

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLLARINDA ALTYAPININ TEKNİK TASARIMI

İnş. Müh. Giray AKBAŞ

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

İSTANBUL, 2008

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLLARINDA ALTYAPININ TEKNİK TASARIMI

İnş. Müh. Giray AKBAŞ

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
ÖZET.....	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. DEMİRYOLU HAKKINDA GENEL BİLGİ	2
2.1 Demiryolunun Tanımı	2
2.2 Demiryolunun Tarihi	2
2.2.1 Türkiye Demiryollarının Tarihi	3
2.3 Demiryolunun Üstün ve Zayıf Yanları	6
3. DEMİRYOLU YAPISI	7
3.1 Demiryolu Yapısı ve Görevleri	7
3.2 Demiryolu Yapısına Gelen Etkiler	8
3.3 Üstyapı	10
3.3.1 Ray	12
3.3.2 Travers	15
3.3.3 Bağlantı Elemanları	20
3.3.4 Elastomer Mesnetler (Elastik elemanlar)	22
3.3.5 Balast	23
3.4 Altyapı	24
3.4.1 Altyapıya Gelen Etkiler	25
3.4.2 Altyapının Görevleri	26
3.4.3 Sanat Yapıları İle Oluşturulmuş Altyapı	26
3.4.3.1 Tüneller	26
3.4.3.2 Viyadükler	27
4. DEMİRYOLUNDA DOĞAL ZEMİNLİ ALTYAPI	29
4.1 Demiryolu Hattında Taban Zemininin Fonksiyonu	29
4.1.1 Hat Performansına Taban Zeminin Etkisi	30
4.1.1.1 Hattın Esnekliği	30
4.1.1.2 Ray Kalıcı Oturmaları	30

4.1.1.3	Hat stabilitesi	31
4.1.1.4	Hat Bileşenlerindeki Aşınmalar.....	32
4.1.2	Taban Zemininde Oluşan Bozulmalar	32
4.1.2.1	Masif Kayma Bozuklukları	33
4.1.2.2	Artan Kayma Bozukluğu	34
4.1.2.3	Aşırı Plastik Deformasyon	35
4.1.2.4	Konsolidasyon Oturması.....	35
4.1.2.5	Aşınma ve Çamur Pompalanması.....	35
4.1.2.6	Don Şişmesi-Erime Yumuşaması	36
4.1.2.7	Nem Değişimi İle Oluşan Kabarma ve Büzülme	36
4.2	Taban Zemininin Taşıma Kapasitesine Göre Sınıflandırılması	37
4.2.1	Taban Zemininin Geoteknik Olarak Sınıflandırılması	37
4.2.1.1	Mineral Zeminler	37
4.2.1.2	Organik Zeminler	40
4.2.1.3	Karışık Zeminler (mineral ve organik zeminlerin karışımı).....	41
4.2.2	Taban Zemini Kalite Sınıfları.....	41
4.2.3	Taban Zemini İçin Taşıma Kapasitesi Sınıfları	43
4.2.4	Zeminlerin Donmaya Duyarlılıkları	44
4.3	Yol Yatağı Tabakaları (Altyapı Tabakaları).....	45
4.3.1	Balast Tabakası.....	45
4.3.2	Alt Balast Tabakası.....	50
4.3.3	Toprak İşleri	52
4.3.3.1	Şev ve Şev Eğimi.....	52
4.3.3.2	Dolguların Oluşturulması	53
4.3.3.3	Dolguların Sıkıştırılması	54
4.3.4	Taban Zemini.....	55
4.3.5	Drenaj	56
4.3.5.1	Yeraltı Suyunun Drenajı.....	57
4.3.5.2	Yüzeysel Suların Drenajı.....	57
4.4	Taban Zeminin Korunması ve İyileştirilmesi	59
4.4.1	Koruma Tabakası (Örtü Tabakası)	59
4.4.2	Geosentetik Uygulamaları	64
4.4.3	Bağlayıcı Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirilmesi	65
4.4.4	Kireçtaşı - Çimento Karışımı Tabakalar ve Asfalt Konglomera Tabakalar	66
5.	ALTYAPI TASARIMINDA BELİRLEYİCİ OLAN PARAMETRELER.....	68
5.1	Dingil Yükleri ve Hız	68
5.2	Yapısal Özellikler	75
5.2.1	Yol Yatağı Tabakasının Özellikleri	82
5.2.2	Üstyapı Özellikleri.....	82
6.	DÜŞEY YÜKLER İÇİN HESAP YÖNTEMLERİ.....	83
6.1	Statik Yöntem Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı	83
6.2	Quasi-Statik Yöntem Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı	86
6.3	Dinamik Analiz Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı	88
7.	ALTYAPI TASARIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER VE BU YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	92

7.1	Tasarım Yöntemleri.....	92
7.1.1	Li ve Selig Yöntemi.....	92
7.1.2	Uluslararası Birleşik Demiryolları (UIC) Yöntemi.....	93
7.1.3	İngiliz Demiryolları Yöntemi.....	96
7.1.4	Pratik Demiryolu Ağları Şartnamesi.....	96
7.1.5	Batı Japon Demiryolları Standartları.....	97
7.2	Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	97
8.	ÖRNEK ALTYAPI TASARIMI.....	104
8.1	Ray Tabanı Ortasında Oluşan Gerilme Hesabı ve Yorulma Mukavemeti Hesabı	104
8.2	Yatak Katsayısı Hesabı ve Eisenmann-Schneider “Eşdeğer Tabaka Teorisi”	105
8.3	Balast Tabakasına Gelen Gerilmelerin Hesabı ve Taşıma Gücü.....	107
8.4	Odemark’ın Eşdeğer Tabaka Yöntemi ve Taban Zeminin Zorlanması.....	108
9.	SONUÇLAR.....	112
	KAYNAKLAR.....	116
	EKLER.....	117
	Ek 1 Hesap çizelgesi-I.....	118
	Ek 2 Hesap çizelgesi-II.....	119
	Ek 3 Hesap çizelgesi-III.....	120
	Ek 4 Hesap çizelgesi-V.....	121
	Ek 5 Hesap çizelgesi- V.....	122
	Ek 6 Hesap çizelgesi- VI.....	123
	Ek 7 Hesap çizelgesi- VII.....	124
	Ek 8 Hesap çizelgesi- VIII.....	125
	Ek 9 Hesap çizelgesi- IX.....	126
	Ek 10 Hesap çizelgesi- X.....	127
	Ek 11 Hesap çizelgesi- XI.....	128
	Ek 12 Hesap çizelgesi- XII.....	129
	Ek 13 Hesap çizelgesi- XIII.....	130
	Ek 14 Hesap çizelgesi- XIV.....	131
	Ek 15 Hesap çizelgesi- XV.....	132
	Ek 16 Hesap çizelgesi- XVI.....	133
	Ek 17 Hesap çizelgesi- XVII.....	134
	Ek 18 Hesap çizelgesi- XVIII.....	135
	Ek 19 Hesap çizelgesi- XIX.....	136
	Ek 20 Hesap çizelgesi- XX.....	137
	Ek 21 Hesap çizelgesi- XXI.....	138
	Ek 22 Hesap çizelgesi- XXII.....	139
	Ek 23 Hesap çizelgesi- XXIII.....	140
	Ek 24 Hesap çizelgesi- XXIV.....	141
	Ek 25 Hesap çizelgesi- XXV.....	142
	Ek 26 Hesap çizelgesi- XXVI.....	143
	Ek 27 Hesap çizelgesi- XXVII.....	144
	Ek 28 Hesap çizelgesi- XXVIII.....	145
	Ek 29 Hesap çizelgesi- XXIX.....	146

Ek 30 Hesap çizelgesi- XXX.....	147
Ek 31 Hesap çizelgesi- XXXI	148
Ek 32 Hesap çizelgesi- XXXII	149
Ek 33 Hesap çizelgesi- XXXIII.....	150
Ek 34 Hesap çizelgesi- XXXIV	151
Ek 35 Hesap çizelgesi- XXXV	152
Ek 36 Hesap çizelgesi- XXXVI	153
Ek 37 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-I	154
Ek 38 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-II.....	155
Ek 39 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-III	156
Ek 40 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-IV	157
Ek 41 Yatak Katsayısının Değişimi-I.....	158
Ek 42 Yatak Katsayısının Değişimi-II	159
Ek 43 Yatak Katsayısının Değişimi-III	160
Ek 44 Yatak Katsayısının Değişimi-IV	161
Ek 45 Yatak Katsayısının Değişimi-V	162
Ek 46 Yatak Katsayısının Değişimi-VI.....	163
Ek 47 Yatak Katsayısının Değişimi-VII.....	164
Ek 48 Yatak Katsayısının Değişimi-VIII	165
Ek 49 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-I.....	166
Ek 50 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-II	167
Ek 51 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-III	168
Ek 52 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-IV.....	169
Ek 53 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-V	170
Ek 54 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-VI.....	171
Ek 55 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-VII	172
Ek 56 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-VIII.....	173
ÖZGEÇMİŞ.....	174

SİMGE LİSTESİ

a	UIC grupları
A	Traversler arası mesafe
B	Sanal giriş genişliği
b_t	Travers genişliği
c	Akış katsayısı
c	Çalışma koşulları ile birlikte UIC grupları (sy 95)
C	Yatak katsayısı (Balast katsayısı)
c_{cr}	Kritik sönümlleme
C_C	Eğrilik katsayısı
C_U	Üniformluk katsayısı
d	Dingil yükü
D	Tekerlek çapı
D_{15}	Granülometri eğrisinin %15'ine karşılık gelen dane çapı
D_{85}	Granülometri eğrisinin %85'ine karşılık gelen dane çapı
D_{B15}	Balast tabakasında bulunan malzemelerin %15'indeki dane boyutu
d_{15}	Koruma tabakasında kullanılan malzemenin %15'indeki dane boyutu
e	Balast ve alt balast kalınlığı
E	Elastisite modülü
E_f	Fiktif elastisite modülü
$E_{i,j}$	Plaka yükleme deneyinin sonucunda oluşan elastisite modülleri
EI	Rayın rijitliği
E_s	Kil için esneklik modülü
E_{v1}	Birinci plaka yükleme deneyinin sonucunda oluşan elastisite modülü
E_{v21}	İkinci plaka yükleme deneyinin sonucunda oluşan elastisite modülü
f	Tren hızı-taban taşıma gücü
F_y	Tabakaların fiktif alanları
g	Geotekstil kalınlığı (Sy. 95)
g	Yerçekimi ivmesi
G	Her bir tekerlek seti için taşıt ağırlığı
h	Dever
h_i	Tabaka kalınlığı
H_w	Yan rüzgar kuvveti
I	Kiriş atalet momenti

I_x	Atalet momenti
k	Kirişin birim uzunluğunun yay sabiti
K	Düşey rijitlik
K_{bp}	Balastlı platform sisteminin düşey rijitliği
K_{ml}	Mesnet levhasının düşey rijitliği
K_s	Mesnet levhası ve balastlı platform sisteminin oluşturduğu ray mesnetlenmesi
l_t	Travers uzunluğu
$l_{o,m}$	Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluk
L	Karakteristik / elastik uzunluk
M_{din}	Rayın dinamik eğilme momenti
M_{st}	Rayın statik eğilme momenti
$M(x)$	Tekerlekten x mesafede oluşan kirişin eğilme momenti
N	Tekrarlı gerilme uygulamalarının sayısı
p	Statik düşey basınç gerilmesi
p_{din}	Dinamik düşey basınç gerilmesi
p_c	Aracın ağırlık merkezinin raya olan mesafesi
p_w	Yanal rüzgar kuvveti etkisinin moment kolu
$P(x)$	Tekerlekten x mesafede oluşan düşey basınç gerilemesi
$P1$	Zayıf taban zemini
$P2$	Orta taban zemini
$P3$	İyi taban zemini
Q	Tekerlek yükü
$QS0$	Uygun olmayan zemin
$QS1$	Zayıf zemin
$QS2$	Orta düzeydeki zemin
$QS3$	İyi zemin
Q_{din}	Dinamik tekerlek yükü
Q_{statik}	Statik tekerlek yükü
$Q_{merkezcil}$	Kurpda dış rayda dengelenmemiş merkezkaç kuvveti ile değeri artan tekerlek yükü
$Q_{rüzgar}$	Yan rüzgarlarla ortaya çıkan tekerlek yükü
Q_{dyn}	Süspansiyonlanmış-süspansiyonlanmamış kütle ve kaynak, aplati teker ve ondilasyonun oluşturduğu dinamik tekerlek yükü
Q_p	Yağış havzasından gelen debi

Q_y	Yarma şevlerinden gelen debi
r	Yükleme plağının yarıçapı
R	Kurp yarıçapı
s	Hat genişliği
$\bar{s}$	Değişim katsayısı
t	Güvenlik katsayısı
T	Metre biriminde temel zeminin derinliği
U	Düzensizlik derecesi
V	Hız
V_{cr}	Kritik hız
V_b	Mavi değer
V_{bs}	Kil muhtevası
W	Su muhtevası
W	Rayın mukavemet momenti (Sy. 106)
W_L	Likit limit
W_P	Plastik limit
W_k	Kuru ağırlık
W_{su}	Su hacmi
y_{din}	Kirişte meydana gelen düşey dinamik elastik çökme
$y(x)$	Tekerlekten x mesafede meydana gelen düşey elastik çökme
z_i	Travers tabanından itibaren derinlik
β	Sönümlleme oranı
$\Delta\sigma$	0,3 σ_{max} ile 0,7 σ_{max} arasındaki fark
Δs	0,3 σ_{max} ile 0,7 σ_{max} arasındaki sıkışma
$\Delta\Sigma Q$	Dinamik dingil yükü artış değeri
ε_p	Zeminin toplam plastik şekil değiştirmesi
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı
γ_k	Kuru birim hacim ağırlığı
η	Çökme etki katsayısı
μ	Moment etki katsayısı
σ_d	Zemin sapma gerilmesi
σ_s	Zemin basınç mukavemeti
$(\sigma_Q)_{din}$	Ray tabanının ortasında oluşan eğilme-çekme gerilemesi
σ_{Ya}	Rayın alt gerilme yorulma mukavemeti

σ_{Y0}	Rayın alt gerilmesiz yorulma mukavemeti
σ_{alt}	Rayın alt gerilmesi
$\sigma_{iç}$	Rayın içsel gerilmesi
$\sigma_{ç}$	Ray kopma mukavemeti
σ_t	Rayda sıcaklık farklarından kaynaklanan gerilme
σ_z	Bir tekerleğin geçtiği traversin tabanından itibaren “z” derinliğindeki düşey basınç gerilmesi
$(\sigma_z)_{em}$	Taban zemini emniyet gerilmesi
ρ	Dinamik etki katsayısı
ρ_d	Kuru birim hacim ağırlığı
ρ^2	Kirişin birim uzunluğunun kütlesi
φ	Hız katsayısı
θ	Hız oranı: tren hızının kritik hıza oranı
ψ	Yansıma açısı
$2u$	Traversin yük ileten kesimlerinin uzunluğu

KISALTMA LİSTESİ

AREA	American Railway Engineering Association
BMS	Bridge Management System
CBR	California Bearing Ratio Test
CTRL	Channel Tunnel Rail Link
ISSMFE	Uluslararası Zemin Mekanikçileri ve Temel Mühendisleri Birliği
LA	Los Angeles Aşınma Deneyi
MDE	Microdeval wet
MGT	Milyon groston
NS	Netherlands Railway
QR	Queensland Rail
RT/CE/S/006	Avrupa Demiryolları Hattı Şartnamesi
SNCF	French National Railway Company
STI	Technical Specifications of Interoperability
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	Uluslararası Demiryolları Birliği (International Union of Railways)
WJRC	Batı Japon Demiryolu Şirketi
YHD	Yüksek hızlı demiryolu
YYT	Yol yatağı tabakaları (track-bed layers)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Stephenson'tt'un Rocket adlı lokomotifi.....	3
Şekil 3.1	Demiryolunun genel yapısı	7
Şekil 3.2	Yol yapısına etki eden kuvvetler	9
Şekil 3.3	Doğru kesimdeki bir demiryolunun üstyapısı	10
Şekil 3.4	Balastlı üstyapı	11
Şekil 3.5	Rijit üstyapı	12
Şekil 3.6	Oluklu ray	13
Şekil 3.7	Patenli (Vignole tipi) ray	13
Şekil 3.8	Ahşap travers	16
Şekil 3.9	Çelik travers	17
Şekil 3.10	İki bloklu betonarme travers	18
Şekil 3.11	Öngermeli tek-blok betonarme travers	19
Şekil 3.12	Krampon ve tirfon	21
Şekil 3.13	Direkt bağlantı elemanları	21
Şekil 3.14	İndirekt bağlantı elemanları	21
Şekil 3.15	“K” tipi bağlantı	22
Şekil 3.16	İndirekt-elastik bağlantı	22
Şekil 3.17	Demiryolu için elastik elemanlar	23
Şekil 3.18	Beton travers için travers altı pedi	23
Şekil 3.19	Balastlı sistem için, YHD ve konvansiyonel demiryoluna ait bileşenler	25
Şekil 4.1	Demiryolu hattının bileşenleri	29
Şekil 4.2	Pueblo hattında killi kumlu taban zemininde plastik oturmanın dağılımı	31
Şekil 4.3	Taban zemini bozulma nedenleri	33
Şekil 4.4	Artan kayma bozukluğu	34
Şekil 4.5	Balast cebi oluşumu	34
Şekil 4.6	Tipik bir bulamaçlaşma ve çamur pompalanması	36
Şekil 4.7	Sınıflandırma için granülometri eğrisi örneği	38
Şekil 4.8	İnce daneli zeminlerin sınıflandırılması için, plastisite abağı	40
Şekil 4.9	Yol yatağı tabakaları (YYT)	45
Şekil 4.10	Queensland'ın kullandığı balast tabakası için granülometrisi	47
Şekil 4.11	Proctor diyagramı	55
Şekil 4.12	Altyapıya nüfuz eden suyun kaynakları	56
Şekil 4.13	Farklı zeminlerde su muhtevalarında balast oturma değerleri	57
Şekil 4.14	Kum filtre için gradasyon eğrisi	58
Şekil 4.15	Koruma tabakası içeren ve içermeyen demiryolu altyapısı	60
Şekil 4.16	Dane dağılımına göre dona duyarlılık	62
Şekil 4.17	Dondan koruma tabakası kalınlığı için diyagram	63
Şekil 4.18	22,5t dingil yükü için hazırlanmış koruma tabakası tasarım abağı	64
Şekil 4.19	Taban zemini üzerine geotekstil uygulaması	65
Şekil 4.20	Çimento katkılı kireçtaşı tabakası için kırma kireçtaşı dane dağılımı	66
Şekil 4.21	Asfalt konglomeraya ilişkin dane dağılımı zarfı	67
Şekil 5.1	Kurb içinde Ouasi-statik araç kuvvetleri	70
Şekil 5.2	Yüksek hızlarda Q-kuvveti	72
Şekil 5.3	22.5 ton dingil yükünde oluşan Q-kuvveti	73
Şekil 5.4	Dingil yükü, hız ve hatta bağlı tekerlek yükünün dinamik bileşeni	73
Şekil 5.5	Balast içeren visko-elastik temel olarak modellenen dolgu ve altyapı	74

Şekil 5.6	Mesnet levhasının elastikliğinin balastın titreşimine etkisi.....	77
Şekil 5.7	Hannover-Würzburg hızlı treninin karakteristik altyapısı.....	77
Şekil 5.8	Bakım maliyetlerinin düşey rijitlikle değişimi	78
Şekil 5.9	Yol rijitliği yüzünden, tekerlek tarafından boşuna harcanan enerji	79
Şekil 5.10	Yol rijitliği ile toplam maliyetler arasındaki ilişki	80
Şekil 6.1	Elastik tabana oturan sürekli kiriş modeli	83
Şekil 6.2	Winkler kirişinin Q tekerlek yükü altında moment deformasyon grafiği	85
Şekil 6.3	Kiriş tabanının elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi	85
Şekil 6.4	Hız ve üstyapının bakım durumuna göre dinamik etki katsayısı	86
Şekil 6.5	60-200 Km/sa ve $V > 200$ Km/sa hızlar için dinamik etki katsayıları	88
Şekil 6.6	Yol modellerinin hiyerarşisi	89
Şekil 6.7	Farklı travers aralıklarında “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi”	90
Şekil 6.8	Farklı ray tiplerinde “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi”	90
Şekil 6.9	Farklı ray elastomer mesnetlerde “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi”	91
Şekil 6.10	Farklı altyapılar için “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi”	91
Şekil 7.1	Demiryolu yatağının minimum kalınlığının hesaplanması	94
Şekil 7.2	Taban zemini durumuna göre tasarım kalınlığının değişimi.....	99
Şekil 7.3	Dingil yüküne göre tasarım kalınlığının değişimi.....	100
Şekil 7.4	Hıza göre tasarım kalınlığının değişimi	101
Şekil 7.5	Toplam tonaja göre tasarım kalınlığının değişimi.....	101
Şekil 7.6	Analitik tasarım prosedürü	103
Şekil 8.1	Eisenmann ve Schneider’ın eşdeğer tabaka teorisi	106
Şekil 8.2	İki tabakalı altyapı tipi.....	108
Şekil 8.3	Üç tabakalı altyapı tipi	108
Şekil 8.4	Taban zemininde oluşacak basınç gerilmesi	109
Şekil 8.5	UIC zemin sınıflandırması ve zemin özellikleri	111

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Mevcut hatların ve yolların uzunlukları	5
Çizelge 3.1	Dünyada kullanılan bazı ray tiplerinin özellikleri	14
Çizelge 3.2	Altyapı işleri ve türleri	24
Çizelge 3.3	Farklı ülkelerde tünel kesitleri için tasarım kriterleri	27
Çizelge 4.1	I.S.S.M.F. E'nin tavsiye ettiği dane boyutu sınıflandırılması	38
Çizelge 4.2	Organik ve mineral zeminlerin karışımlarının sınıflandırılması	41
Çizelge 4.3	Zemin kalite sınıfları	42
Çizelge 4.4	Değişik kalite sınıflarındaki zemin özellikleri	43
Çizelge 4.5	Taban zemini için taşıma kapasitesi sınıfları	44
Çizelge 4.6	Zeminlerin dona duyarlılıkları	44
Çizelge 4.7	Avrupa Demiryolları Hattı Şartnamesi'ne uygun balast granülometrisi	47
Çizelge 4.8	Balastlı ve balastsız demiryolunun karşılaştırılması	48
Çizelge 4.9	Farklı ülkelerde kullanılan balast kalınlıkları	49
Çizelge 4.10	Alt balast tabakasının dane dağılımı	50
Çizelge 4.11	Alt balast tabakası gerektirmeyen taban zemini dane dağılımı	51
Çizelge 4.12	Alt balast tabakası gerektiren taban zemini dane dağılımı	51
Çizelge 4.13	Farklı ülkelerde kullanılan alt balast kalınlıkları	51
Çizelge 4.14	Zemin sınıfı ve su muhtevasına bağlı olarak şev eğimleri	53
Çizelge 4.15	Farklı yüzeyler ve zeminlerde akış katsayıları	59
Çizelge 4.16	Bağlayıcı katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme	65
Çizelge 4.17	Kireçtaşı ve çimento tabakalar ve asfalt konglomera tabakalar	66
Çizelge 5.1	Demiryolu taşıtlarının dingil sayıları ve her dingilin ağırlıkları	68
Çizelge 5.2	UIC yük sınıflandırması	69
Çizelge 5.3	Bazı Almanya demiryollu hatlarında balast katsayıları	78
Çizelge 5.4	Fransız demiryollu hatlarında ray mesnetlenme rijitlikleri	81
Çizelge 5.5	Almanya demiryollu hatlarında ray mesnetlenme rijitlikleri	81
Çizelge 7.1	WJRC göre gerekli hat yatağı tabakası kalınlığı	97
Çizelge 7.2	Tasarım prosedürlerinde hesaba katılan faktörler	98
Çizelge 8.1	Değişik zemin türleri için E_{v2} değerleri	110
Çizelge 9.1	Örnek altyapı çalışmasında kullanılan kompozisyonlar	113

ÖNSÖZ

Bir demiryolu hattı, bütün inşaat yapılarında olduğu gibi dışarıdan bakıldığında görünen ve görünmeyen kısımlardan meydana gelmektedir. Yapılarda görünen olan kısma üstyapı, görünmeyen kısma ise altyapı denilmektedir. Yapılarda, üstyapı görünen kısım olmanın avantajı ile kendisinde meydana gelen yıpranmaları ve bozulmaları göz önüne serip bu hataların ortadan kaldırılmasına izin verirken, altyapı gözlerden ırak olduğundan böyle bir imkanı vermez.

Bu tezde, işte bu gözlerde uzak olan fakat sağlam ve sağlıklı olmadığında, üstyapısı ne kadar iyi olursa olsun bir demiryolu hattının performansını ve güvenliğini büyük ölçüde etkileyen altyapı tabakası derinlemesine incelenmiştir. Bu incelemenin yanında, bir altyapı tasarım örneği de tezin içerisine dahil edilmiştir.

İleriki meslek hayatımda bana çok faydası olacağını düşündüğüm bu tez çalışmamda bana rehberlik eden, yardımını ve sabrını çalışmam boyunca hiç esirgemeyen, fakat tezimin teslim aşamasından rahatsızlığından ötürü danışmanlığımdan ayrılmak zorunda kalan, demiryolu konusunda ülkemizde uzmanlığı tartışılmaz olan değerli hocam Prof. Dr. S. Aydın Erel'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tezimin teslimi sırasında danışmanlığımı üstlenen Yrd.Doç.Dr. İsmail Şahin'e, çalışmam boyunca beni cesaretlendiren ve sabır gösteren aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Giray AKBAŞ,
HAZİRAN,2008

DEMİRYOLLARINDA ALTYAPININ TEKNİK TASARIMI

İnş. Müh. Giray AKBAŞ
İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Raylı taşımacılıkta dingil yüklerinin, seyir hızlarının ve konfor isteğinin artması ile demiryolu altyapısının tasarımı ve yapımı demiryolu endüstrisinin en önemli konuları arasına girmiştir. Hız artışı ile birlikte, altyapıya iletilen dinamik yükler de arttığından, yolda oluşan kalıcı yer ve şekil değiştirmeler, yolun yatay ve düşey geometrisinde bozulmalara, dolayısıyla yol ve taşıtlara gelen etkilerin daha da artarak, konfor ve güvenlik değerlerinin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, demiryollarının yapılacağı kesimlerde gerekli altyapı özelliklerinin duyarlılıkla saptanması ve ekonomik olarak uzun süre hizmet verebilecek bir yapı oluşturulması gerekir.

Bu çalışmada, altyapı tasarım yöntemlerinden biri olan Quasi-statik tasarım yöntemi kullanılarak, bir altyapı tasarımı yapmak amaçlanmıştır. Çalışma sunulurken, üstyapıya gelen etkiler ve üstyapıyı oluşturan elemanlar, altyapının üzerine inşa edileceği taban zemini ve günümüzde altyapı terminolojisi yerine kullanılan yol yatağı tabakaları hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgilere ek olarak, dünyada kullanılan ve geçerliliğini koruyan çeşitli ülkelere ait altyapı tasarım modellerinin karşılaştırılması bir başlık altında işlenmiştir.

Tezin tasarım bölümünde Excel yazılımı kullanılmıştır. Farklı tip üstyapılar ve işletim hızlarında altyapı tasarımları yapılmıştır ve tasarım sonuçları tablolar ve grafikler üzerinde gösterilmiştir. Bu farklı üstyapılara sahip altyapı tasarım sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu, altyapı, yol yatağı tabakaları, Quasi-statik tasarım tekniği

Kabul tarihi: 26.06.2008
Sayfa Sayısı: 191

SUBSTRUCTURE TECHNICAL DESIGN OF RAILWAYS

Civil Engineer Giray AKBAŞ
Civil Engineering, M.S. Thesis

ABSTRACT

Design and construction of railway substructure have been one of the most important topics of railway transportation after the increase in axle loads, cruising speeds and the demand in comfort. With the increase of speed, the dynamic loading of the substructure has increased and permanent structure changes have formed on the road. This has led to the deterioration of the vertical and horizontal geometries of the road, increasing further, the influences on the road and vehicles, and thus decreasing the values of comfort and safety. For this reason, the substructure characteristics of the rail corridor should be carefully examined before the construction of the railway and an economically profitable long life structures should be constructed.

In this study, it is aimed to make a substructure design by using the Quasi-static design technique, which is one of the techniques used. The study includes information about the influences on the superstructure, components making up the superstructure, the soil on which the substructure will be constructed and track bed layers which is the term replacing substructure terminology these days. In addition to the information above, contemporary design models from different parts of the world were compared in a sub-section of the thesis.

In the design section of the thesis, Microsoft Excel was utilized as the software. Substructure designs were made for different superstructures and operational speeds and the results were presented in tables and graphs. Further, these designs regarding different superstructures were compared with each other.

Key Words: Railway, substructure, track bed layers, Quasi-static design technique

Date of acceptance: June 26th,2008
Number of pages: 191

1. GİRİŞ

Yakın zamana kadar demiryolu literatüründe demiryolu üstyapısı, ray, travers, bağlantı elemanları, elastomer mesnetler ve balasttan, demiryolu altyapısı ise alt balast, koruma tabakası ve taban zemininden meydana gelmekteydi. Fakat günümüzde demiryolu yapısı ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalarda, üstyapı elemanı olarak kabul edilen balast, yol yatağı tabakası adı verilen granüler tabakalardan oluşan sisteminin içine dahil edilmektedir. Bu sebeple, klasik ve hızlı demiryolu hatları, ray, traversler, bağlantı elemanları ve elastomer mesnetlerden meydana gelen üstyapı ve balast, alt balast, koruma tabakası (gerekli ise) ve taban zeminini içeren altyapıdan (yol yatağı tabakalarından) oluşan bir yapısal sistemdir. Bu yapı, demiryolu trafiğinin ve iklimin zarar verebilecek kötü etkilerine dayanacak, taban zemini yeterince koruyacak şekilde tasarlanmalı, ayrıca demiryolu araçlarının işletiminde maliyetleri, güvenliği ve yolcu konforunu tasarım ömrü süresince kabul edilebilir sınırlarda tutmalıdır.

Tekrarlı trafik yüklerinin toplam etkisi zamanla yol altyapısını bozar. Balast periyodik bakımlarda iyileştirilerek ve değiştirilerek, yol doğrultu ve yükseltisini koruma görevleri sürekli duruma getirilebilir ise de, altyapı ile ilgili sorunların çözümü daha zordur. Sonuç olarak, tasarımın birincil amacı taban zemini korumaktır. Bu amaçla yol yatağı tabakaları, trafik ve taban zemini koşullarına göre uygun kalınlıkta olmalıdır. Eğer bunların kalınlıkları yetersiz ise, katarların oluşturduğu tekrarlanan gerilmeler, taban zemininde aşırı deformasyonlar bakım gereksiniminde önemli artış olur. Diğer yandan, gereksiz kalınlıktaki yol yatağı tabakaları da, yapım ve bakım maliyetleri bakımından verimsiz olacaktır.

Dünyada altyapı ile ilgili çalışmalar daha çok hızlı hatların altyapı tasarımları ve sorunları ile ilgileniyor olsa da, ülkemizde, altyapının bir demiryolu hattı için ne kadar önemli olduğu daha yeni anlaşılmaktadır.

Bu tezde, klasik ve hızlı demiryollarında kullanılan üstyapı ve altyapı bileşenleri hakkında bilgi, bir demiryolu hattına temel oluşturabilecek taban zemininden beklenen özellikler ve zeminde oluşabilecek bozulmalar, altyapı tasarımında düşey yüklerin hesabı için kullanılan yöntemler hakkında genel bilgi verilmiştir. Bu bilgilere ek olarak tezin son bölümünde, “Quasi-statik” hesap yöntemi kullanılarak, farklı yol tiplerinde (farklı ray tipleri, travers aralıkları vb.) bir altyapı tasarımı çalışması yapılmıştır.

2. DEMİRYOLU HAKKINDA GENEL BİLGİ

2.1 Demiryolunun Tanımı

Bir yerden bir yere, çelik bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen çelik tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin hepsine birden demiryolu denir (Evren, 2002).

Bu tanımdan anlaşıldığı üzere, demiryolu yalnız üstyapı (ray, travers, bağlantı elemanları) ve altyapıdan (balast, alt balast, taban zemini) oluşmayıp, bunlarla birlikte istasyon tesisleri, araçlar, emniyet ve sinyalizasyon tesisleri gibi, taşıma işine yardımcı tüm tesislerin oluşturduğu bir bütündür. Demiryolunun taşıma işlemini istenilen standartlarda yerine getirebilmesi için, taşımaya ilişkin tüm tesislerin yeterli ve uyumlu olması gerekmektedir (Evren,2002).

2.2 Demiryolunun Tarihi

Ulaşım alanında, demirden yapılmış lamalar, ilk kez İngiltere’de 18. yüzyılda maden ocaklarında bir bunalım nedeniyle kullanıldı.

Demir sanayicisi olan Reynold, 1767 yılında elindeki demirleri ucuz satmak yerine, bunları arabaların çekildiği kalaslar üzerine geçici bir süre için kaplayarak, hem ahşap kalasların aşınmasını önlemeyi, hem de demir fiyatları yükseldiğinde, bunları söküp satmayı planladı. Böylece, tamamen farklı amaçlarda kullanılan demir levhalar, demiryolu uygulamasının ilk örneğini meydana getirdi.

Demiryolculuğun doğuşuna, genel ulaşım alanında çok uzun yıllar boyu süren gelişmelerden sonra tanık olmaktadır. Demiryollarına yönelik bakımından, aşağıdaki iki nokta önemli rol oynamıştır.

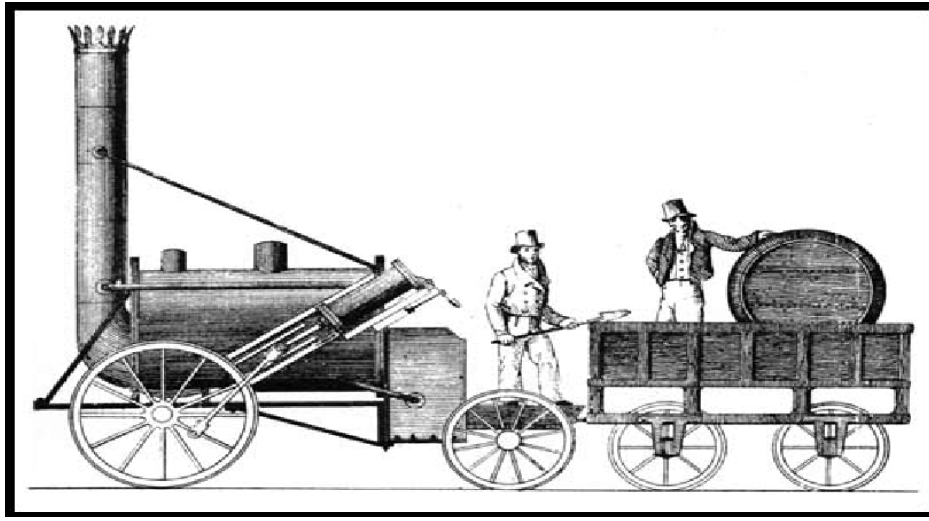
- Tekerleklerin az pürüzlü madeni yüzeyler üzerinde daha kolay yuvarlanabilmesi
- Buharla işleyen araçların yapılması ve geliştirilmesi

1687 yılında Denis Papin, buharın elastiki gücünü buldu ve bundan yararlanan James Watt, buhar makinesini geliştirdi.

İlk kez, raylardan meydana gelmiş bir yolda, buharla çalışan bir aracı yürüten İngiliz mühendis Richard Trevithick olmuştur. Ancak, 1803 yılında kullanılan bu araç, bugünkü lokomotiflerin sahip olduğu özelliklerden çok uzaktaydı. 1814 yılında, George Stephenson isimli İngiliz mühendis, iki silindirli bir lokomotif yaptı. Fakat 4-5 ton ağırlığında olan bu

lokomotif, borusuz sistemli kazanla çalışmasından dolayı gerektiği kadar buhar elde edilemediği için, 4-5 Bb. den fazla güç elde edilemiyor ve sürekli çalıştırılamıyordu.

Lokomotiflerdeki büyük gelişme, 1825’de Marc Seguin tarafından borulu kazan icat edildikten sonra olmuştur. Bundan yararlanan George Stephenson, lokomotifine yatay borulu bir kazan koyarak, pistonu doğrudan tekerleğe bağlayarak ve silindirden çıkan kullanılmış buharı bacadan geçirip dışarı vererek, 1829 yılında, Liverpool-Manchester şirketi tarafından inşa edilen demiryolu hattı için açılan bir yarışmada birinci olmuştur. Rocket adı verilen bu lokomotif, 4,25 ton ağırlığında, 22 Bb. gücünde ve 13,2 tonluk yükü 22 km/sa’lık bir hızla çekebilmekteydi.



Şekil 2.1 Stephenson’un Rocket adlı lokomotifi

George Stephenson’un 6 Ekim 1829 da birincilik kazanan Rocket isimli lokomotifi, demiryolculuğunun başlangıcı olarak dünyaca kabul edilmiştir.

2.2.1 Türkiye Demiryollarının Tarihi

Ülkemiz demiryolu tarihi; Cumhuriyet öncesi, 1923–1950 yılları arası ve 1950 sonrası dönem olarak, üç başlık altında incelenmesi uygundur. Bu dönemlerin belirgin özellikleri; birinci dönemde, demiryolu hatlarının büyük bölümünün yabancılara verilen imtiyazla yaptırılması, ikinci dönem demiryolu ulaştırmasının altın çağı olması, üçüncü dönem de ise demiryolu ulaştırmasının yok sayılması, ihmal edilmesidir.

Cumhuriyet öncesi dönem;

Türk Demiryolu Tarihi, 1856 yılında başlar. İlk demiryolu hattı olan 130 km’lik İzmir-Aydın hattının inşaatı bir İngiliz şirketine verilen imtiyazla bu yılda başlamıştır. Osmanlı Devleti tarafından İngilizlere demiryolu yapımı için verilen imtiyazlar, daha sonra Fransız ve Alman

demiryolu şirketlerine de sağlandı. Batılı sermayedarlar, sanayi devrimi ile çok önemli ve stratejik bir ulaşım yolu olan demiryolunu, tekstil sanayinin ham maddesi olan tarım ürünlerini ve önemli madenleri, en hızlı biçimde limanlara, oradan da kendi ülkelerine ulaştırmak için inşa ettiler. Dolayısıyla Osmanlı topraklarında yapılan demiryolu hatlarının geçtiği güzergahlar, bu ülkelerin iktisadi ve siyasi amaçlarına göre biçimlendirilmişti. Osmanlının yıkılışına kadar geçen sürede, toprakları üzerinde toplam 8619 Km demiryolu hattı inşa edilmiştir.

Osmanlı İmparatorluğu'nun yıkılışından sonra, genç cumhuriyete; 8619 km'lik toplam demiryolu hattından, yabancı şirketlere ait; 2282 km'lik normal, 70 km'lik dar genişlikte hat ile devletin yönetiminde olan 1378 km'lik normal genişlikte hat kalmıştır.

Cumhuriyet sonrası dönem (1923-1950 ve 1950 sonrası);

Cumhuriyet döneminde, kendine yeterli “milli ekonomi”nin yaratılması amaçlanarak, demiryollarının ülke kaynaklarını harekete geçirmesi hedeflenmiştir. Bu dönemde yapılan ilk “Beş Yıllık Sanayileşme Planı”nda, demir-çelik, kömür ve makine gibi temel sanayilere öncelik verilmesi ile bu tür kitlesel yüklerin en ucuza taşınabilmesi açısından demiryolu yatırımlarına ağırlık verilmiştir. Bu dönemde, tüm olumsuz koşullara karşın, demiryolu yapım ve işletmesi ulusal güçle başarılmıştır. Bütün olumsuzluklara ve güçlüklerle rağmen, demiryolu yapımı İkinci Dünya Savaşı'na kadar büyük bir hızla sürdürüldü. 1923–1950 yılları arasında yapılan 3578 km'lik demiryolunun 3208 km'si, 1940 yılına kadar tamamlanmıştır. Karayolu sistemi ise bu dönemde demiryollarını besleyecek şekilde tasarlanmıştır.

1950 yılında Amerika'nın hükümete verdiği Marshall yardımıyla demiryolları adeta yok sayılarak, karayolu yapımına hız verildi. 1960 sonrası planlama kalkınma dönemlerinde, demiryolu için öngörülen hedeflere hiçbir zaman ulaşamamıştır. Bu planlarda, ulaştırma alt sistemleri arasında koordinasyon sağlanması hedeflense de, plan öncesi dönemin özellikleri devam ettirilerek, ulaştırma alt sistemleri arasında koordinasyon sağlanamamış ve karayollarına yapılan yatırımlar, bütün plan dönemlerinde öne çıkmıştır. Bu politikaların sonucunda, 1950–1980 yılları arasında yılda yalnızca ortalama 30 km yeni hat yapılabilmektedir.

Ülkemiz ulaşım sistemi içerisinde karayolu-demiryolu yük taşıma paylarına bakıldığında, karayolu yük taşıma oranı % 94, demiryolu yük taşıma payı ise % 4'dür. Demiryollarının yük taşımacılığındaki payı, son 50 yılda % 60 oranında gerilemiştir.

1980'li yılların ortalarında ise, ülkemizde hızlı bir karayolu yapım seferberliği başlatılmış, otoyollar, GAP ve turizmden sonra ülkemizin üçüncü büyük projesi olarak kabul edilmiştir. Buna karşılık, demiryolu altyapı yatırımları konusunda herhangi bir proje hayata

geçirilmemiştir. Ayrıca, ülkemizde yapılmış tek ulusal ulaştırma planı olan, ulaştırma sistemimizin iyileştirilmesi yönünde bir adım olarak görülen, karayolu ulaşım payının % 72’den % 36’ya düşürülmesini hedefleyen “1983–1993 Ulaştırma Ana Planı” da uygulanmamış ve 1986 yılından sonra uygulamadan kaldırılmıştır.

Günümüzde, özellikle büyük şehirlerde yapımına hız verilen yolcu taşımacılığına yönelik raylı sistem inşaatları, yük taşımacılığına getirilen yeni düzenlemeler ve TCDD’nin yapımını üstlendiği Ankara-İstanbul ve Ankara-Konya hızlı tren projeleri ile demiryolu taşımacılığına, yeteri kadar olmasa da tekrar önem verilmeye başlanmıştır. Çizelge 2.1’de, 2001–2005 yılları arasında, mevcut hatların ve yolların uzunluklarına ait bilgileri görmek mümkündür.

Çizelge 2.1 Mevcut hatların ve yolların uzunlukları (TCDD APK Dairesi Başkanlığı istatistik şubesi)

		(Km)				
		2001	2002	2003	2004	2005
ANAHA TLAR Mainlines	Elektriksiz - Non electrified	6.778	6.778	6.778	6.693	6.693
	Elektrikli - Electrified	1.479	1.479	1.479	1.564	1.564
	TOPLAM - Total	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257
2.3.4.ANAHA TLAR 2nd,3rd,4th, Mainlines	Elektriksiz - Non electrified	141	141	167	84	84
	Elektrikli - Electrified	273	273	273	356	356
	TOPLAM - Total	414	414	440	440	440
ANAHA T TOPLAMI Total Mainline	Elektriksiz - Non electrified	6.919	6.919	6.945	6.777	6.777
	Elektrikli - Electrified	1.752	1.752	1.752	1.920	1.920
	TOPLAM - Total	8.671	8.671	8.697	8.697	8.697
DİĞER YOLLAR Subsidiary Lines	Elektriksiz - Non electrified	1.899	1.907	1.917	1.902	1.871
	Elektrikli - Electrified	370	370	370	385	416
	TOPLAM - Total	2.269	2.277	2.287	2.287	2.287
TOPLAM YOLLAR Total Lines	Elektriksiz - Non electrified	8.818	8.826	8.862	8.679	8.648
	Elektrikli - Electrified	2.122	2.122	2.122	2.305	2.336
	TOPLAM - Total	10.940	10.948	10.984	10.984	10.984

2.3 Demiryolunun Üstün ve Zayıf Yanları

Demiryolunun en belirgin özelliği, araçların iki ray dizisi üzerinde kılavuzlanmış olarak yuvarlanması ve bu nedenle çeliğin çelik üzerinde yuvarlanmasıyla harekete karşı koyan direncin, küçük değerlerde olmasıdır. Bu özelliğin demiryoluna kazandırdığı üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Evren,2002).

- Enerji tüketimi azdır.
- Hız yüksektir.
- Güvenlik bakımından en iyi ulaştırma sistemidir.
- Yolcu ve yük taşıma kapasitesi yüksektir. Harekete karşı direnç çok küçük olduğundan, ağır yüklerin, küçük çekim kuvvetleri ile taşınmasına olanak sağlar.
- Arazi kullanımı en az olan ulaştırma sistemidir.
- Araçların raylarla kılavuzlanmış olması, otomotizasyona olanak sağlar.
- Çekim sistemi bakımından, teknik gelişmelere ayak uydurabilme olanağına sahiptir.
- Özellikle yerleşim bölgelerinde, elektrikli çekim sayesinde çevreye verilen zarar azdır.
- Kötü hava koşullarından en az etkilenen ulaştırma sistemidir.

