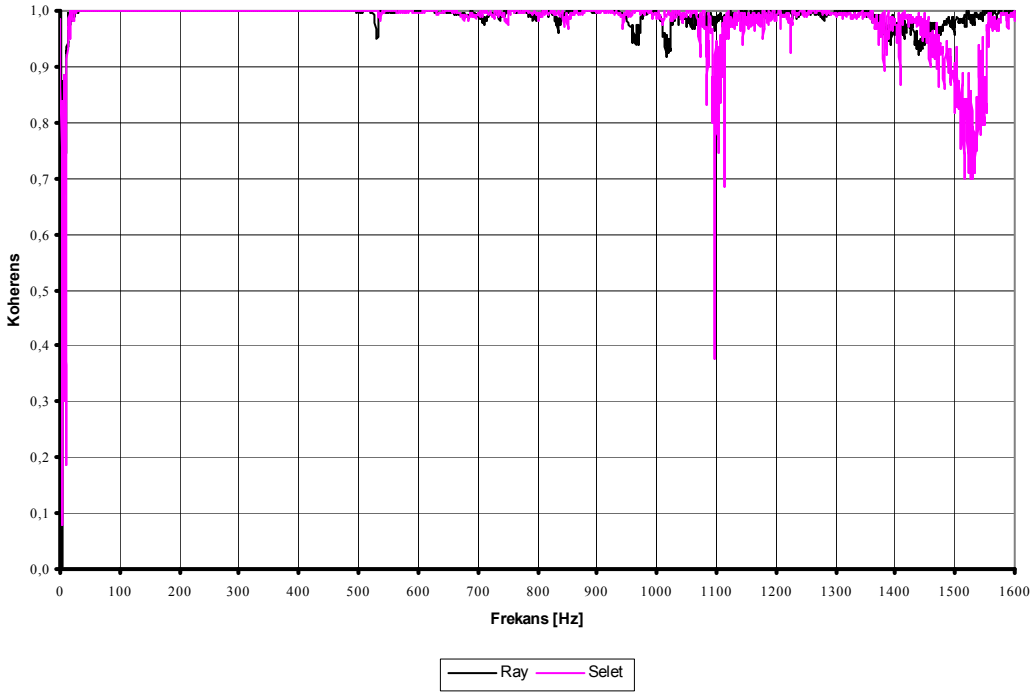
Şekil D.19 : Esenler depo sahası tabii zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında ölçümün koherans grafiği.



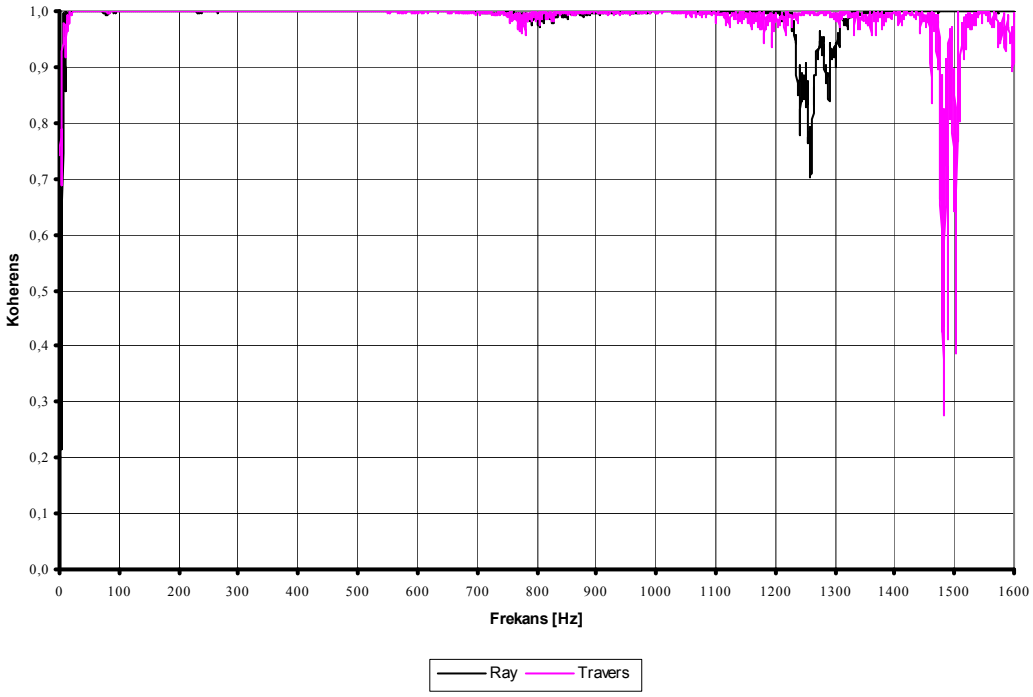
Şekil D.20 : Esenler-Otogar istasyonları arası tabii zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında ölçümün koherans grafiği.



Şekil D.21 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda iki mesnet arasında yeni ray altı elastik tabaka durumunda ölçümün koherans grafiği.