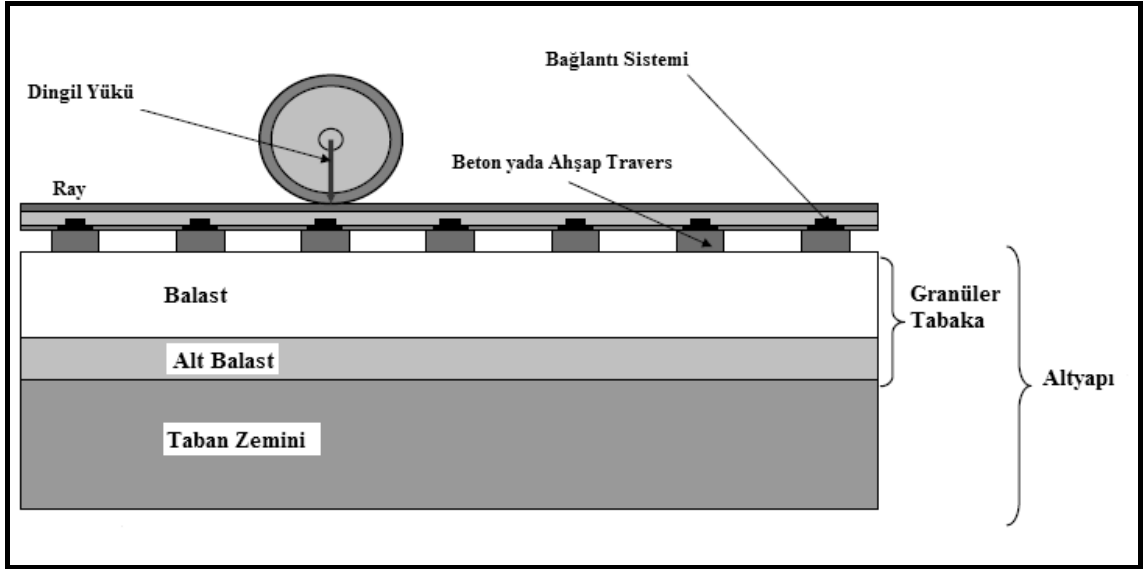
Demiryolu ulaşımının birçok üstünlüğü olması yanında her ulaştırma sisteminde olduğu gibi zayıf yönleri de bulunmaktadır. Bu olumsuzluklar iki noktada özetlenebilir (Evren,2002).

- Demiryolunun inşaat maliyeti yüksektir. Bu durum, demiryollarında, rayla tekerlek arasındaki sürtünmenin az olmasından ötürü, boyuna eğimlerin küçük olması gerekliliği, toprak işleriyle köprü, viyadük ve tünel gibi sanat yapılarının artmasına sebep olur.
- Demiryollarında hareketin, rayların kılavuzluğunda belirli bir eğri üzerinde olması zorunluluğu, yararları yanında sakıncalarda getirmektedir. Bu kılavuzlanmış hareket yüzünden demiryolu, karayolu gibi geniş bir hareket serbestliğine sahip değildir ve her yere hizmet götürmesi imkan dahilinde olmamaktadır. Bu durum, özellikle işletme yönünden bazı zorlukları ortaya çıkarır. Aynı zamanda özel tesislerin gerekmesi, hem yatırım maliyetlerini hem de işletme maliyetlerini arttırır.

3. DEMİRYOLU YAPISI

3.1 Demiryolu Yapısı ve Görevleri

Demiryolu hattı, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, raylar, bağlantı elemanları, traversler, balast, alt balast ve taban zemini gibi bileşenleri içeren yapısal bir sistemdir. Demiryolu yapısı, genel olarak altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımda inşa edilmektedir.



Şekil 3.1 Demiryolunun genel yapısı (Burrow vd., 2005)

Ray, bağlantı elemanları, traversler ve elastomer mesnetler üstyapıyı; balast, alt balast ve taban zemini (doğal ya da yapay) altyapıyı oluşturmaktadır. Üstyapı ve altyapı ile ilgili ayrıntılı bilgi, alt başlıklar halinde verilecektir.

Bir demiryolu bileşenlerinin her birinden beklenen görevler olduğu gibi bir demiryolu yapısının da yerine getirmesi gereken görevler bulunmaktadır. Bu görevler, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

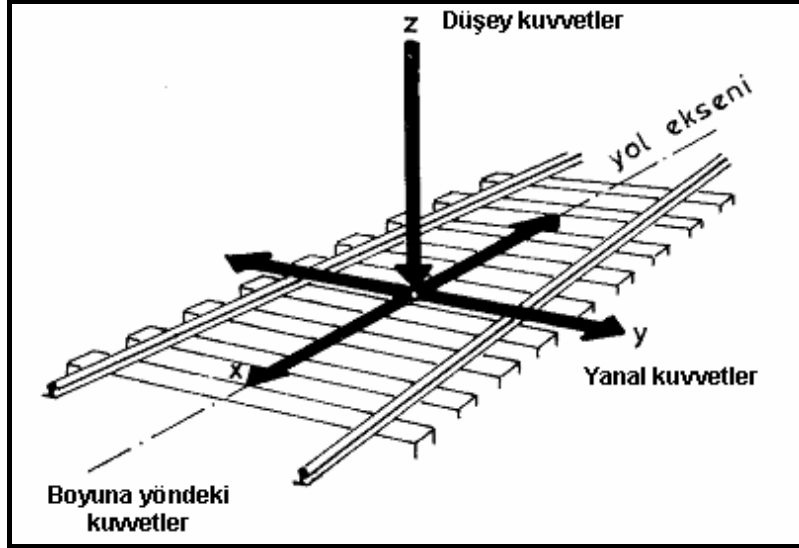
- Trafiğin yarattığı olumsuz etkilere karşı koyabilmek,
- İklim koşullarından en az düzeyde etkilenmek,
- Yolculuk esnasında, seyahat edenlere kabul edilebilir düzeyde konfor sağlamak,
- Güvenlikli bir seyahat sağlamak,
- İşletme ve bakım maliyetlerini en düşük seviyede tutmaktır.

3.2 Demiryolu Yapısına Gelen Etkiler

Demiryolu yapısına gelen etkiler, kökenlerine göre aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler:

- ***Taşıtların oluşturduğu etkiler:*** Bu grupta, düşey doğrultudaki dinamik dingil yükleri ile taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde, yol eksenini doğrultusunda oluşturdukları yatay kuvvetler sayılabilir. Yol yapısının zorlanmasında etkili olan dingil yükleri, yoldaki aşınmalar, balast tabakasındaki çökmeler sonucunda traverslerin altında oluşan boşluklar, çeşitli nedenlerle yolun boyuna doğrultusundaki elastikliğinin değişmesi, balast ve taban zeminindeki çökmeler sonucunda yolda oluşan yükselti farklılıkları gibi uyarı kaynakları ile taşıtların süspansiyon ve amortisör düzenleri tarafından dinamik karaktere dönüştürülürler.
- ***Yolun geometrik karakteristikleri, taşıtların yapısal özellikleri ve demiryolu üzerindeki hareket koşullarının oluşturduğu etkiler:*** Cebireli ray eklerindeki şoklar, kurba kesimlerinde dengelenmemiş merkezci ya da merkezkaç kuvvetler, tekerleklerle dingillerin rijit bağlı ve tekerlek bandajlarının konik olmaları nedeniyle ortaya çıkan zorlanmalar bu grup içinde sayılabilirler.
- ***Yol ve taşıtlardaki bozuklukların oluşturduğu etkiler:*** İşletme etkisiyle yolda zamanla aşınmalar, cebireli ray eklerinin bulonlarındaki ve rayı traverslere bağlayan bağlantı elemanlarındaki gevşemeler meydana gelir. Düşey ve yanal kuvvetlerin etkisiyle bu iki doğrultudaki ray eğrilikleri, ray mantarında oluşan yorulma hasarları, periyodik (ondülasyon) ve periyodik olmayan aşınmalar, balast ve taban zemininde kalıcı çökmeler ve travers altlarında boşluklar oluşur. Arzu edilmeyen bu yol bozuklukları, taşıtların seyir koşullarını ve dolayısıyla yol yapısının zorlanmasını olumsuz yönde etkilerler.
- ***Çevre koşullarının etkisi:*** Yaz ve kış aylarındaki büyük sıcaklık farklılıkları, özellikle kaynaklı uzun raylarda ısı gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar. Hava kirliliği ve nem ise, tekerlekler ile ray arasındaki sürtünmeyi azaltarak, kayma olasılığını artırır. Don etkisinde balast ve taban zemininin elastikliklerinin azalmasıyla, yol yapısına gelen zorlanmalar artar, bu da büyük gerilmeler oluşturur. Ayrıca, oksitlenmenin de yaratacağı olumsuz etkilerden söz etmek gerekir.

Hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından, yukarıda ifade edilen yol yapısına etki eden başlıca kuvvetleri, (x; y; z) koordinat sistemine göre, düşey, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler olmak üzere üç ayrı grupta inceleyebiliriz (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Yol yapısına etki eden kuvvetler (Erel,1989)

Dingil yükleri, kurba kesimlerinde tekerlek yükü değişimi, conta ve ek yerlerindeki şoklar ve tekerlek aplatiliği sonucu taşıtların geçişi sırasında oluşan dinamik ani kuvvetler yol yapısına düşey yönde (z eksenini) etki eden kuvvetlerdir. Taşıt şasileri ile dingil başlarına ve tekerlekler ile raya aktarılan dingil yükleri, taşıt ve yol durumuna bağlı olarak artan dinamik etkilerle birlikte, tüm yol yapısını ve taban zeminini zorlarlar. Normal koşullarda her iki raya eşit olarak etkimesi gereken (Q) tekerlek yükleri, eksantrik yükleme ve kurba kesimlerdeki dengelenmemiş deyer ile farklı değerler almaktadırlar. Kurba yarıçapı, seyahat hızı, deyer ve taşıtların ağırlık merkezi yüksekliklerine bağlı olarak değişen tekerlek yükü artışlarının yol yapısının zorlanmasında hesaba katılmaları zorunludur. Ayrıca, taşıt ve yol yapısının özelliklerine bağlı olarak değişen titreşimlerin oluşturduğu dinamik etkiler dingil yüklerinde artışa neden olmaktadır. Dolayısıyla dinamik stabilite problemlerinde taşıt ve yol sisteminin çok iyi tanımlanması gerekir.

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

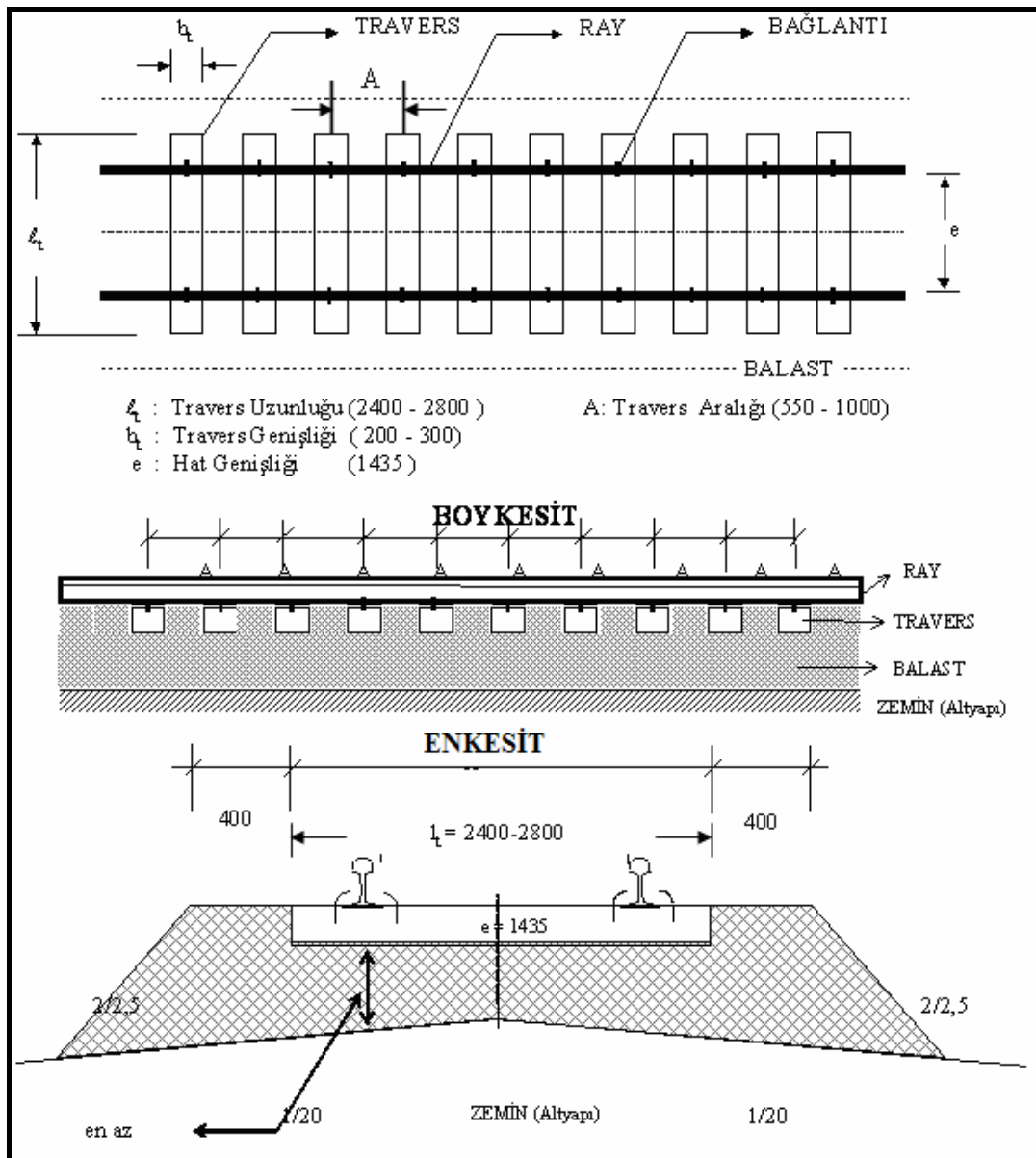
Boyuna doğrultuda (x eksenini) yol yapısına etki eden kuvvetler ise, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ve rayların boyuna genleşmelerinin sınırlandırılması nedeniyle oluşan kuvvetler, taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde oluşan kuvvetler, ray içsel gerilmeleri ve kaynaklama sonrası ortaya çıkan büzülme gerilmelerinin oluşturdukları boyuna kuvvetler şeklinde sıralanabilirler. Ayrıca, rayların yürümesi (şöminman) ile oluşan kuvvetler, conta ve

ek yerlerinde oluşan şoklar ve tekerlek aplatılığinden kaynaklanan yanal kuvvetler de yolun boyuna doğrultusunda etki eden zorlayıcı kuvvetlerdir.

Genellikle hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından, düşey dinamik stabilite analizlerinde yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmektedir.

3.3 Üstyapı

Demiryolu üstyapısı, Şekil 3.3’de görülebileceği gibi, yol eksenine boyunca, altyapı üzerine döşenen ve genellikle kırma taşlardan oluşturulan balast tabakasının içine gömülü olarak yol eksenine dik yönde ve belirli aralıklarla döşenen ahşap, çelik ya da betonarme traversler, bu traverslerin üzerine sabit aralıkla ve yol eksenine paralel olarak döşenen bir çift çelik ray ve traversleri raylara, rayları birbirlerine bağlamaya yarayan bağlantı elemanlarından oluşur.

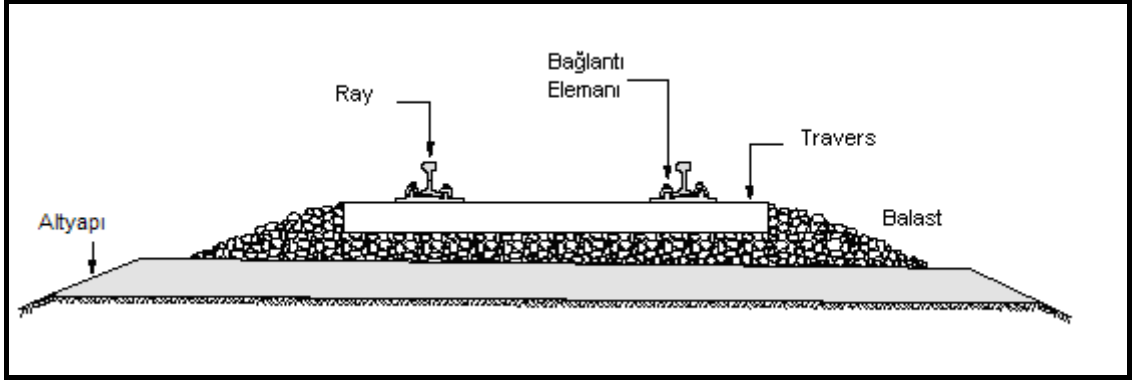


Demiryolu üstyapısının görevleri, aşağıda belirtildiği gibidir.

1. Taşıtlara istenilen geometrik ve fiziksel standartlarda, düzgün, pürüzsüz ve güvenli bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
2. Taşıtların oluşturduğu dinamik etkiler ile diğer dış etkileri hiçbir kalıcı yer ve şekil değiştirme yapmadan karşılamak, bunları elastik şekil değiştirmeler ile kısmen azaltarak, geniş bir yüzey boyunca altyapıya iletmek,

Üstyapının dünyada kullanılan iki türü vardır. Bunlardan biri balastlı üstyapı (Ballasted track structure), bir diğeri ise rijit üstyapıdır (Slab track structure/ Ballastless track).

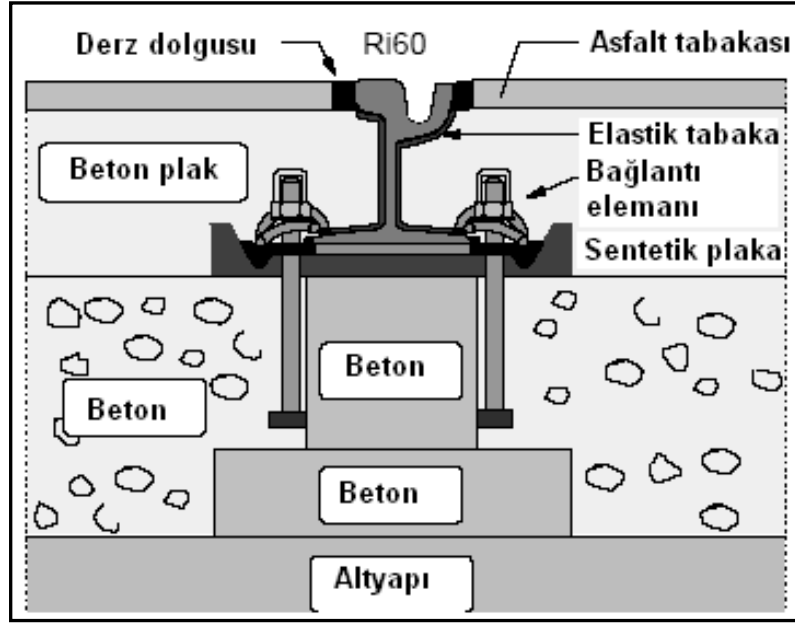
Balastlı üstyapı, balast tabakası üzerine döşenmiş ahşap, çelik veya betonarme traverslere mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmektedir. Balastlı üstyapı elemanları, balast tabakası, traversler, çelik ray ve bağlantı elemanlarından oluşur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Balastlı üstyapı

Diğer bir üstyapı tipi olan rijit üstyapı ise Şekil 3.5 de görülebileceği gibi, balast tabakası yerine; daha az şekil değiştiren beton, betonarme ya da asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı bir demiryolu üstyapı tipidir. Rijit üstyapı için gerekli elastiklik, ray ve travers arasında ve/veya travers altında elastik malzemeler kullanılarak sağlanır. Rijit üstyapının en önemli özellikleri;

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



Şekil 3.5 Rijit üstyapı

Yukarıda sayılan üstyapı görevlerini yerine getirecek olan her bir üstyapı elemanı ve görevleri, tezde başlıklar halinde anlatılacaktır. Başlıca üstyapı elamanları;

- Ray
- Traversler
- Bağlantı elemanları
- Elastomer mesnetler (elastik elemanlar)
- Balast tabakası veya asfalt ve beton taşıma tabakasıdır.

3.3.1 Ray

Rayın şekil bakımından gelişim süreci incelendiğinde, üç ray tipi dışındaki rayların, kısa ömürlü oldukları göze çarpmaktadır. Sözüünü ettiğimiz bu üç ray tipi:

1. Oluklu ray,
2. Çift mantarlı raylar,
3. Patenli (Vignole tipi) raylardır.

Oluklu raylar (Şekil 3.6), daha çok tramvay hatlarında kullanılırlar. Ayrıca diğer şase kaplamaları ile uyuşabildiği için hemzemin geçit ve özellikle rıhtım hatlarında kullanılırlar.

Çift mantarlı raylar, simetrik bir şekil gösterip, bir alt bir de üst mantardan meydana gelirler. Bu rayın ortaya atılışındaki fikir, üst mantarın aşınmasından sonra rayın çevrilmesiyle bu defa yuvarlanma yüzeyi olarak alt mantarın kullanılmasıydı. Ancak, üst mantarla beraber alt mantarında sürtünmeler nedeniyle aşınmasından dolayı bu fikrin imkansızlığı anlaşıldı. Bu raylar Fransa'nın bazı bölgelerinde ikinci dereceden hatlarda kullanılmaktadır.

Technical drawing of a T-shaped cross-section of a reinforced concrete beam. The drawing is divided into three horizontal sections: MANTAR (Crown), GÖVDE (Web), and TABAN (Sole). Dimensions are given in centimeters (cm).

- MANTAR (Crown):** The top flange. Its width is indicated as 60 - 75 cm. Its thickness is indicated as 35 - 45 cm.
- GÖVDE (Web):** The central vertical part. Its width is indicated as 14 - 16 cm.
- TABAN (Sole):** The bottom flange. Its width is indicated as 120 - 150 cm.
- Overall Height:** The total height of the section is indicated as 150 - 170 cm.

Şekil 3.7 Patenli (Vignole tipi) ray

Taşıtların ilk temas ettiği üstyapı elemanı olan rayın, başlıca görevleri şunlardır;

- Taşıtlara istenilen geometrik ve fiziksel standartlarda, düzgün, pürüzsüz ve güvenli bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Tekerlekler tarafından iletilen düşey, yanal ve boyuna doğrultudaki etkiler ile, çevre etkilerini güvenliyle karşılamak, kısmen azaltmak ve geniş bir yüzey boyunca ara mesnetlere ya da traverslere iletmektir.

Bu görevleri yerine getirebilmesi için, raylarda aranan nitelikler şunlardır:

- Yeterli kesit boyutlarına sahip olması,
- Yeterli çekme-basınç-burulma ve aşınma dayanımlarına (statik ve dinamik) ve elastikliğe sahip olması,
- Oksitlenmeye ve korozyona karşı dayanıklı olması,
- Düşük maliyetli olmasıdır.

Raylar, 1m uzunluğundaki ray ağırlığı ve çekme dayanımları ile adlandırılırlar. Örneğin, UIC 60 rayının bir metresinin ağırlığı 60 kg ve çekme dayanımı 900 N/mm^2 'dir. Günümüzde kullanılan rayların metre ağırlıkları 46 – 75 kg arasında, çekme dayanımları ise 700–1200 N/mm^2 arasında değişmektedir. Ülkemiz demiryollarında büyük bir kısmında S49 rayı kullanılmaktadır. Yüksek hızlı işletmecilik yapan demiryollarında daha büyük kesitli ve yüksek dayanımlı raylara gereksinim duyulur. Çizelge 3.1'de, değişik ülkelerde kullanılmakta olan bazı ray tiplerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Dünyada kullanılan bazı ray tiplerinin özellikleri

Özellikler	Birimi	R 46 (TCDD)	S49 (Almanya)	UIC 60 (*)	AREA 136 (ABD)
Ağırlığı	Kg/m	46,30	49,43	60,34	67,56
Enkesit Alanı	mm^2	5906	6297	7687	8606
Ray Yüksekliği	mm	145	149	172	185,74
Mantar Genişliği	mm	62	67	72	72,62
Mantar Yüksekliği	mm	36,30	39,80	37,50	39,89
Gövde Kalınlığı	mm	15	14	16,50	17,46
Taban Genişliği	mm	134	125	150	152,40
Atalet Momenti (I_x)	cm^4	1588	1819	3055	3949
Ağırlık Merkezi Yüksekliği	mm	67,20	73,70	80,90	85,01

3.3.2 Travers

Traversler, yol eksenine dik yönde ve belirli aralıklarla (A), balast tabakası içine gömülü olarak döşenen enine kirişler olup, raylara mesnet görevi yapan üstyapı elemanıdır.

Traverslerden beklenen başlıca görevler şunlardır:

- İki ray dizisi arasındaki hat genişliğini korumak,
- Ray tabanları ya da ray-travers mesnetleri tarafından iletilen yükleri, güvenlikle karşılamak, kısmen azaltmak ve geniş bir yüzey boyunca balast tabakasına iletmek,
- Rayların birbirlerinden bağımsız yer değiştirmelerine engel olmak,
- Sinyalizasyonlu blok sistemli yollarda, iki ray dizisi arasında elektrik yalıtımı yapmak,
- Ağırlığı ve balastla arasındaki sürtünme ile yolun boyuna ve yanal yönde kaymasını engellemek,

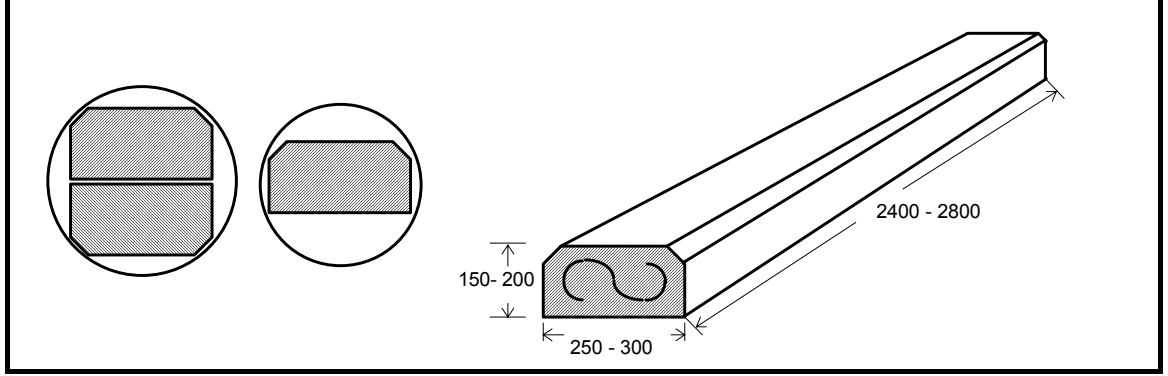
Traverslerin yukarıda belirtilen görevleri yerine getirebilmeleri için aşağıdaki niteliklere sahip olmaları gerekmektedir:

- Bağlantı elemanlarının takılıp-sökülebilmesine elverişlilik,
- Kırılmaya, ezilmeye karşı yeterli dayanım ve elastiklik,
- Yeterli genişlik ve uzunluk,
- Elektrik akımını iletmeyen bir malzemeden yapılmak,
- Balastla temas yüzeyinde, yüksek sürtünme için gerekli ağırlık ve/veya sürtünme katsayısı,
- Suyun, nemin, asit yağmurlarının, yabancı bitkiler ve küçük canlıların zararlı etkilerine dayanıklılık,
- Taşıma, istifleme, döşeme ve sökme kolaylığı,

Günümüzde üç tür travers kullanılmaktadır. Bunlar;

- Ahşap traversler,
- Çelik traversler,
- Betonarme traversler,
- Plastik traverslerdir.

Ahşap traversler, demiryolu tarihinde en eski geçmişe sahip olan traverslerdir. Yumuşak (çam ve karaçam) ve sert (kayın, meşe, okaliptus) türdeki ağaçların gerekli boyutlarda kesilmesi, uygun şekilde kurutulması ve bazı işlemlerden geçirilmesi ile elde edilirler (Şekil 3.8). Ağırlıkları, boyutlarına ve kullanılan ağaç cinsine göre 50–90 kg arasında değişir.



Şekil 3.8 Ahşap travers (Boyutlar “mm”)

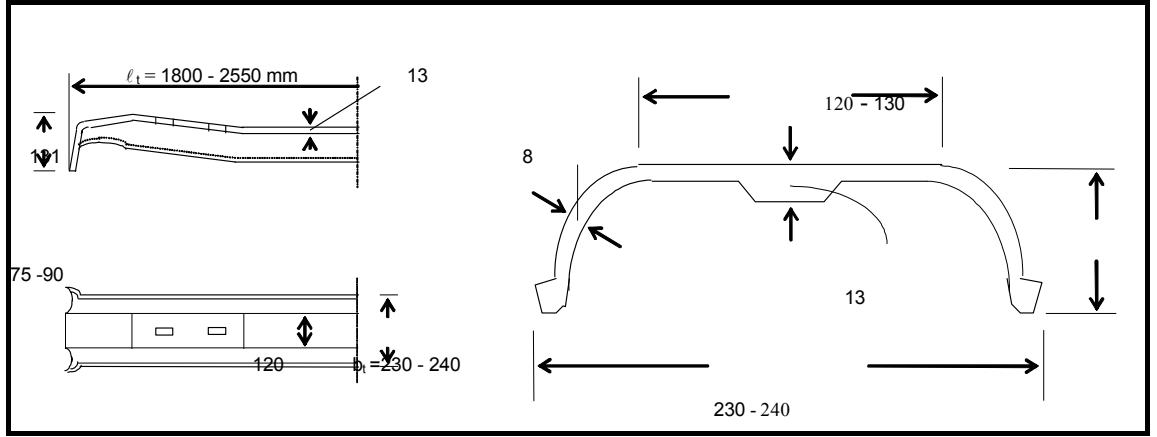
Ahşap traverslerin doğal ömürleri, kullanılan malzemeye göre 3 ila 18 yıl arasında değişir. Suyun, nemin, asit yağmurlarının, yabani bitkiler ve küçük canlıların zararlı etkilerine karşı, daha uzun süre dayanıklı duruma gelmeleri için, bu traverslere, yüksek basınç altında KREOZOT adı verilen bir kimyasal madde emdirilir. Bu durumda, ömürleri yumuşak ağaç türlerinde 20–25 yıla, sert ağaç türlerinde ise 30–35 yıla kadar çıkar.

Ahşap traverslerin olumlu yanları şunlardır:

- Çok iyi elastik davranış gösterir; aşırı yüklere karşı dayanıklıdır,
- İyi işlenebilir, makas bölgelerindeki her elemanın bağlanmasına uygundur,
- Balast tabakasının sıkıştırılması (Buraj) ve yolun doğrultulması işleri kolayca yapılabilir,
- Betonarme traverslere göre daha hafif olup, taşınması kolaydır,
- Balastla aralarındaki sürtünme katsayısı, betonarme traversinkinden daha yüksektir,
- Raydan çıkma olaylarında sorun çıkmaz,
- Hava yoluyla gelecek kimyasal etkilere dayanıklıdır,
- Tünellerde kullanılması uygundur,
- Raylar arasında iyi bir elektrik yalıtımı sağlar,
- Raylarla bağlantısı iyi olur, bağlantı yerleri değiştirilebilir.

Ahşap traverslerin olumlu yanları olduğu gibi, çeşitli olumsuz tarafları da bulunmaktadır. Bu olumsuz taraflarına örnek vermek gerekirse; ömürleri kısadır, küçük canlıların ve yabani otların zararlarına karşı dayanıksızdır, bağlantı yerlerinde liflerin ezilmesiyle zamanla laçkalaşma olduğundan, hat genişliği bozulabilir, kurutma ve ilaçlama için büyük depo yerlerine gereksinim duyulur, maliyeti yüksektir.

Çelik traversler, günümüzde kullanılan biçimine, 1888 yılında Heindl tarafından kavuşmuştur (Şekil 3.9). Bu biçimin özelliği, yolun yanal ve boyuna yönde kaymasına karşı, “kucaklayarak” içine aldığı balast sayesinde gerçekleşen ve “travers-balast” sürtünmesinden çok daha yüksek olan “balast-balast” sürtünmesi ile direnç göstermesidir. Ancak bu şekil statik açıdan çok uygun değildir. Ağırlıkları, boyutlarına bağlı olarak 45–70 kg arasında değişir.



Şekil 3.9 Çelik travers (Boyutlar “mm”)

Çelik traverslerin olumlu özellikleri şunlardır:

- Şekil vermeye uygundur, makaslar için gereken uzun traversler yapılabilir,
- Ağırlıkları az olduğundan taşınması, döşenmesi ve sökülmesi kolaydır,
- Kötü hava koşulları olmayan bölgelerde uzun ömürlüdürler(50 – 60 yıla kadar),
- Aşırı zorlanmalardan etkilenmez,
- Ray bağlantıları basit, direkt ve ucuz şekilde yapılabilir,
- Hat genişliğini iyi korur,
- Eski traversler kullanılabilir ya da hurda olarak değerlendirilebilir.

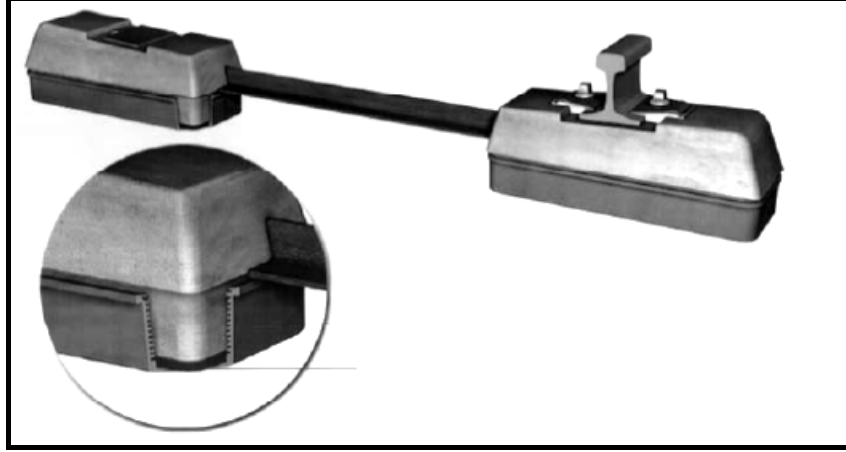
Olumlu yönlerine karşın, aşağıda belirtilen olumsuzlukları da mevcuttur.

- Rayların elektrik yalıtımı pahalıdır ve yoğun bakım gerektirir,

- Endüstri bölgelerinde ve tünellerde korozyon tehlikesi vardır,
- Raydan çıkma (derayman) olaylarında, hat genişliğini koruyamaz,
- Bağlantı için açılan deliklerde başlayan çatlamlar oluşur,
- Betonarme traverslere göre daha fazla gürültüye neden olurlar,
- Genelde pahalıdır, ancak maliyeti çelik maliyetlerine bağlıdır.

Günümüzde kullanılan travers tiplerinden sonuncusu, betonarme traverslerdir. Betonarmenin yapılarda kullanılmaya başlamasından sonra, bu malzemenin demiryolu üstyapısında da kullanılması için araştırmalar yapılmıştır. İlk yapılan betonarme traverslerde çatlamlar oluşmuş ve rayların traverse bağlanma konusu da memnun edici bir şekilde çözümlenememiştir. Fransızlar çatlak sorununu çözmek için, iki bloklu betonarme travers yaparak, beton içindeki eğilme momentinin önemli ölçüde düşürülmesini sağlamışlardır. Tek bloklu (monoblok) betonarme travers için ise, ancak öngerme tekniğinin kullanılmasından sonra iyi sonuçlar alınabilmektedir.

İki bloklu betonarme traversler (Şekil 3.10), hat genişliğini korumak amacıyla yeterli dayanıma sahip olan “L” ya da “T” kesitli çelik çubuklar ya da eski ray parçalarıyla birbirlerine bağlanmış olan iki betonarme mesnet kütesinden oluşturulurlar. Ağırlıkları 140 kg’dır.



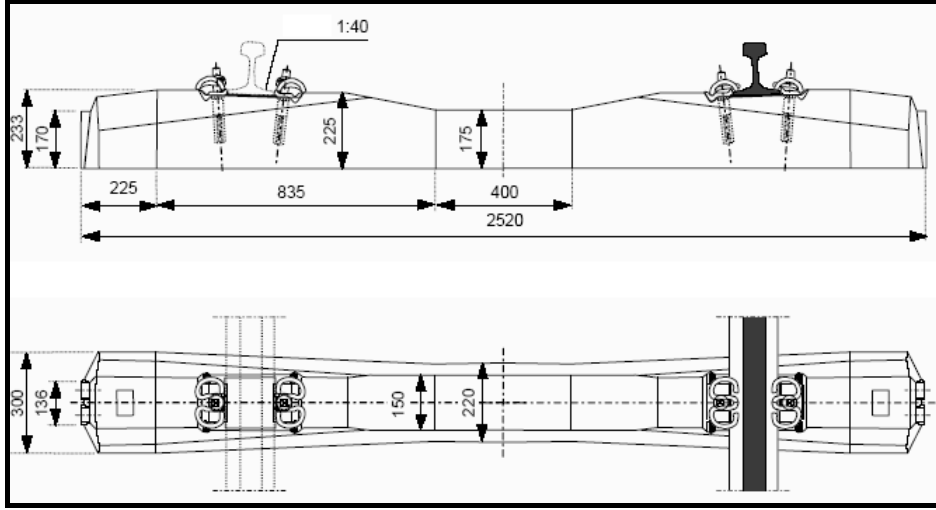
Şekil 3.10 İki bloklu betonarme travers

Betonarme blokların iç kısımlarındaki alın yüzeyleri sayesinde yanal kayma direncinde sağlanan artış, orta kısmın balast tabakası ile temas etmemesinden kaynaklanan sürtünme kuvveti kaybı nedeniyle olan azalmanın çok üstündedir. Bu nedenle iki bloklu traversler, özellikle sürekli kaynaklı rayların kullanıldığı üstyapılara çok uygundur. Cebire ile bağlı rayların kullanıldığı yollarda ise, taşıt geçişi sırasında ek yerlerinde oluşan kütsel

kuvvetlerin şiddeti, betonarme traversin ağırlığının fazla olmasını nedeniyle çok artar, bu hem traverslerde hem de ray uçlarında büyük zararlara yol açar.

İki bloklu traverslerin kullanıldığı yollardaki raydan çıkma olaylarında, raydan çıkan tekerlek direkt olarak aradaki çelik çubuğun üzerine çarpacağından, bu çubuk eğrilir ve hat genişliği değişir. Bu nedenle, iki bloklu traverslerin, trafiğin yoğun olduğu tek hatlı demiryollarında kullanılmaları uygun değildir.

Tek bloklu betonarme traverslerin mutlaka ön gerilmeli olarak üretilmeleri gerekmektedir (Şekil 3.11). Bunların ağırlıkları 250 – 280 kg'dır. Ön germe için, ya 20–50 adet ya da 2–8 adet çelik çubuk kullanılır. Ön germe kuvveti ise 270–280 kN arasındadır. Rayların bağlanabilmesi için, beton içine ahşap ya da plastik dübelleri yerleştirilir.



Şekil 3.11 Öngermeli tek-blok betonarme travers (Boyutlar “mm”)

Betonarme traverslerin yararları, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek ağırlık, yola iyi bir stabilite kazandırır. İki bloklularda ek alın yüzeyleri sayesinde yanal kayma direnci daha da artar,
- Rayların sürekli olarak kaynaklandığı yollara uygundur,
- Tek Bloklu traversler hat genişliğini iyi korur,
- Tek bloklu traversler rayların elektrik yalıtımı için uygundur,
- Ömürleri çok uzundur,
- Üretim maliyetleri düşüktür,
- Aşırı zorlanmalara dayanıklıdır.

Şu ana kadar sayılan travers tipleri arasında en kullanışlı olan betonarme traverslerinde, diğer tiplerde olduğu gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bunlar:

- Rayların birbirlerine cebire ile bağlandığı yollara uygun değildir,

- Ağırlığı fazla olduğundan, taşınması, döşenmesi ve sökülmesi zordur,
- İki bloklu traverslerde, raylar bağlanırken yalıtım sağlayan özel bağlantı elemanların kullanılması gerekir; bu da yapım ve bakım maliyetini artırır,
- İki bloklu raylarda raydan çıkma olaylarında hat daralır,
- Eski traverslerden yararlanılamaz,
- Makas yerleri gibi özel yol kesimleri için gereken değişik boyuttaki traverslerin üretilmesi zahmetlidir.

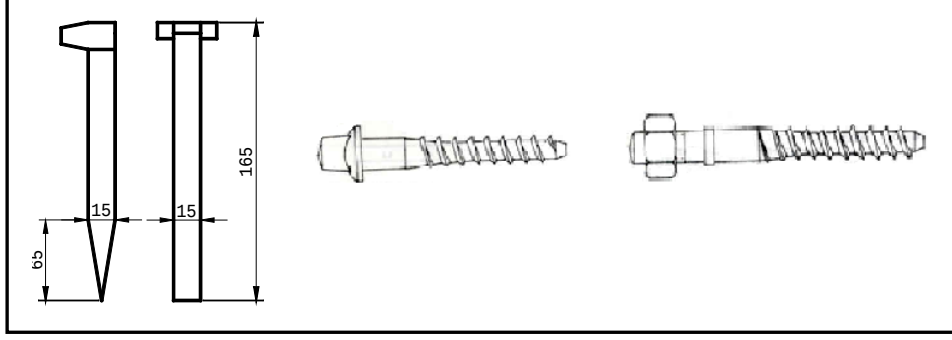
3.3.3 Bağlantı Elemanları

Demiryolu üstyapısında, rayları birbirine bağlayan elemanlar ve ray travers bağlantı elemanları olmak üzere iki tip ray bağlantı elemanı kullanılır. Bu tezde, yalnızca rayları traverslere bağlamaya yarayan elemanlar incelenecektir.

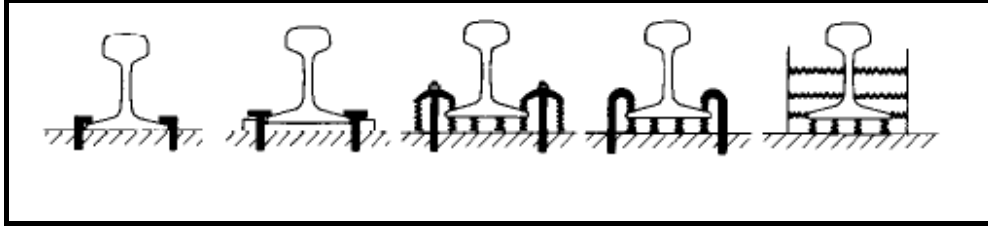
Ray-travers bağlantı elemanın görevleri şunlardır:

- Ray ve traversler arasında kuvvet aktarıcı bir bağlantı sağlamalı, bu kuvvet ilişkisi sabit ve kontrol edilebilir, ya da ayarlanabilir olmalıdır,
- Taşıt tekerlekleri tarafından iletilen yükleri güvenlikle karşılamalı, kısmen azaltmalı ve geniş bir yüzey boyunca traverse aktarmalıdır,
- Gerekiyorsa, raylara bandaj konikliğine uygun enine eğimin verilmesini sağlamalıdır,
- Aşınmanın ve gürültünün azaltılması, konforun azaltılması için, raylar traversler üzerine elastik olarak oturtulmalıdır,
- İyi bir yük dağılımı sağlamalı, kenarlarda yüksek basınçlar olmamalıdır (özellikle ahşap traverslerde),
- Rayların ve yol çerçevesinin boyuna ve yanal yönde şekil değiştirmelerine karşı yüksek bir direnç göstermelidir,
- Rayların elektrik yalıtımına uygun olmalıdır.

Ray-travers bağlantıları, direkt-indirekt ve rijit-elastik olmak üzere iki türlü sınıflandırılabilir. Direkt bağlantıda ray krampon ve tirfon (Şekil 3.12-13) gibi elemanlarla direkt olarak traverse bağlanır. Bu tipte, ray ve travers arasına mesnet levhası (sela) konulabilir. Mesnet levhası, ray tarafından iletilecek yüklerin, traverslere daha geniş bir yüzey boyunca aktarılmasını ve gerekli durumlarda raya bandaj konikliğine uygun enine eğim verilmesini sağlar.

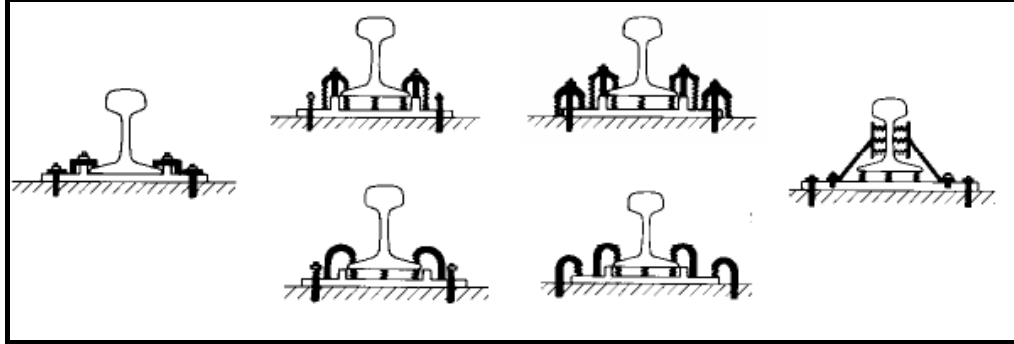


Şekil 3.12 Krampon ve tirfon



Şekil 3.13 Direkt bağlantı elemanları (Ludvig, 2004)

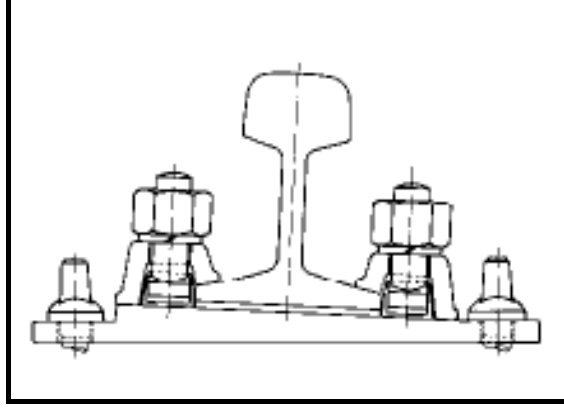
İndirekt bağlantıda ise, ray krapo ve bulonlar yardımıyla bir mesnet levhasına (sela), mesnet levhası da tirfonlar yardımıyla traverse bağlanır (Şekil 3.14). İndirekt bağlantıda, ray ile mesnet levhası arasına sıkıştırılmış ahşap, kauçuk ya da yapay elastik malzemeden yapılan ara mesnetler konulur. Bu ara mesnetler, hem rayın boyuna kaymasına karşı direnci artırır, hem de elastik bir bağlantı sağlayarak, elemanların zorlanmasını ve gürültü oluşumunu azaltır.