Şekil D.22 : Balastsız yolda ray altı pedsiz durumda ölçümün koherans grafiği.



Şekil D.23 : Bahçelievler istasyonu beton zeminli ve beton traversli balastlı yolda ray altı elastik tabakasız durumda ölçümün koherans grafiği.

Çizelge D.1 : Çelik seletli balastsız yol için doğrulanmış modelin parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
	Ray özellikleri		
Ray tipi	S49		
Rayın atalet momenti	I	1819×10^{-8}	m^4
Rayın kesit alanı	A	6297×10^{-6}	m^2
Rayın kesme katsayısı	K	0.35	-
Ray çeliğinin elastisite modülü	E	2.1×10^{11}	N/m^2
Ray çeliğinin yoğunluğu	ρ	7850	kg/m^3
Rayın poisson oranı	ν	0.3	-
Rayın birim kütlesi	m	49.43	kg/m
	Mesnet özellikleri		
Selet aralığı	a	75	cm
Çelik selet kütlesi	m	8	kg
Ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayısı	k	970×10^6	N/m
Ray altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	32×10^3	Ns/m
Selet altı elastik tabakası rijitlik katsayısı	k	85×10^6	N/m
Selet altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	3.55×10^3	Ns/m

Çizelge D.2 : Balastlı yol için doğrulanmış modelin parametreleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Ray özellikleri			
Ray tipi	S49		
Rayın atalet momenti	I	1819×10^{-8}	m^4
Rayın kesit alanı	A	6297×10^{-6}	m^2
Rayın kesme katsayısı	K	0.35	-
Ray çeliğinin elastisite modülü	E	2.1×10^{11}	N/m^2
Ray çeliğinin yoğunluğu	ρ	7850	kg/m^3
Rayın poisson oranı	ν	0.3	-
Rayın birim kütlesi	m	49.43	kg/m
Mesnet özellikleri			
Travers aralığı	a	75	cm
Yarım travers kütlesi (B58 monoblok beton)	m	124.5	kg
Ray altı elastik tabakanın rijitlik katsayısı	k	520×10^6	N/m
Ray altı elastik tabakanın sönümleme katsayısı	c	7×10^3	Ns/m
Tabii zeminli balast tabakasının rijitlik katsayısı	k	65×10^6	N/m
Tabii zeminli balast tabakasının sönümleme katsayısı	c	32×10^3	Ns/m

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Veysel ARLI

Doğum Yeri ve Tarihi: Samsun-10.09.1976

Lisans Üniversite: O.D.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Üniversite: İ.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma A.B.D

Yayın Listesi:

- Öztürk Z., **Arlı V**., 2006: Demiryolunda Koruyucu Tabakaların İşlevleri ve Uygulanma Prensipleri. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Aralık 2006, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2006: Kent İçi Raylı Sistemlerde Balastlı ve Balastsız Üstyapıların Uygulama, Bakım ve Maliyet Açılarından Karşılaştırılması. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Aralık 2006, Turkey.
- Öztürk Z., Öztürk T., **Arlı V**., 2007: The Protection of Railways Against Eartquake. *International Symposium on Eartquake Loss Estimation for Turkey***,** Semptember 24-26, 2007 İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2007: Yüksek Hızlı Demiryolu Köprülerinde Rezonans Olayı. *1.Köprü ve Viyadükler Sempozyumu***,** Kasım 2007, Antalya, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Demiryolu Titreşimleri ve Önlemleri. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Aksaray-Havalimanı Metro Hattı Düşey Yönlü Titreşimlerin İncelenmesi. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Aksaray-Havalimanı Metro Üstyapısının Analitik ve Nümerik Analizi. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Rayların Aşınmaya Karşı İyileştirilmesi. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Demiryollarında Yeni Geliştirilen Beynitik Raylar. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., Öztürk T., **Arlı V**., 2008: Raylarda Oluşan Gerilmelerin İncelenmesi. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.

- Öztürk Z., **Arlı V**., Yıldız M.Ş., 2008: Zemin Penetrasyon Radarı ile Balastın İncelenmesi: Aksaray-Havalimanı Metro Hattı Örneği. *Uluslararası Demiryolu Sempozyumu***,** Ekim 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Kentiçi Raylı Sistemlerde Çevresel Gürültünün Azaltılması. *Üniversite Öğrencileri III. Çevre Sorunları Kongresi***,** 15-16 Mayıs 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Rijit Demiryolu Üstyapısında Beton Kullanımı. 9th Light Rail Conference**,** 2-6 Kasım**,** 2008 İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., Öztürk T., **Arlı V**., 2008: Demiryolu Titreşimlerinin Çevre Yapılarına Etkisi ve Etkili Önlemler. *Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu***,** 19-22 Haziran 2008, İstanbul, Turkey.
- Öztürk Z., **Arlı V**., 2008: Demiryolunda Titreşim Kaynaklarından Biri Olan Ondülasyonu Azaltma Prensipleri. *Kent Yönetimi, İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu***,** 19-22 Haziran 2008, İstanbul, Turkey.