Şekil 3.14 İndirekt bağlantı elemanları (Ludvig, 2004)

Rijit bağlantıda, bağlantı elemanlarının elastik şekil değiştirme yapmalarına ve dolayısıyla rayların elastik dönme ve şekil değiştirme yapmalarına izin verilmediğinden, traverse aktarılan etkilerin azaltılması mümkün olmaz. Oysa, elastik bağlantılarda krampon ve kramponlara elastik şekil değiştirme olanağı sağlayan şekiller verilerek, rayların ve traverslerin daha az zorlanmaları sağlanır.

Şekil 3.15’de, ülkemizde kullanılmakta olan iki bağlantı tipine ait örnekler görülmektedir. TCDD’da “K” Tipi adı verilen indirekt-rijit bağlantı, İstanbul Aksaray-Yeni Bosna Hafif Metrosunda indirekt-elastik bağlantı (Şekil 3.16) kullanılmaktadır.



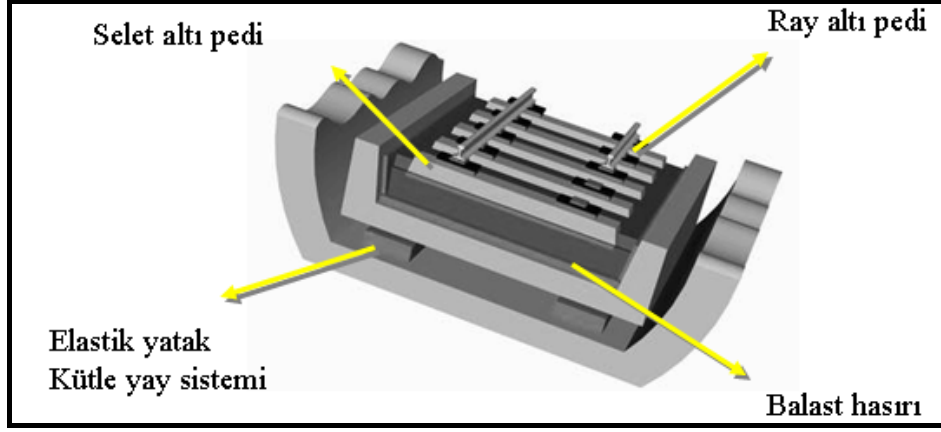
Şekil 3.15 “K” tipi bağlantı (Ludvig, 2004)



Şekil 3.16 İndirekt-elastik bağlantı (Ludvig, 2004)

3.3.4 Elastomer Mesnetler (Elastik elemanlar)

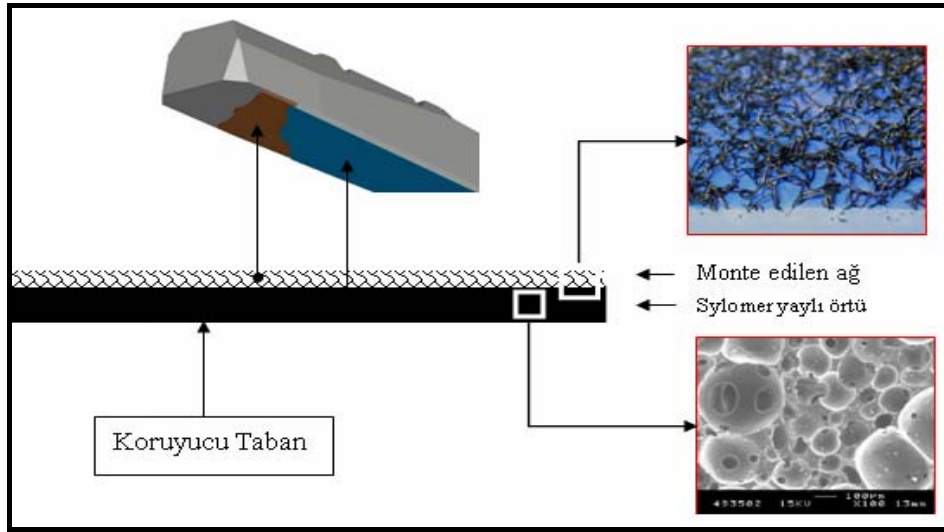
Klasik bağlantı sistemlerinin hepsi zamanla laçkalaşmakta ve önemli bakım ve onarım sorunları çıkarmaktadır. Bunun başlıca nedeni, üstyapının elastikiyeti dolayısıyla her dingil geçişinde düşey yer değiştirmeler yapması, buna karşı bağlantıların, rijit olmaları yüzünden bu yer değiştirmelere uymamasıdır. İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra, bu sorun üzerinde yapılan araştırmalarla elastik bağlantı sistemleri geliştirilmiştir.



Şekil 3.17 Demiryolu için elastik elemanlar

Günümüz demiryolu hatlarında, birçok elastik eleman kullanılmaktadır (Şekil 3.17). Rayların altına elastik mesnetler yerleştirildiği gibi, traverslerin altına da elastik elemanlar yerleştirilmesi mümkündür (Şekil 3.18). Elastik travers pedinin görevleri şunlardır:

- Tekerleklerden kaynaklanan dinamik etkileri azaltarak, titreşim yalıtımını sağlamak,
- Yük dağıtımını sağlayarak, balast, ray bağlantısı ve toprak altı statik yükü azaltmak,
- Traverslerle balast arasındaki hassa yerlerde temas yüzeyini arttırmaktır.



Şekil 3.18 Beton travers için travers altı pedi

3.3.5 Balast

Raylarla traverslerin bağlantı elemanları ile birleştirilmesiyle oluşturulan “yol çerçevesi” nin altına döşenen ve çapları genellikle 20-70mm arasında olan doğal ya da kırma taş daneleridir.

Türkiye’deki literatürde balast tabakası, üstyapının bir elemanı olarak alınırken, dünya literatüründeki birçok kaynakta “hat yatağı tabakası” olarak adlandırılan yapının içinde yer almaktadır ve bu yapı, altyapıya dahil edilmektedir. Bu tezde, balast tabakası, dünya

literatüründe olduğu gibi, altyapının bir elemanı olarak ele alınacak ve altyapı başlığı altında geniş bir biçimde işlenecektir.

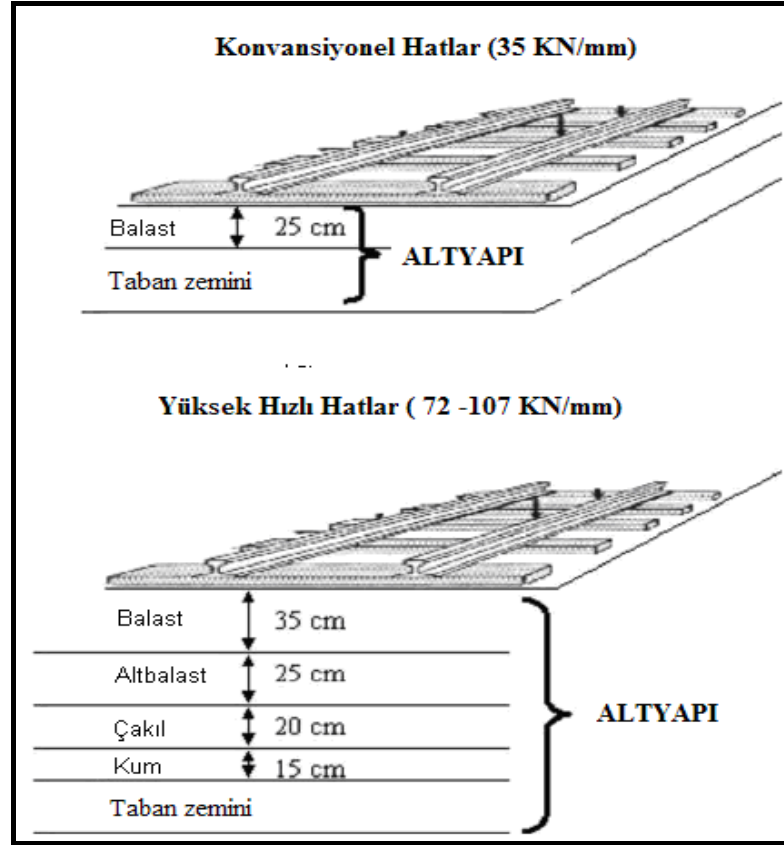
3.4 Altyapı

Altyapı, üzerine demiryolunu inşa edebilmek için, zeminde yapılması gerekli her türlü yapı ve işleri içerir. Yani, dolgu ve yarmadaki esas platformun oluşturulması ile demiryolunun sürekliliğinin sağlanması için, yolların altında veya üstünde kalan bütün sanat yapılarını (köprü, viyadük ve tünel) ihtiva eder. Demiryollarının toprak işlerinin tasarımı ve inşaatı için belirlenmiş olan kuralların büyük bir kısmı, karayolları için geliştirilmiş tekniklere dayanmaktadır (UIC Code 719R, 1994). Altyapı, yolun esas taşıyıcı kısmı olup, üstyapı tarafından iletilen yükleri, herhangi bir kalıcı şekil değiştirmeye uğramadan güvenlikle karşılayarak, geniş bir yüzey boyunca doğal zemine iletmesi gerekir. Altyapı işleri ve altyapı türleri Çizelge 3.2’de görülebilir.

Çizelge 3.2 Altyapı işleri ve türleri (UIC Code 719R, 1994)

ALTYAPI İŞİ	ALTYAPI TÜRÜ
Arazi düzeyini, zemini kazıp uzaklaştırarak düşürme	Yarma
Arazi düzeyini, üzerine zemin doldurma ve sıkıştırma ile yükseltme	Dolgu
Dolgu ve yarma şevlerinin korunması	Çimlendirme, ağaçlandırma, ankraj, kaplama, vb
Dolguda şev eteğinin, yarmada şev kretinin korunması	Blokaj, perde, istinat duvarı vb.
Yüzeysel ve yeraltı sularının uzaklaştırılması	Drenaj tesisleri
Yolun durgun sular ve akarsular üzerinden geçilmesi	Köprü
Küçük akarsuların dolgu altından geçirilmesi	Büzler ve Menfezler
Doğal zeminin delinerek, içinden yol geçirilmesi	Tünel
Yolun vadilerin üzerinden geçirilmesi	Viyadük
Yol yüzeyinin kardan korunması	Paranej
Doğal zeminin taşıma kapasitesinin arttırılması	Hazırlanmış altyapı ve geosentetikler
Altyapı tesislerinin sürekli denetimi, bakımı, onarımı ve korunması.	

Şekil 3.19’da, yolun enkesiti göz önüne alındığında, konvansiyonel yol ile yüksek hızlı demiryolu (YHD) için tipik bileşenler gösterilmiştir. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, YHD’nda, balastın altına koyulan farklı tabakalar ile konvansiyonel demiryoluna göre 2-3 kat daha rijit bir sistem oluşması sağlanmaktadır.



Şekil 3.19 Balastlı sistem için, YHD ve konvansiyonel demiryoluna ait bileşenler (Pita, 2004)

Altyapı, özgün mühendislik yapıları (sanat yapıları), tesisleri ve işleri ile oluşturulmakta olup, ulaştırma yapısının hizmet ömrü boyunca, sürekli olarak denetlenmesi, bakılması, onarılması ve korunması gereken bir yapıdır.

Kısaca altyapı, bir ulaştırma yapısının konumunu oluşturan ve yolu dış etkilere koruyan, ancak, genelde yuvarlanma yüzeyinin altında kaldığı için, “gözden ırak olan” bir yapıdır. Oysa bir yolun hizmet düzeyi ve kalitesi, en az % 50 oranında altyapının kalitesine ve korunma koşullarına bağlıdır.

Daha öncede belirtildiği gibi, altyapı, sanat yapıları (köprü, viyadük ve tünel) ve doğal zemin üzerine inşa edilen daneli malzemelerden oluşabilmektedir. Bu bölümde, sanat yapılarından oluşan altyapı türü incelenecektir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, “doğal zeminli altyapı”lar, “yol yatağı tabakaları” başlığı altında derinlemesine incelenecektir.

3.4.1 Altyapıya Gelen Etkiler

Altyapıya gelen etkiler, doğal ve yapay olmak üzere iki ana başlık altında ele alınabilir. Doğal etkilere, altyapının üzerinde bulunduğu zemin koşulları, ortamda bulunan suyun etkisi örnek olarak gösterilebilir. Eğer, tabi zemin kötü ise altyapı ne kadar iyi olursa olsun bozulmaya mahkumdur. Bununla birlikte, suyun muhakkak altyapıdan iyi bir şekilde uzaklaştırılması

gerekmektedir. Çünkü su, altyapıda bulunan ince daneli ve daha kalın daneli malzemeleri birbirine karıştırarak, yapıyı bozar ve böylece altyapının taşıyıcılığını azaltır.

Bu doğal etkilerin yanında, hattın üzerinden geçen yüklerin üstyapıdan altyapıya ilettiği boyuna, yanal ve düşey etkileri bulunmaktadır. Eğer bu etkiler altyapının karşılayamayacağı boyutlarda ise altyapının bozulmaması mümkün değildir.

3.4.2 Altyapının Görevleri

Stabil ve düşük maliyetli bir yol için önkoşul, iyi bakılan ve iyi koşullardaki bir altyapıdır. Demiryolu altyapısının beş temel fonksiyonu, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Üstyapı için pürüzsüz bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Trafik yüklerini zarar görmeden taşımak,
- Suyun, yanal ve boyuna drenajını sağlamak,
- Bulunduğu bölgedeki iklim koşullarına uygun şekilde yapılarak, çevrenin olumsuz etkilerine karşı dayanıklı olmaktır.

Trafik yüklerini zarar görmeden taşıma ve suyun drenajını sağlama fonksiyonları birbirlerine bağımlıdır. Eğer taşıma kapasitesi yetersizse, su ceplerinin oluşması nedeniyle drenaj başarısız olur. Drenajın iyi çalışmaması durumunda ise, altyapıda suyun bulunması nedeniyle zemin zayıflar ve yeterli stabilite korunamaz.

3.4.3 Sanat Yapıları İle Oluşturulmuş Altyapı

Bundan önce de değinildiği gibi altyapı, doğal zemin üzerine ya da sanat yapıları üzerine inşa edilebilir. Bu başlık altında, altyapının üzerine inşa edilebilecek olan köprü (ve ya viyadük) ve tünel yapıları anlatılacaktır.

3.4.3.1 Tüneller

Tünellerin tasarımında, tünel enkesitinin büyüklüğü, maliyetin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Tünellerde havanın direnci, açık araziden daha büyük olmaktadır. Tünel giriş ve çıkışında, yolcular için kulak ve baş ağrısına sebep olabilecek ani hava basıncı değişimleri oluşmaktadır. Çizelge 3.3’de, farklı ülkelerde uygulanan farklı hızlar için tünel enkesit değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Farklı ülkelerde tünel kesitleri için tasarım kriterleri

	ÜLKE (km/sa)										STI tasarımı
	Fransa		Almanya(1)			İtalya		İspanya		Belçika	
	300	350	300 Yolcu Yük	300 Yolcu	350 Hipotez	300	350 Hipotez	300	350	320	350
Hava sızdırmaz trenler için tünel kesitleri (m ²)	70	100	92 (1)	92 (2)	103 (1)	82	100	75	100	150 (3)	-

(1) Balastsız yol. d=0 mm ve d=160 mm olan balastlı yol için genişlik balastın kenarlarda eğimli olmasından dolayı 40 cm artar (2) Hava sızdırmaz trenler (yük trenleri hariç) (3) Kaplaması az olan bölüm

Taşıtlar, tünele girip çıkarken bir basınç dalgası oluşturmaktadır. Taşıtın sonu, tünele girdiğinde bir depresyon dalgası, oluşur ve bu dalga tünel içerisinde treni geçerek, tünelin sonundan basınç dalgası olarak yansır. Trenin yönüyle hava akışı ters yönlü olduğunda, çok daha büyük hava direnci oluşmaktadır. Dolayısıyla hava basıncından daha da büyük fark meydana gelir. Aynı zamanda, tünel içinde hava akımı ile oluşan enerji ısıya dönüşür ve tünel içinde sıcaklığın artmasına neden olur. Basınç dalgaları oluştuğunda, havanın sıkışmazlık prensibi geçerli olmaz. Basınç dalgaları ses çıkartarak, hızlıca hareket ederler ve tünelin sonunda oluşan baskı altında yansır. Tünel içinde trenlerde oluşan iç basınç farklılıkları, hızlı trenlerde, normal trenlere göre daha azdır. Tünel uzunluğu, tünelin kesiti, trenin uzunluğu ve hızı, trenin dışındaki basıncı belirler. Trenin hava geçirgenliği ise trenin dışındaki hava basıncı değişiminin, içerideki yolcularda yaratacağı olumsuz koşulları belirler.

Tünel tasarımı için dört ana kistas vardır;

- İşletme hızında yolcu konforu,
- Trenin yüzeyinde bir delik açıldığı takdirde yolcu güvenliği,
- Bakım ekibinin güvenliği,
- Trenin dış kabuğunun kuvvetidir.

3.4.3.2 Viyadükler

Yapıların veya köprülerin araç geçişinden nasıl etkilendiği, 19. yy.'dan beri araştırmaların konusu olmuştur. Geçtiğimiz bir kaç yılda, çok fazla sayıda teorik ve deneysel araştırma ile köprülerin dinamik tepkileri araştırılmaya çalışılmıştır. Trenlerin hareketi, özellikle tınlaşım (rezonans) durumunda, zeminde çok büyük titreşimlere sebep olmaktadır.

Demiryolu inşaatları, dünyada birçok ülkede, inşaat mühendisliği alanında en önemli ve değerli projelerin başında gelmektedir. Demiryolu köprüleri söz konusu olduğunda, hareketli (dinamik) yük etkisi en temel tasarım olmaktadır. Bununla birlikte demiryollarında köprülerde

oluşan tınlaşım durumu, hareketli tekil yük etkisinden çok daha büyük etkiye neden olmaktadır. Bu nedenle, köprülerin dinamik davranışları ayrıca önemli olmaktadır dolayısıyla tasarım aşamasında ele alınmalıdır. Buna rağmen, trenlerin köprü üstündeki hareketi esnasında seyahat konforundaki değişimi açıklayan çok fazla çalışma yapılmamıştır. Yang'ın sonlu elemanlar metodu ile yaptığı çalışmada, düşey yol bozukluklarının, balastın rijitliğinin, aracın süspansiyon sisteminin sönümleme ve rijitlik değerlerinin her birinin seyahat konforuna etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca yapılan bu çalışma ile tasarımın köprünün dayanımından dışında, yolcu konforuna önem verilerek yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

İlk yapılan yüksek hızlı demiryollarından sonra köprülerde balastın dökülmesi sonucu hat geometrisinde ve stabilizasyonunda bozulma görülmüştür. Bunun sebebinin, trenlerin oluşturduğu düşey ivmenin, döşemede yarattığı etkidir.

Yüksek hızlı trenlerin geçişi için yapılacak sanat yapıları tasarlanırken, üstyapı elemanlarının nasıl davranacağı da önceden saptanmalıdır. Bunun için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır:

- Balastlı sistemde; düşey ivme 0,35g değerini aşmamalı ve düşey ivmenin frekansı 20Hz'in altında olmalıdır.
- Balastsız sistemde; düşey ivme 0,5g değerini aşmamalı ve düşey ivmenin 20Hz'in altında olmalıdır.

Yeni yapılan yüksek hızlı demiryollarında, toprak gövdeden sanat yapılarına geçiş noktalarında çok hassas davranılmaktadır. Bu noktalar, altyapı için narin noktalardır ve dikkat edilmediği takdirde bu noktalarda iki tür problem meydana gelir:

- Çökme,
- Rijitlik değişmesi.

Çökme problemi, iki farklı yapı arasında, farklı oturmaların meydana gelmesi sebebiyle ortaya çıkar. Bu problem, genelde hattın işleme açılmasından sonraki ilk beş yıl içerisinde meydana gelerek, bakım maliyetini arttırır. Daha sonraki yıllarda problem azalır.

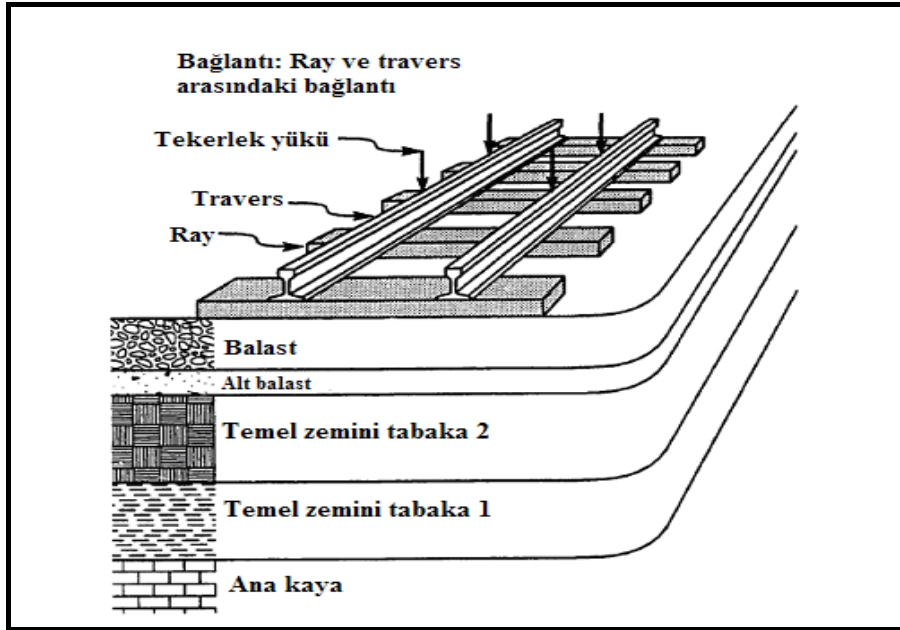
Düşey rijitliğin değişimi direkt olarak hıza bağlıdır, ray-tekerlek ilişkisinden oluşan Q yükünün artması ile yol ve balast bozulur ve dolayısıyla bakım maliyeti artar. Aynı problem balastsız üstyapı sistemlerinde de görülmektedir. Problemi ortadan kaldırmak için birçok çözüm yöntemi içinden; özellikle temelde arazinin tipine bağlı olarak kullanılacak dolgu malzemesinin yolun geometrisine uygun karıştırılması ve ölçümlerinin yapılması gerekmektedir.

4. DEMİRYOLUNDA DOĞAL ZEMİNLİ ALTYAPI

Konvansiyonel demiryolu altyapısı, bir tabakalı sistemdir. Demiryolu altyapısı, rayın ve traverslerin desteklenmesini sağlamak için balast, alt balast (subballast), ve taban zemininden oluşmaktadır. Bazı kaynaklarda, balast ve alt balast tabakaları birleşik olarak “demiryolu mesnedi” (track support) olarak tanımlanır. Tezin bu bölümünde, doğal zeminli altyapıların tüm bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1 Demiryolu Hattında Taban Zemininin Fonksiyonu

Şekil 4.1’de, bir demiryolu hat yapısının bileşenleri gösterilmiştir. Klasik demiryolu, raylardan, traverslerden, bağlantı elemanlarından, bir balast tabakasından ve taban zeminine üzerine serilmiş alt balast tabakasından meydana gelmektedir. Demiryolu hattının temeli olarak, taban zeminini, balast-alt balast tabakaları altında uzanan toprak ve kaya tabakalarını içermektedir.



Şekil 4.1 Demiryolu hattının bileşenleri (Li, 1994)

Daha önceden de anlatıldığı gibi, demiryolu üstyapı ve altyapı olarak iki ana bölüme ayrılır. Üstyapı, rayları, bağlantı sistemlerini ve traversleri içermektedir. Altyapı ise, balast, alt balast ve taban zeminini içermektedir.

Taban zeminin iki ana görevi bulunmaktadır. Bu görevler:

- Tekrarlanan tekerlek yüklerini oluşturduğu, balast ve alt balast tabakalarından taban zeminine iletilen gerilmeleri, mukavemetinde bozulma olmadan ve aşırı deformasyona uğramadan taşımak,

- Demiryolu hattı için stabil bir platform sağlarken çevreden gelen değişik etkilere dayanıklı olmak.

4.1.1 Hat performansına Taban Zeminin Etkisi

Li (1994), belirttiği gibi, Demiryolu hattının platformu olarak çalışan taban zemini, hat performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir demiryolu hattının performansı, dört nicelikle tanımlanabilir. Bunlar, hat esnekliği (track resiliency), rayın kalıcı oturmaları, hat stabilitesi ve hat bileşenlerindeki aşınma ve bozulmalardır. Bu dört nicelik, demiryolu hattının tasarımında ve bakımında esas sorunlardır.

4.1.1.1 Hattın Esnekliği

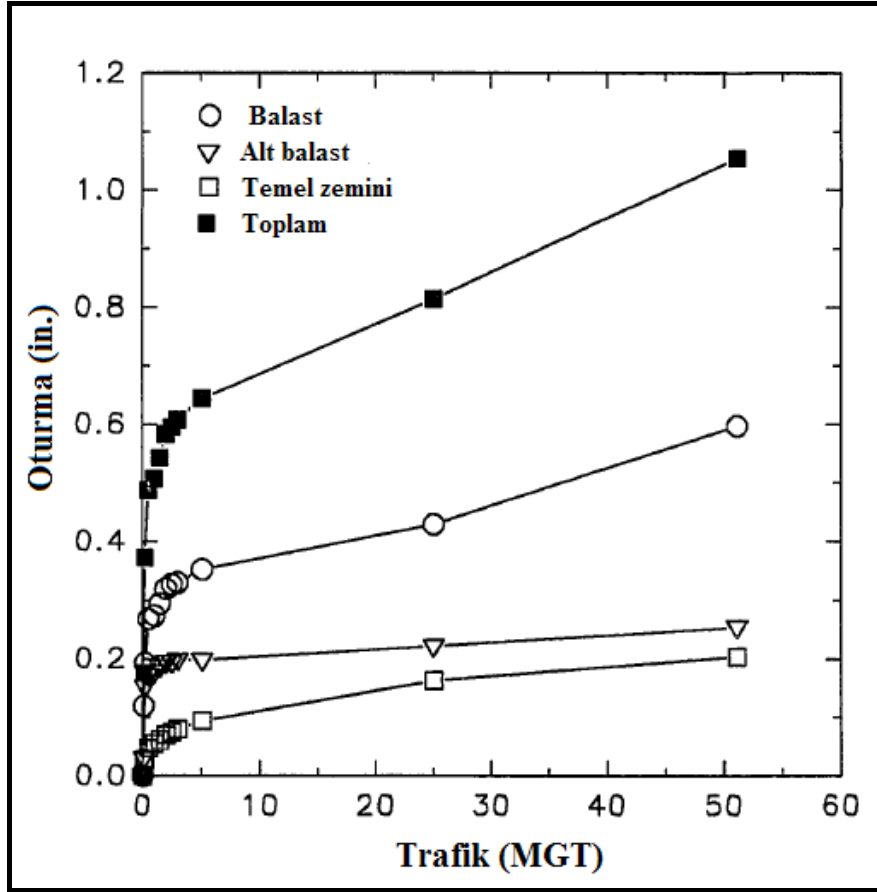
Hattın esnekliği, hat yapısının, tekrarlanan trafik yükü altında gösterdiği elastikliğe göre tanımlanabilir. Hat yapısındaki gerilmelerin dağılımı ve ray yüzeyinin esnek sehim, direkt olarak hattın esnekliğine bağlıdır.

Yatak katsayısı, ray temeli elemanlarının (traversler, bağlantılar, balast, alt balast ve taban zemini) hepsinin karakteristik esnekliklerini temsil eder ve hat rijitliği ise bütün hat sisteminin (ray dahil) taban zemini ile beraber karakteristik esnekliklerini temsil etmektedir. Stewart (1982) ve Sharpe'ın (1983) yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda, rayda görülen esnek ray sehimlerinin, % 10 ile % 30 arasında balast ve alt balast tabakalarına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Toplam sehimin geri kalan kısmının ise, taban zemini malzemelerin elastik deformasyonlarına bağlı olarak meydana geldiğini göstermişlerdir (Li, 1994).

4.1.1.2 Ray Kalıcı Oturmaları

Hat üstyapısı ve altyapısı, her dingil yükü altında esasen elastik olarak davranış gösterir. Buna rağmen, bir süre sonra trafik, rayda kalıcı oturmalar neden olur. Bu oturmalar, bir dereceden sonra, trenin geçişi esnasında güvenliğin sağlanması için bakımı gerektirmektedir. Aşırı ray kalıcı oturmaları hat bozulmalarının başlıca biçimidir. Ayrıca bakım maliyetlerinin büyük kısmını oluşturur ve güvenlik faktörünü azaltır.

Bu sonuçlar, Kolorado Pueblo'da killi kum taban zemini üzerine inşa edilen hattın bir kesiminde yapılan testlerle bulunmuştur. Ray kalıcı deformasyonunu ortaya çıkaran ana sebebinin, balast tabakasının sıkışma ve bozulmalarına bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 4.2' de, her altyapı elemanın toplam ray yüzey oturmalarına katkısı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, kalıcı deformasyonlar tren trafiği (MGT= milyon gros ton) ile artmakta ve ray yüzey oturmasının oluşmasına sebep olan ana katkı balast tabakasıdır.



Şekil 4.2 Pueblo hattında killi kumlu taban zemininde plastik oturmanın dağılımı (Li, 1994)

Buna rağmen, Şekil 4.2'nin işaret ettiği gibi, demiryolu hattı çok güçlü bir taban zeminine inşa edilmiş olmasına rağmen, taban zeminin, ray oturmasına katkısı önemlidir. Taban zeminin toplam hat kalıcı deformasyonuna katkısı, taban zeminin taşıma kapasitesindeki azalmaya göre artacaktır (Li, 1994).

4.1.1.3 Hat stabilitesi

Burada hat stabilitesi, demiryolu hattının altyapısının ve üstyapısının destekleme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır ve bu nedenle demiryolu hattının güvenliği ile ilişkilidir. Taban zemininde bir bozulmanın ortaya çıkması, sonuç olarak hattın yüzeyinde bozulmalara neden olur (Li, 1994).

Mademki, balast ve alt balast malzemeleri genelde taban zeminin mukavemetinde daha yüksek mukavemet değerine sahipse, hat stabilitesinde ki azalmanın esas nedeni taban zemininde oluşan bozulmadır. Bir istisna olarak hattın yatayda stabilize kaybı, balast tabakasının, rayın yatay stabilitesini sağlayamamasından ve yüksek sıcaklığın etkisinden meydana gelir.

Li'e (1994) göre, taban zeminin dayanım kapasitesini etkileyen iki tip bozulma vardır. Bunlar daha ileriki bölümlerde tartışılacaktır. Bunlarda birincisi trafik yükü, hattın ve temel malzemelerinin yükü altında oluşan masif kayma bozukluğudur. Dayanım kapasitesini etkileyen diğer bir hata ise, tekrarlanan yüklerin ortaya çıkardığı artan kayma bozukluğudur. Bu bozulma masif kayma bozukluğu kadar feci değildir. Ancak, hat üzerinde sık bakım ihtiyacı ortaya çıkarır ve taban zemini malzemesi sıkıştığında, balast ve alt balastta karışması taban zemini içinde bir tehdittir. Bu iki kayma bozulması; farklı mekanizmalara sahip olmalarına rağmen, sonuç olarak ikisi de taban zemini malzemesinin mukavemetini azaltan bir etki oluşturur.

4.1.1.4 Hat Bileşenlerindeki Aşınmalar

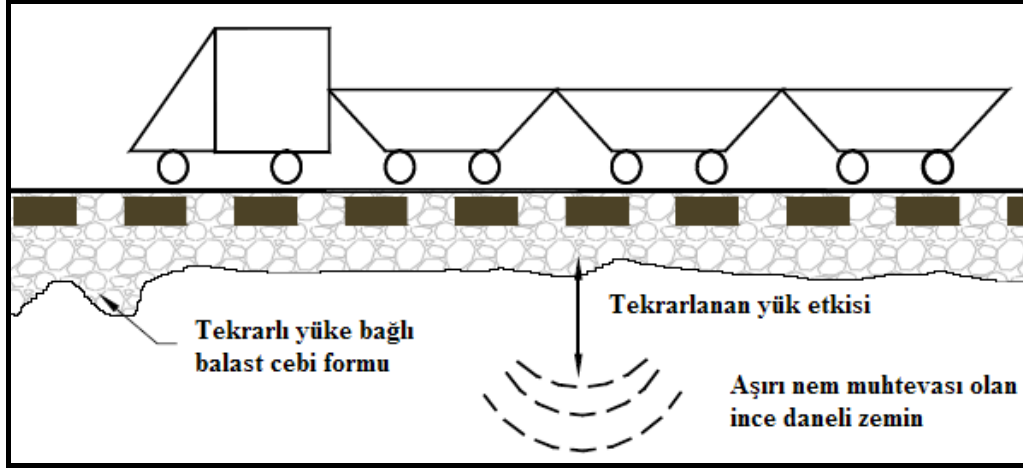
Hat bileşenlerindeki bozulmalar, hattın bakımına yol açan ana nedendir. Balastın temizlenmesi ve ya değiştirilmesi ve aşınmış travers ve rayların değiştirilmesi ana bakım maliyetleri olarak sıralanabilir.

Çeşitli hat yapısı bileşenlerinin bozulmasına neden olan farklı mekanizmalar bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda, balastta oluşan bozulmalara neden, tekrarlanan trafik yükü etkisi altında balastın kırılması ve kendi kendine aşındırması olarak bulunmuştur. Buna rağmen, ince daneli taban zemini parçacıklarının balast tabakasına sızma sonucunda, bu malzemelerin balast yüzeyine sürtünmesi ile balastta bozulmalara neden olmaktadır. Görüldüğü gibi ince daneli taban zemini malzemesi balast üzerinde önemli bozulmalara neden olabilmektedir. Taban zeminin ray ve travers aşınmalarına nasıl etki ettiği ve taban zeminin balastta oluşan kırılmalarda ve aşınmalardaki oranı üzerinde halen çalışılmaktadır. Çalışmalar devam ediyor olsa bile, taban zemininin hat bileşenlerindeki bozulmalar üzerinde önemli bir etkisi olduğuna inanılmaktadır (Li, 1994).

4.1.2 Taban Zemininde Oluşan Bozulmalar

Taban zeminin performansı da demiryolu bozulmalarında kilit rol oynar. Bu doğal zeminin özelliklerinin, birkaç metre içinde önemli değişiklikler uğramasına bağlıdır ve bu etkiyle mevsimsel nem değişiklikleri farklı çökmeler neden olur. Bu olay, tekerlek geçişinin tekrarlanması ya da yük tekrarı ile şiddetlenir.

Şekil 4.3, taban zeminin bozulmasında etkili birkaç neden gösterilmiştir. Tekrarlanan dinamik yükler, çok fazla nem, ince gradasyonlu ve ya kötü kaliteli zemin bozulma nedenleri içinde sayılabilir (Radampola 2006).



Şekil 4.3 Taban zemini bozulma nedenleri (Radampola, 2006)

Selig ve Waters (2000), taban zemini bozulma türlerini aşağıdaki gibi sıralamışlardır:

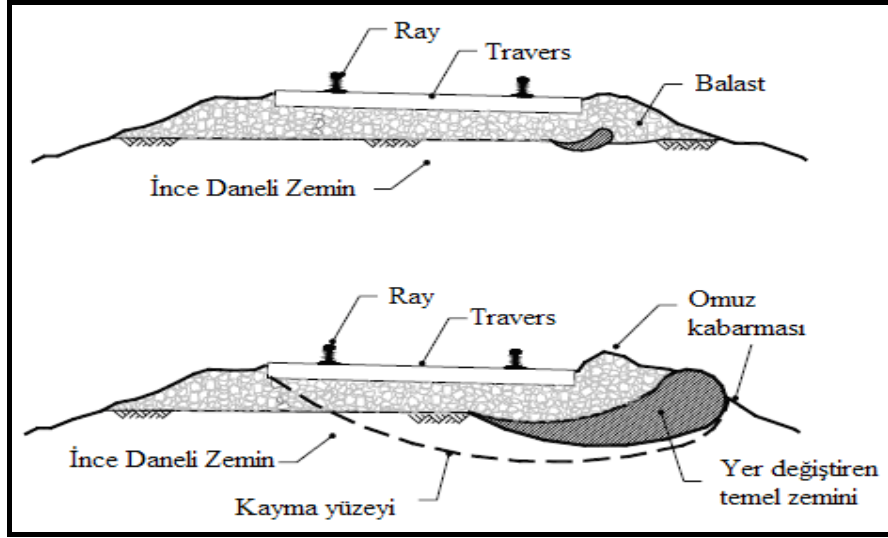
- Masif kayma bozukluğu,
- Artan kayma bozukluğu,
- Aşırı plastik deformasyon,
- Konsolidasyon oturması,
- Balast boşluklarına toprak parçacıklarından oluşan çamurun pompalanması ile oluşan taban zemini aşınmaları,
- Don şişmesi ve erime yumuşaması,
- Nem değişimi ile oluşan büzülme ve kabarmadır.

4.1.2.1 Masif Kayma Bozuklukları

Masif kayma bozuklukları, yolun stabilitesinin tamamıyla bozulmasıyla oluşur ve bunlar muhtemelen kuvvetli yağmur yağışları gibi olağandışı durumlarda söz konusu olur. Ayrıca masif kayma bozuklukları yarmaların kazılmasından sonrada ortaya çıkabilir. Bunun nedeni, zamanla şevlerdeki negatif boşluk basıncının yayılması ve bunun sonucu olarak mekanizmadaki kayma mukavemetinin azalması ile oluşur. Bu kesimlerde, yarmanın yapılması ile şevlerde bozulmaların ortaya çıkması arasında belli bir süre olabilir. Bu süre, zeminin geçirgenliği ve kayma özelliklerine göre bir gün, bir ay ve ya bir yıl arasında değişebilir. Özellikle bu sorun, ağırlıklı olarak aşırı konsolidasyonlu killerde, akıcı killerde, gevşek kumlarda görülür (Radampola, 2006).

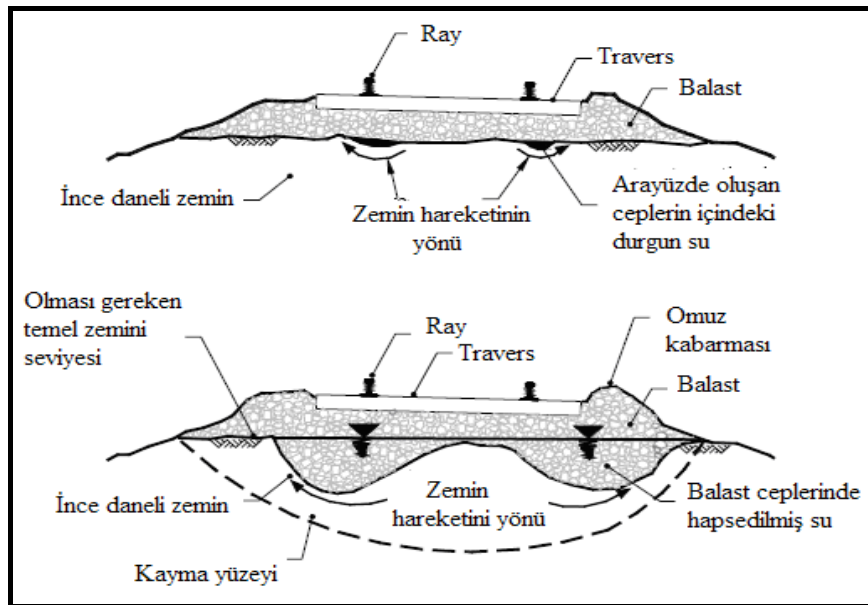
4.1.2.2 Artan Kayma Bozukluğu

Artan kayma bozukluğu, tekrarlı yüklerin neden olduğu bütün taban zemini tabakasının ilerlemiş şekilde sıkışması ve konsolidasyonu ile meydana gelmektedir (Şekil 4.4). Bu olay, ıslak kil gibi yumuşak killerde rastlanan tipik bir olaydır. Sıklıkla bu bozulma türü, düzgün olmayan hat oturmalarının ve istenmeyen hat geometrisi değişikliklerinin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. (Radampola, 2006) değindi gibi, artan kayma bozukluğu, masif kayma bozukluğuna bağlı zemin gerilme seviyesinin düşmesi sonucu da ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 4.4 Artan kayma bozukluğu (Radampola, 2006)

Bununla birlikte artan kayma bozukluğunun düşey bileşeni balast tabakasında bozulmalara yol açar. Balast tabakasında bu bozulma, balast cebi adı verilen bir durum olarak ortaya çıkar (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Balast cebi oluşumu (Radampola, 2006)

4.1.2.3 Aşırı Plastik Deformasyon

Artan kayma bozukluğu ile beraber artan kayma deformasyonuna rağmen, aşırı plastik deformasyon temel zemin bozulmaları içinde ayrı bir başlık altında incelenmektedir. Aşırı plastik deformasyon, artan kayma deformasyonunu olduğu gibi tekrarlı trafik yükünü taban zemininde oluşturduğu sıkışma ve konsolidasyondan meydana gelen deformasyonları da içermektedir.

Taban zemininde, toplam plastik deformasyonun ilerlemesi, tekrarlanan yükün bir fonksiyonudur. Esasen normal koşullarda, tekil bir dingil yükünün oluşturduğu plastik deformasyon, önemsemeye değmez değerdedir. Buna rağmen, tekrarlı yüklerin tekerrür sayısı yükseldikçe, taban zemininde oluşan plastik deformasyonda önemli seviyelere ulaşır. Bundan başka, plastik deformasyonun gelişmesi genellikle hat boyunca ve boydan boya geçen uniform olmayan şekildedir. Bu yüzden, aşırı plastik deformasyon, hat geometrisinde istenmeyen bozulmalara yol açar (Radampola, 2006).

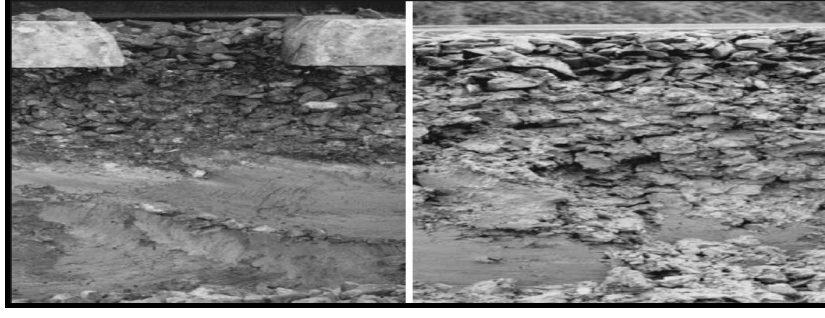
4.1.2.4 Konsolidasyon Oturması

Taban zemini yüksek bir dolgu olduğu zaman, dolgunun temelindeki gerilme, dolgunun ve demiryolu hattının ağırlığının artmasına bağlı olarak artar. Yükselen ağırlığın sızıntı boyunca dağılmasıyla oluşan aşırı boşluk basıncı, zeminin boşluk hacminin azalmasından dolayı taban zemini oturma yapacaktır.

Daneli zeminlerde, aşırı boşluk basıncının dağılımı daha hızlıdır, bu yüzden oturma, dolgu ve hattın yapımı esnasında tamamlanır. Kohezyonlu zeminlerde, aşırı boşluk basıncının uzaklaşması genellikle yavaş olur, böylece dolgunun oturması hattın inşasının yapımında çok sonraya sarkar. Bu yüzden, konsolidasyondan meydana gelen oturmalar, sadece kohezyonlu temel zeminlerinde önemli bir sorundur.

4.1.2.5 Aşınma ve Çamur Pompalanması

Sürtünerek yırtınma (aşınma), altyapının üzerinde bulunan suyun neden olduğu, balast-taban zemini ara yüzünde bir bulamaçlaşmanın oluşması durumudur. Trafik, bulamacın yüzeye pompalanmasına ve yana doğru hareketine, böylece drenaj sisteminin tamamıyla bloke edilmesine neden olabilir. Bu tür hatalar, aynı zamanda, altyapının aşırı yüklendiği yumuşak zeminlerde, sonradan bulamaçlaşmaya yol açan su ceplerinin olduğu yerlerde sık olarak gözlenebilir. Bulamaçlaşma ve pompalanma hataları, taban zemini ile balast arasına daneli bir örtü tabakasının döşenmesi ile önlenabilir. Tipik bir bulamaçlaşma ve çamur pompalanma noktası Şekil 4.6'da gösterilmiştir (Radampola, 2006).



Şekil 4.6 Tipik bir bulamaçlaşma ve çamur pompalanması

4.1.2.6 Don Şişmesi-Erime Yumuşaması

Don şişmesi, dona duyarlı zeminler içinde bulunan serbest suyun, sıcaklığa bağlı olarak zeminin içinde donmasından meydana gelir. Dona duyarlı zeminler, gerekli kılcal boşluklara sahip ve ince daneli zeminlerdir. Bu kılcallar arasında rahat bir şekilde hareket eden su, düşük sıcaklıklarda buralarda donarak, zeminin şişmesine neden olur. Dona karşı duyarlı zeminler, silt, siltli kum ve düşük plastisiteli killeri içerirler. Boşluk suyu donduğu ve zamanla buza dönüştüğünde zemin parçacıklarını yukarıya doğru iter ve zeminin hacminde önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu durumda, demiryolun hattında önemli bir düşey diferansiyel yer değiştirmeye yol açar. Daha sonra, buz eridiği zaman, zeminin içinde kalan fazla su, taban zeminin mukavemetinde önemli bir düşüşe neden olur. Erime yumuşaması esnasında, ağır plastik deformasyonun sonucu olarak, hat geometrisinde hızlı bozulma ve hat bileşenlerinde hızlı hasarlar meydana gelir.

Oluşacak don şişmesi problemlerini önlemek iyi bir drenaj sistemi ile su kaynağını limit içinde tutmakla mümkün olabilir. Yeterli bir kalınlıkta dona duyarlı olmayan zeminlerle (balast ve alt balast tabakasının birleşimi) dona karşı zeminlerin yalıtımı yapılabilir, bu ayrıca taban zeminin donma sıcaklığına düşmesini engelleyebilir (Li, 1994).

4.1.2.7 Nem Değişimi İle Oluşan Kabarma ve Büzülme

Bazı plastik temel zeminleri; içlerine su girdiğinde, oldukça kabarır ve suyun bünyeden çıkmasıyla büzülür. Bu tür zeminler üzerine inşa edilen hat geometrisinde, zeminin hacminde meydana gelen kabarmanın ve büzülmenin neden olduğu değişimler yüzünden önemli değişimlerle karşı karşıya kalır.

Zeminin kabarmasından ve büzülmesinden meydana gelen sorunların önlenmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar, demiryolu hattının altında bulunan hacmi genişleyen zeminin, sıkıştırma kontrolü yapılmış, ön ıslatmalı, bir rutubet bariyeriyle yalıtılmış ve kimyasal stabilizasyonu yapılmış zeminlerle yer değiştirmesidir (Li, 1994).

4.2 Taban Zemininin Taşıma Kapasitesine Göre Sınıflandırılması

UIC Code 719R'e (1994), göre taban zeminin sınıflandırılması için şunlar gerekir:

- Taban zeminin oluşturan her bir zemin tipinin kalitesinin belirlenmesi,
- Tüm taban zemininin (hazırlanmış taban zemini ve mevcut taban zeminin) taşıma kapasitelerinin belirlenmesi.

4.2.1 Taban Zemininin Geoteknik Olarak Sınıflandırılması

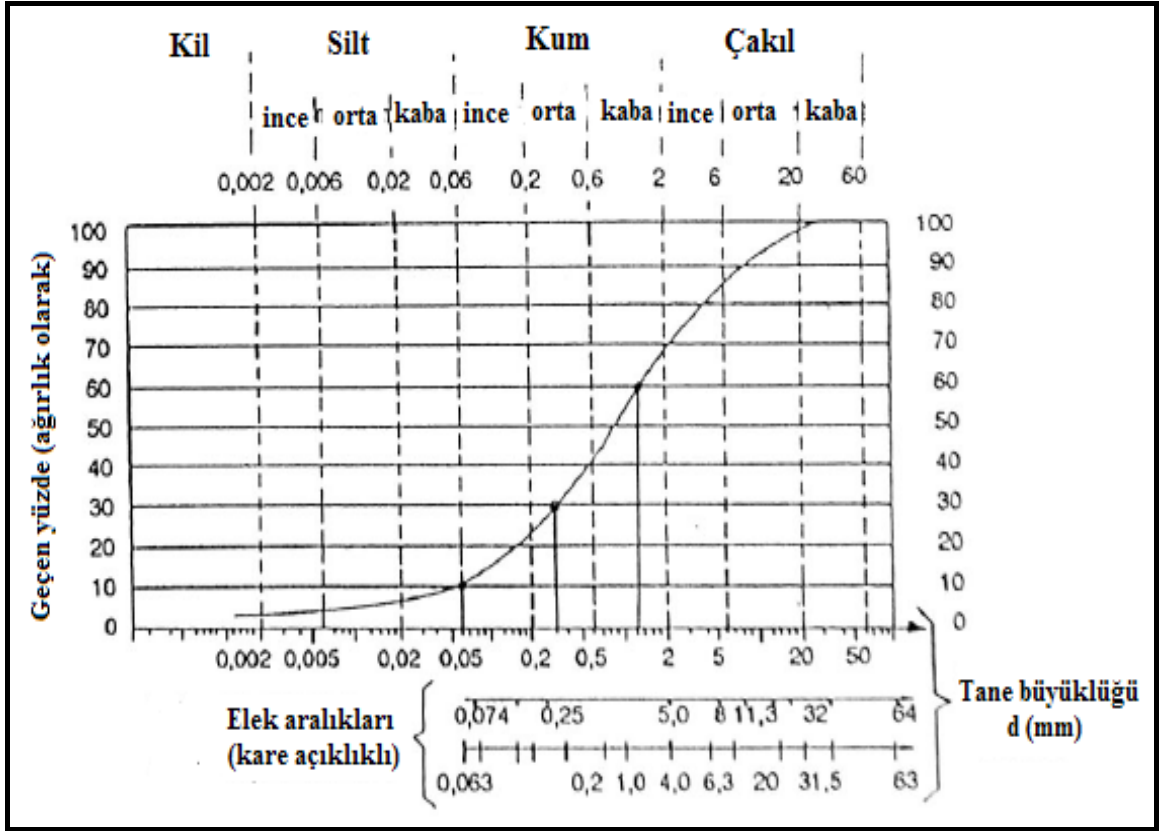
Zeminlerin geoteknik olarak sınıflandırmak için kullanılan metotlar, ülkeden ülkeye çeşitlilik göstermektedir. En çok kullanılan sınıflandırma aşağıda belirtilmiştir (UIC Code 719R, 1994).

- Mineral zeminler, şunlara bağlı olarak alt sınıflara ayrılabilir
 - Dane büyüklüğü
 - Plastisite
 - Suya duyarlılık
 - Mineral içeriği
- Organik zeminler
- Karışık zeminler

4.2.1.1 Mineral Zeminler

Mineral zeminler, dane büyüklüğüne, plastisitesine, suya duyarlılığına ve mineral içeriğine göre dört farklı biçimde sınıflandırılabilir.

Dane büyüklüğüne göre sınıflandırma, bir mineral zemin, eleme ve/veya çökeltme testlerinden elde edilen dane dağılımı eğrisi ile tanımlanabilir (Şekil 4.7). Uluslararası Zemin Mekanikçileri ve Temel Mühendisleri Birliği (I.S.S.M.F. E), dane büyüklüğüne göre mineral zeminleri, Şekil 4.7'de verilen dane boyutu eğrisine göre sınıflanmasını tavsiye etmektedir. Çeşitli ülkelerdeki demiryolu firmaları, tavsiye edilen bu eğriden farklı eğriler kullanarak da bu sınıflandırmayı yapabilmektedir.



Şekil 4.7 Sınıflandırma için granülometri eğrisi örneği (UIC Code 719R, 1994)

Çizelge 4.1 I.S.S.M.F. E'nin tavsiye ettiği dane boyutu sınıflandırılması (UIC Code 719R, 1994)

Dane Sınıfı	Dane Boyutu (mm)
Kil	< 0.002
Silt	0.002 - 0.006
İnce	0.002 - 0.006
Orta	0.006 - 0.02
Kaba	0.02 - 0.06
Kum	0.06 - 2
İnce	0.06 - 0.2
Orta	0.2 - 0.6
Kaba	0.6 - 2
Çakıl	2 - 60
İnce	2 - 6
Orta	6 - 20
Kaba	20 - 60
Kaba Çakıl	60 - 200
İri	> 200

Bir mineral zemin, dane büyüklüğüne göre sınıflandırıldığında, zemin içinde baskın durumda bulunan dane boyu ile tanımlanır. Diğer sıfatlar ise, zeminin içeriğindeki diğer sınıfları temsil eder. Bu açıklamaya bağlı olarak, Şekil 4.7’de ki temsil edilen zemin, “çakıllı ve az siltli kum” olarak tanımlanır. Dane büyüklüğü dağılımına bağlı olarak aşağıdaki katsayılar tanımlanabilir.

- Üniformluk katsayısı (C_U)
- Eğrilik katsayısı (C_C) (curvature coefficient)

Üniformluk katsayısı (C_U) kavramı tanecikli zeminlerin kalitesini değerlendirmede çok önemlidir. Özellikle zeminin sıkıştırma için uygunluğunun belirlenmesinde ve hat yatağı tabakalarının taşıma kapasitesinin belirlenmesinde önemlidir.

Daneli zeminlerin iyi derecelendirilmiş olarak göz önüne alınması için, $C_U > 6$ olması gerekir. Mevcut demiryolları, örtü tabakasında kullanılacak daneli zeminler için, bu değerden daha büyük bir değer istenmektedir.

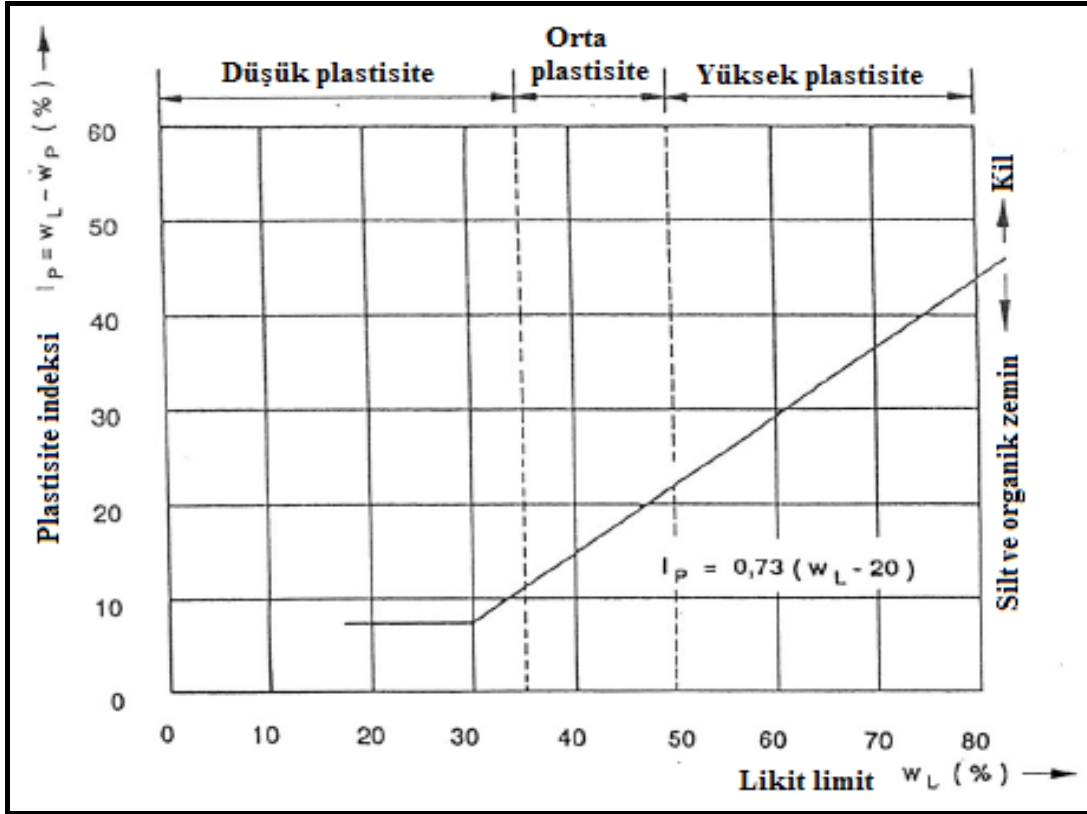
Her ne kadar demiryollu yapımında göz ardı edilse de, yuvarlık katsayısı (C_C) da göreceli olarak önemlidir. Bir zemine iyi derecelendirilmiş denilebilmesi için, $1 < C_C < 3$ olması gerekir. Bu değer, kumlu- çakıl ve kum içinde geçerlidir.

Plastisiteye göre sınıflandırmada, ince kohezyonlu zeminlerin daha anlamlı bir şekilde sınıflandırılması için, genellikle Atterberg limitleri kullanılır (bu test tane büyüklüğü 0 ile 0,4mm arasında olan zeminlerde uygulanır). Atterberg limitleri;

- Likit limit (W_L),
- Plastik limit (W_P).

olmak üzere iki adettir.

Küçük bir oranda olsa bile plastisitesi abacağına göre (Şekil 4.8), Çizelge 4.2’de belirtilen organik malzemelerin yüzdesi, ince zeminlerin sınıflandırılmasını etkiler.



Şekil 4.8 İnce daneli zeminlerin sınıflandırılması için, plastisite abağı (UIC Code 719R, 1994)

Mineral zeminlerin suya duyarlılığına göre sınıflandırılmasında, kilin suya karşı duyarlılığı Methylene mavi testi (mavi değer V_b) ile karakterize edilir. Benzer olarak suya karşı duyarlı zeminler, içerdikleri kil muhtevası (V_{bs}) tarafından karakterize edilir. V_{bs} değeri 0,1'den küçükse ($V_{bs} < 0,1$) zemin suya duyarsızdır denir, eğer V_{bs} değeri 0,2'den büyükse ($V_{bs} > 0,2$) zemin suya duyarlıdır denir.

Mineral içeriğine göre sınıflandırma, dane boyutuna ve plastisiteye ek olarak sınıflandırma yapmak için kullanılan bir referanstır. Örnek olarak; kuvarslı kum, olivinli kum, CaCO_3 içeriğine bağlı olarak ince marn verilebilir (UIC Code 719R, 1994).

4.2.1.2 Organik Zeminler

Organik zeminler, bitkilerin ve ya hayvan kalıntılarının çürümesi ile meydana gelirler (Çizelge 4.2). Ana grupları: üst toprak, turba (çürümüş bitkilerden oluşan yer kömürü), organik çamurdur (ayrıca gyttja, dy ve sapropel).

Mineral zeminlere benzer şekilde, organik zeminlerde, nem muhtevası, likit limit, plastisite indeksi, mukavemet ve sıkıştırılabilirlik için test edilebilir.

Üst toprak, yapay ve doğal humusu karışımının çeşitli oranlarda mineral zeminle karışımından oluşmaktadır.

Turba, bitkilerin kalıntılarının çeşitli katmanlar oluşturmamasından meydana gelmiştir ve çürüme derecelerine göre sınıflandırılır. Ama bu sınıflandırma demiryolu uygulamalarını çok az ilgilendirdiğinden burada verilmemektedir.

Organik çamur, organik zeminlerin suyun altına çökmesi ve içinde bulunan bitki ve canlı maddelerin çözünmesiyle oluşur. Organik çamur sıklıkla kum, kil ve ya kireç taşı ile karışırlar (UIC Code 719R, 1994).

4.2.1.3 Karışık Zeminler (mineral ve organik zeminlerin karışımı)

Karışık zeminler, Çizelge 4.2' de verilen tabloya göre sınıflandırılır. Organik maddeler içeren zeminlerin sınıflandırılması, Şekil 4.8' e göre de yapılabilir.

Çizelge 4.2 Organik ve mineral zeminlerin karışımlarının sınıflandırılması (UIC Code 719R, 1994)

Zeminlerin Tanımı	Organik İçeriğin Kuru Ağırlığının Yüzdesi
Mineral zeminler	organik içerik $\leq$ % 1
Organik maddeler içeren zeminler	% 1 < organik içerik $\leq$ % 5
Mineral/organik zeminlerin karışımı	% 5 < organik içerik $\leq$ % 30
Organik yağlar	organik içerik $\geq$ % 30

4.2.2 Taban Zemini Kalite Sınıfları

UIC Code 719R'de (1994) belirtildiği gibi, bir zeminin kalitesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Zeminin geoteknik özellikleri; Mineral zeminler, organik zeminler, karışık zeminler.
- Yerel hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar; bu koşullar aşağıdaki durumlarda taşıma kapasitesini etkilemeleri açısından olumlu kabul edilebilirler:
 - o En üstteki zemin tabakası, en yüksek yeraltı suyu seviyesinden olumsuz etkileneceği düzeyin üzerinde ise (bu düzey en kötü hava koşullarındaki ve drenajın bulunmadığı durumlar için değerlendirilmelidir.),
 - o Altyapı içinde, düşey, boyuna ve enine doğrultularda hiçbir doğal su akıntısı bulunmuyorsa,
 - o Yağış suları taban zemininden doğru biçimde uzaklaştırılıyor, boyuna ve enine drenaj sistemi doğru olarak çalışıyorsa.

Bu üç ölçütten herhangi birisi bile sağlanmıyorsa, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar zayıf olarak değerlendirilir.

Yukarıdaki bilgiler temel alınarak, zeminlerin kalite sınıfı, Çizelge 4.3-4’de, “QSi” sınıflandırılması ile belirlenebilir.

Çizelge 4.3 Zemin kalite sınıfları (UIC Code 719R, 1994)

Kalite Sınıfı	Tanımlama
QS0	<i>Uygun olmayan zeminler:</i> Bu zeminlerle iyi bir altyapı oluşturulamaz, bu nedenle iyileştirilmeleri gerekir (belirli bir derinliğe kadar daha kaliteli bir zeminle değiştirmek, bağlayıcı malzemelerle stabilizasyon, geotekstil kullanmak, kazıklarla kuvvetlendirmek vb.). Bu nedenlerle, yol yatağı tabakalarının boyutlandırılmasında bu zemin türleri kullanılmamıştır.
QS1	<i>Zayıf zeminler:</i> Bunlar “iyi bir drenajın sağlanması” ve “iyi düzeyde bir bakım uygulanması” koşullarıyla, doğal halleriyle kullanılabilirler. Bunlar için uygun yöntemlerle (örn. Bağlayıcı katkısı ile stabilizasyon) kalite artırımı da düşünülebilir.
QS2	<i>Orta düzeydeki zeminler</i>
QS3	<i>İyi zeminler</i>

Çizelge 4.4 Değişik kalite sınıflarındaki zemin özellikleri (UIC Code 719R, 1994)

Zemin Kalite Sınıfı	Zemin Tipi (Geoteknik Sınıflandırma)	
QS0	0.1	Organik zeminler
	0.2	% 15'den fazla (1) ince dane içeren ve yüksek su kapsamı olan yumuşak zeminler: bu nedenle sıkılamaya uygun değildirler
	0.3	Tiksotropik zeminler (2) (örn: akıcı kil)
	0.4	Çözünebilir malzeme içeren zeminler (örn: kaya tuzu ve jips)
	0.5	Kirli zemin (örn: endüstriyel atıklar)
	0.6	Karışık malzemeli / organik zeminler (2)
QS1	1.1	% 40'dan fazla (1) ince dane içeren zeminler (0.2 de tanımlanan zemin türlerinin dışındakiler)
	1.2	Hava etkisine çok duyarlı kayalar Örn.: – Kuru birim hacim ağırlığı (ρ_d) < 1,7 ton/m ³ ve yüksek gevrekliğe sahip tebeşir – Marn (kireçli kil) – Hava koşullarından etkilenmiş Şeyl (killi şist)
QS1(3)	1.3	% 15 – 40 (1) ince dane içeren, 0.2 de tanımlanan zemin türlerinin dışındaki zeminler
	1.4	Hava etkisine orta düzeyde duyarlı kayalar Örn.: – Kuru birim hacim ağırlığı (ρ_d) < 1,7 ton/m ³ ve gevrekliği az olan tebeşir – Hava koşullarından etkilenmemiş Şeyl (killi şist)
	1.5	Yumuşak kaya Örn.: Microdeval wet (MDE) > 40 ve Los Angeles (LA) > 40
QS2 (4)	2.1	% 5 – 15 (1) ince dane içeren zeminler
	2.2	% 5 'den az oranda (1) ince dane içeren üniform zeminler ($C_u \leq 6$)
	2.3	Orta sert kaya Örn.: $25 < MDE \leq 40$ ve $25 < LA \leq 40$
QS3	3.1	% 5 'den az oranda (1) ince dane içeren iyi derecelenmiş zeminler
	3.2	Sert kaya Örn.: Eğer $MDE \leq 25$ ve $LA \leq 30$ ise
(1) Bu yüzdelere, 60 mm gözlü elekten geçen zeminler için yapılan dane dağılımı (granülometri) analizine göre belirlenmiştir, (2) Bazı demiryollarında bu zeminleri QS1 sınıfı içinde kabul ederler, (3) Bu zemin türleri, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise QS2 sınıfına sokulabilir, (4) Bu zemin türleri, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise QS3 sınıfına sokulabilir.		

4.2.3 Taban Zeminini İçin Taşıma Kapasitesi Sınıfları

UIC Code 719R'e (1994) göre, taban zemininin taşıma kapasitesi şu faktörlere bağlıdır:

- Dolgu ya da yarma taban zemininin kalite sınıfına,
- Varsa, iyileştirilmiş taban zemin kalitesi ve tabaka kalınlığıdır.

Bu sayılan faktörlere göre, üç taşıma kapasitesi sınıfı söz konusu olmaktadır:

- **P1:** Zayıf taban zemin

- **P2:** Orta taban zemini
- **P3:** İyi taban zemini

Sınıflandırma yöntemleri değişik demiryollarında farklı olup, Çizelge 4.5’de bunlardan birisi gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 Taban zemini için taşıma kapasitesi sınıfları (UIC Code 719R, 1994)

Zeminin Kalite Sınıfı	Altyapı İçin Gerekli Taşıma Kapasitesi Düzeyi	Hazırlanmış Altyapı Tabakası Özellikleri	
		Kalite Sınıfı	Minimum kalınlık “e _f ” (m)
QS1	P1	QS1	---
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	---
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	---

4.2.4 Zeminlerin Donmaya Duyarlılıkları

UIC Code 719R’de (1994), zeminleri dona duyarlılıklarına göre üç sınıfa ayrılmıştır:

- Dona duyarlı olmayanlar,
- Dona duyarlı olanlar,
- Dona çok duyarlı olanlardır.

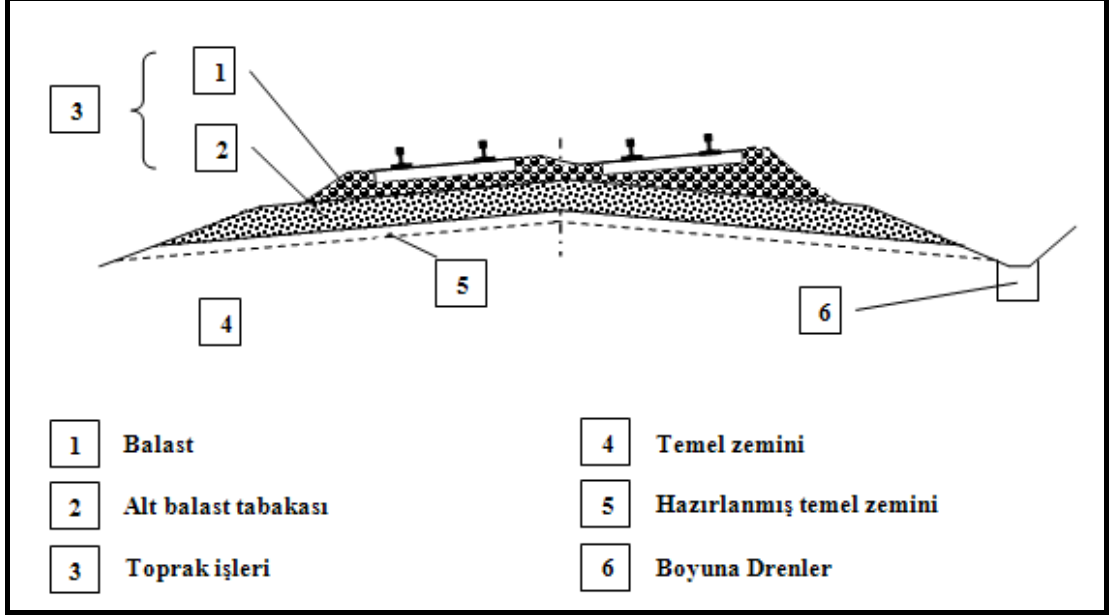
Dona duyarlı olmayan zeminler, donduklarında ve çözüldüklerinde yol geometrisinde beklenmeyen bir bozukluğa neden olmazlar. Diğerlerinde ise, belirli sıcaklık koşullarında ve su içeriklerinde, yol geometrisinde beklenmeyen bozukluklar oluşabilir. Zemin türleri ve dona karşı duyarlılıkları Çizelge 4.6’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Zeminlerin dona duyarlılıkları (UIC Code 719R, 1994)

Dona duyarlılık düzeyi	Zemin türü
Dona duyarlı değil	Kum ve çakıl
Dona duyarlı olanlar	Kil
Dona çok duyarlı	Silt

4.3 Yol Yatağı Tabakaları (Altyapı Tabakaları)

Yol yatağı tabakaları, özellikleri ve kalınlıkları ile yol mesnet rijitliği, yol geometrisinin ve drenaj sisteminin korunması açısından, yol performansı üzerinde önemli bir rol oynarlar. “Yol Yatağı Tabakaları (YYT) : track-bed layers” terimi, kırma taştan oluşmuş balast, kum-çakıl malzemeden oluşan alt balast ve taban zemini tabakalarını kapsar (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Yol yatağı tabakaları (YYT) (UIC Code 719R, 1994)

4.3.1 Balast Tabakası

Raylarla traverslerin bağlantı elemanları ile birleştirilmesiyle oluşturulan yol çerçevesinin altına döşenen ve çapları genellikle 20 – 70 mm arasında olan taş danelerden oluşturulan yol yatağı tabakasının en üst katmanı olan balast tabakasının görevleri şunlardır (Ionescu, 2004):

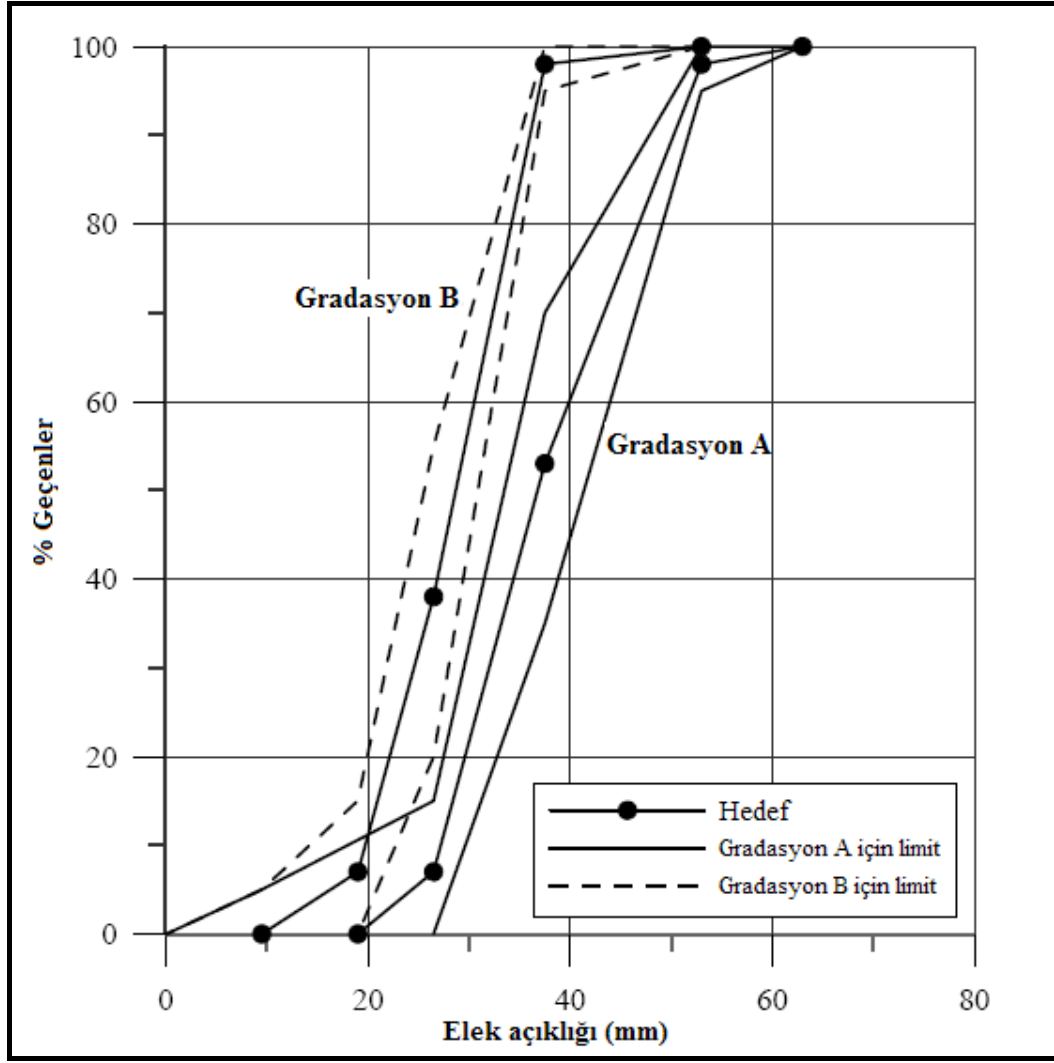
- Taşıtların oluşturdukları ekiler ve dış etkiler altında zorlanan yol çerçevesinin şekil ve yer değiştirmesine engel olmak,
- Travers tabanları tarafından iletilen yükleri güvenle karşılamak, kısmen azaltmak ve geniş bir yüzey boyunca alt tabakalara iletmek,
- Yol çerçevesine elastik bir yatak görevi yaparak, titreşimleri ve gürültüyü sönümlemek, seyir konforunu arttırmak,
- Üstyapıya gelen yüzeysel suların, en hızlı şekilde drenajını sağlamak,
- Üstyapı elemanlarına zarar veren yabancı bitkilerin büyümesine engel olmaktır.

Balast tabakasının bu görevleri yerine getirebilmesi için, sahip olması gereken özellikler aşağıda özetlenmiştir (Ionescu, 2004):

- Daneler, gerek travers tabanları, gerek birbirleri ile yüksek sürtünme oluşturabilmeleri, tabaka halinde yüksek bir kayma dayanımı gösterebilmeleri için keskin kenarlı ve köşeli olmalıdır,
- Balast daneleri darbe etkisinde kırılmaya, sürtünme etkisinde aşınmaya ve donma etkisinde parçalanmaya dayanımı yüksek olan kayalardan elde edilmelidir,
- Danelerin su emmesi belirli sınırların altında olmalıdır,
- Elastik yatak ve su geçirgenliği görevleri için, dane çapları belirli bir dağılıma (granülometriye) uygun oranlarda bulunmalıdır,
- Balast malzemesi yola döşenmeden önce kil, silt gibi ince daneli malzemelerden arındırmak için basınçlı ve bol su ile yıkanmış olmalıdır.

Sıklıkla balast malzemelerinin seçiminde, malzemeye ulaşılabilirlik ve maliyet ilk göz önünde tutulan kriterlerdir. Balast malzemesi granit, bazalt gibi volkanik kayalar ile, silisli kireç taşı, sert kum taşı ve sert kalker taşlarının belirli dane çaplarında kırılmasıyla elde edilir (Ionescu, 2004). İri çakıl taşları da kırılarak balast malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak küresel, oval yüzeyli taşları kullanmaktan sakınılmalıdır. Taşların en az basınç dayanımları en az 180 – 200 N/mm² (1800 – 2000 Kg/cm²) olmalıdır. Kalınlıkları 20 mm’nin altında ve uzunlukları 90 mm’nin üzerinde olan dane miktarlarının, toplam ağırlığa göre oranları % 15’in üzerine çıkmamalıdır.

Dünyadaki demiryolu ile uğraşan otoriteler arasında, optimum balast özellikleri (dane dağılımı, dane büyüklükleri, şekil, sertlik, aşınma dayanımı ve mineral bileşeni) konusunda bir fikir birliği bulunmamasına rağmen ortak görüş, hangi balast türü en iyi hat performansını sağlayacak ise onu seçilmesidir. Bununla birlikte, Şekil 4.10 ve Çizelge 4.7’de, balast tabakasını oluşturan malzemenin, nasıl bir dane boyutu dağılımına sahip olması gerektiği, Queensland Rail (QR) kullanılan ve Avrupa Demiryolları Hattı Şartnamesi’nin (RT/CE/S/006 Issue) belirttiği balastlar için dane büyüklükleri dağılımı örneklenmiştir. Şekil 4.10’da gösterilen “Gradasyon A” beton traverslerle, “Gradasyon B” ise çelik traverslerle beraber kullanılmak için tasarlanmıştır (Radampola, 2006).



Şekil 4.10 Queensland'in kullandığı balast tabakası için granülometrisi (Radampola, 2006)

Çizelge 4.7 Avrupa Demiryolları Hattı Şartnamesi'ne uygun balast granülometrisi (Lim, 2004)

Kare Açıklıklı Elek (mm)	Elekten Geçenlerin Toplam %
63	100
50	70-100
40	30-65
31,5	0-25
22,4	0-3
32-50	≥ 50

Çizelge 4.8 de balastlı bir demiryolu ile balastsız bir demiryolunun çeşitli nicelikler bakımından karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 4.8 Balastlı ve balastsız demiryolunun karşılaştırılması (Mittal vd.)

No	Açıklama	Balastlı Hat	Balastsız Hat
1	Bakım	Geometri için sıklıkla bakım gerekmektedir.	Geometri için sıklıkla bakım gerekmemektedir.
2	Maliyet karşılaştırması	Düşük yapım maliyeti, yüksek bakım maliyeti.	Yüksek yapım maliyeti, düşük bakım maliyeti.
3	Elastikiyet	Balasttan kaynaklanan yüksek elastikiyet.	Elastikiyet, kullanılan kauçuk mesnetlere ve diğer yapay malzemelere bağlı.
4	Sürüş konforu	250-280 Km/sa arasında iyi sürüş konforu.	250 Km/sa üzerindeki hızlarda mükemmel sürüş konforu.
5	Kullanım ömür	Kötü kullanım ömrü.	İyi kullanım ömrü.
6	Stabilite	Zamanla hem boyuna hem de yanal yönlerde “yüzer” duruma gelebilir.	Böyle bir problem yaşanmaz.
7	Yanal direnç	Kurbalarda dengelenmemiş boyuna ivme sınırlıdır.	Yüksek hızlarda dahi yüksek yanal dirence sahiptir.
8	Gürültü	Yüksek gürültü.	Düşük gürültü ve titreşim sıkıntısı.
9	Balastın yayılması	Balast yüksek hızlarda yayılabilir, ray ve tekerleklerde ciddi hasarlara neden olur.	Raylarda ve tekerleklerde hasar oluşmaz.
10	Geçirgenlik	Balast malzemenin arasına dolabilecek taban zemini parçacıkları ile kirlenme olur bu da geçirgenliği düşürür.	Yüksek geçirgenlik
11	Köprü / Tünel yapım maliyetleri	Sürekli bir balast tabakasını taşıyacaklarsa, yapım maliyetleri artar.	Balastsız yollarda balastın ölü ağırlığı olmadığından, yapım maliyetleri daha düşüktür.

12	Yapım kalınlığı	Balastlı yolların kalınlığı yüksektir, bundan dolayı tünellerin kesitleri daha büyük olur.	Yüksekliği azaltır.
13	Malzemeye ulaşılabilirlik	Uygun balast malzemesine ulaşım sınırlıdır.	Malzeme problemi yoktur.
14	Toz kirliliği	Balasttan çevreye yayılan toz çevre kirliliğine neden olur.	Daha az çevre kirliliği
15	Bakıma uygulugu	Bakım esnasında trafiğin kesilmesi nedeniyle uygunluğu azdır.	Bakım için gerekli ekipmanların azlığı sayesinde bugünkü ve gelecekteki bakım senaryolarına uygundur.

Dünyada demiryolu şirketleri standart bir balast kalınlığı konusunda fikir birliğine varmış olmamalarına rağmen, Çizelge 4.9 da, farklı ülkelerde kullanılan balast kalınlıkları değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 Farklı ülkelerde kullanılan balast kalınlıkları (Mittal vd.,2007)

NO	Demiryolu Sistemi	Balast Kalınlığı (mm)
1	Avustralya	200–300
2	İngiltere	225–375
3	Fransa	150–350
4	UIC	250–550
5	Japonya	300
6	İsveç Demiryolları	240
7	ABD	300

4.3.2 Alt Balast Tabakası

Balast ve taban zemini arasında bulunan bir yol yatağı tabakasıdır. Demiryolu hattından beklenen performansa bağlı olarak, alt balast tabakası kullanır ve ya kullanılmaz. Kullanılması durumunda bu tabakadan beklenen görevler şunlardır:

- Rijitliği ayarlanarak, yolun taşıma kapasitesini arttırmak ve yukarıdan iletilen yüklerin, taban zemininde daha iyi dağılmasını sağlamak,
- Yolun dinamik performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmak,
- Balast ve taban zemini arasında bir filtre görevi yapmak,
- Yolu erozyona ve dona karşı korumak,
- Yüzeysel suları uzaklaştırmak.

Balast altı tabakası, bir ya da birkaç tabakadan oluşabilir (alt-balast tabakası, dondan koruma tabakası, filtre tabakası).

Alt balast tabakası kullanılmayan altyapı inşaatlarında, altyapının bakımı için, daha fazla gayret gerekmektedir. Çünkü alt balast tabakası, taban zeminini balast tabakasının aşındırıcı etkisinden korur, aşırı yağışlardan sonra oluşabilecek çamur pompalanması olayında, tersine bir filtre gibi çalışır ve en son olarak yükün dağılmasına yardımcı olur (Radampola 2006).

Radampola (2006), alt balast tabakasının oluşturulmasında kullanılabilecek uygun malzemelerin, geniş gradasyonlu doğadan elde edilmiş ve ya işlenmiş kum-çakıl karışımları, geniş gradasyonlu kırılmış doğal agregalar ya da curuf olduğunu belirtmiştir.

Alt balast tabakası, Çizelge 4.10'da verilen gradasona uygun olarak seçilmelidir.

Çizelge 4.10 Alt balast tabakasının dane dağılımı (Railamerica Engineering, 2001)

Elek Açıklığı	2''	1''	3/4''	No.10	No.40	No.200
% Geçenler (Optimum)	100	95	67	38	21	-
% Geçenler (İzin verilebilir)	100	90–100	50–84	26–50	12–30	0–10

Bir demiryolu yol yatağı tabakaları oluşturulurken, taban zemini malzemesinin dane dağılımı, aşağıdaki çizelgedeki (Çizelge 4.11) değerlerden daha küçük değilse alt balast tabakasının kullanılmasına gerek duyulmaz (Railamerica Engineering, 2001).

Çizelge 4.11 Alt balast tabakası gerektirmeyen taban zemini dane dağılımı (Railamerica Engineering, 2001)

Ağırlıkça Geçenlerin Yüzdesi	Elek Açıklığı (İnç)	Dane Boyutu (mm)
0	200	0,08
20	100	0,16
38	60	0,26
64	40	0,42
11	20	0,85
100	10	1,08

Demiryolunun inşa edileceği taban zemini gradasyonu, yukarıda verilen dağılımdan düşük ve Çizelge 4.12’de verilen dağılımdan daha ince değilse, 20cm alt balast yerleştirmek gerekmektedir. Taban zemini dağılımı, Çizelge 4.12’de ki dağılımdan daha küçük değerlerde ise alt balast kalınlığının 30cm olması uygundur (Railamerica Engineering, 2001).

Çizelge 4.12 Alt balast tabakası gerektiren taban zemini dane dağılımı (Railamerica Engineering, 2001)

Ağırlıkça Geçenlerin Yüzdesi	Elek Açıklığı (İnç)	Dane Boyutu (mm)
19	200	0,08
74	100	0,16
92	60	0,26
100	40	0,42

Dünyada öne çıkan bütün demiryolu şirketleri, balast tabakasının altına farklı kalınlıklarda alt balast tabakası yerleştirmektedir. Çizelge 4.13’de, farklı ülkelerde kullanılan alt balast tabakası kalınlıkları gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 Farklı ülkelerde kullanılan alt balast kalınlıkları (Railamerica Engineering, 2001)

No	Demiryolu	Alt Balast Kalınlığı
1	Avustralya	150
2	İngiltere	Değişken
3	Fransa	Değişken
4	UIC	450 mm kadar değişir
5	Japonya	200
6	İsveç	90
7	ABD	300

4.3.3 Toprak İşleri

Toprak işleri, bir mühendislik projesinin gerçekleştirilmesi amacıyla doğal arazi yüzeyinde gerekli düzlemeler için yapılan işlemlerin tümünü içeren bir inşaat mühendisliği terimi olarak tanımlanabilir (Evren, 2001).

Toprak işleri, birçok yapının ve özellikle ulaşım yollarının yapımında önemli bir yere sahiptir. Bu tez çalışmasında öne çıkan toprak işi, dolgu çalışmalarıdır. Çünkü dolgu çalışmalarının standartlara uygun ve sağlam olması, üstyapıdan gelen yüklerin güvenli bir şekilde karşılanması için çok önemlidir ve tezin içerisinde ayrı bir başlık altında incelenecektir.

UIC'nin hazırladığı 719R kodlu yönetmeliğinde, toprak işlerinin çevresel etkileşimlerine değinmekte ve yapılacak işlerin, aşağıda sıralanan koşulları mümkün olduğunca sağlaması istenmektedir.

- Özellikle yüzeye yakın yapılarda, bölgesel bitkilere zarar vermeyecek malzemeler kullanılması,
- Yapının, hidrojeolojik durumlara etkisinin incelenmesi,
- Arkeolojik bölgelerin mümkün olduğu kadar korunması.

Genellikle toprak işleri çalışmaları iki ana gruba ayrılabilir. Birinci grup, sanat yapıları ile ilgili toprak işleri çalışmalarıdır. Bunlar, oransal olarak küçük hacimli, büyük bir projenin küçük bir kesimini oluşturan fakat birçok kısıt altında gerçekleştirilmesi gereken çalışmalardır. Örneğin tünellerde, çalışma alanı boyutların küçük olması nedeniyle yüksek verimli mekanik araçların kullanımında güçlülüklerle karşılaşılır.

İkinci grup ise, genel toprak işleri çalışmalarıdır. Demiryolu, karayolu, boru hattı gibi ulaşım yolları, triyaj garları, hava alanı yapımlarındaki toprak işleri çalışmalarıdır. Büyük hacimlidirler fakat teknik açıdan özel yöntemler kullanılmasını zorunlu kılmazlar (Evren, 2001)

4.3.3.1 Şev ve Şev Eğimi

Bir yarmada ya da dolguda, platform kenarı ile doğal zemin arasındaki eğik yüzeye “şev” denir.

Çizelge 4.14’de, zemin sınıfı ve zeminin su muhtevasına bağlı olarak, şevlerde uygulanacak eğim değerleri görülmektedir. Çizelgedeki kuru zemine ilişkin değerler, su dışındaki toprak işleri için, suya doymuş zemine ilişkin değerler ise su altındaki işler içindir. Eğer zemin yalnız normal hava koşullarının etkisi altında kalıyorsa, kuru zeminler için verilen değerleri

kullanmak gerekir. Normal dışı hava koşullarının ve yağışların etkisinde kalan zeminlerde suya doymuş zeminler için verilen değerleri almak uygundur (Evren, 2001).

Çizelge 4.14 Zemin sınıfı ve su muhtevasına bağlı olarak şev eğimleri (Evren, 2001)

Zemin Sınıfı	ŞEV EĞİMİ							
	Sarsıntıya Uğramış Yarma ve Dolgu				Yarma			
	Zemin				Zemin			
	Kuru		Suya Doymuş		Kuru		Suya Doymuş	
	α	$\text{tg } \alpha$	α	$\text{tg } \alpha$	α	$\text{tg } \alpha$	α	$\text{tg } \alpha$
İnce Kum	30°	1/2	20°	1/3	30°	1/2	20°	1/3
Çakıl	35°	2/3	30°	1/2	35°	2/3	30°	1/2
Kil	35°	2/3	20°	1/3	40°	4/5	20°	1/3
Taşlı karışık yağlı toprak	35°	2/3	30°	1/2	45°	1/1	30°	1/2
Kırma Taş	45°	1/1	40°	4/1	45°	1/1	40°	4/5
Yumuşak Kaya	45°	1/1	45°	1/1	55°	3/2	55°	3/2
Sert Kaya	45°	1/1	45°	1/1	80°	5/1	80°	5/1

4.3.3.2 Dolguların Oluşturulması

Toprak işleri anlamında dolgular, arazi üzerinde oluşturulan bir tesviye platformu ve platform kenarlarıyla doğal arazi yüzeyi arasında şevleri bulunan zemin kütleleridir. Geometrik ve mekanik özellikleri kullanım amaçlarına bağlıdır.

Dolgu için kullanılacak zemin ve dolguların oluşturulması yöntemleri, öngörülen amaca göre değişmekle birlikte, tüm dolguların ortak niteliği belirli biçimde ve olanaklar ölçüsünde dengeli olmaları zorunluluğudur. Bu açıklamalara dayanarak, dolgularda ortaya çıkabilecek sorunlar üç noktada toplanabilir:

- Oturdıkları zeminin stabilitesi,
- Çökme ya da sıkışma,
- Şevlerin stabilitesidir.

4.3.3.3 Dolguların Sıkıştırılması

Bir dolgunun gerekli çökme derecesine erişmesi için, normal olarak iki ya da üç yıl beklemek gerekir. Mekanik araçlarla zemin tabakaları sıkıştırılarak, bu sürenin kısaltılması çoğu kez uygun bir çözümdür.

İster demiryolu, ister karayolu ya da benzeri bir yapı söz konusu olsun, yüzeyin gelecekte her türlü hareketinin (çökme ya da şişme) belirli bir minimum değere indirilmesine çaba göstermek gerekmektedir. Böylece yüklere karşı daha büyük bir dayanım elde edilmiş olunur.

Bu amaçla sıkıştırılacak dolgunun, yeterince ince tabakalar biçiminde serilmesi gerekmektedir. Tabaka kalınlığı, zeminin porozitesine bağlı olarak değişir. Örneğin, kil kuma göre daha ince tabakalar halinde serilebilir. Bununla beraber, her zemin sınıfı için sağlanabilecek en büyük sıkışmaya karşı gelen optimum bir su muhtevası vardır.

Eğer sıkıştırmadan sonra zemine uygulanan yük yeterli değilse, bir süre sonra zeminde şişme meydana gelebilmektedir. Meydana gelebilecek şişme, zeminin yapısının bozulmasına, dayanımının ve özellikle kayma dayanımının önemli ölçüde azalması sonucunu doğurmaktadır. Çökme, zeminin kuru birim hacim ağırlığına ve danelerin istifleniş durumuna bağlı olarak ortaya çıkar.

Amerikalı bir mühendis olan Proctor, sıkışma olayını ilk kez sistematik bir biçimde incelemiştir. Proctor, bir zeminin sıkışma durumunun, yalnızca kuru birim hacim ağırlığıyla belirlendiğini kabul ederek sıkışma olayını basitleştirmiştir.

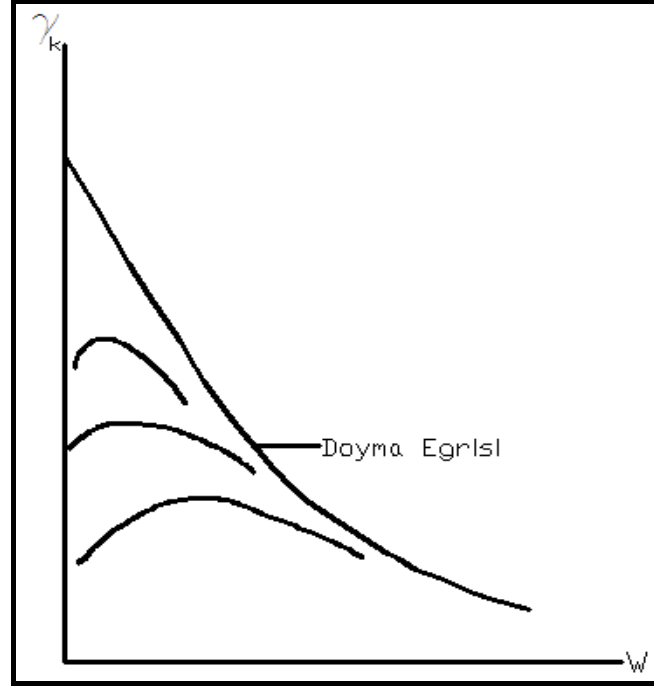
Proctor, her tabakaya uyguladığı darbe sayısını ya da tabaka sayısını değiştirerek, çeşitli sıkıştırma enerjileri için bir eğriler demeti oluşturdu. Birbiriyle kesişmeyen bu eğrilerde, sıkıştırma enerjisi arttığında kuru birim hacim ağırlığın büyüdüğü optimum su muhtevasının küçüldüğü görülmektedir (Şekil 4.11). Ayrıca suya doygunluk durumuna karşı gelen “sınır eğri”, tüm eğrilere çok yaklaşmakta fakat onları kesmemektedir. Doyma eğrisi denilen sınır eğrinin denklemi, kuru birim hacim ağırlık tanımından kolaylıkla bulunabilir. Su muhtevası:

$$W(\%) = \frac{W_{su}}{W_k} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada, W su muhtevası; W_{su} su hacmi; W_k kuru ağırlıktır. Bu denkleme bağlı olarak;

$$\frac{1}{\gamma_k} = \frac{W}{100} + \frac{1}{\gamma_s} \quad (4.2)$$

denklemleri elde edilir. Burada, γ_s dane birim hacim ağırlığı; γ_k kuru birim hacim ağırlık; W su muhtevasıdır. Dane birim hacim ağırlığı bilindiğinde doyma eğrisi çizilebilir.



Şekil 4.11 Proctor diyagramı (Evren, 2001)

Uygun bir sıkıştırma ile dolguların çökmeleri ya da çok az çökmeleri sağlanabilir. Her malzemenin optimum bir sıkışma durumu vardır. Bu değerden daha fazla sıkıştırma, gereksiz giderlere ve bazı kompakt dolguların şişmesine neden olur.

Dolguların çökmeleri ve ileride şişmemeleri için sağlanması gerekli sıkışmanın belirlenmesi, karmaşık bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorun, dolgunun olanaklar ölçüsünde az ve özellikle düzenli hacim değişimlerini sağlamak ile basitleştirilebilir. Deneyimler göstermiştir ki; dolgunun az ve düzenli hacim değişimini sağlamak, zemin sıkışmasının belirli iki sınır değer arasında olması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Sınır değerinin altında, zeminin çöktüğü bir alt sınır ve sınırın üstünde zeminin şiştiği bir üst sınır söz konusudur (Evren, 2001).

4.3.4 Taban Zemini

Taban zemini, yol yatağı tabakasının en önemli bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir demiryolu hattının üstyapısını ve altyapısını oluşturan bileşenler ne kadar iyi olursa olsun, hattın üzerine inşa edildiği taban zeminin taşıma kapasitesi yeterli değilse diğer kalemelerin hiçbir önemi kalmaz.

Bu yüzden ki, taban zemini Bölüm 4.1 ve 4.2’de kapsamlı olarak ele alınmıştır.

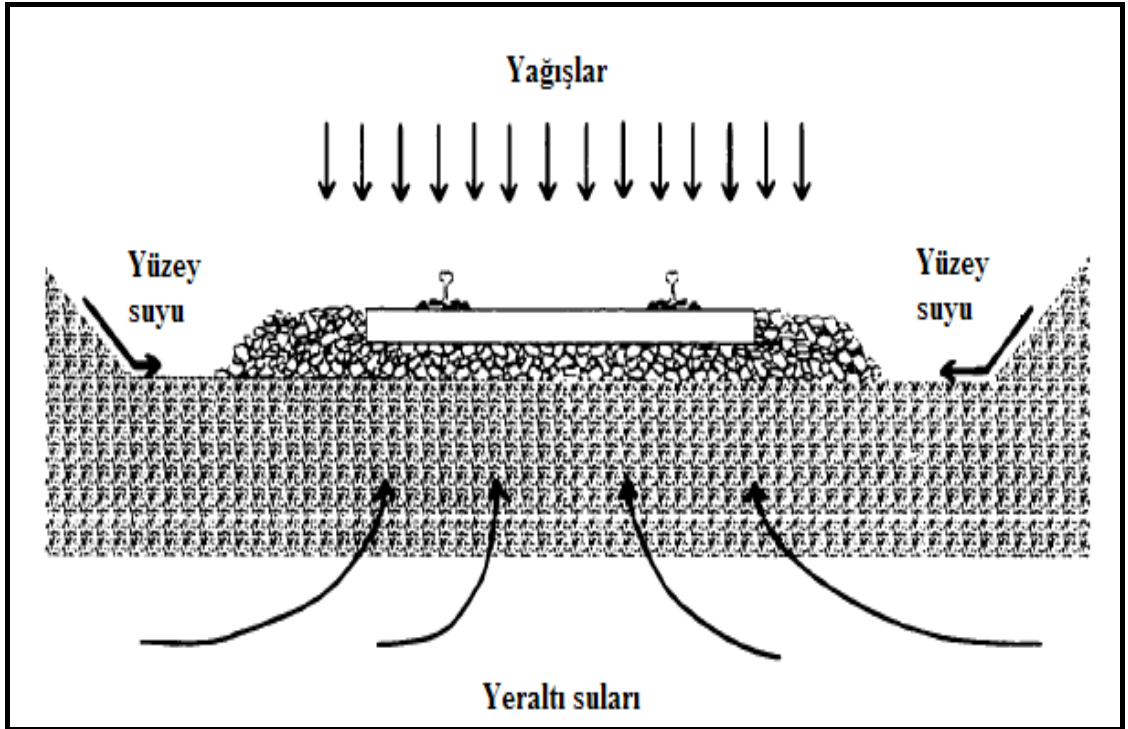
4.3.5 Drenaj

Bir demiryolu hattının drenajının yetersiz olması, hattan beklenen performansın düşmesine neden olmaktadır. Altyapıda bulunan serbest su, aşırı hat oturmalarına ve balast ile taban zemininde bulunan ince daneli malzemenin bir bulamaç haline gelmesine neden olur. Ayrıca iyi bir drenaja sahip olmayan demiryolu hattında, yarma şevi erozyonları ve şev stabilite problemleri ortaya çıkabilmektedir.

Bir demiryolu altyapısına suyun girmesini sağlayan üç adet potansiyel kaynak vardır (Şekil 4.12). Bunlar;

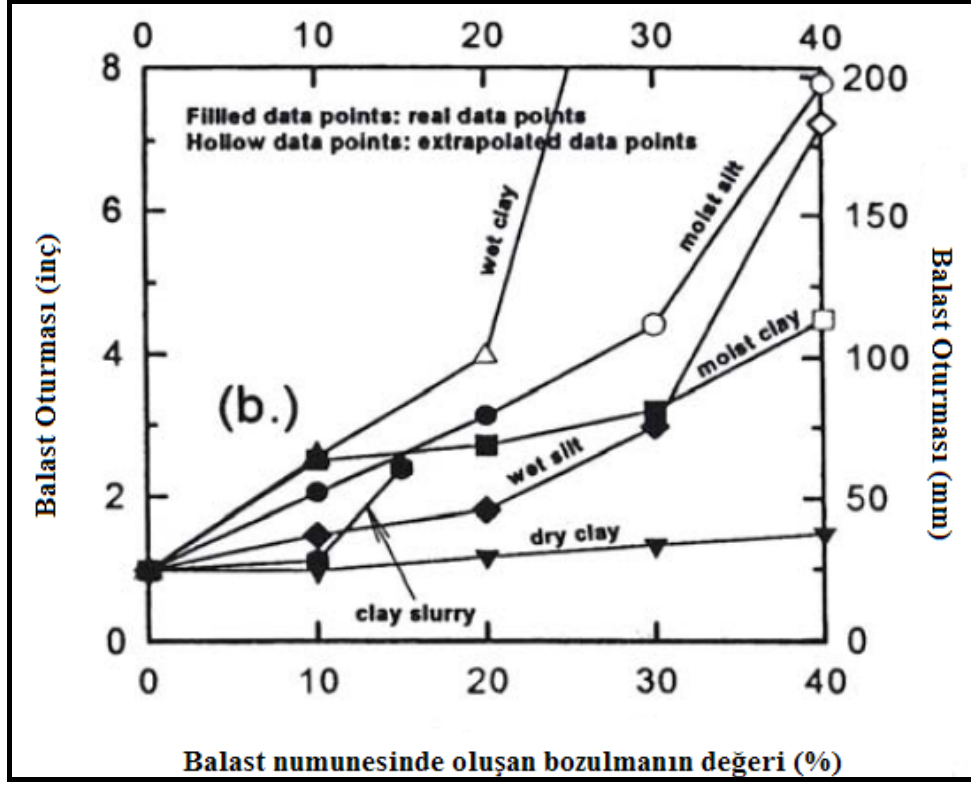
- Hattın üzerine düşen yağış,
- Hattın çevresinde bulunan yüzey sularının hatta doğru olan akış,
- Yeraltı sularıdır.

Hattan beklenen performansı sağlamak ve hattan uzun süreli hizmet alabilmek için bu üç kaynaktan altyapıya gelebilecek suyun mümkün olan en şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir (UIC 719 R, 1994).



Şekil 4.12 Altyapıya nüfuz eden suyun kaynakları

Yukarıda da değinildiği gibi drenaj demiryolu performansını önemli derece de etkilemektedir. Şekil 4.13’de, su içeriğinin balast tabakasında oluşturduğu bozulma değerleri görülebilmektedir.



Şekil 4.13 Farklı zeminlerde su muhtevalarında balast oturma değerleri (Lim, 2004)

4.3.5.1 Yeraltı suyunun drenajı

Bölgesel hidrolojik ve hidrojeolojik koşullar, su tabakasının durumuna göre belirlenir. Bu koşullar zayıf ise, altyapının taşıma kapasitesi ve dolayısıyla yolun stabilitesi bu durumdan etkilenebilir. Bu durum, yeraltı su seviyesinin yol kenarı hendekleri ve derin drenaj sistemleri ile yolun altında belirli bir düzeye kadar indirilmesiyle iyileştirilebilir. Demiryolu işletmeleri, yeraltı su tabakasının yerel koşullara bağlı olarak, ray üst seviyesinden itibaren en az 0,80m ile 2,50m arasında aşağıya çekilmesi gerektiğini belirtmektedirler. Minimum 0,80m değerine, ancak balast altındaki altyapı zemininin iyi olması durumunda (P3 sınıfı), don zemin içine girmiyor ve yeraltı su akımı düşük ise izin verilmektedir (Erel, 2007).

4.3.5.2 Yüzeysel suların drenajı

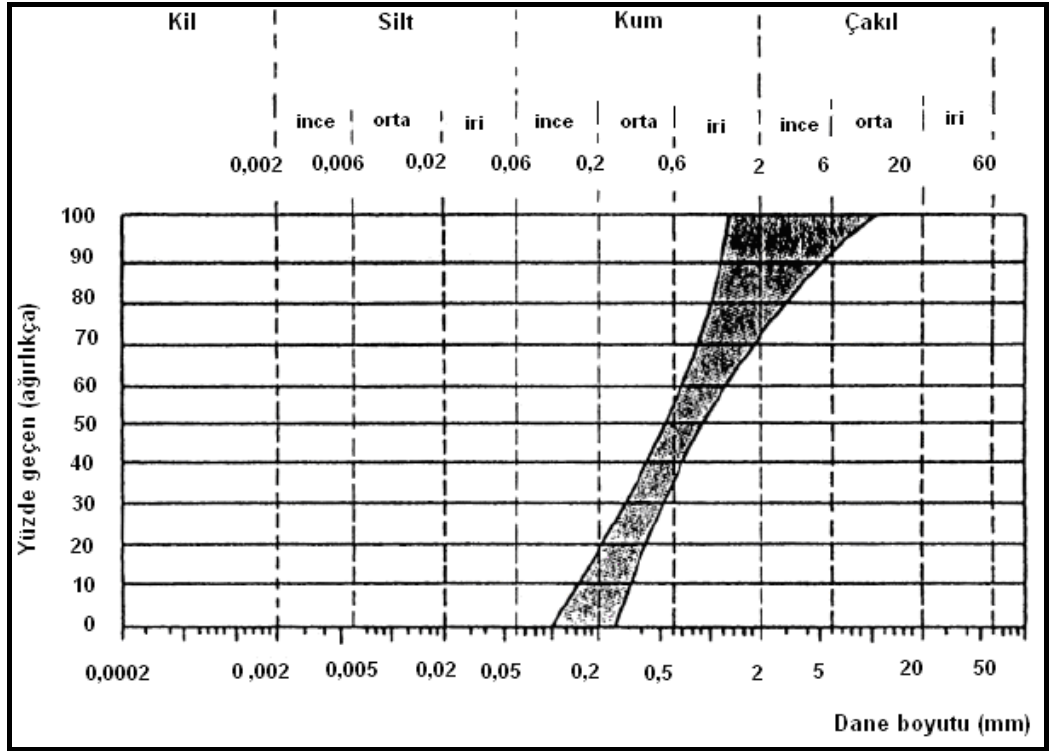
Erel (2007), yüzeye düşen ve altyapıya girmesi söz konusu olan yağış suları hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını ve bunun için aşağıdaki hususlara uyulmasına dikkat çekmiştir.

- Yolun hem doğru hem de eğri (kurp) kesimlerinde, altyapıya, boyuna drenaj sistemine doğru (yarmalarda) ya da banketlere doğru (dolgu) yeterli enine eğim verilmelidir. Bu eğim, % 3 ile % 5 arasında olmalıdır. Dever uygulanan kesimlerdeki çift hatlı yolların altyapısına, tek taraflı ve sürekli bir enine eğim verilebilir.

Alt balast tabakasının üst yüzeyine de yukarıda belirtilen enine eğimler verilmelidir. Balast tabakasının dane dağılımı iyi derecelendirilmiş (akış katsayısı $c \approx 0,8$) ise, yağış sularının yaklaşık % 80'i direkt olarak balast tabanından drenaj sistemine akar. Kalan % 20'si balast altı tabakasına girer ve bu da iyi bir enine eğimle drenaj sistemine gönderilebilir.

- Yol kenarındaki drenaj sisteminin elemanları doğru boyutlandırılmalıdır. Boyutlandırma, tekrarlama aralığı 10 yıl olan en büyük akımı geçirebilecek şekilde olmalıdır. Bu akım, yarma bölgelerinin yağış havzasından gelen sular (Q_p) ile yarma şevlerinden (Q_v) ve yol üzerine akan sulardan oluşur. Yoğunlaşma, zamanları genellikle birbirinden farklı olan Q_p ve Q_v akış katsayıları ile ilişkilidir. Farklı kaynaklardan gelen suların akış katsayıları farklı olduğundan, bunların büyük olanına göre boyutlandırma yapılması fazla hata vermez.

Çok kohezyonlu zeminleri yeterince koruyabilmek için, Şekil 4.14'de dane çapı dağılım eğrisi için kum filtre malzemesi önerilmektedir.



Şekil 4.14 Kum filtre için gradasyon eğrisi (UIC Code 719R, 1994)

Çizelge 4.15' de drenaj için önemli bir ölçüt olan akış değerinin hesabında kullanılan akış katsayısının farklı zeminler ve akış yüzeyleri için aldığı değerler görülmektedir.

Çizelge 4.15 Farklı yüzeyler ve zeminlerde akış katsayıları (UIC Code 719R, 1994)

Geçirimsiz yüzeyler	$c = 0,9-1,1$
Ekili zeminlerde	$c = 0,4-0,8$
Kumlu zeminlerde	$c = 0,3$
Ağaçlı alanlarda	$c = 0,2$

Yukarıda değinilen drenaj yöntemlerine ek olarak günümüzde, geosentetik malzemelerde basit filtreleme sistemleri olarak kullanılmaktadır. Altyapının ince daneli zeminlere temas ettiği durumlarda ve granüler malzemelerin drenaj kanallarından uzak tutulması konularında drenaja yardımcı olurlar (Erel, 2007).

4.4 Taban Zeminin Korunması ve İyileştirilmesi

Taban zeminini korumak ve geliştirmek, demiryolunun tarihte ortaya çıktığı günden beri tartışılan ve çözüm aranan başlıklar olarak ortaya çıkmaktadır. 1889'da "Chesapeake and Ohio Railway" şirketinde çalışan H. Frazier şunu belirtmiştir: "Yolun stabilitesi, üzerine döşeli olduğu yol yatağının ve yapıların mukavemetine ve sürekliliğine bağlıdır. Bunların zarardan korunabilmesi ve bozulmaların erken önlenmesi için yapılması gerekenler dikkatle gözlenmelidir. En kötü düşman sudur ve su yoldan uzak tutulabilir ya da acilen yoldan uzaklaştırılabilir, daha iyisi yol sudan korunabilir"

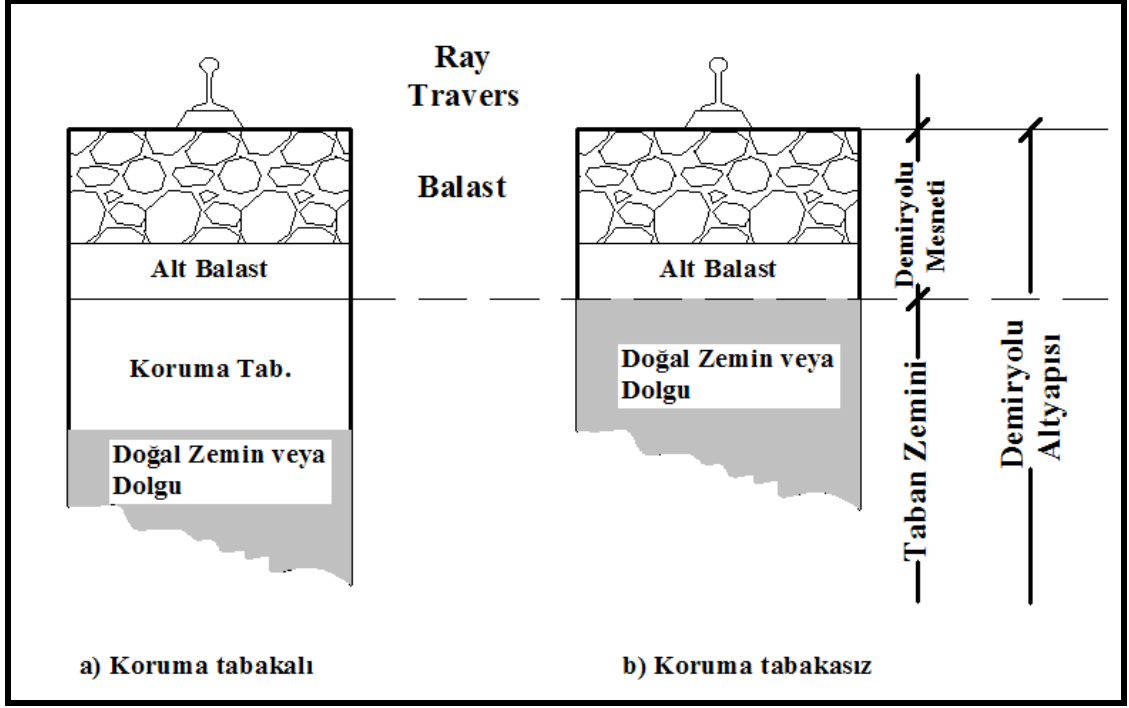
Tarihi bu kadar eski olan bu konulara günümüz yaklaşımı şöyledir:

- Taban zemini malzemesinin kendisinin değiştirilmesi ya da onun mukavemeti yüksek malzemelerle kuvvetlendirilmesi,
- Taban zeminini korumak ve yapısını bir koruma (örtü) tabakası ile kuvvetlendirmek,
- Değişik tiplerde sentetik malzemeler (geosentetikler) kullanarak, taban zeminin taşıma kapasitesini artırmak veya yine bu malzemeler kullanılarak, suyun zemine olan etkisini ortadan kaldırmaktır.

4.4.1 Koruma Tabakası (Örtü Tabakası)

Radampola'ya (2006) göre, koruma tabakası, doğal zemini veya dolguyu, nem girişinden korunmasını ve birleşmiş bir temel zemini tabakası oluşturulması amacını taşır. Koruma tabakası, zayıf doğal zeminleri ve ya dolguları korumak için kullanılan daneli malzemeden

oluşmuş yüksek mukavemetli ve yüksek rijitliğe sahip bir tabakadır. Şekil 4.15 koruma tabakası içeren ve içermeyen konvansiyonel altyapılar örneklenmektedir.



Şekil 4.15 Koruma tabakası içeren ve içermeyen demiryolu altyapısı (Radampola, 2006)

Koruma tabakasının fonksiyonları:

- Yükleri geniş bir alana yayarak, temeli (tabanı) yüksek gerilmelerden korumak,
- Drenajı kolaylaştırmak,
- Balastın, taban zeminine girişini önlemektir.

İyi bir koruma tabakası için kullanılacak en iyi malzeme; çakıl parçacıkları içeren düşük plastisiteli, iyi dereceli iri taneli çakıllı malzemedir. Bu malzeme özelliklerine ek olarak, koruma tabakasında kullanılacak malzemenin filtre özelliğinin olması ve dona karşı dayanıklı olması da beklenir (Radampola 2006).

Koruma tabakasında kullanılacak malzemeler, suyun drene edilmesine izin veren, ancak alttan ince danelerin girmelerine izin vermeyen bir kompozisyona sahip olmalıdır. Bu kompozisyonu sağlamak için öne sürülen birçok yöntem arasında en yaygın olarak kullanılan Avusturya geoteknoloji uzmanı Karl Terzaghi tarafından 1925 de önerilendir. Buna göre;

- Granülometri eğrisinin % 15'ine karşılık gelen dane çapı, % 85'ine karşılık gelen dane çapının dört katına eşit ya da altında olmalıdır.

$$D_{15} \leq 4 \times d_{85} \quad (4.1)$$

- Balast tabakasında bulunan malzemelerin % 15’inde ki dane boyutu, koruma tabakasında kullanılan malzemenin % 15’inde ki dane boyutunun dört katından daha büyük olmalıdır.

$$D_{B15} \geq 4 * d_{15} \quad (4.2)$$

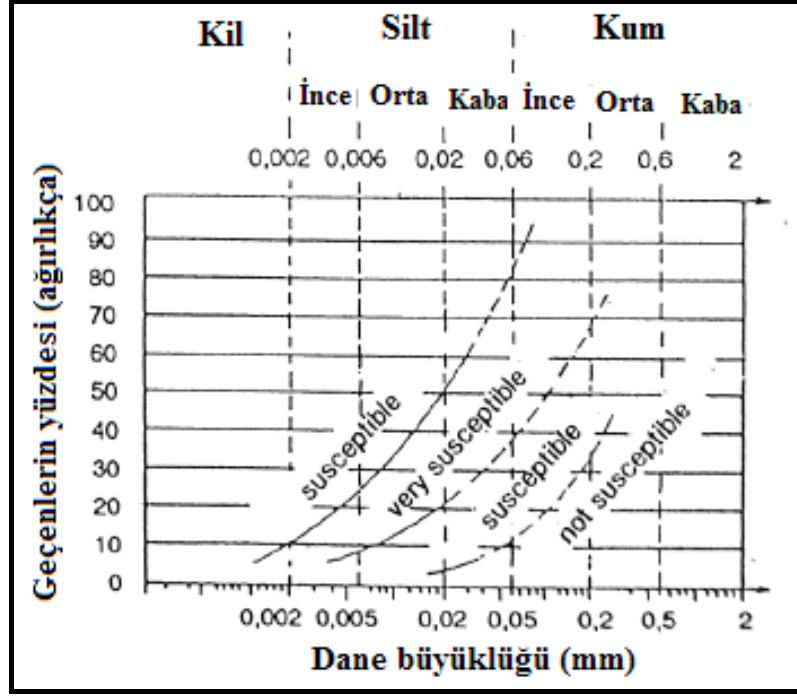
Filtre malzemesinin minimum dane boyutu, altında bulunan zeminden çok daha yüksek geçirgenliğe sahip olmalı ve altyapıyı etkin şekilde drene edebilmelidir.

Yukarıda belirtildiği gibi koruma tabakasını oluşturan malzemelerden beklenen başka bir özellik de dona karşı dayanıklı olmasıdır. Donmaya karşı dayanıklı bir yapı oluşturmak için, Arthur Casagrande’nin kuralı kullanılmaktadır. Arthur Casagrande, koruma tabakasını oluşturacak 0,02mm’den daha küçük boyutlu danelerin yüzdesini belirlemeyi amaçlayan ve “U” düzensizlik derecesinde sınırlandıran bir dondan korunma kuralı geliştirmiştir. Bu kurala göre;

1. “U” düzensizlik derecesi, 0–60 mm ve 0–10 mm boyutundaki danelerin birbirlerine oranıdır.
2. $U > 15$ ise, koruma tabakasını oluşturan malzemenin, % 3’ünden fazlasının dane çapı 0,02mm’nin altında olmamalıdır.
3. $U > 5$ ise, koruma tabakasını oluşturan malzemenin, % 10’undan fazlasının dane çapı 0,02mm’nin altında olmamalıdır.

Bu özelliklere sahip olabilmek için, malzeme ocaklarda karıştırılmalı ve dane dağılımı sağlanmalıdır (UIC 719R, 1994).

Dona duyarlılık derecesi, ayrıca Şekil 4.16 de verilen abak yardımı ile de tahmin edilebilir. Bu amaç için 2mm’lik elekten geçen bir numunenin granülometri eğrisi oluşturulur.



Şekil 4.16 Dane dağılımına göre dona duyarlılık (UIC Code 719R, 1994)

Koruma tabakasından beklenen özellikler, dona karşı dayanıklı olması ve filtreleme özelliği ile sınırlı değildir. Her taşıyıcı elemandan istendiği gibi, koruma tabakasından da belli bir taşıma kapasitesine sahip olması istenir. Taşıma kapasitesini ölçmek için, Plaka Yükleme Deneyi ile belirlenen ve birimi MN/m^2 olan E_{v1} ve E_{v2} şekil değiştirme modülleri kullanılır. 30 cm yarıçapındaki bir dairesel plak $\sigma_{\max} = 0,5 \text{ MN/m}^2$ değerindeki gerilmeye erişinceye dek, kademeli olarak yüklenir. Birinci yükleme sonucunun değeri E_{v1} ve ikinci yükleme sonucu E_{v2} değerlerini verir (Erel, 2007).

$$E_{v2} = \frac{1,5 * \Delta\sigma * r}{\Delta s_2} \quad (4.3)$$

Burada;

E_{v2} : Şekil değiştirme modülü (MN/m^2)

$\Delta\sigma$: $0,3 \sigma_{\max}$ ile $0,7 \sigma_{\max}$ (MN/m^2) arasındaki fark

r : Yükleme plağının yarıçapı (mm)

Δs : $0,3 \sigma_{\max}$ ile $0,7 \sigma_{\max}$ arasındaki sıkışma (mm)

Koruma tabakası olarak kullanılacak malzemenin şekil değiştirme modülü, aşağıda verilen değerlerde olmalıdır. Aksi takdirde malzeme koruma tabakası olarak taban zemini üzerine serilemez.

$$\begin{aligned} V \leq 160 \text{ km/saat için } E_{v2} &\geq 50 \text{ MN/m}^2 \\ V \geq 160 \text{ km/saat için } E_{v2} &\geq 80 \text{ MN/m}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

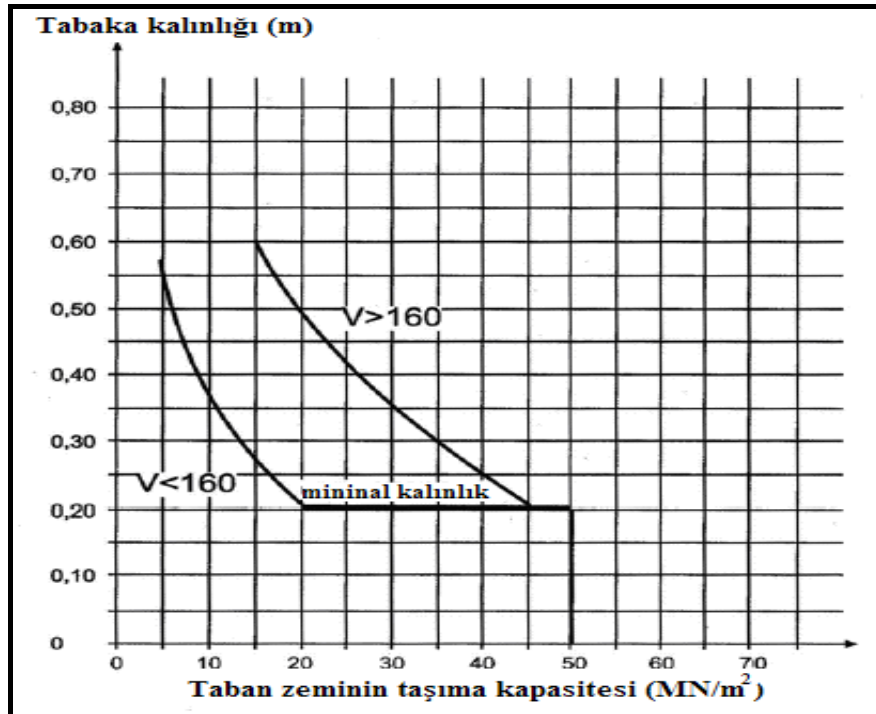
Eğer E_{v2} değerini elde etmek için uygulanan deney uzun sürecekse, E_{v2} değeri yerine dinamik yükleme deneyi sonucu elde edilen E_{vd} değerleri kullanılabilir.

E_{v2} değerleri ile CBR (California Bearing Test) arasında iyi bir korelasyon vardır. Almanya Demiryolları ortalama olarak 1 % CBR = 13 MN/m² ve 10 % CBR = 40 MN/m² olarak almaktadır.

Yukarıda sıraladığımız özellikleri sağlayan koruma tabakasının kalınlığını belirlemek için iki kıstas bulunmaktadır. Bu kıstaslar aşağıda sıralanmıştır.

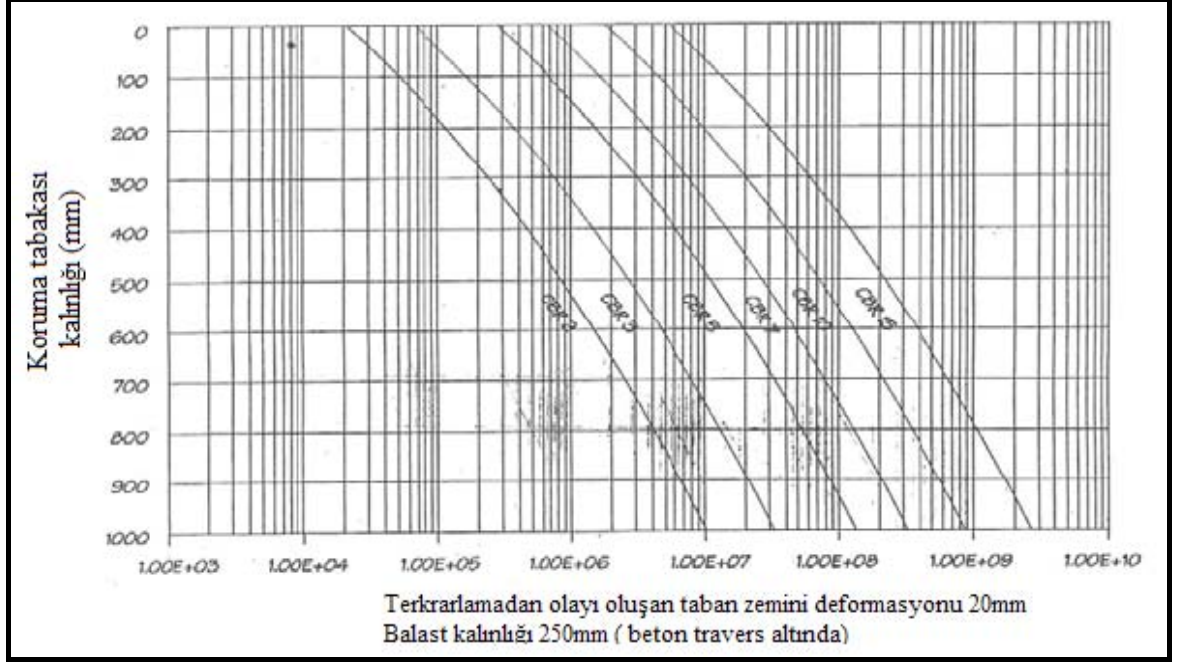
1. Dondan koruma: Kalınlık, kış aylarındaki sıcaklığa (uzun süreli kayıtlar bir referans olarak alınır) ve taban zemininin kompozisyonuna bağlıdır.
2. Taşıma kapasitesi: Kalınlık, taban zeminin taşıma kapasitesine ve koruma tabakasından istenen taşıma kapasitesine bağlıdır. Şekil 4.17’de bu parametreler arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Yukarıda sıralanan kıstaslara dayalı olarak yapılan iki hesabın sonuçlarının farklı kalınlık değerleri vermesi durumunda, bu değerlerden büyük olanı alınmalıdır. Don olayının bulunmadığı bölgelerde sadece ikinci kıstas dikkate alınır. Koruma tabakasının minimum kalınlık değeri 20cm’in altında olmamalıdır (Erel, 2007).



Şekil 4.17 Dondan koruma tabakası kalınlığı için diyagram (Erel, 2007)

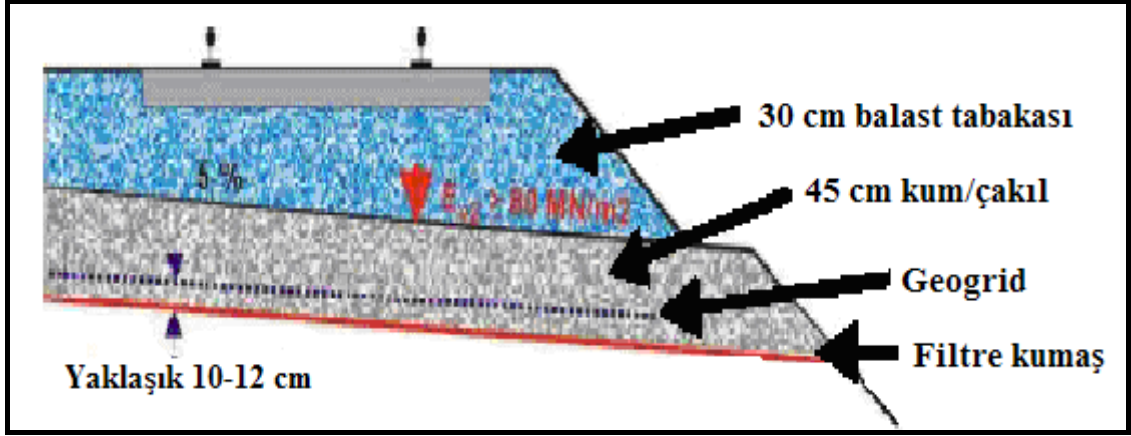
İngiliz Queensland Demiryolu şirketi, CBR değerlerine, demiryolu trafik yüklerine, özel hatlar için maksimum dingil yüklerine ve işletme parametrelerine (demiryolu trafiği, hacim, hız ve bakım standartları) dayalı olarak, koruma tabakasını belirlemek için abaklar hazırlamışlardır. Şekil 4.18’de verilen örnek abak, 22,5 ton dingil yükü için hazırlanmış bir tasarım abağıdır (Radampola 2006).



Şekil 4.18 22,5t dingil yükü için hazırlanmış koruma tabakası tasarım abağı (Radampola 2006)

4.4.2 Geosentetik Uygulamaları

Geosentetikler, daha iyi yük dağılımı, filtre fonksiyonu arttırmak ve koruma tabakasının yanlarının drenajına yardımcı olmak için kullanılır. Geotekstil (örgülü ve örgüsüz), geogrid, tensar geogrid, geomembran gibi pek çok farklı isimde ve farklı amaca yönelik geotekstil ürünleri ulaştırma projelerinde kullanılmaktadır. Geosentetikler asla direkt olarak balast altına uygulanmaz, sadece taban zemini ile koruma tabakasına uygulanabilirler (Şekil 4.16). Geotekstillerin direkt olarak balast ile taban zemini arasına döşenmesi, tekstil malzemesinde erken bir aşınmaya neden olur. Bir geotekstil, her zaman tüm taban zeminini kaplamalı ve yanal olarak gerilme zarfının ve drenaj sisteminin ötesine uzatılmalıdır. Geootekstilin özellikleri, onun önerilen amacı (ayırma, filtreleme, kuvvetlendirme) esas olarak dikkatlice seçilmelidir. Geotekstillere ve bileşik sentetikler, 10 cm'ye kadar sıkıştırılmış çakıl-kum karışımı yerine kullanılabilirler. Taban zemini taşıma kapasitesi çok düşük olan bölgelerde, ek olarak geogrid uygulanır. Şekil 4.19'da, geotekstil ve geogrid ile takviye edilmiş bir formasyon koruma tabakasının tipik aranjmanı görülmektedir.



Şekil 4.19 Taban zemini üzerine geotekstil uygulaması

4.4.3 Bağlayıcı Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirilmesi

UIC Code 719R’de (1994) belirtildiği gibi, bağlayıcı malzemelerle (kireç, çimento ve bitüm) iyileştirme söz konusu olduğunda, bunların uygunluğunu araştırmak ve en uygun koşulları belirlemek için gerekli deneylerin yapılması gerekir. Ayrıca laboratuarda belirlenen katkı oranlarının uygunluğu arazide de kanıtlanmalıdır. Çizelge 4.16’da bu yöntemler özetlenmiştir.

Çizelge 4.16 Bağlayıcı katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme (UIC Code 719R,1994)

Katkı Malzemesi	Açıklama
Kireç	Kireç stabilizasyonu (CaO veya Ca(OH)_2) sadece kil zeminlere uygulanır. Kirecin yağmur suları ile çözülüp ayrılmaması için, iyileştirilecek zeminin üst yüzeyi bitümle kaplanmalı ya da balast altı tabakası ile iyi bir geçirimsizlik sağlanmalıdır.
Çimento	Çimento ya da diğer hidrolik bağlayıcı katkı malzemeleri ile stabilizasyon, rötre çatlakları oluşumu nedeniyle, belirli koşullarda önerilir. Ayrıca, çimento dozajının fazla olması tabakayı çok sertleştirir, bu da trafik altında çatlamalara neden olur.
Bitüm	Bitümlü stabilizasyon demiryollarında kullanılmamaktadır (UIC Code 719, 1994) ⁽¹⁾ .

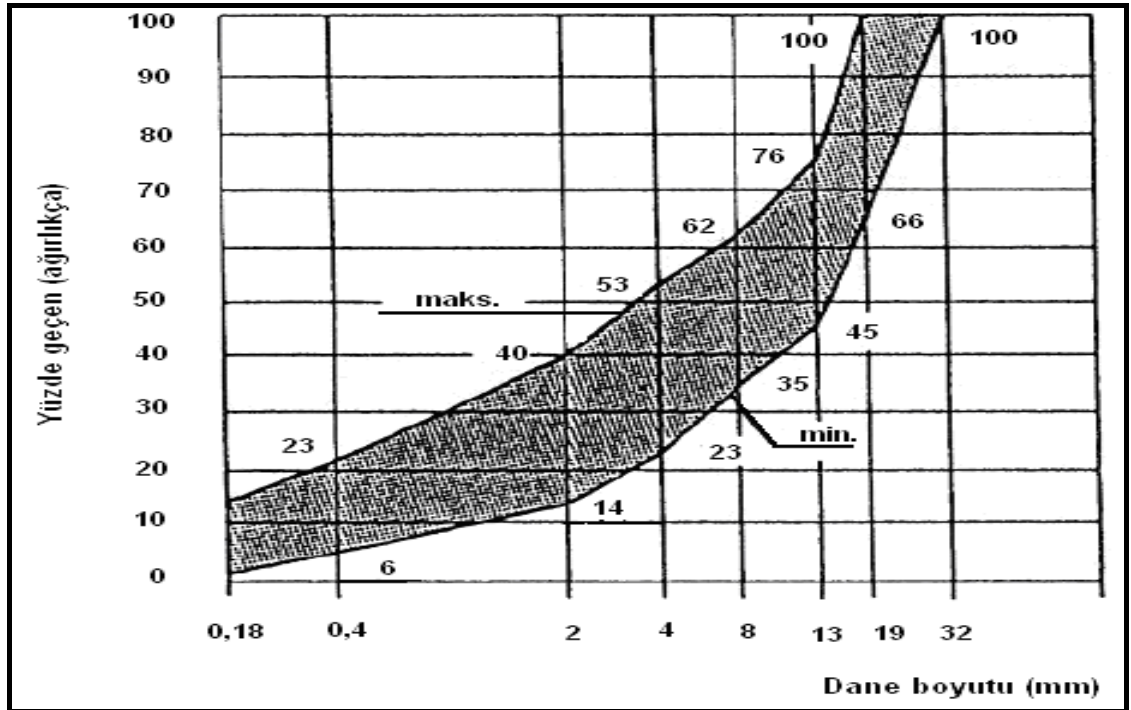
⁽¹⁾ Her ne kadar kaynakta bitümlü stabilizasyonun kullanılmadığı belirtilmekte ise de, son yıllarda bu konuda araştırmalar yapılmaktadır.

4.4.4 Kireçtaşı - Çimento Karışımı Tabakalar ve Asfalt Konglomera Tabakalar

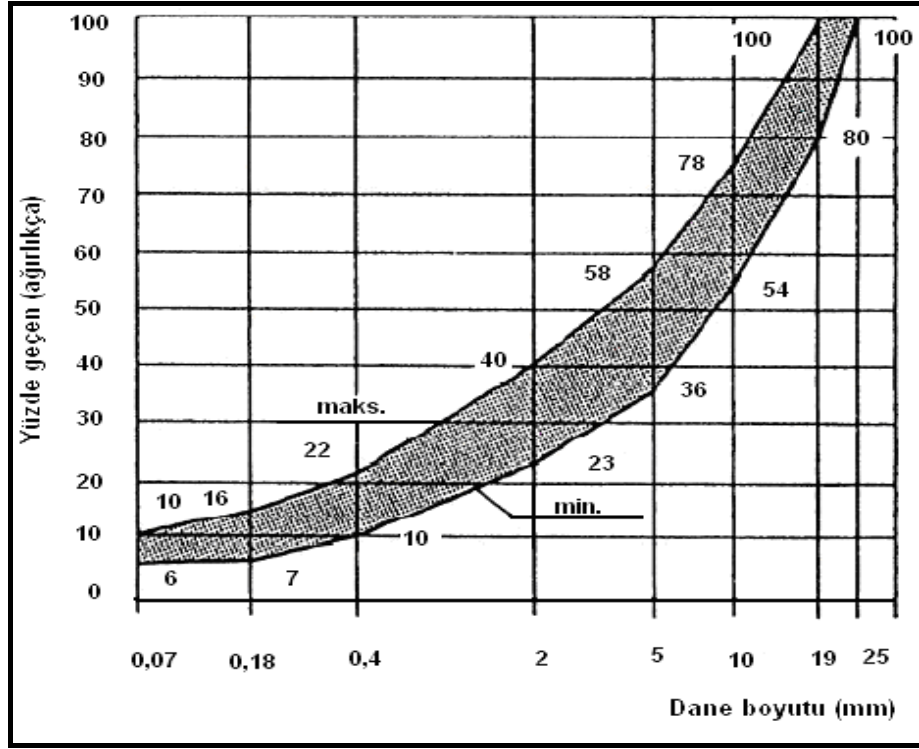
Bağlayıcı katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme yönteminden farklı olarak, demiryolu literatüründe başlıkta verilen yöntemler yardımıyla da yol yatağı tabakası uygulamaları için taban zemini iyileştirilebilir. Bu yöntemler iyileştirme konusunda yirmi yıldır kullanılmakta ve müspet değerler vermektedir. Çizelge 4.17’de, çimento, kireçtaşı ve asfalt konglomera malzemeleri kullanılarak demiryolu tabakalarının oluşturulması ile ilgili bilgi verilmektedir.

Çizelge 4.17 Kireçtaşı ve çimento tabakalar ve asfalt konglomera tabakalar (UIC Code 719R, 1994)

Yöntem	Açıklama
Çimento İle Sağlamlaştırılmış Kireçtaşı	Kırılmış kireçtaşı (CaCO_3) çimento ile karıştırılarak, 30 – 50cm kalınlığındaki çakıl tabakanın üzerinde, 20cm kalınlığında bir balast altı tabakası olarak kullanılır. Kırılmış kireçtaşının Şekil 4.20’de görülen dane dağılımına sahip olması gerekir. Çimento oranı en çok % 3 – 4, su oranı ise yaklaşık % 6 olmalıdır.
Asfalt Konglomera	Asfalt konglomera, 30 – 50cm kalınlığındaki çakıl tabakanın üzerinde, 12cm kalınlığında bir tabaka şeklinde oluşturulur. Dane dağılımı eğrisi, Şekil 4.21’deki zarf içinde bulunmalı ve bitüm oranı ağırlığın yaklaşık % 5’i olmalıdır.



Şekil 4.20 Çimento katkılı kireçtaşı tabakası için kırma kireçtaşı dane dağılımı (UIC Code 719R, 1994)



Şekil 4.21 Asfalt konglomeraya ilişkin dane dağılımı zarfı (UIC Code 719, 1994)

5. ALTYAPI TASARIMINDA BELİRLEYİCİ OLAN PARAMETRELER

5.1 Dingil Yükleri ve Hız

Hattın kalitesi ve taşıma kapasitesi için gereklilikler, büyük ölçüde yük parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dingil yükü: Her dingil için statik düşey yük,
- Katar yükü: Toplam dingil yükü,
- İşletim hızı.

Hatlara uygulanmakta olan nominal dingil yükleri çeşitlilik göstermekle birlikte, Çizelge 5.1’de, dünyada kullanılan dingil yükleri değerleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.1 Demiryolu taşıtlarının dingil sayıları ve her dingilin ağırlıkları (Esveld, 2001)

	Dingil Sayısı	Boş	Yüklü
Tramvay	4	50 kN	70 kN
Hafif raylı sistem	4	80 kN	100 kN
Yolcu vagonu	4	100 kN	120 kN
Motorlu yolcu vagonu	4	150 kN	170 kN
Lokomotif	4 veya 6	215 kN	-
Yük vagonu	2	120 kN	225 kN
Ağır yük vagonu(ABD, Avusturalya)	2	120 kN	250-350 kN

Yüksek dingil yüklerine sahip araçlar, raylarda büyük bozulmalara ve hatların bakım ihtiyaçlarını arttırmaktadırlar.

UIC (Uluslararası Demiryolları Birliği), çıkarmış olduğu UIC 700 standardın da, uygulanacak dingil yüklerine bağlı olarak hatları sınıflandırıp bir tablo haline getirmiştir (Çizelge 5.2). NS (Netherlands Railway) şebekesi de işlettiği hatlarda, UIC’nin ortaya koyduğu bu kategorileri kullanmaktadır. NS mevcut hatlarında, kategori C₂’yi, yeni inşa edeceği hatlarda ise C₄ ve D₄ sınıflarını uygulamayı uygun bulmuştur.

Çizelge 5.2 UIC yük sınıflandırması (UIC Code 714R, 1989)

Kategori	Dingil Yüğü (kN)	Ağırlık / m (kN/m)
A	160	48
B ₁	180	50
B ₂	180	64
C ₂	200	64
C ₃	200	72
C ₄	200	80
D ₄	225	80

Demiryolu taşıtlarının oluşturduğu yüklemeler, hat üzerinde, hayli fazla, ani değişimlere yol açan kuvvetleri meydana getirirler. Bu kuvvetler, daha önceki bölümlerde de bahsettiğimiz gibi, düşey, yatay ve boyuna değişimlerdir. Yüklerin doğasına göre, yükler aşağıdaki gibi iki gruba ayrılabilir:

- Aracın ağırlığından, merkezkaç kuvvetinden, kurplarda ve makaslarda oluşan merkezleme kuvvetinden ve yan rüzgarların ortaya çıkardığı “Quasi-statik” yükler,
- Aşağıdaki olayların meydana getirdiği dinamik yükler:
 - ❖ Hat düzensizliği (düşey ve yatay) ve değişken karakteristiklere ve balast yatağı oturmalarına bağlı düzensiz hat rijitliği,
 - ❖ Kaynaklardaki, bağlantılardaki ve makaslardaki süreksizliklerden,
 - ❖ Araç bozukluklarından (aplata teker, doğal titreşim vb.)

Tezde, altyapı tasarımı için kullanılacak olan model, “Quasi-statik” model olacağından, hesap içinde kullanılacak olan dingil yükü içerisinde, dinamik etkilerden gelen sabitler bulunmayacaktır.

Düşeyde etkiyen toplam tekerlek yükü, aşağıda verilen bileşenlerin toplanması ile ortaya çıkmaktadır.

$$Q_{\text{tot}} = (Q_{\text{statik}} + Q_{\text{merkezcil}} + Q_{\text{rüzgar}}) + Q_{\text{din}}$$

Quasi – statik yükler

(5.1)

Formül 5.1 de,

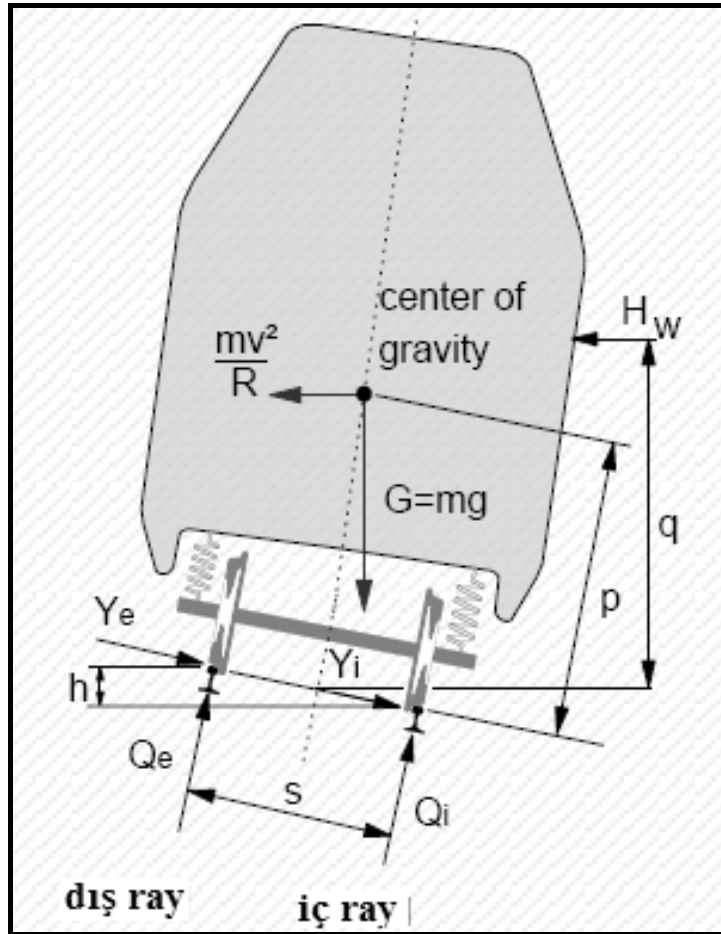
Q_{statik} : Statik tekerlek yükü: statik dingil yükünün yarısı, hattın düz kısımlarında ölçülür,

$Q_{\text{merkezcil}}$: Kurp içerisinde dıştaki rayda dengelenmemiş merkezkaç kuvveti ile değeri artan tekerlek yükü,

$Q_{\text{rüzgar}}$: Yan rüzgarlarla ortaya çıkan yük,

Q_{din} : Süspansiyonlanmış-süspansiyonlanmamış kütle ve kaynak,aplattı teker ve ondülasyonun oluşturduğu dinamik tekerlek yükü.

Şekil 5.1’de, kurp içinde bulunan bir araç üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmektedir. Formül 5.2 ve 5.3’de ise her tekerlek için yük hesabı ve eksik dever hesapları verilmektedir.



Şekil 5.1 Kurb içinde Ouasi-statik araç kuvvetleri (Esveld, 2001)

$$Q_{\text{merkezci}} + Q_{\text{rüzgar}} = G \frac{p_c h_d}{s^2} + H_w \frac{p_w}{s} \quad (5.2)$$

$$h_d = \frac{sv^2}{gR} - h \text{ (eksik dever)} \quad (5.3)$$

Bu denklemlerde;

G : Her bir tekerlek seti için taşıt ağırlığı

H_w : Yan rüzgar kuvveti

s : Hat genişliği

v : Hız

g : Yerçekimi ivmesi

R : Kurp yarıçapı

h : Dever

p_c : Aracın ağırlık merkezinin raya olan mesafesi

p_w : Yanal rüzgar kuvveti etkisinin moment kolu

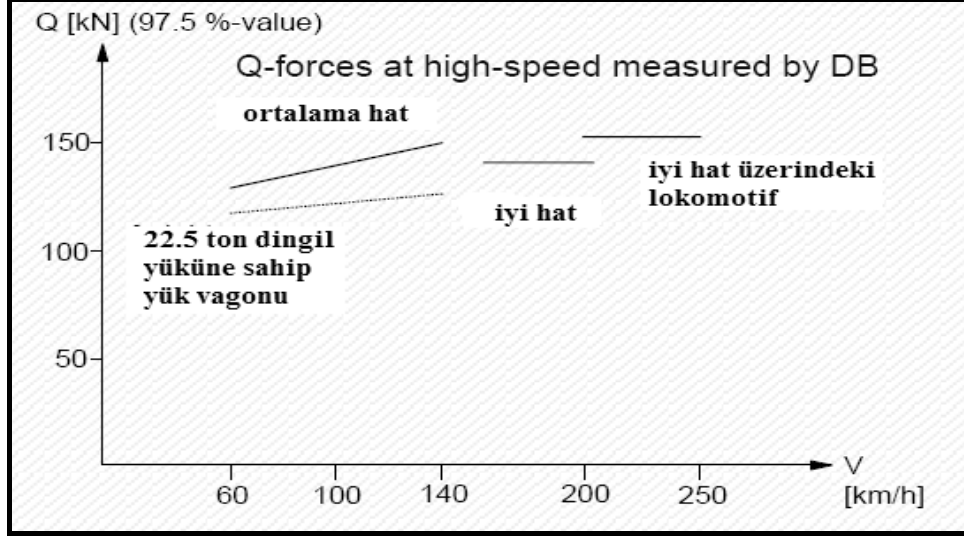
Q_{merkezci} kuvvetinin % 10-25 arasındaki oranı statik tekerlek yüküdür. Şekilde gösterilen yanal rüzgarın kuvvetinin tersi yöndeki aynı kuvvet, denkleme eksi işaretle girer ve bu daha çok kurp içinde bulunan araçlar için önemlidir.

Yüksek hız ve yüksek dingil yükleri, diğer ulaştırma sistemleri ile karşılaştırıldığında, raylı sistemlerde daha büyük bir önem taşımaktadır. Yüksek hızın, dingil yükleri üzerindeki ve dolayısıyla üst ve altyapı üzerindeki etkileri üzerinde, dünyada birçok çalışma yürütülmektedir.

Demiryollarında en büyük sorunlardan biri, yüksek hızın etkisini, altyapı ve üstyapıda nominal seviyede tutmaktır. Yüksek hız yüzünden araçta meydana gelen etkiler, hat tarafından tepkiyle karşılanır ve bu etki tepki ilişkisi, yol geometrisinde bozulmalara yol açmaktadır.

Şekil 5.2’de, DB tarafından sürdürülen ve Q-kuvvetinin ölçümleri gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, katarı çeken lokomotifin tekerlek yükü 250 km/sa de 150 kN’a kadar

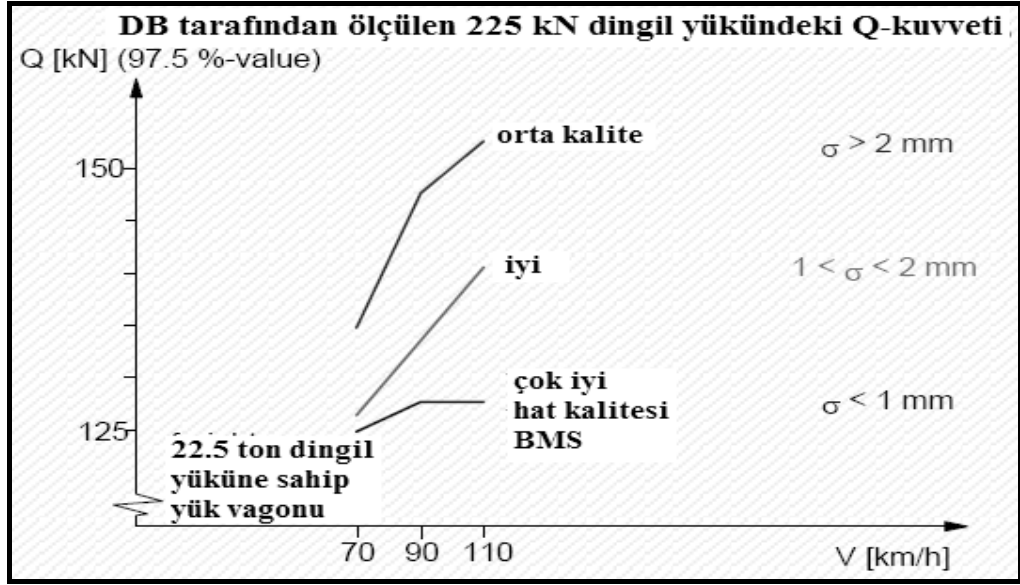
yükselmektedir. Aynı etki, dingil yükü 22,5 ton olan vagonlarda 120 km/sa de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca benzer bir dinamik yük de oluşturmaktadır (Esveld, 2001).



Şekil 5.2 Yüksek hızlarda Q-kuvveti (Esveld, 2001)

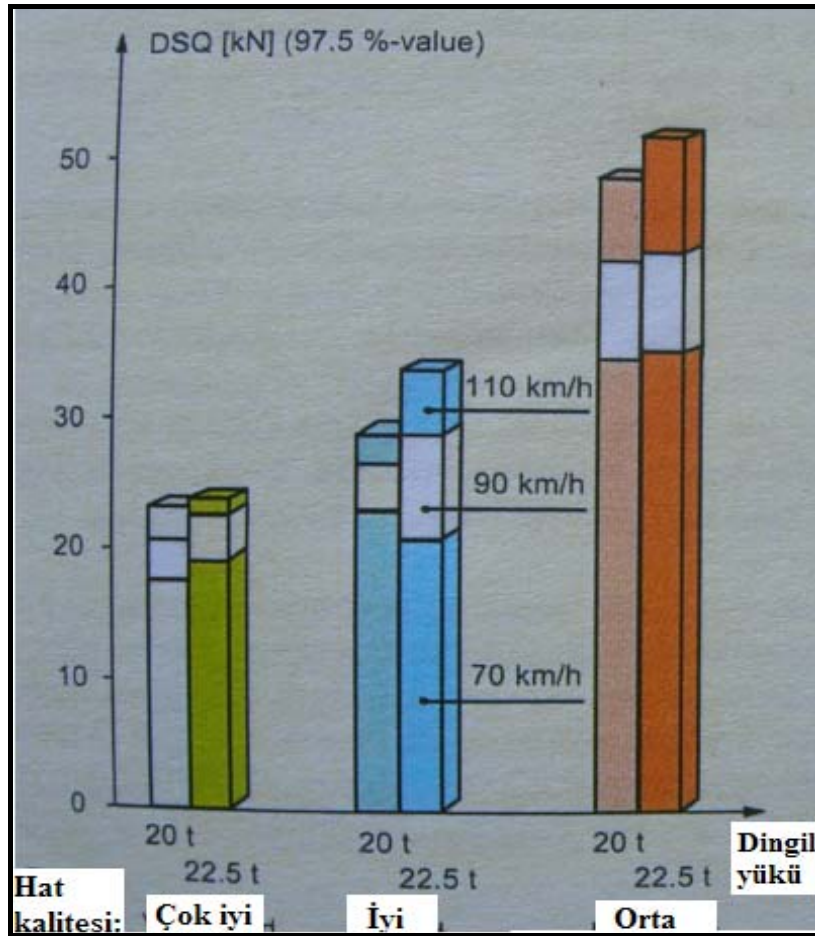
1983 yılında, ORE'nin D161 ve B12 komitelerinin gözetiminde, büyük ölçekli bir Avrupa ölçüm şirketi bir çalışma yürüttü. Ölçümlerde, Y25 tipi ve dingil konfigürasyonu DB65 olan vagonlar kullanıldı. Ayrıca tren, içlerinde BMS sistemleri bulunan NS kayıt araçlarını da içermekteydi. Ölçümler 20 ve 22,5 ton dingil yüklerinin farklı kalitedeki hat tiplerinde meydana getirdikleri Q ve Y kuvvetlerinin belirlenmesine yönelikti.

Farklı hat kaliteleri için BMS tarafından belirlenen mm mertebesinde standart sapmalar (s), 22,5 tonluk nominal dingil yükü için dinamik tekerlek yükleri Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Hat kalitesi üç alt sınıfa ayrılmıştı: 0-1mm: çok iyi, 1-2mm: iyi, 2mm fazla: orta. Bu sınıflandırma bütün bölümlerde ve bütün hat geometrisinde kullanılmıştır. Şekil 5.4 de hat kalitesinin etkisinin önemi açık bir şekilde görülmektedir (Esveld, 2001).



Şekil 5.3 22,5 ton dingil yükünde oluşan Q-kuvveti (Esveld, 2001)

20 ton ve 22,5 ton dingil yüklerinin 70, 90 ve 110 km/sa hızlarındaki dinamik dingil yükü artış değeri $\Delta S Q$ Şekil 5.4 de görülmektedir.



Şekil 5.4 Dingil yükü, hız ve hatta bağlı tekerlek yükünün dinamik bileşeni (Esveld, 2001)

Tablolarda da görüldüğü gibi, yalnız planlanan dingil yüküne göre alt yapı tasarımı yapmak, tasarım için sağlıklı sonuçlar vermez. Katarların işletme hız aralıklarının da dingil yükünde yapacağı artışı göz önüne alınması, iyi bir altyapı tasarımı için muhakkak gereklidir.

Hız, özellikle yüksek hızlı demiryollarının altyapı tasarımında bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızlı trenin hızı, alttaki yumuşak zemin, yol yatağı / dolgu ve hareketli yükten oluşan dinamik sistemin karakteristik dalga hızına erişebilir ya da aşabilir. Tren hızı, bir “kritik hız” a eriştiğinde büyük şekil değiştirmeler oluşabilir.

Bu hareketler, tren ve yapının bütünlüğü için tehlikeli olabilir, yol bakım maliyetlerini yükseltir. Bu nedenle yoldaki şekil değiştirmeleri kabul edilebilir düzeylerde sınırlayacak, dinamik bir rijitlik sağlayacak dolguların tasarımının yaşamsal önemi vardır.

Bu problem, bazen “ondülasyon”, “yaylı dalga” ya da “kritik hız” etkisi olarak tanımlanır ve yeni bir yüksek hızlı demiryolu tasarlandığında ya da mevcut demiryolunu yüksek işletme hızları için iyileştirme amacıyla geoteknik ölçütler belirlenirken önemlidir.

(V_{cr}) Kritik hız, Kenney (1954) tarafından şöyle formüle edilmiştir (Şekil 3):

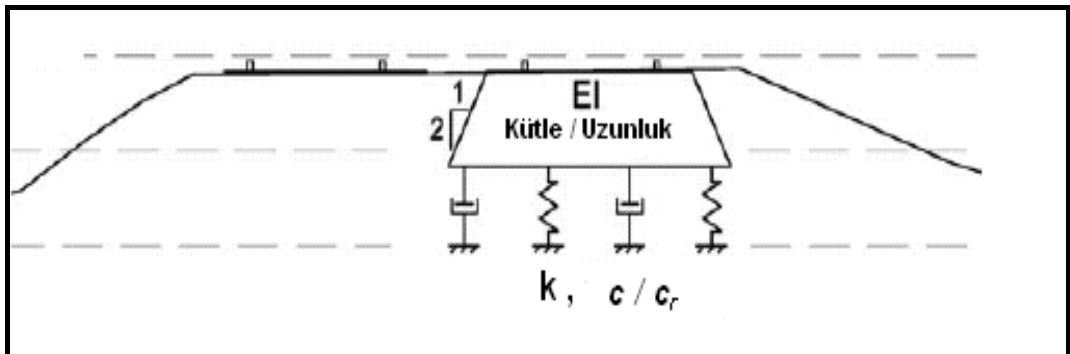
$$V_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{\rho^2}} \quad (5.4)$$

k = kirişin birim uzunluğunun yay sabiti,

E = kirişin elastiklik modülü,

I = kirişin atalet momenti

ρ^2 = kirişin birim uzunluğunun kütlesi.



Şekil 5.5 Balast içeren visko-elastik temel olarak modellenen dolgu ve altyapı (Erel, 2007)

Kenney bu formülü, bir visko-elastik Winkler ortamı üzerindeki bir Euler –Bernoulli kirişi üstünde, sabit hızla hareket eden bir noktasal yük için geliştirmiştir. Kenney'in analitik çözümünde, dolgu ve taban zemini, lineer yaylar üzerine mesnetlenmiş tek bir kiriş olarak

basitleştirilmiştir. Diğer yöntemlerde, sistem lineer olmayabileceğinden, yük büyüklüğü ve dağılımındaki değişikliklerin de hesaba katılması gerekir.

(θ) Hız oranı, tren hızının kritik hıza oranıdır. Benzer şekilde Kenny (1957) aynı zamanda (c_{cr}) kritik sönümlemeyi ve (β) sönümleme oranını da tanımlamıştır.

$$\theta = \frac{V}{V_{cr}} \quad c_{cr} = 2\sqrt{k\rho} \quad \beta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (5.5)$$

Kritik hızları aşan hızlarda altyapıda meydana gelen bozulmalar demiryolu tasarımı ile uğraşan birçok kişi için araştırma konusudur. Yüksek hızın, altyapıya ve üstyapıya olan olumsuz etkilerinin belirlenmesi ve bu etkileri optimum seviyede tutmak için yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

5.2 Yapısal Özellikler

Yüksek ve konvansiyonel hızlı trafikte önemli projelendirme görevlerinden birisi, yol yatağı-dolgu – altyapı sistemlerinin dinamik davranışlarının analizidir. Amaç, rastlanan titreşimler ve titreşimin altyapıya iletilmesini ve orada yayılmasını minimize etmektir. Bu konuda yol yatağı tabakaları (YYT) ve taban zeminin esneklikleri, geleneksel tanımı ile “yatak katsayısı (düşey rijitlik)” çok önemli rol oynar.

Bir demiryolu hattının düşey rijitliği (K), rayın üzerine uygulanan belirli bir yükün (Q) ve sözü edilen yükün bütün hatta ortaya çıkardığı düşey çökme ile ilişkili bir katsayıdır (5.6).

$$K = \frac{Q}{y} \left(\frac{kN}{mm} \right) \quad (5.6)$$

Demiryolunda kullanılan ray tipinin, kullanılan balast özelliklerinin ve üstyapının konfigürasyonun, hattın düşey rijitliğine olan etkisini hesaplamak, Zimmerman’ın formülü ile mümkündür. Matematiksel olarak:

$$K = \frac{2BC}{A} \sqrt[4]{\frac{4EI A}{BC}} \quad (5.7)$$

Burada;

C: Balast katsayısı,

B: Sanal giriş genişliği,

A: Traversler arası mesafe,

EI: Rayın rijitliğidir.

Genelde, ray tipleri ve traversler (birbirleri arasındaki mesafeleri içerir) bütün ülkelerde nispeten standart hale getirilmiştir. 1960’larda ve 1970’lerde hattın rijitliğinin değişiminin balast ve zeminin taşıma kapasiteleri ile ilişkilendirilmesi şaşırtıcı değildir. Buna bağlı olarak, yumuşak taban zeminlerinde 5~25 kN/mm, kaya taban zeminlerde 30~40 kN/mm arasında olmasına karşın, sıklıkla ortalama değer olarak 30 kN/mm alınır (Pita, 2004).

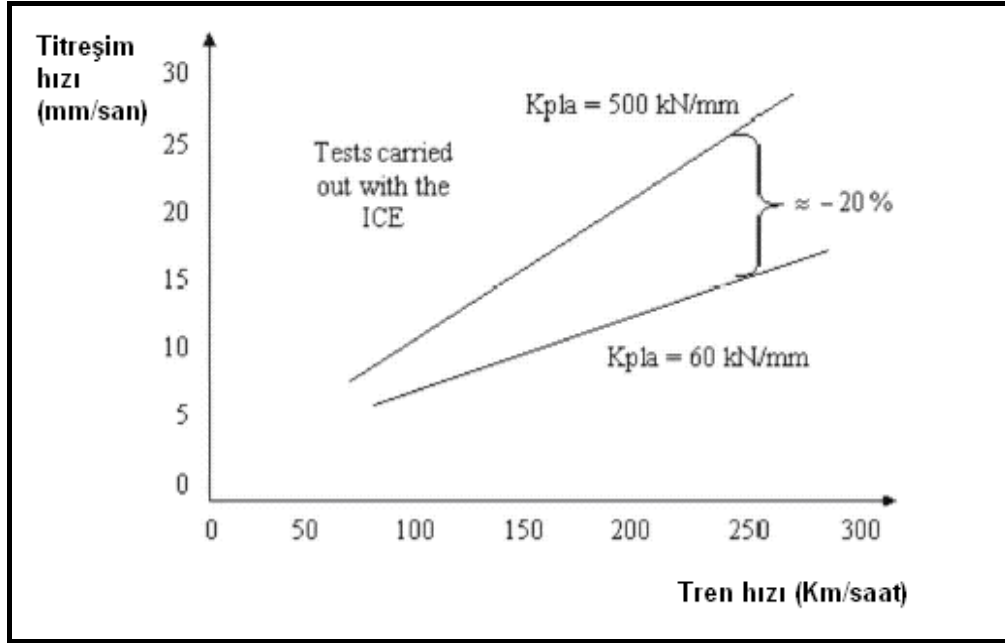
Yapılan araştırma sonuçlarına göre, aşağıdaki çelişkili etkilere karşı, yol için en uygun bir düşey rijitlik vardır:

- a) Yüksek düşey rijitliğe sahip yollarda, ray üzerinde daha aşırı dinamik yükler oluşur,
- b) Aşırı esnek yollarda, taşıt tarafından daha fazla enerji yapıya iletilerek boşa harcanır.

Yolun düşey rijitliğinin etkisinin belirlenmesi kapsamında Almanya Demiryolları tarafından yükleme plakası ile yapılan düşey rijitlikte (normal yollardaki mesnet levhalarının rijitliğinin beşte birine) azaltma ölçümleri, balast tabakasında taşıtların oluşturduğu titreşim hızlarında fark edilir azalma olduğunu göstermiştir. Şekil 5.6’da görüldüğü gibi, (titreşim hızı / seyir hızı) oranında da küçük bir sapma oluşmaktadır. Pita’a (2004) göre, yolun düşey rijitliğinin azaltılmasının, yol geometrisindeki bozulmanın azaltılmasında önemli bir rol oynayacağını varsaymak mantıklıdır. Çünkü:

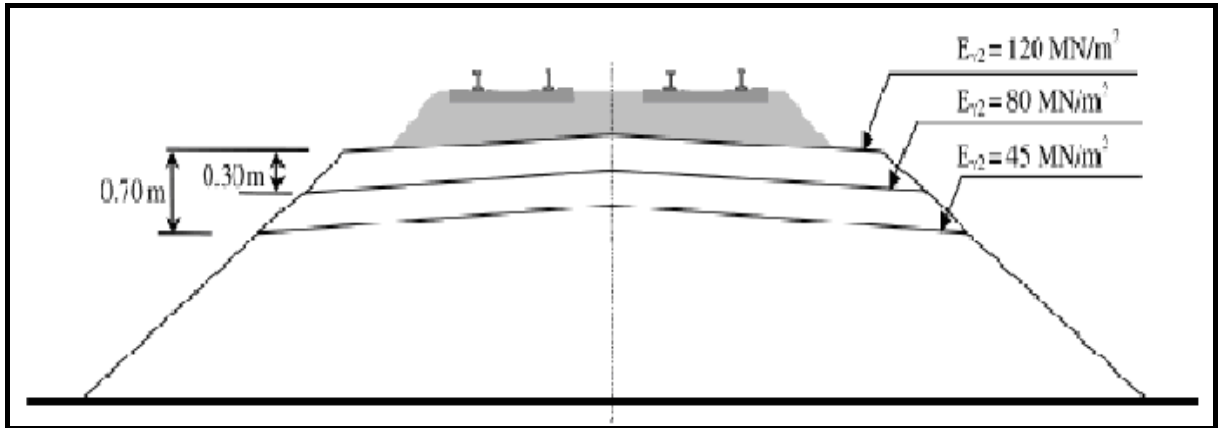
- a) Taşıtların askıya alınmamış (süspanse edilmemiş) kütlelerinin yolda oluşturacakları düşey dinamik gerilmelerin sınırlandırılmasına yardımcı olur,
- b) Özellikle yüksek elastisiteye sahip mesnet levhaları ile balast danelerinin titreşim hızlarının seyir hızına göre azaltılmasına yardımcı olur.

Bunun karşıtı olarak, yoldaki düşey rijitliğin daha az olması, yüksek hızlarda daha fazla enerji kaybına ve dolayısıyla daha yüksek işletme maliyetlerine yol açar.



Şekil 5.6 Mesnet levhasının elastikliğinin balastın titreşimine etkisi (Pita, 2004)

Yüksek hızlı demiryollarında traverslerin altında çok sayıda malzeme bulunması, balast – platform sisteminin düşey rijitliğinin, geleneksel bir demiryolunun düşey rijitliğinden 2 – 3 kat daha büyük değerlere ulaşmasına neden olur. Bu şekiller, Fransız yüksek hızlı demiryolu hatlarının tasarım ölçütüne karşıt gelir. Almanya’daki ilk yüksek hızlı demiryolu hatlarının durumu ise Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7 Hannover-Würzburg hızlı treninin karakteristik altyapısı (Pita, 2004)

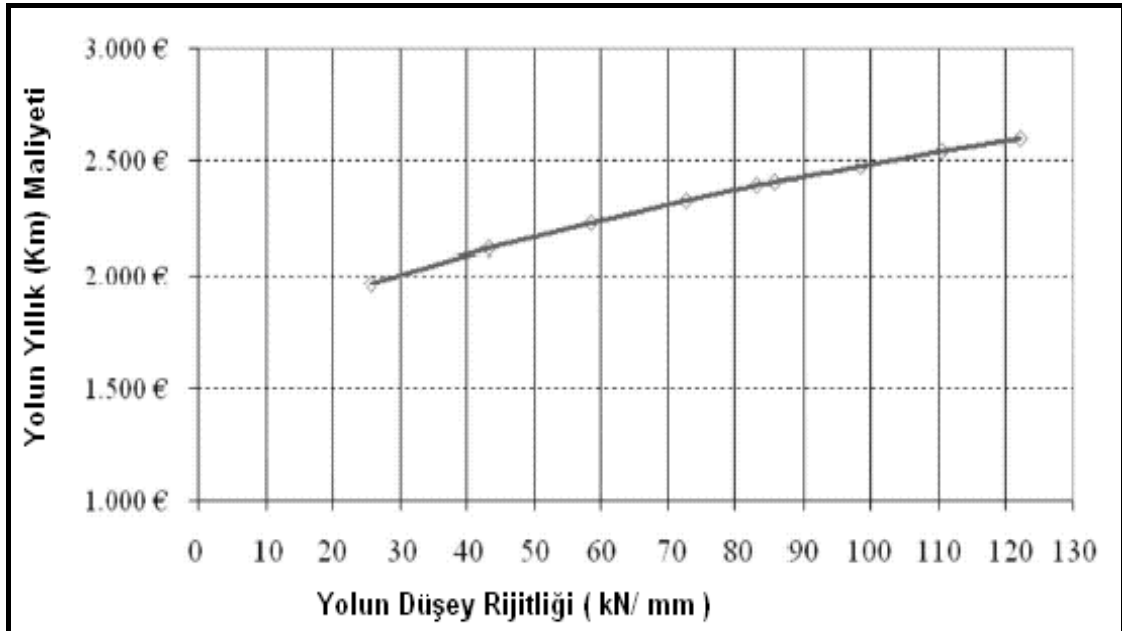
Eisenmann ve Rump’a göre yolun bu yapısal biçimi, Çizelge 5.3’de görüldüğü gibi, yüksek balast katsayısına yol açar (yolun düşey rijitliğinin indirekt ölçütü). Bu tablodaki sonuçlar, Almanya yüksek hızlı demiryollarında yerinde yapılan deneysel ölçümlere karşıt gelmektedir. Değerler, yeni Almanya yüksek hızlı demiryollarının geleneksel yollarının iki katından fazla balast katsayısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu araştırmalara göre, bu gerçek yüksek hızlı demiryolunun geometrik kalitesinin erken bozulması anlamına gelmektedir.

Çizelge 5.3 Bazı Almanya demiryollu hatlarında balast katsayıları (Pita, 2004)

Yol Tipi	Yapı Tipi	Balast Katsayısı (N/mm ³)
Eski ve iyileştirilmiş	Az dayanım kapasitesi	0,05
	İyi kalite	0,15
Yeni yol		
Hannover – Würzburg	Doğal platform	0,30 – 0,40
Mannheim - Stuttgart	Köprüler ve tüneller	0,40 – 0,50

Yolun düşey rijitliği için uygun bir değer bulunması önemlidir. Erel'in (2007) belirttiği gibi en uygun değeri bulmak için iki farklı görüş açısı bulunmaktadır; ilki, fazla esnek bir yolun neden olduğu yüksek enerji maliyetleri, ikincisi yüksek düşey rijitliğe sahip bir yolda geometrik kalitenin korunması için bakım maliyetlerinin artmasıdır.

Eğer yolun geometrik kalitesindeki bozulma düzeyi ile bu bozulmanın oluşturacağı bakım maliyetleri arasındaki direkt ilişkinin varlığı makul geçerli kabul edilebilirse, bakım maliyetlerinin Şekil 5.8'de gösterildiği gibi bir evrim yasasını izleyeceği kabul edilebilir.



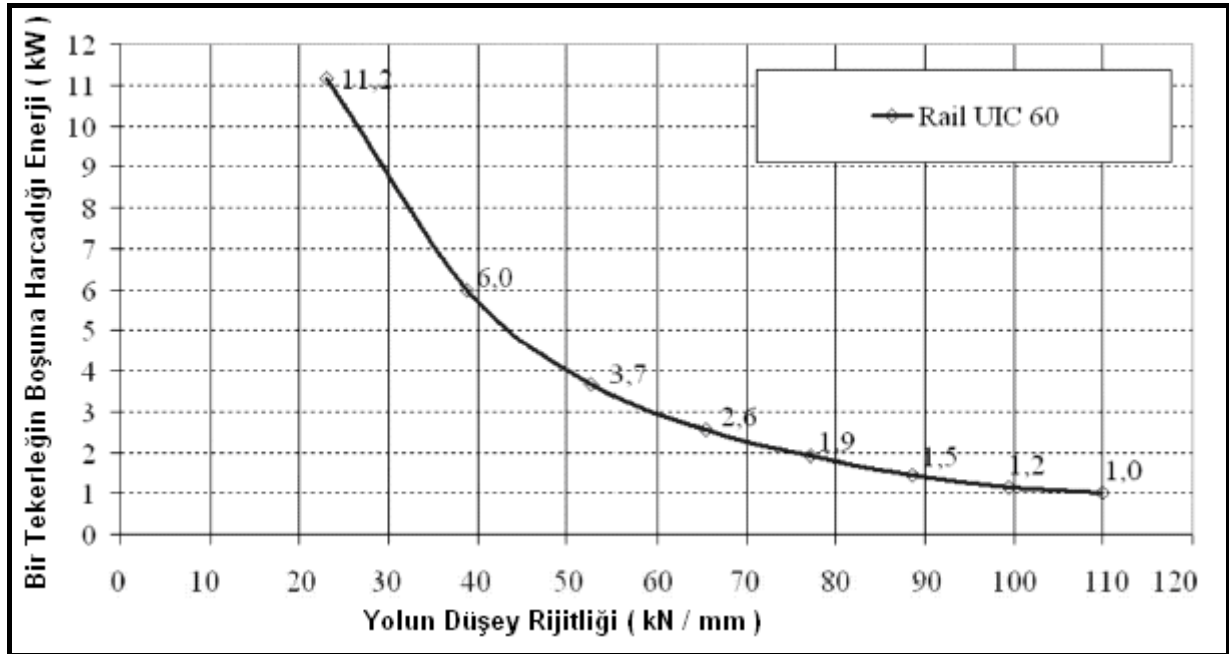
Şekil 5.8 Bakım maliyetlerinin düşey rijitlikle değişimi (Pita, 2004)

Bu evrimi ekonomik terimlerle ölçülendirmek için olası yaklaşımlardan birisi, bir yolun ilgili bakım maliyetlerini bilinen bir düşey rijitlikle ilişkilendirilmesine bağlıdır. Bu yöntemde,

bakım maliyetlerinin diğer farklı düşey rijitlik değerleri için ekstrapolasyonu mümkün olabilir.

Bu konuda Paris ve Lyon arasındaki hızlı demiryolu hattından referanslar elde edilebilir. Bu hatta yolun düşey rijitliği, Alias and Prud'Homme tarafından 80 kN/mm olarak belirtilmiştir. Yol geometrisi bakım maliyetleri ile ilişkili olarak, SNCF (French National Railway Company) tarafından yayınlanan sonuçlar, yaklaşık ortalama yıllık maliyet, yolun km'si başına 2400 Euro/km'dir. Maliyet olarak verilen ekonomik değer sadece, direkt olarak geometrik kalite bozulması ile ilişkili olan, buraj ve yol doğrultulması işlemleri ile ilişkilidir. Ray taşlanması, yol aygıtlarının iyileştirilmesi, yönetim personeli ve malzemelerin temini vb. bu değere katılmamıştır.

Yol üzerine dağılarak boşa harcanan enerjinin ekonomik etkisi, şöyle değerlendirilebilir. Sauvage and Fortin tarafından elde edilen sonuçlar esas alınarak, UIC 60 rayının kullanıldığı bir hızlı demiryolu hattında dağılan enerjinin miktarını değerlendirebilmek için, bu yazarlar tarafından yayınlanan sonuçlar Şekil 5.9'da görülmektedir. Bu yolla, 300 km/saat sabit hızla seyreden bir tren için, 8,15 ton'luk bir tekerlek tarafından kilometre başına basitleştirilmiş yaklaşık E_i enerji dağılımı değerlendirilebilir (TGV trenleri için) (Pita, 2004).



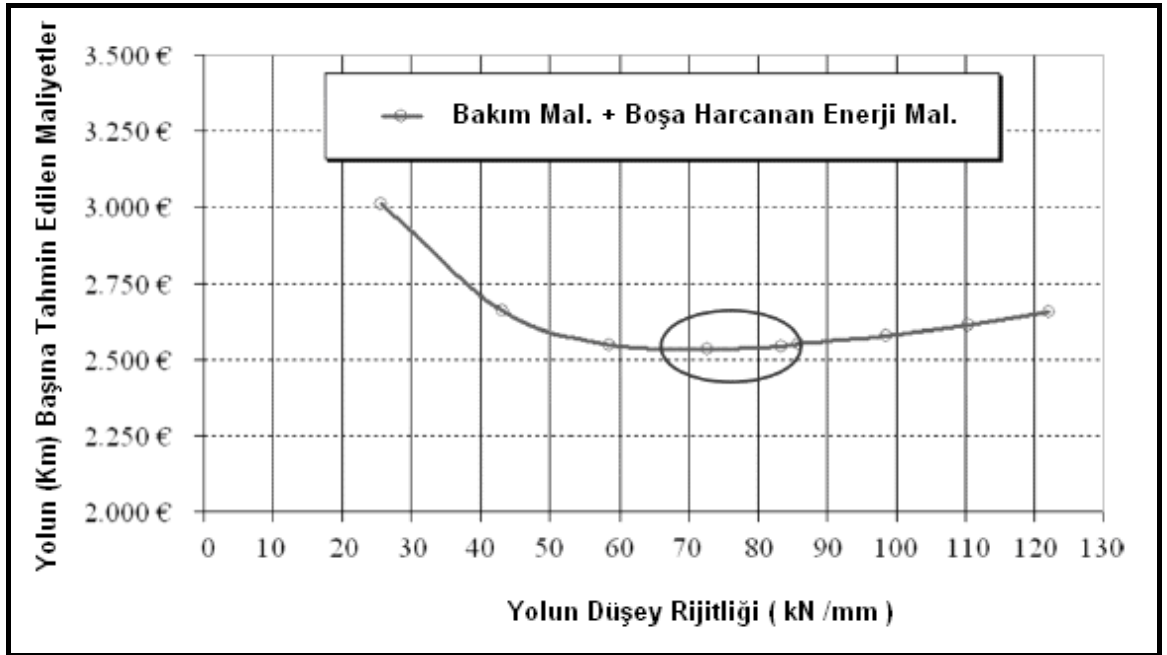
Şekil 5.9 Yol rijitliği yüzünden, tekerlek tarafından boşa harcanan enerji (UIC 60 rayı için) (Pita, 2004)

Hem yolun düşey rijitliğinin yolun geometrik bakım maliyetlerinin, hem de dağılarak boşa harcanan enerji maliyetlerinin etkileri ile ilgili öncelikli düşünceler temel alınarak, optimum (en uygun) düşey rijitlik için bir eşik tanımlamak mümkün olur.

Bu eşik, bu ikili perspektif açısından toplam minimum maliyete yönlendirir: geometrik kalitenin korunması maliyeti ve kaybedilen enerji maliyetleri.

Şekil 5.10'deki grafik, optimum düşey rijitlik eşliğinin 70 ile 80 kN/mm arasında olacağını gösterir. Optimum düşey rijitlik değeri hesabı yapılırken, aşağıda verilen büyüklükle hesaba katılmaktadır.

- a) Kilowatt-saat başına kabul edilen maliyet;
- b) Referans olarak alınan düşey rijitlik;
- c) Dikkate alınan yol geometrisi bakım maliyeti



Şekil 5.10 Yol rijitliği ile toplam maliyetler arasındaki ilişki (Erel, 2007)

Rayın altındaki toplam düşey rijitlik değerini hesaplamak için, Moravcik taban plakasının ve traversin altında bulunan granüler malzemelerin rijitliğini de dikkate alan bir hipotez geliştirmiş ve bu hipotezi (5.8)'de gösterildiği gibi formüle etmiştir.

$$K_s = \frac{K_{ml} K_{bpl}}{K_{ml} + K_{bpl}} \quad (5.8)$$

Burada;

K_s = Mesnet levhası ve balastlı platform sisteminin oluşturduğu ray mesnetlenmesi düşey rijitliği

K_{ml} = Mesnet levhasının düşey rijitliği

K_{bp} = Balastlı platform sisteminin düşey rijitliği

Çizelge 5.4 ve 5.5’de Almanya ve Fransa’ya ait çeşitli mesnet levhası rijitlikleri için ray mesnet rijitlik değerleri verilmektedir.

Çizelge 5.4 Fransız demiryolu hatlarında ray mesnetlenme rijitlikleri (Pita, 2004)

Balast+Platform Sisteminin Düşey Rijitliği (kN/mm)	Taban Plağının Düşey Rijitliği (kN/mm)		Ray Mesnetlenme Toplam Düşey Rijitliği (kN/mm)	
	Klasik Hatlar	Yüksek Hızlı Hatlar	Klasik Hatlar	Yüksek Hızlı Hatlar
46	150	90	35,2	30,4
68	150	90	46,8	38,7
96	150	90	58,5	46,4
107	150	90	62,4	48,8

Çizelge 5.5 Almanya demiryolu hatlarında ray mesnetlenme rijitlikleri (Erel, 2007)

C (N/mm³)	K_{bp} (kN/mm)	Travers ve Taban Plağı	Taban Plağı Düşey Rij. (kN/mm)	Ray Mesnetlenme Toplam Düşey Rij. (kN/mm)
0,35	99,7	B70W ZW 687a	500	82,6
0,35	99,7	B70W 14 K90	60	37,3
0,35	99,7	B75 Ioarv 300	27	22,8

Fransa ve Almanya hatlarındaki mesnet levhalarının rijitlikleri arasındaki dikkati çeken farklılıklar, ray mesnetlenme rijitliği konusunda dikkati çeken farklılıklar oluşturur. Dolayısıyla, yüksek hızlı hatlardaki mesnet levhalarının düşey rijitliklerinin arzu edilen değerlerinin merak edilmesi akılcı görünmektedir. Yaklaşık yanıt şöyle olabilir:

Yüksek hızlı hatlarda, balast-platform sisteminin düşey rijitliği yaklaşık 98 kN/mm’dir. Eğer yol için arzu edilen düşey rijitliğin 75 kN/mm olduğu varsayılırsa, mesnet levhalarının yaklaşık 30 – 50 kN/mm değerinde bir rijitliğe sahip olmaları gerektiği kolaylıkla ortaya çıkar. Mesnet levhasının esneklik etkisinin, balast içindeki titreşimlerin düzeyinin azaltılmasındaki yararlı etkiyi de unutmamak gerekir.

Deneyimler ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, düşey rijitlikteki bir artış, taşıtların ray üzerinde oluşturacakları düşey gerilmeler üzerinde negatif bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte, düşey rijitlikteki böyle bir değişim, yol içine gereksiz yere dağılan enerji miktarını da azaltır. Bu çelişki (ikilem), düşey rijitlik için, hem yol geometrisinin bakım maliyetleri ve hem de enerji maliyetleri ile ilgili ekonomik maliyetleri minimize edecek bir optimum değer bulmak için çaba harcanmasını önerilir duruma getirir.

Yapılan araştırma, yüksek hızlı hatlarda, yolun düşey rijitliği için optimum değerlerin 70 – 80 kN/mm olacağını göstermiştir. Bu sonucun elde edilmesinde kullanılan hipotezler, hattan hata değişebilir, ancak bütünsel olarak bu hipotezlerin etkisi elde edilen sonuçları fazla değiştirmez. Bu çalışmada ayrıca, yüksek hızlı hatlarda kullanılan ve 90 ile 500 kN/mm arasında değişen mesnet levhaları düşey rijitlikleri için önerilebilecek değerler de incelenmiş, sonuç olarak 30 – 50 kN/mm bulunmuştur. Bu konudaki optimizasyon, hem taşıtların yola ilettikleri düşey gerilmeleri, hem de balast tabakası içindeki titreşimleri azaltmak konularında yararlı olacaktır (Erel, 2007).

5.2.1 Yol Yatağı Tabakasının Özellikleri

Altyapı tasarımında belirleyici parametrelerden bir tanesi olarak, yol yatağı tabakasının (YYT) özellikleri gösterilebilir. Yol yatağının, temel zemini, alt balast ve balast tabakalarının bir bütünü olduğuna daha önceki bölümlerde değinilmişti. Altyapı tasarımı yaparken, YYT'yi oluşturan tabakalarda kullanılan malzemenin özellikleri muhakkak göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tabakaların özellikleri ile ilişkili bilgiler, temel zeminin için, başlık 4.1 ve 4.2; yol yatağı tabakasının diğer bölümleri, başlık 4.3'de geniş olarak anlatılmıştır.

5.2.2 Üstyapı Özellikleri

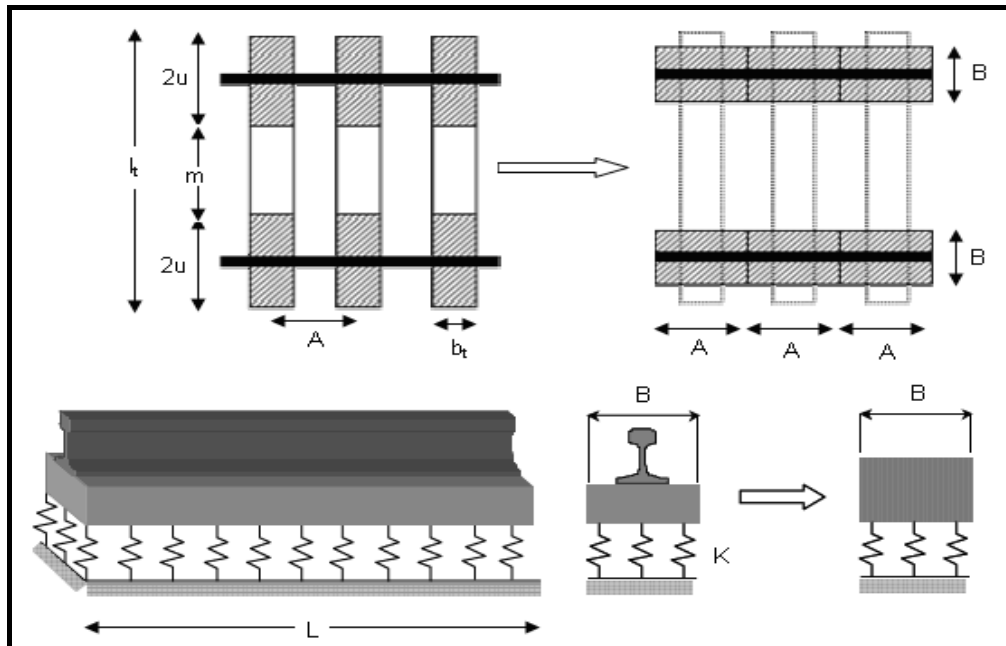
Dingil yükü, hız, düşey rijitlik ve yol yatağı tabakasına ek olarak, altyapı tasarımında belirleyici bir parametre olarak üstyapının özelliklerini de saymak mümkündür. Üstyapıyı oluşturan rayın, traversin, bağlantı elamanlarının ve elastomer mesnetlerin taşıtlardan gelen statik ve dinamik etkiler karşısında nasıl tepki gösterdikleri ve üstlerine gelen yükleri ne ölçüde güvenli bir şekilde alt tabakalara ilettikleri altyapı tasarımı yaparken sorulması gereken sorulardır. Özellikle, ray ve travers altında bulunan elastik mesnetlerin araçların süspansiyonlanmamış yüklerinin meydana getirdiği titreşimleri, ne düzeyde azaltarak altyapıya ilettiği önemli bir konudur. Üstyapıyı oluşturan elemanlar ve bunlar hakkında geniş bilgi tezin “3.3” başlığı altında verilmiştir.

6. DÜŞEY YÜKLER İÇİN HESAP YÖNTEMLERİ

Demiryolu altyapısına ve üstyapısına gelen dinamik etkileri hesaplamak için, dünyada kullanılan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar, “Statik Yöntem”, “Quasi-Statik Yöntem” ve bir diğeri de “Dinamik Yöntem” dir. “Statik” yöntemde hat üzerindeki katarın etkisi dinamik değil, statik bir yük olarak kabul edilir. “Quasi-Statik Yöntem” de durağan olarak hesaplanan kuvvetler bir “dinamik etki katsayısı” ile çarpılarak kullanılır ve böylece statik olarak hesaplanmış yükler dinamik bir etki olarak hesaba katılır. “Dinamik Analiz” de ise hat üzerinde hareket eden trenin, hat üzerindeki etkileri dinamik olarak modellenir ve bu değerlere göre boyutlandırmalar yapılır. Bu yöntemler arasında en iyi sonucu “Dinamik Analiz” vermesine karşın, bu yöntemde bir model oluşturmak zor ve hesaplar “Quasi-Statik Yöntem”e göre daha zordur.

6.1 Statik Yöntem Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı

Üstyapı elemanlarının düşey dinamik dingil yükleri altındaki zorlanmalarının araştırılmasında kullanılan en yaygın yöntem, Winkler'in geliştirmiş olduğu ve Zimmermann'ın demiryollarına uyguladığı "Elastik Tabana Oturan Sürekli Kiriş Yöntemi"dir. Winkler hipotezine bağlı olarak Şekil 6.1'de ki yol çerçevesi, Zimmermann tarafından traverslerin yük ileten kısımlarının 90° döndürülerek, uç uca eklenmesiyle ray ve traverslerden oluşan sanal (hayali) bir sürekli kompozit kirişe dönüştürülmüştür. Winkler hipotezine bağlı olarak, Zimmermann'ın geliştirdiği hesap yöntemine ilişkin eşitlikler aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.1 Elastik tabana oturan sürekli kiriş modeli (Esveld, 2001)

Şekil 6.1’de ki, “B” sanal kiriş genişliği, “L” karakteristik uzunluk (elastik uzunluk) olarak isimlendirilir. Winkler hipotezine bağlı olarak geliştirilen “Sürekli Kiriş Modeli” için öncelikle sanal kiriş genişliği ve karakteristik uzunluk değerleri elde edilir.

Sanal kiriş genişliği;

$$B = \frac{2u \cdot b_t}{A} \quad (6.1)$$

Eşitlikte yer alan “2u” değeri traversin yük ileten kesimlerinin uzunluğu olup;

$$2u = \frac{l_t - m}{2} \quad (6.2)$$

şeklinde ifade edilir.

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

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{BC}} \quad (6.3)$$

Şekil 6.2’de, Winkler hipotezine bağlı olarak dikkate alınan kiriş elemanı ile birlikte tekil Q statik dingil yükünün yol yapısına $x = 0$ noktasında etkimesi durumunda elde edilebilecek moment ve deformasyon grafikleri verilmiştir.

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

$$y(x) = \frac{Q}{2CBL} \eta(x) \quad (6.4)$$

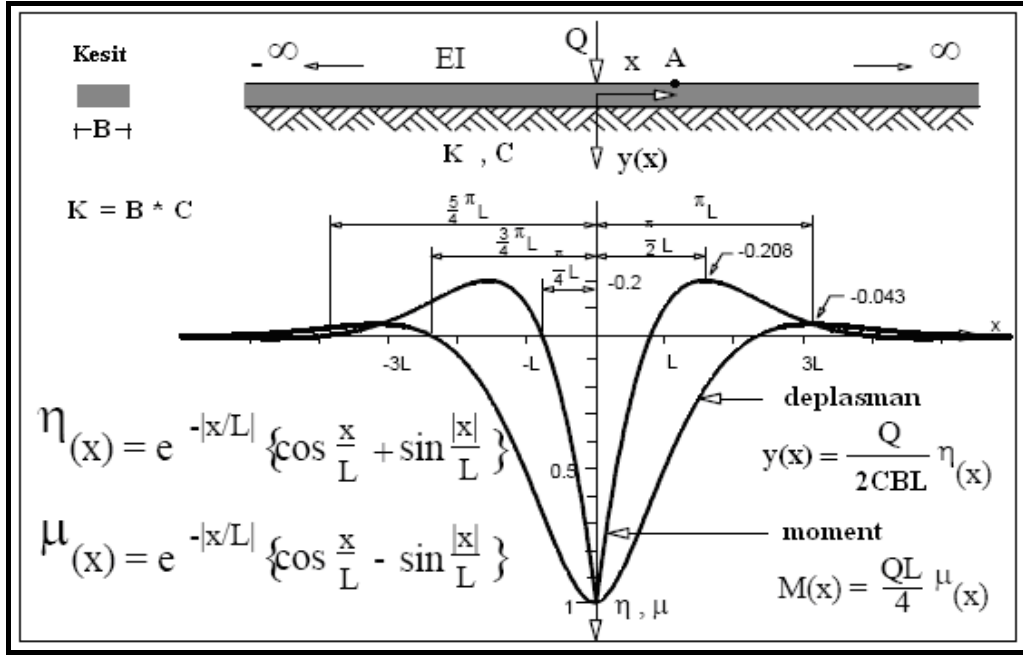
$$\eta(x) = e^{-(x/L)} (\cos(x/L) + \sin(x/L)) \quad (6.5)$$

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

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) \quad (6.6)$$

$$\mu(x) = e^{-(x/L)} (\cos(x/L) - \sin(x/L)) \quad (6.7)$$

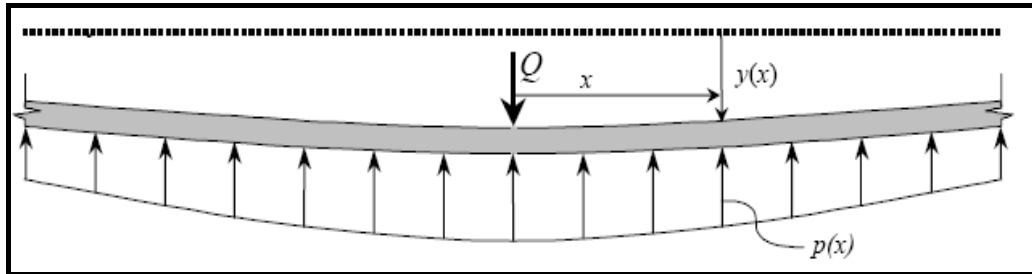
şeklinde hesaplanır.



Şekil 6.2 Winkler kirişinin Q tekerlek yükü altında moment deformasyon grafiği

Kiriş tabanının A noktasında elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi ise, elastik tabanın yatak katsayısı ve düşey elastik çökme değerlerine bağlı olarak aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır (Şekil 6.3);

$$P(x) = C \cdot y(x) \quad (6.8)$$



Şekil 6.3 Kiriş tabanının elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi

Yukarıdaki sembollerin anlamları ve birimleri aşağıda verilmiştir;

Q : Statik tekerlek yükü (N)

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

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

$M(x)$: Kirişin A noktasındaki eğilme momenti (Nm)

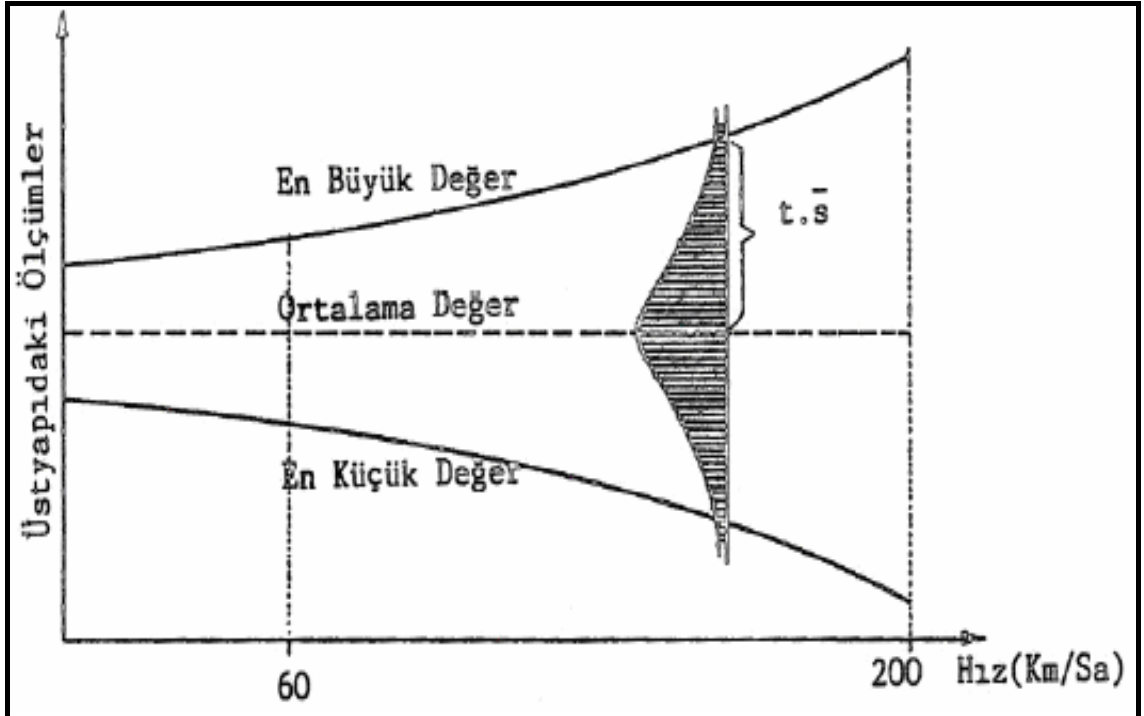
A : Travers aralığı (mm)

bt : Travers taban genişliği (mm)

- lt : Travers taban uzunluğu (mm)
- lo : Traversin orta kısmındaki yük iletmeyen uzunluğu (mm)
- B : Sanal kiriş genişliği (mm)
- L : Karakteristik / Elastik uzunluk (mm)
- C : Elastik tabanın yatak katsayısı (N/mm^3)
- K : Elastik tabanın yay katsayısı (N/mm^2)
- η : Çökme etki katsayısı
- μ : Moment etki katsayısı

6.2 Quasi-Statik Yöntem Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı

Zimmermann yöntemi ile elde edilen statik zorlanmalardan mevcut dinamik zorlanmaların tahmin edilebilmesi için, Münih Teknik Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nce Eisenmann ve ekibi tarafından yapılan uzun süreli ölçüm sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi sonucu, seyir hızı ve üstyapının bakım durumuna bağlı olarak bir “Dinamik Etki Katsayısı” geliştirilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Hız ve üstyapının bakım durumuna göre dinamik etki katsayısı (Erel, 1989)

Dinamik etki katsayısının belirlenmesi için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\rho = 1 + t \cdot \bar{s} \quad (6.9)$$

Burada;

ρ : Dinamik etki katsayısı

t : Güvenlik katsayısı

$\bar{s}$: Değişim katsayısı

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

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

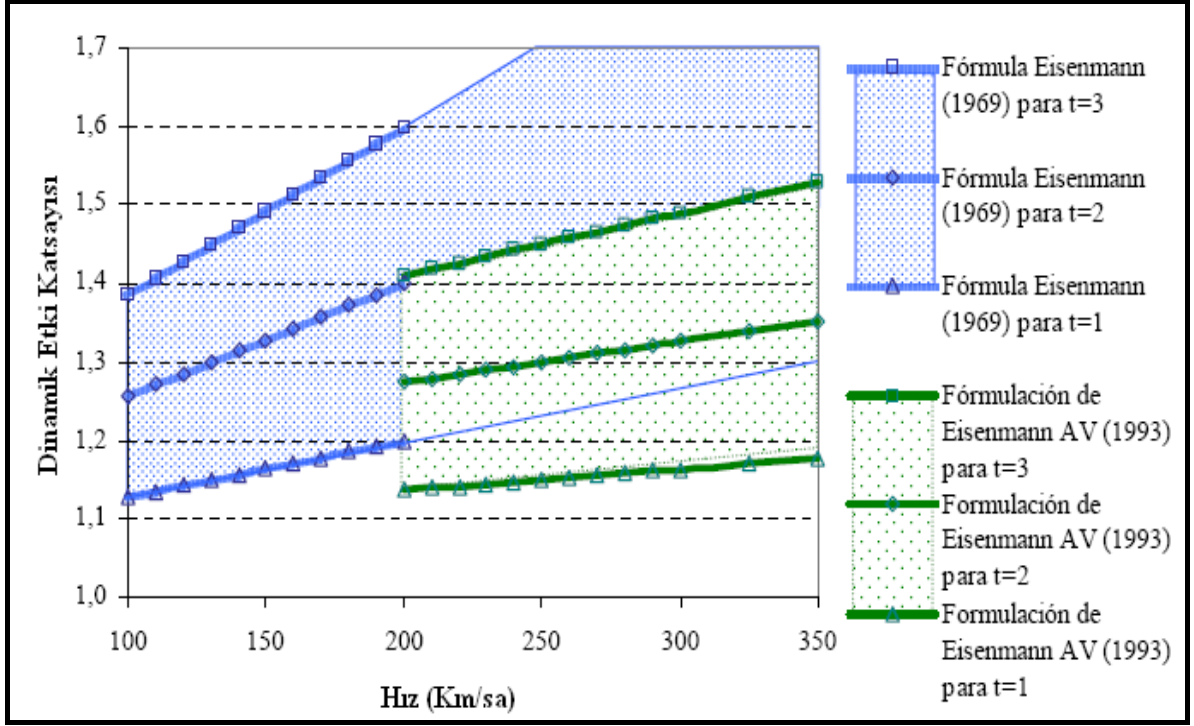
Değişim katsayısının belirlenmesinde kullanılan “ φ ” değeri “Hız Katsayısı” olup “V” seyir hızına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad ; 60 < V \leq 200 \text{ km/sa} \quad (6.10)$$

$$\varphi = 1 \quad ; V \leq 60 \text{ km/sa} \quad (6.11)$$

Eisenmann, 1993 yılında yaptığı çalışmalarla, 200 km/sa’den daha yüksek seyir hızına sahip araçlar için yeni bir hız katsayısı formülü geliştirmiştir (6.12). Şekil 6.5’de, Eisenmann’ın farklı hız aralıklarında geliştirdiği dinamik etki katsayısı değerleri görülmektedir.

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{380} \quad ; V > 200 \text{ km/sa} \quad (6.12)$$



Şekil 6.5 60-200 Km/sa ve $V > 200$ Km/sa hızlar için dinamik etki katsayıları (Fonseca, 2003)

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

$$Q_{din} = \rho \cdot Q \quad (6.13)$$

$$y_{din} = \rho \frac{Q}{2CBL} \eta(x) \quad (6.14)$$

$$M_{din} = \rho \frac{QL}{4} \mu(x) \quad (6.15)$$

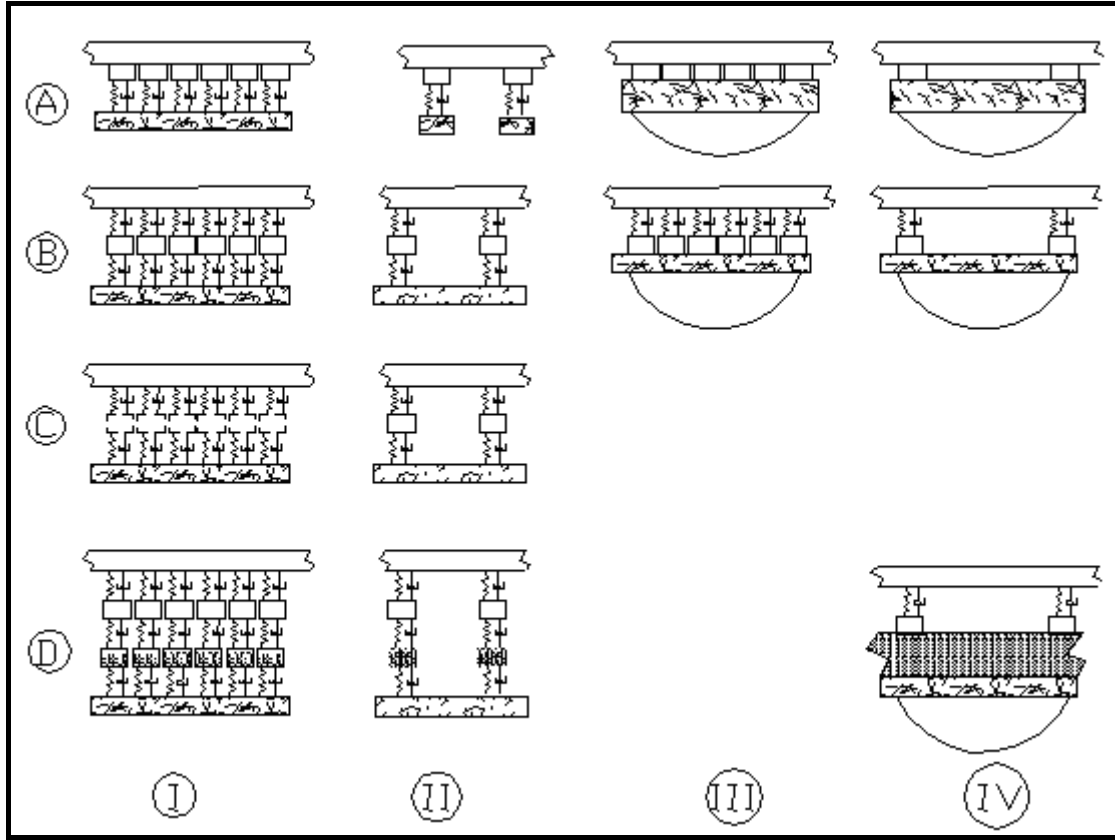
$$P_{din} = \rho \cdot C \cdot y(x) = \rho \frac{Q}{2BL} \quad (6.16)$$

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

6.3 Dinamik Analiz Yardımı İle Düşey Yüklerin Hesabı

Dinamik analizlerde kullanılan tüm yol modelleri için prensipte farklılık, yolun sürekli veya ayırık mesnetli şekilde ifade edilmesidir. Şekil 6.6'da analizler için kullanılabilecek yol modelleri detaylı bir şekilde gösterilmiştir. İlgilenilen bütün frekans aralıklarında, rayların ayırık traversler üzerine döşenmesi şekliyle oluşturulmuş yolların çoğu için ayırık mesnetlenmiş model tipi gerçeğe daha uygun bir temsil gösterse de, sürekli mesnet tipi, ayırık mesnetlerin yol boyunca döndürülüp uç uca eklenmesi ile elde edilmektedir. Böylece modelde

traversler kesintisiz bir tabaka halinde ve sürekli bir boyuna kiriş şeklinde temsil edilir. Bu sanal boyuna kiriş, rijit bir yapıymış gibi veya rijitliği ve kütlesi üniform dağıtılmış bir kiriş gibi modellenebilir (Şekil 6.6 CI).



Şekil 6.6 Yol modellerinin hiyerarşisi (Knothe 2001)

Şekil 6.6'da;

A: Tek tabakalı modeller (Tek kiriş modeli),

B: İki tabakalı modeller (Çift kiriş modeli),

C: Elastik traversli iki tabakalı modeller,

D: Travers ve balastın ayrı ayrı kiriş elemanı olarak düşünüldüğü üç tabakalı modeller (Üç kirişli model),

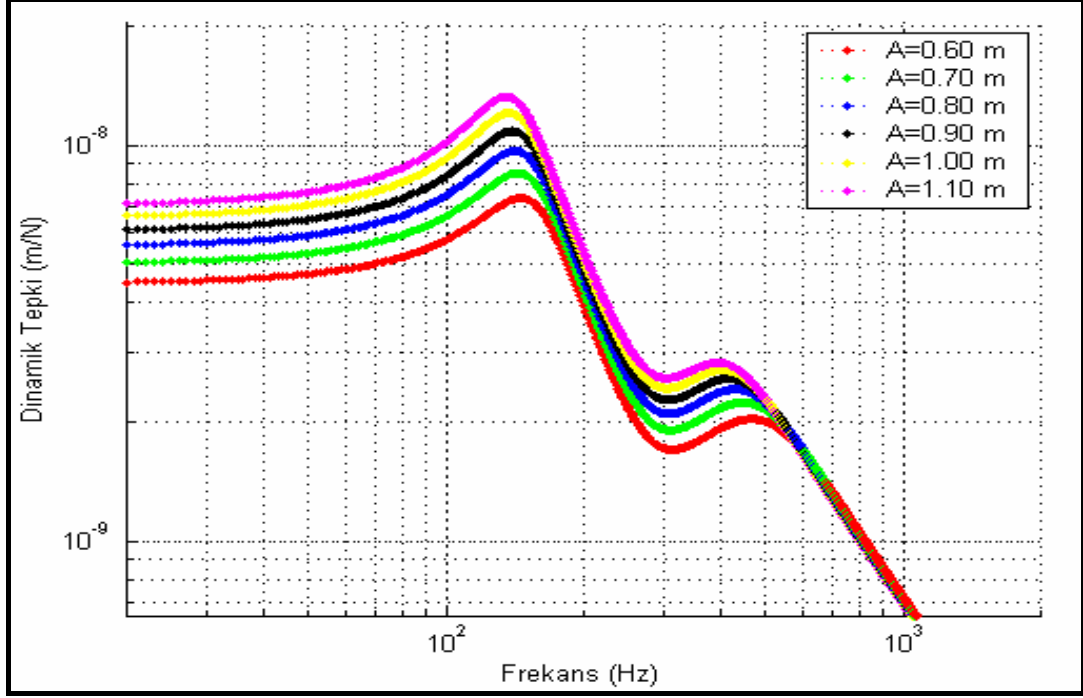
I: Sürekli mesnetli modeller,

II: Ayrık mesnetli modeller,

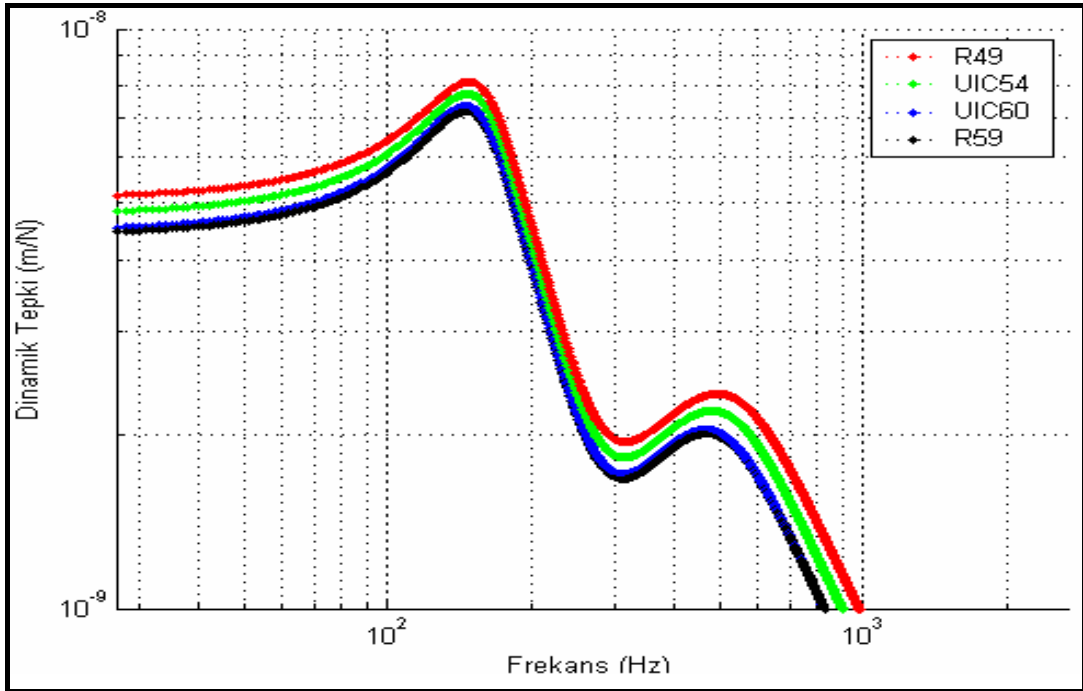
III: Sürekli mesnetli yarı-mekanlı modeller,

IV: Ayrık mesnetli sürekli yarı-mekanlı modeller.

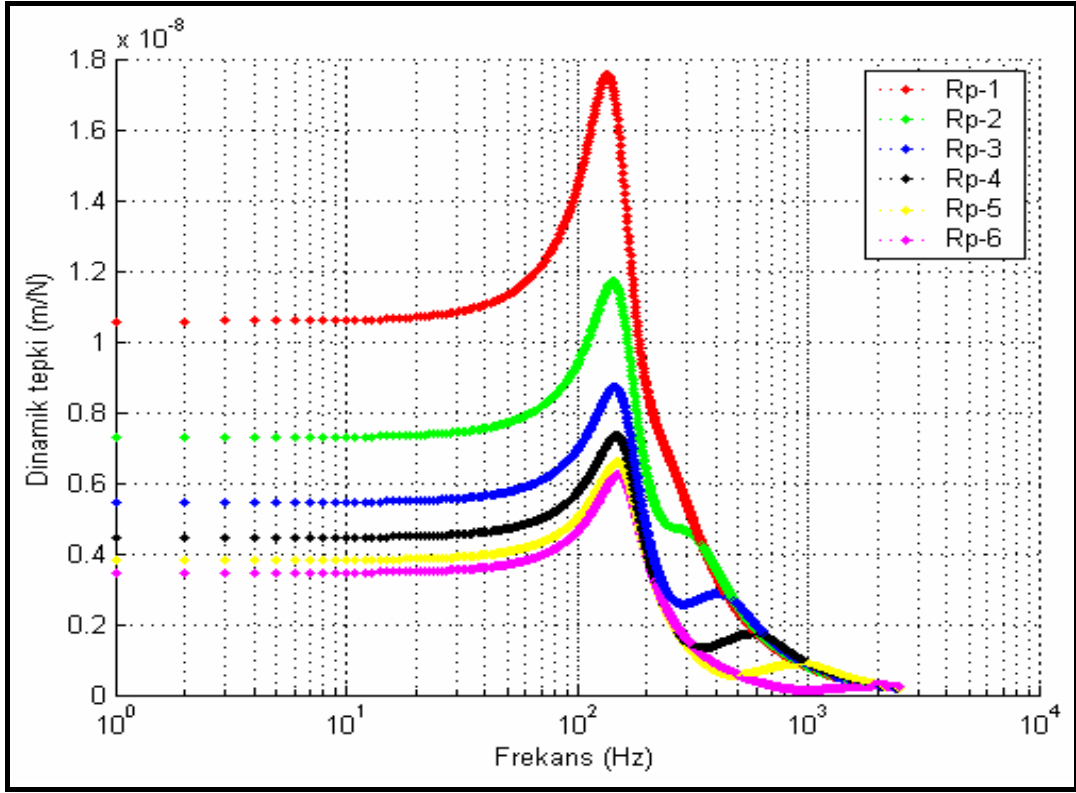
Tezin, örnek çalışma aşamasında kullanılacak yöntemi, “Quasi-statik” yöntem olacağından, dinamik yöntemde yüklerin nasıl hesaplandığı konusunda geniş bir bilgi verilmeyecektir. Ama dinamik analiz sonuçları hakkında fikir sahibi olunması amacı ile “Frekans Tanım Alanı Metodu” kullanılarak yapılan dinamik bir analizin sonuçları, Şekil 6.7-8-9-10-11-12’de gösterilmiştir.



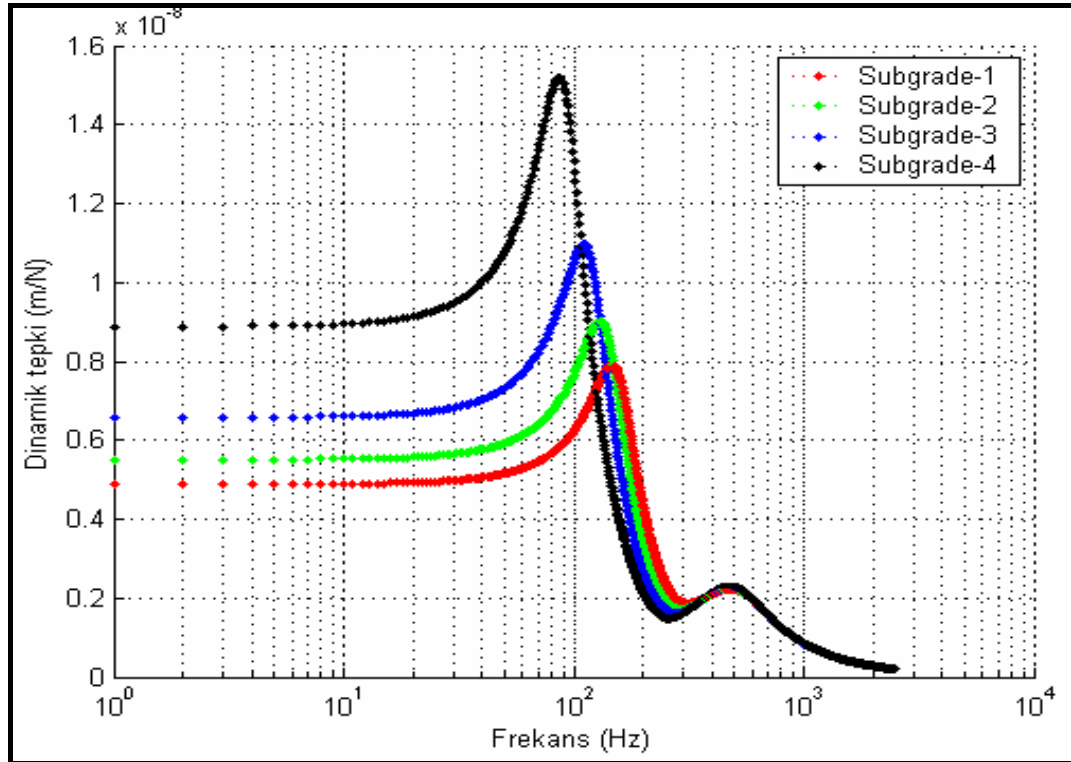
Şekil 6.7 Farklı travers aralıklarında “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi” (Yalçın, 2006)



Şekil 6.8 Farklı ray tiplerinde “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi” (Yalçın, 2006)



Şekil 6.9 Farklı ray elastomer mesnetlerde “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi” (Yalçın, 2006)



Şekil 6.10 Farklı altyapılar için “Dinamik Tepki-Frekans İlişkisi” (Yalçın, 2006)

7. ALTYAPI TASARIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER VE BU YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, yol yatağı tabaka kalınlıklarının hesaplamasında kullanılan beş tasarım metodu ve bunların karşılaştırılmasına değinilmektedir. Bu bölüm içinde verilen bilgilerin büyük bir kısmı M.P.N. Burrow vd.. (2006) yılında yayınladıkları “A comparison of railway track foundation design methods” isimli çalışmalarından alınmıştır.

Analiz edilen metotlar; ABD’de Li ve Selig tarafından hazırlanan GEOTRACK programının çalışma prensiplerini içeren metot, Uluslar arası Demiryolları Birliği standardı (UIC 719R), İngiliz Demiryolları Yöntemi, Demiryolu Ağları Şartnamesi ve Japonya’da, Batı Japon Demiryolu Şirketi’nin kullandığı metotlardır.

7.1 Tasarım Yöntemleri

7.1.1 Li ve Selig Yöntemi

Li ve Selig tarafından önerilen yöntemin hedefi, bütün artan kesme göçmesi ve aşırı plastik deformasyonları önlemektir. Bu temel zeminindeki gerilmelerin sınırlandırılması ile başarılabilir. Temel zemini gerilmeleri, yol sisteminin bir analitik modeli kullanılarak hesaplanır, izin verilen gerilmeler plastik şekil değiştirmeyi periyodik yükleme sayısı ile bağdaştıran bir denklemle belirlenir.

GEOTRACK olarak bilinen bir üç-eksenli, çok tabakalı elastik model, çeşitli trafik yüklemeleri altında temel zemini gerilme dağılımlarının belirlenmesi için oluşturuldu. Tasarım amaçları için model, altyapıyı bir homojen temel zemini üzerinde tek bir yol yatağı tabakası gibi basitleştirildi. Yol ve aracın düzensizlikleri sonucunda, yol yüklerinin artışının hesaplanması için, Li ve Selig, dinamik yüklerin kullanılmasını önerdi. Bu bilgilerin mevcut olmadığı yerlerde, Amerikan Demiryolu Mühendisler Birliğinin (AREA) geliştirdiği statik tekerlek yükünü değiştiren aşağıdaki formülün kullanılmasına hükmettiler.

$$K = 1 + \left(\frac{0.0052 \times V}{D} \right) \quad (7.1)$$

Burada, K dinamik tekerlek yükünün statik tekerlek yüküne oranı, V trenin hızı (km/sa) ve D’ de tekerlek çapıdır (m).

Bu metotta temel zemini performansının belirlenmesi için, tekrarlı yükleme altında izin verilen plastik şekil değiştirmeler ve deformasyonların belirlenmesinde, çeşitli ince daneli zeminlerde yapılan üç eksenli periyodik yükleme testleri kullanılmaktadır. Aşağıdaki formül

yardımları ile zemin sapma gerilmesi ile ilişkili olan temel zeminin toplam plastik şekil değiştirmesi bulunur.

$$\varepsilon_p (\%) = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_s} \right)^m N^b \quad (7.2)$$

Burada;

N: Tekrarlı gerilme uygulamalarının sayısı,

σ_d : Zemin sapma gerilmesi,

σ_s : Zeminin basınç mukavemeti,

ε_p : Zeminin toplam plastik şekil değiştirmesi,

a, b ve m: Zeminin tipine bağlı olan parametrelerdir.

Temel zeminin şekil değiştirebilen kısmının derinliğini boyunca integrali alınırsa, toplam kümülatif deformasyon belirlenebilir.

$$\rho = \int_0^T \varepsilon_p dt \quad (7.3)$$

Burada T, metre olarak temel zeminin derinliğidir. Tasarım için Li ve Selig, ε_p ve ρ değerlerinin sırasıyla %2 ve 25mm olarak sınırlandırılması gerektiğini ileri sürmektedir.

Li ve Selig, yukarıda verilen iki denklem yardımı ile iki adet tasarım abağı kümesi oluşturmuştur. Abaklardan birincisi, artan kesme göçmesini engellemek için gereken minimum yol yatağı tabakalarının kalınlıklarını verir ve bu kalınlıklar yol yatağı tabakasının, altyapı esneklik modülünün, zemin tipi ve trafik yükünün fonksiyonlarıdır. Abaklardan ikincisi, temel zeminin bir fonksiyonu olarak, aşırı plastik deformasyonu önlemek için gerekli olan yol yatağı tabakalarının kalınlığını verir.

7.1.2 Uluslararası Birleşik Demiryolları (UIC) Yöntemi

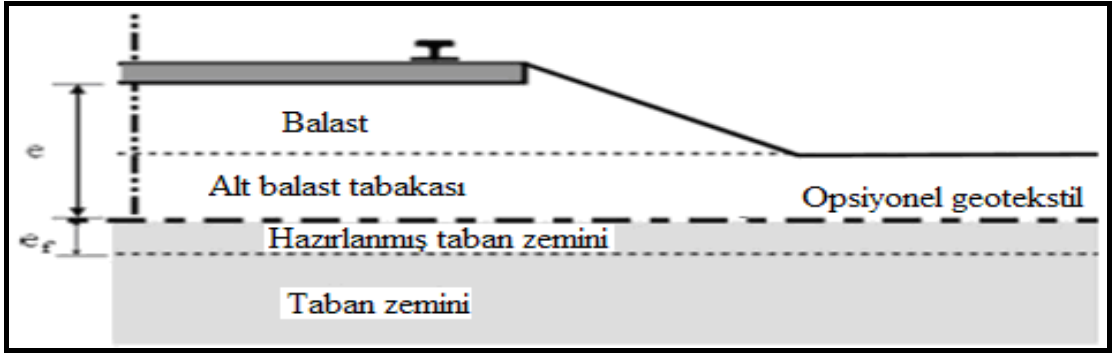
UIC 719 R, hat altyapısının bakımı ve tasarımı için tavsiyeleri içerir. Şartnamede, hat yatağı tabakaları için ve hazırlanmış temel zemini için tek bir kalınlık verilir. Altyapı, balast, bir granüller alt balast, bir geotekstil ve hazırlanmış temel zemininden oluşabilir. (Şekil 7.1).

Bu yöntemde, trafiğin karakterize edilmesi için, UIC 719 R, UIC 714 kodları referans olarak alınır. UIC 714 kodu bir hattı, hatta taşınan yükün tonajının, çekici birimlerin tonajının, hat

hızının, trafik kompozisyonunu (yük ve /veya yolcu) ve araçların aşınma etkilerinin fonksiyonu olarak sınıflandırır.

Yol yatağı tabakalarının toplam kalınlığı, altyapıyı oluşturan temel zemininin sınıfına, trafik özelliklerine, yol konfigürasyonuna ve niteliğine ve hazırlanmış temel zeminin kalınlığına göre belirlenir. Balast ve alt balast tabakasının kalınlıklarının tekil olarak belirlenmesi için, herhangi bir bilgi verilmemiştir. Alt balastın altında yer alan hazırlanmış temel zemini, iyileştirilerek, mühendislik özellikleri yükseltilmiş temel zemini tabakasıdır. Temel zemininde iyileştirme gerekmiyorsa hazırlanmış temel zeminin kullanılması tercihe bağlıdır. Ayrıca geotekstil de kullanılabilir.

Altyapıyı oluşturan zemin tipleri, zeminin içindeki ince dane yüzdesinin temel alındığı basit bir sistemle sınıflandırılır. Dört adet zemin kalite sınıfı vardır. Bu kalite sınıfları ile ilgili detaylı bilgiye, dördüncü bölümde verilen Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'den ulaşılabilir.



Şekil 7.1 Demiryolu yatağının minimum kalınlığının hesaplanması (UIC Code 719R, 1994)

UIC yöntemine göre balast ve alt balast kalınlığı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$e = E + b + c + d + f + g \quad (7.4)$$

Bu formülde “e” nin birimi metre olarak hesaplanır. Minimum kalınlığın hesaplanması ile ilgili formülde,

e: Balast ve alt balast kalınlığı,

E: Taban zemini taşıma gücünün balast-alt balast kalınlığına etkisi,

a: UIC grupları (UIC 714 (A.A.72) kitapçığında tanımlanmaktadır)

b: Travers uzunluğu,

c: Çalışma koşulları ile birlikte UIC grupları,

d: Dingil yükü, f: Tren hızı-taban taşıma gücü ve g: geotekstil kalınlığıdır.

* $E = 0,70 \text{ m}$	Taşıma kapasitesi sınıf P1 zeminler için
$E = 0,55 \text{ m}$	Taşıma kapasitesi sınıf P2 zeminler için
$E = 0,45 \text{ m}$	Taşıma kapasitesi sınıf P3 zeminler için
* $a = 0$	UIC grupları 1 ve 2 (yada hat hızı $v > 160 \text{ km/h}$) için‘**’
$a = -0,05$	UIC grupları 3 ve 4 için
$a = -0,10$	UIC grupları 5, 6 ve “ yolcularla 7, 8, 9” için‘**’
$a = -0,15$	UIC grupları “ yolcular olmada 7, 8, 9” için‘**’
* $b = 0$	Ahşap travers $L=2.60 \text{ m}$
$b = (2,5-L) / 2$	Beton travers (b, L metre cinsinden)
	$L > 2.50\text{m}$ olursa b negatif çıkabilir
* $c = 0$	Olağan boyutlar için
$c = -0,10\text{m}$	Mevcut hatlarda ağır çalışma koşulları altında, Grup 7, 8,9 (yolcusuz) dışındaki UIC grupları için‘**’
$c = -0,05\text{m}$	Mevcut hatlarda ağır çalışma koşulları altında, Grup 7, 8,9 (yolcusuz) UIC grupları için
* $d = 0$	Yüklü taşıt maksimum dingil yükü $< 200 \text{ kN}$
$d = +0,05\text{m}$	Yüklü taşıt maksimum dingil yükü $< 225\text{kN}$
$d = +0,12\text{m}$	Yüklü taşıt maksimum dingil yükü $< 250 \text{ kN}$
* $f = 0$	$V \leq 160\text{km/saat}$ veya taban zemini P3 olan yüksek hızlı hatlar için
$f = +0,05$	Taban zemini P2 olan yüksek hızlı hatlar için
$f = +0,10$	Taban zemini P1 olan yüksek hızlı hatlar için
* $g = +$	Hazırlanmış taban malzemesi QS1 veya QS2 ise hat yatağı geotekstil içermelidir‘**’
$g = 0$	Hazırlanmış taban malzemesi QS3 ise geotekstil gerekmez ‘**’

‘**’ Gerekli bilgiye Bölüm 4 Çizelge 4.5’de ulaşılabilir.

7.1.3 İngiliz Demiryolları Yöntemi

İngiliz Demiryolları Yöntemi, aşırı plastik deformasyonların temel zemininde oluşturduğu bozulmaları önlemek için geliştirilmiş bir metottur. Bu amaçla, gerekli yol yatağı katmanı kalınlığını, “eşik gerilmesi” olarak bilinen altyapı mukavemeti ile ilişkilendiren bir dizi abak üretilmiştir. Abaklar, yolun lineer elastik bir modeli ile tahmin edilen trafik kaynaklı altyapı gerilmeleri ile zeminin laboratuvar testleri sonucu belirlenen “eşik gerilmeleri” eşlendirilmesi sonucu oluşturulmuştur.

Bu yöntemde, yolun tek tabakalı bir elastik modeli (yol yatağı tabakaları ve taban zemini homojen varsayılmıştır), değişik travers aralıkları ve temas basınçları için, taban zeminindeki gerilme dağılımını belirlemek için geliştirilmiştir. İngiltere’de Batı Sahili Ana Hattı üzerinde yapılan gerilme ölçümleri, modelin kalibrasyonunda kullanılmıştır.

Tasarımda kullanılacak olan “uygun malzeme” parametresinin belirlenmesi için, Londra Kilinde bir seri periyodik üç eksenli sıkıştırma testleri yapılmıştır. Testlerin sonucunda, bir eşik gerilmesi değeri elde edilmiştir. Bu eşiğin üstünde uygulanan tekrarlı yükler, zemin üzerinde büyük miktarda kalıcı deformasyona yol açmaktadır ve bu deformasyon tekrarlanan yük sayısı ile üssel olarak artmaktadır. Bu eşik gerilmesinin altındaki bölgede her tekrarlı yük ile ilişkili plastik şekil değiştirme, kalıcı deformasyonların küçük değerlerde olduğu bir denge durumuna ulaşıncaya kadar azalır.

7.1.4 Pratik Demiryolu Ağları Şartnamesi

Birleşik Krallık ağındaki yol yatağı tabakalarının kalınlıkları için tavsiyeler, Demiryolu Ağları Şartnamesi içinde toplanmıştır. Şartnameler, demiryolu altyapısının durumunun, hat geometrisi ve bakım gereksinimine etkilerini tanımlar. Bu önermelere dayanarak ve yol geometrisinin daha önceleri büyük çaplı bakıma gereksinim duymadığı yerlerde, temel zemininin yeterli mukavemet ve rijitliği sağladığı kabul edilir. Bunun tersi durumlarda, yol yatağı tabakaları için gerekli kalınlıklar, şartnamede verilen abakların yardımı ile belirlenir.

Yol yatağı tabakalarının gerekli kalınlıkları belirlemek için, drenajsız yatak katsayıları, üç değişik dinamik travers mesnet rijitlik değerleri (30, 60 ve 100 kN/mm/travers sonu) için abaklar hazırlanmıştır. Dinamik travers mesnet rijitliğinin değerleri, mevcut hatlarda geogrid donatısı olup olmamasına göre ve yeni hatlar için sırası ile var olan geogrid takviyeli ve geogrid takviyesiz ana hatları ve yeni hatlar için verilmiştir. Abakların nerden türetildiğine dair hiçbir teknik detay verilmemiştir. Bununla beraber abakların, “ampirik veriler” ve “çok tabakalı elastik teori” yardımı ile oluşturulduğu bilinmektedir.

7.1.5 Batı Japon Demiryolları Standartları

Batı Japon Demiryolu Şirketi (WJRC), Shinkansen ve banliyö hatları için yapım ve bakım standartları konusunda çalışmalarını sürdürmektedir. Shinkansen hattı, standart ray açıklığında (1435mm) ve ortalama işletme hızı 200 km/sa olan hızlı yolcu trenlerin işlediği bir hattır.

Buna karşın, banliyö hatlarında, dar hat (1067mm) kullanılmakta ve karışık trafiğe hizmet verilmektedir. Bu iki tip hat için, gerekli olan yol yatağı tabakalarının derinlikleri Çizelge 7.1’ de verilmektedir. Altyapının taşıma kapasitesi 288 kPa olarak farz edilir ve bu değer altına düşüldüğü takdirde zemin iyileştirilmesi gereklidir ($\sigma_B = 288$ kPa taşıma kapasitesi), tek bir kiriş temel için kohezyon modeli plastik çözüme göre, yaklaşık olarak 112 kPa basınç gerilmesine σ_S karşıt gelir ($\sigma_B = 2,57 \sigma_S$).

Çizelge 7.1 WJRC göre gerekli hat yatağı tabakası kalınlığı (M.P.N. Burrow vd., 2006)

Hat	Yıllık Tonaj (Milyon Gross Ton / yıl)	Gerekli Hat Yatağı Derinliği (mm)
Shinkansen	NA	300
Banliyö Hatları	$10 \leq \text{MGT}$	250
	$10 \geq \text{MGT}$	200

7.2 Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması için, temel zemini, dingil yükü, hız, toplam tonaj parametreleri kullanılarak, her yöntem ile yol yatağı tabakalarının kalınlıkları belirlenmiştir. Bu karşılaştırma için yapılan tasarımda hesaba katılan faktörler, Çizelge 7.2’de verilmektedir.

Çalışmada, temel zemini, İngiltere’de sorunlarla karşılaşılan tipik zemin tipi olan, yüksek plastisiteli bir kil zemin olduğu farz edilmiştir. Zeminin esneklik modülü, 15 ila 100 Mpa arasında değerler alacağı kabulü yapılmıştır. Bazı yöntemlerde esneklik modülü yerine, zemin durumunu tanımlamak için başka ölçütler kullanılmıştır. Burada kullanılan kil için esneklik modülü (E_s) ve nihai basınç mukavemeti (σ_s) (Li ve Selig yöntemi) arasında $E_s \approx 250 \times \sigma_s$ olarak basit bir ilişki kurulmuştur. İngiliz Demiryolları Yöntem’inde kullanılan eşik mukavemeti, esneklik modülü ile ilişkilendirilmiş ve basınç mukavemetinin yarısı olarak farz edilmiştir. UIC Code 719 R için, zemin parametreleri (esneklik modülü veya mukavemet) için ölçümler yapılmadan yönergede verilen standartlar kullanılmıştır. Sonuç olarak, temel zeminin kalite sınıfı QS1 ve temel zemini hazırlanmamış olarak farz edilmiştir. Demiryolu Ağları Şartnamesi için elastiklik modülü olarak, tekrarlı gerilmeler altındaki esneklik modülü

kabul edilmiştir. WJRC standardı için, temel zemini gerekli minimum taşıma kapasitesi 288 kPa kabul edilmiştir.

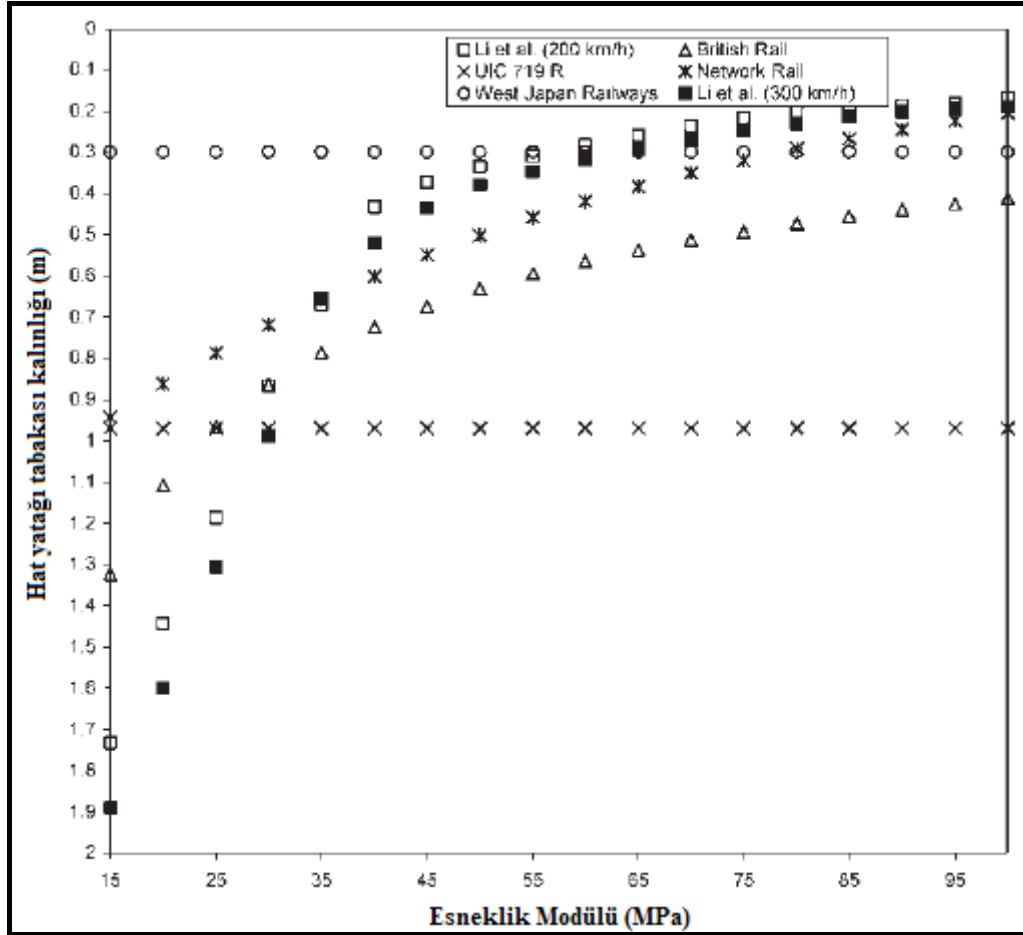
Çizelge 7.2 Tasarım prosedürlerinde hesaba katılan faktörler (M.P.N. Burrow vd., 2006)

	Li ve Selig	UIC 719R	İng. Dmy. Yönt.	NR Şartname039	WJRC
Statik dingil yükü	Tasarım abakları için Geotrack kullanıldı	Evet	24 tona kadar kullanılan elastik modelden	Hayır	Hayır
Travers tipi, uzunluğu ve aralığı	Geotrack göre	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Ray kesiti	Geotrack göre	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Hız	Dinamik dingil yükü kullanıldı	Evet	Hayır	Minimuma göre, Dinamik travers mesnet rijitliği için gerekliliğe göre	Evet
Yıllık tonaj	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Sadece banliyö hatları için
Toplam tonaj	Tasarım ömründeki toplam tonajın toplamı	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır
Taban zemini durumu	Abaklardan farklı taban zeminleri için esneklik ve zemin mukavemetleri alındı	UIC zemin sınıfları kullanıldı	Zemin için eşik gerilim değeri kullanıldı	Drenajsız taban zemini modülü ve kesme mukavemeti	Taban zemini taşıma kapasitesi 288kPa olarak kabul edildi, aksi halde taban iyileştirilmeli

Tasarım yöntemlerinin karşılaştırılmasında, trafik yüklemesi ile ilgili olarak iki farklı senaryo düşünülmüştür. İki senaryoda da trafiğin, %50 yük ve % 50 yolcu taşımacılığı olarak karışık olduğu, sınıf 66 tipi lokomotiflerin 125 km/saat ile çektiği, 250 kN dingil yüküne sahip yük trenlerinin ve bir yüksek hız lokomotifinin çektiği 170 kN dingil yüküne sahip yolcu trenlerinin hat üzerinde çalışacağı farz edilmiştir.

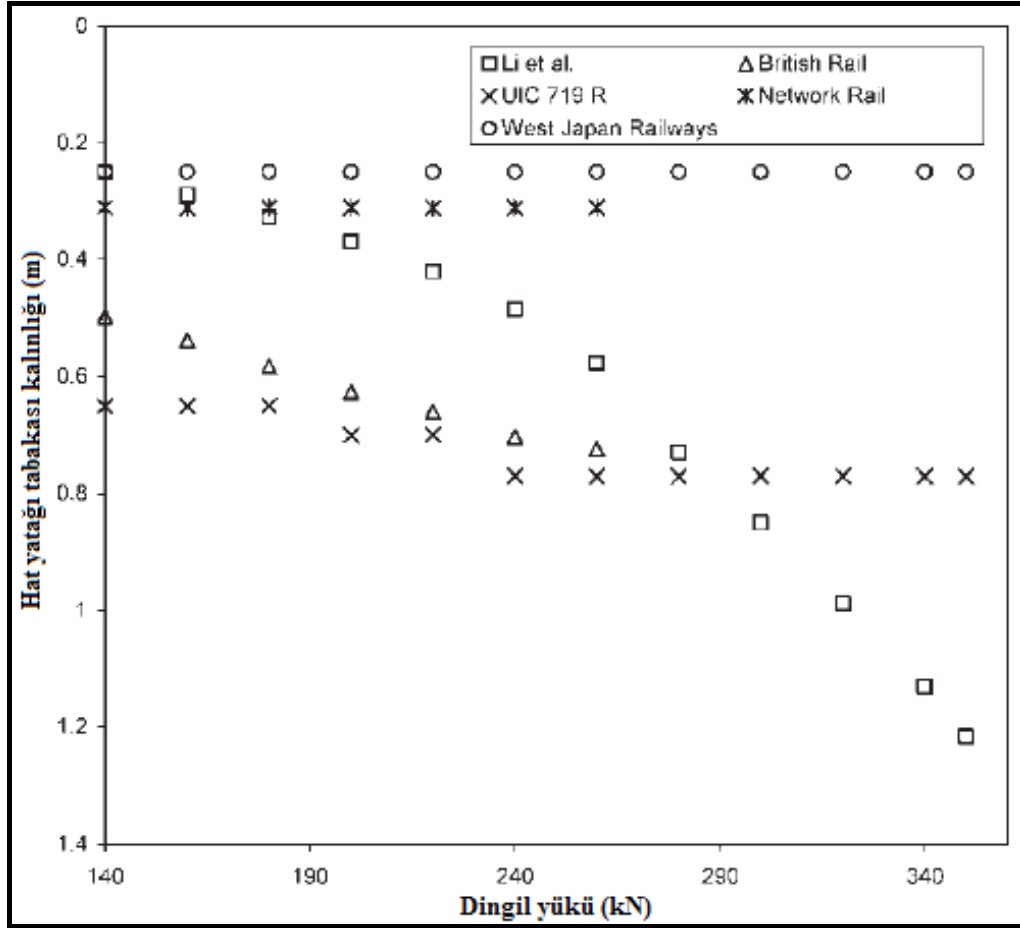
Birinci senaryo olarak, yolcu treninin 200 km/sa ve diğer senaryo için 300 km/sa ile seyahat ettiği kabulü yapılmıştır. Bu senaryolar sırası ile İngiltere’de ana hatların ve bir yüksek hızlı tren hattını (örneğin Channel Tunnel Rail Link (CTRL)) temsil etmesi için düşünülmüştür. Li ve Selig yöntemi ve UIC Code 719 R tasarımları karışık bir trafik hesabı kullanmasına karşın, karşılaştırmanın içine alınan diğer yöntemler bu hesapları kullanmamışlar ve 300 km/sa ve 200 km/sa ile hareket lokomotifler ile dingil yükü 250 kN olan vagonları trafik yükü hesabında kullanmışlardır. Tasarım süresi 60 yıl alınmış, tasarım yükleri 900 MGT (60 yıl boyunca 15 MGT/ yıl) olarak hesaba katılmıştır. Taban zemini performansı esas alınarak

yapılan çalışmanın sonuçları Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Li ve Selig yöntemi ile 300 km/saat hızla seyreden bir yolcu treni içinde yol yatağı tabakası kalınlığı belirlenmiş ve yine bu yöntemle 200 Km/saat hızla giden tren için yol yatağı tabakası belirlenmiş ve bu iki hızda da tabaka kalınlığının hemen hemen aynı olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 7.2 Taban zemini durumuna göre tasarım kalınlığının değişimi (M.P.N. Burrow vd., 2006)

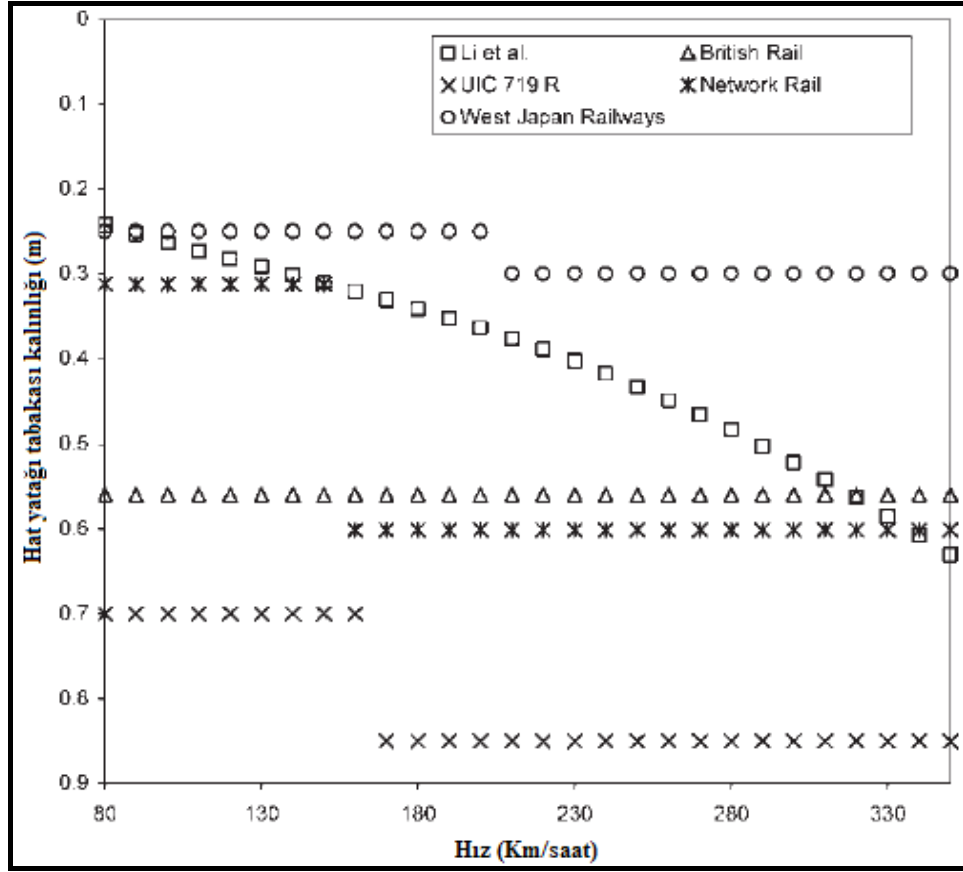
Dingil yüküne bağlı olarak yapılan çalışmalar, esneklik modülü 40 Mpa olan killi temel zemininde gerçekleştirilmiş ve çalışmanın sonuçları Şekil 7.3’de gösterilmiştir. Taban zemini esas alınarak yapılan çalışmada tanımlanan ilişkiler, zemin mukavemeti ile ilgili gerekli diğer ölçülerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Yük trafiğinin benzetimi için, dingil yükü 140 ile 350 kN arasında değişen, 125 km/saat hız yapabilen tren seçilmiştir; İngiliz Demiryolları Yöntemi’nde ve Demiryolu Ağları Şartnamesi için mevcut dingil yükü limiti olan 250 kN (25,4 ton) kullanılmıştır. Tasarım ömrü, toplam yükü 900 MGT olan 60 yıl olarak seçilmiştir. Batı Japon Demiryolları Yöntemi için hattın üzerinde işleyecek olan aracın hızı, bu çalışmada 125 km/saat olarak seçilmiştir.



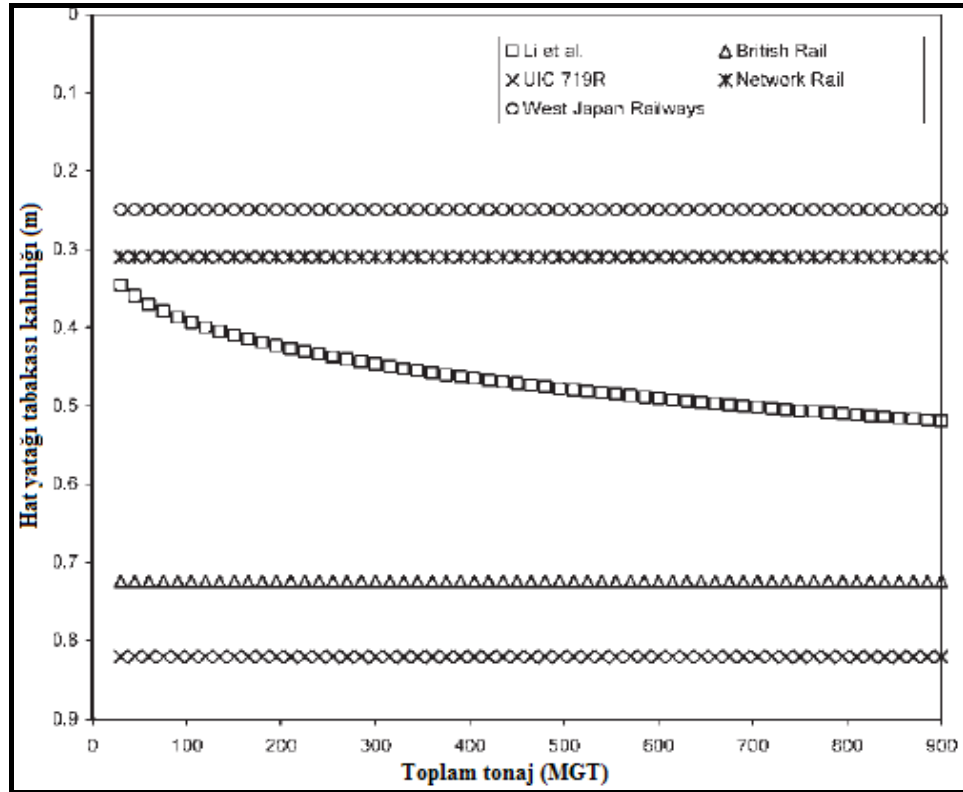
Şekil 7.3 Dingil yüküne göre tasarım kalınlığının değişimi (M.P.N. Burrow vd., 2006)

Hıza bağlı kalınlık tasarımı çalışmasında, 170 kN dingil yükü olan bir yüksek hızlı lokomotif kullanılmıştır (CTRL’de çalışan Eurostar yüksek hızlı trenlerinde kullanılanlar gibi). Gerekli olan yol yatağı tabakalarını kalınlıkları, 80 ve 350 km/saat arasındaki değerler için belirlenmiştir (Şekil 7.4). Batı Japon Demiryolları tasarımı için, hızı 200 km/saat’ten büyük Shinkansen trenlerine ve tüm diğer hızlardaki banliyö trenlerine uygun olan kalınlıklar kullanılmıştır. Taban zemini koşulları ve tasarım ömrü, daha önce belirtilen dingil yükleri karşılaştırmaları için belirtilenlerle aynıdır.

Toplam tonaj çalışmasında, Sınıf 66 lokomotifinin çektiği tam yüklü 125 km/saat ile hareket eden dingil yükleri 250 kN olan vagonlar kullanılmıştır. Taban zemini durumları, dingil yükü karşılaştırmadaki ile aynı ve kabul edilen 15 MGT/yıl yıllık tonaj için toplam tonaj 30 ile 900 MGT arasında değişmektedir (Şekil 7.5).



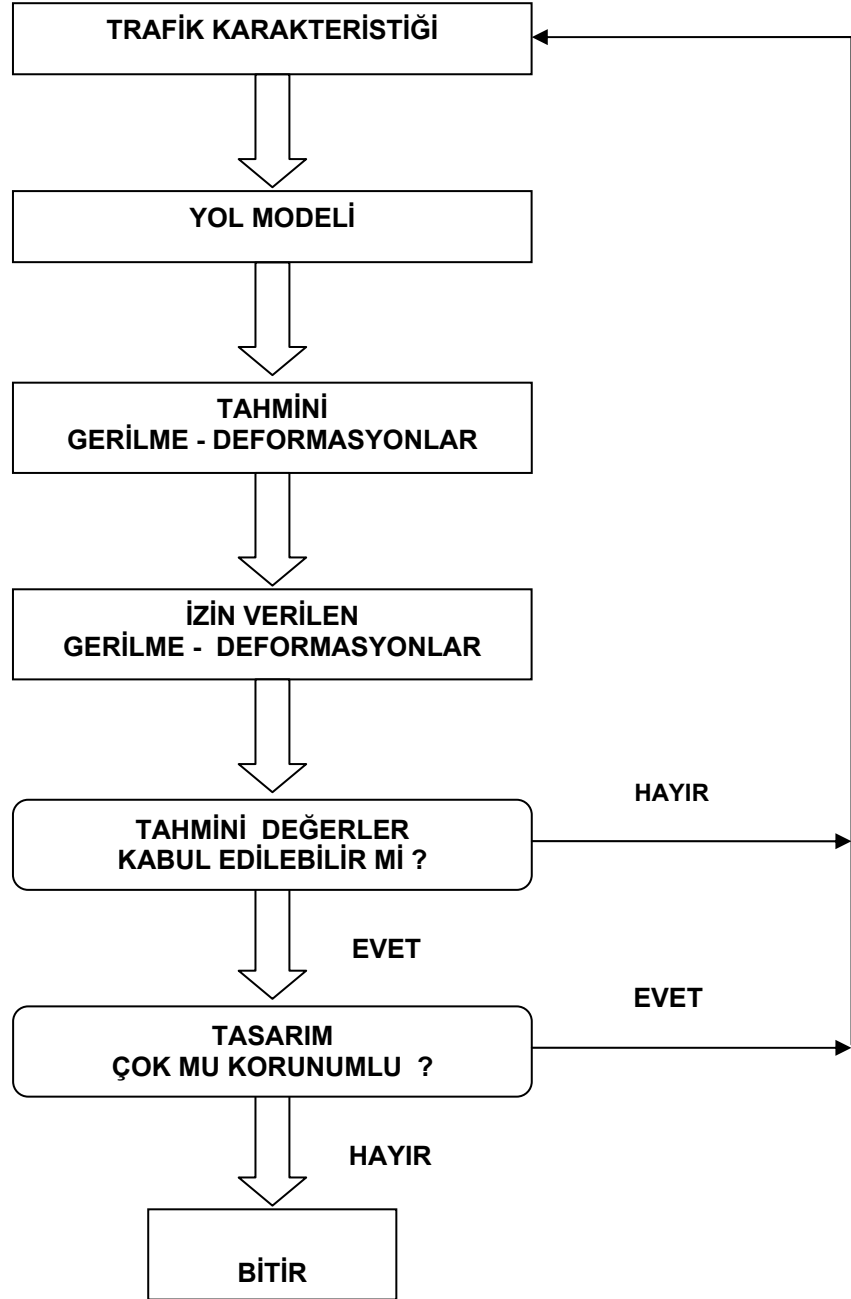
Şekil 7.4 Hıza göre tasarım kalınlığının değişimi (M.P.N. Burrow vd., 2006)



Şekil 7.5 Toplam tonaja göre tasarım kalınlığının değişimi (M.P.N. Burrow vd., 2006)

Şekil 7.2-5’de verilen grafiklerin karşılaştırması sonucunda şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Her grafikte verilen karşılaştırmalar için, yöntemlerden elde edilen yol yatağı tabakalarının kalınlıkları arasında büyük değişimler vardır. Bu farklılıkların nedenleri, karmaşık olmasına rağmen, kısmen uygulanan tasarım yaklaşımı ile açıklanabilir. Yöntemlerin her birinin değişen sayılarda ampirik ve analitik elemanları bulunmaktadır. Tasarımlarda, analitik yaklaşım için iki ana süreç birleştirilmektedir. İlk süreçte, yol sisteminin bir analitik modeli kullanılarak, trafik yükleri ile taban zemininde oluşan gerilmeler, şekil değiştirmeler ve deformasyonlar belirlenir. İkinci süreçte, genellikle temel zemininde deneyler yapılarak kritik veya izin verilen gerilmeler, şekil değiştirmeler ve çökmeler belirlenir. Uyarılmış gerilmeler, şekil değiştirmeler veya çökmeler, izin verilen değerlerle karşılaştırılır ve tasarım düzenlenir. Bu yaklaşım Şekil 7.6’da özetlenmiştir.
- Her yöntemle belirlenen tasarım kalınlığı, dört değişkenden (temel zemini esneklik modülü, dingil yükü, hız ve toplam tonaj) en az birinin bir fonksiyonudur. Ancak, sadece Li ve Selig’in yöntemi, bu değişkenlerin hepsini hesaba katarak, gerekli kalınlık değişimini vermektedir. Bu nedenle bu yöntemle hesaplanan kalınlık değeri, diğerlerine göre daha gerçekçi ve güvenilir olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7.6 Analitik tasarım prosedürü (M.P.N. Burrow vd., 2006)

8. ÖRNEK ALTYAPI TASARIMI

Tezin son başlığı olan bu bölümde, farklı üstyapı özelliklerine ve proje hızına sahip gerçekte mevcut olmayan demiryolu hatları için altyapı tasarımına örnek olması amacı ile bir sayısal çalışma örneği verilecektir.

Bu örnek çalışmada, demiryolu hatlarına etki eden trafik yüklerinin bulunmasında, 6.2 başlığı altında değinilen “Qua-statik Yöntem” kullanılmıştır. Ray ve balast tabakasına gelen yüklerin ve bu yüklerin güvenli şekilde karşılanıp karşılanmadığı konusunda yapılacak olan hesaplar için kullanılacak formülasyonlar, alt başlıklar altında sunulacaktır. Bununla birlikte, balast, alt balast (gerekli durumlarda) ve taban zemininden oluşan sistemin, sabit aralıklarla döşenmiş olan travers tabanları tarafından iletilen yayılı yükler altındaki zorlanması, Elastisite Teorisi ve Odemark’ın “Eşdeğer Tabaka Teorisi” ilişkin hesap yöntemi de bu bölüm altında verilecektir. Bu yöntemlerle elde edilecek sonuçların doğruluk derecesi, balast, zemin ve varsa alt balast tabakasından oluşan kiriş tabanın elastik davranışını karakterize eden “Yatak Katsayısı”nın doğru olarak saptanabilmesine bağlıdır ve bu bölümde yatak katsayısının hesabında Winkler’in yaklaşımı kullanılmıştır. Yatak katsayısı hesabında, Eisenmann ve Schneider tarafından geliştirilen, üç tabakalı bir sistemi tek tabakaya dönüştürmeye yarayan hesap yöntemi fiktif bir elastisite değeri hesabında kullanılmıştır.

8.1 Ray Tabanı Ortasında Oluşan Gerilme Hesabı ve Yorulma Mukavemeti Hesabı

Demiryolu üstyapısının taşıtlarla doğrudan temasta bulunan elemanı olan raylar, hem yol hem de taşıyıcı olarak görev yaparlar. Üstyapıya gelen etkilerin tümü, önce rayı zorlamakta ve gelen etkiler ray tarafından travers, balast ve taban zeminine aktarılmaktadır. Bu bakımdan rayın zorlanması, üstyapı hesabında karar verici bir nitelik taşır. Bir dingil yükünün, ray tabanında oluşturduğu eğilme-çekme mukavemeti, aşağıdaki formüller yardımı ile hesaplanır.

$$M_{ST} = \frac{Q.L}{4} \quad (8.1)$$

$$(\sigma_Q)_{din} = \rho \cdot \frac{M_{st}}{W} = \rho \cdot \frac{Q.L}{4.W} \quad (8.2)$$

Bu formüllerde;

Q: Dingil yükü (N), L: Kirişin karakteristik elastik uzunluğu (mm), M_{ST} : Rayın statik eğilme momenti, W: Rayın mukavemet momenti (mm^3), ρ : Dinamik etki katsayısı, $(\sigma_Q)_{din}$: Ray tabanın ortasında oluşan eğilme-çekme gerilmesi.

Rayın iç gerilmeler ve ısı gerilmelerinden oluşan alt gerilmeler ile tekrarlanan tekerlek yüklerinin oluşturduğu eğilme-çekme gerilmeleri altındaki yorulma mukavemeti, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_{Ya} = \frac{\sigma_{Y0} \cdot (\sigma_{\varphi} - \sigma_{alt})}{\sigma_{\varphi}} \quad (8.3)$$

$$\sigma_{alt} = \sigma_{i\varphi} + \sigma_t \quad (8.4)$$

$$\sigma_t = 2,5 \cdot \Delta T \quad (8.5)$$

$$\sigma_{i\varphi} = 100 \text{ N/mm}^2 \quad (8.6)$$

Burada;

σ_{Ya} : Rayın alt gerilmeli yorulma mukavemeti (N/mm²)

σ_{Y0} : Rayın alt gerilmesiz yorulma mukavemeti (N/mm²)

σ_{alt} : Ray alt gerilmesi (N/mm²)

$\sigma_{i\varphi}$: Ray içsel gerilmesi (N/mm²)

σ_{φ} : Ray kopma mukavemeti (N/mm²)

σ_t : Rayda sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan gerilme (N/mm²)

Taşıt tekerleklerinden, raylara iletilen yüklerin, raylar tarafından güvenli bir şekilde karşılandığını söyleyebilmemiz için, rayın alt gerilme yorulma mukavemetinin (σ_{Ya}), ray tabanın ortasında oluşan eğilme-çekme gerilmesinden ($(\sigma_Q)_{din}$) daha büyük olması gerekmektedir. Yani;

$$(\sigma_Q)_{din} \leq \sigma_{Ya} \quad (8.7)$$

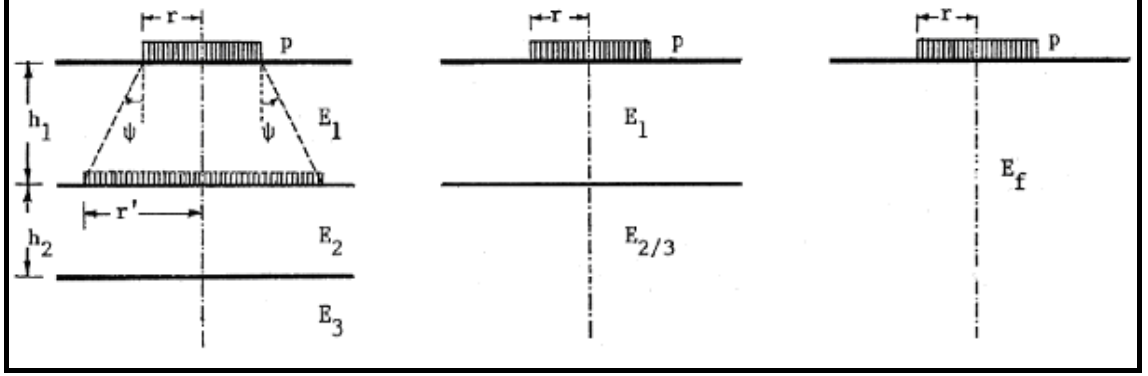
olmalıdır.

8.2 Yatak Katsayısı Hesabı ve Eisenmann-Schneider “Eşdeğer Tabaka Teorisi”

Yatak katsayısı, yüklerin etkiye yüzeyinin alanına, yüklerin şiddetine ve etkiye süresine göre değişim göstermektedir.

Yatak katsayısı hesabında, birden çok tabakalı bir altyapı sisteminin (balast, zemin ve varsa alt balast tabakası) tek tabakalı bir sisteme çevrilmesi gerekmektedir (Şekil 8.1). Bu çevirim sonunda üç farklı elastisite modülüne sahip olan bir sistem, tek bir fiktif elastisite modülüne (E_f) sahip bir sisteme dönüştürülür. Tezin hesap aşamasında kullanılan yaklaşım Eisenmann

ve Schneider'ın "Eşdeğer Tabaka Teorisi" olduğundan bu teorinin formülasyonu aşağıda verilecektir.



Şekil 8.1 Eisenmann ve Schneider'ın eşdeğer tabaka teorisi (Erel, 1989)

Traversin, bir ray altındaki ($F_t/2$) yük iletim alanını " r " yarıçaplı eşdeğer daire alanına ve balast altındaki yük iletim alanını " r " yarıçaplı eşdeğer daire alanına dönüştürülmesi, aşağıda verilen formüller yardımı ile hesaplanabilir. Formüllerde; h_1 : Balast tabakasının kalınlığı, ψ : Yansıma açısıdır.

$$r = \sqrt{\frac{F_t}{2\pi}} \quad (8.8)$$

$$r' = r + h_1 \cdot \text{Tg}\psi$$

r ve r' değerleri hesabı yapıldıktan sonra, sistem en alttan üstte doğru çözümlenir. Üç tabakalı bir sistemi tek tabakaya çevirmek için gerekli olan formülasyon aşağıdaki gibidir.

$$E_{2/3} = \frac{E_3}{(F_y)_{2/3}} \quad E_f = \frac{E_{2/3}}{(F_y)_{1/2/3}} \quad (8.9)$$

Eisenman ve Schneider, tabakaların eşdeğer alanlarının (F_y) hesabını (8.10) da verilen fonksiyon ile tanımlamışlardır. Bu değerler, Burmister tarafından ortaya atılan bir abak yardımı ile hesaplanabileceği gibi, Palmer ve Barmer tarafından geliştirilen formüllüde (8.11–12) hesaplanabilir. Tez içinde yapılan hesaplarda, Palmer ve Barmer tarafından geliştirilmiş formül kullanılarak eşdeğer alanlar hesaplanmıştır.

$$(F_y)_{2/3} = f \left\{ \left(h_2/r' \right), \left(E_2/E_3 \right) \right\} \quad (8.10)$$

$$(F_y)_{1/2/3} = f \left\{ \left(h_1/r \right), \left(E_1/E_{2/3} \right) \right\}$$

$$\xi = \frac{E_i}{E_j} \quad \nu = \frac{h}{r} \quad (8.11)$$

$$F_y = \frac{1}{\xi} + \frac{\xi - 1}{\xi \{1 + \nu^2 \cdot \xi^{2/3}\}^{1/2}} \quad (8.12)$$

Travers tabanı tarafından F_T alanı boyunca balasta aktarılan düzgün yayılı ve (P_{dn}) şiddetindeki düşey dinamik gerilmelerin, eşdeğer tek tabanın üst yüzeyinde ve ray ekseninde oluşturacakları çökme:

$$y = \frac{1,5 \cdot p_{dn} \cdot r}{E_f} \quad (8.13)$$

$$p_{dn} = \rho \cdot p$$

Bu formüllerde;

p: Statik düşey basınç gerilmesi,

ρ : Dinamik etki katsayısı,

E_{ij} : Plaka yükleme deneyinin ikinci yüklemesi sonucunda ortaya çıkan malzeme elastisite modülleri,

F_y : Tabakaların fiktif alanları,

E_f : Tabakaların toplam fiktif elastisite modülü.

Winkler'e göre, bir sistemin yatak katsayısı (C) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C = \frac{p}{y} = \frac{E_f}{1,5 \cdot r \cdot \rho} \quad (8.14)$$

8.3 Balast Tabakasına Gelen Gerilmelerin Hesabı ve Taşıma Gücü

Raylardan traverslere aktarılan taşıt hareketinden meydana gelen yükler, traverslerin alt yüzeyinden balast tabakasına iletilirler. İletilen bu yükler, balast tabakasını zorlayan düşey dinamik basınç gerilmeleri oluştururlar. Daha önceki bölümlerde de bahsettiğimiz gibi, balast tabakasından, bu gerilmeleri güvenli bir şekilde karşılaması ve altında bulunan tabakaya (alt balast ve ya zemin) gerilme değerlerini azaltarak iletmesi beklenir. Elastik kirişi modeline göre balast tabakasından oluşan dinamik basınç gerilmeleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$p_{dn} = \rho \cdot C \cdot y = \rho \cdot \frac{Q}{2BL} \eta \quad (N/mm^2) \quad (8.15)$$

Tekrarlanan düşey basınç gerilmeleri altındaki balast tabakasının yorulma mukavemeti;

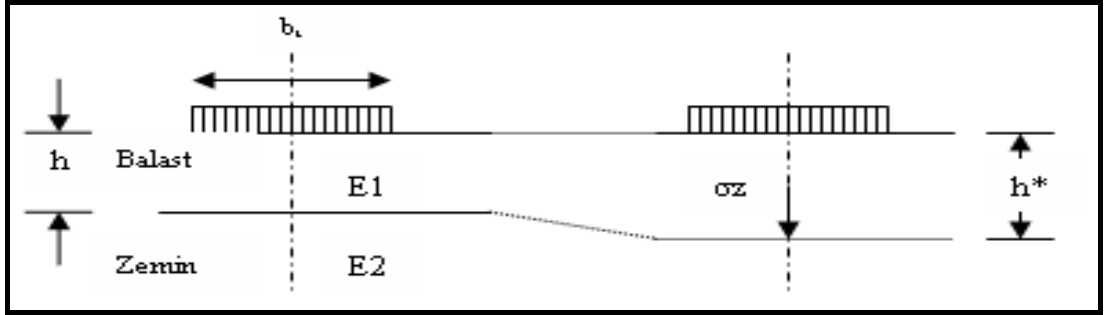
$$(\sigma_b)_{em} = \frac{(1,15 \sim 2,35)E_b}{1000} \cong \frac{1,75E_b}{1000} \quad (N/mm^2) \quad (8.16)$$

Balast tabakasının yorulma mukavemeti, balast tabakasında oluşan dinamik basınç gerilmesinden büyük ise, balast üzerinde oluşan gerilmeleri güvenlik içinde karşılanıyor demektir.

8.4 Odemark'ın Eşdeğer Tabaka Yöntemi ve Taban Zeminin Zorlanması

Taban zeminin, gelen yükler altında zorlanmasını bulmak için, travers tabanından yükün ne kadar derinliğe kadar etki ettiğinin bulunması gerekmektedir. Bu derinliğin bulunması için Odemark, “Eşdeğer Tabaka Yöntemi”ni ortaya atmıştır. Bu yöntem sayesinde, iki tabakalı ve üç tabakalı altyapı sistemlerinde travers tabanından altyapıya iletilen yükün etkili derinliğini (z) bulmak mümkündür.

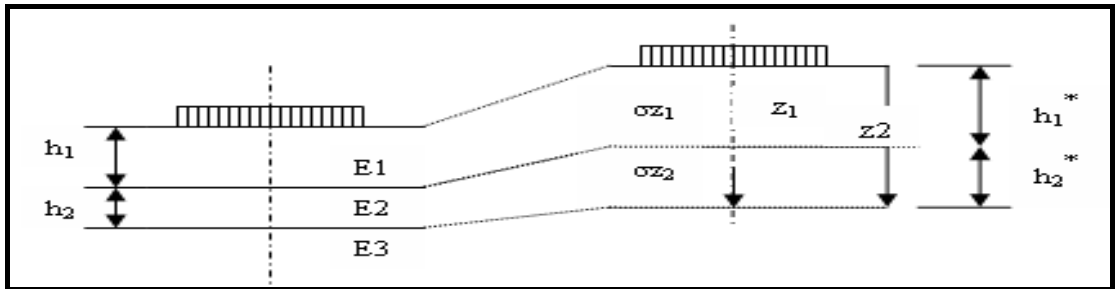
Odemark'ın, Şekil 8.2’de gösterilen iki tabakalı bir altyapı sistemi için travers tabanından itibaren derinlik;



Şekil 8.2 İki tabakalı altyapı tipi (Erel, 1989)

$$z = h^* = 0,9.h.\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (8.17)$$

şeklinde hesaplanır. Bununla birlikte, Odemark'ın ortaya attığı eşdeğer tabaka teorisinde, üç tabakalı bir altyapı sistemi (Şekil 8.3) için, travers tabanından itibaren etkili derinliğini aşağıda verildiği gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 8.3 Üç tabakalı altyapı tipi (Erel, 1989)

$$h_i^* = 0,9.h_i.\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_i}} \quad (8.18)$$

$$z_1 = h_1^* \quad ; \quad z_2 = h_1^* + h_2^* \quad (8.20)$$

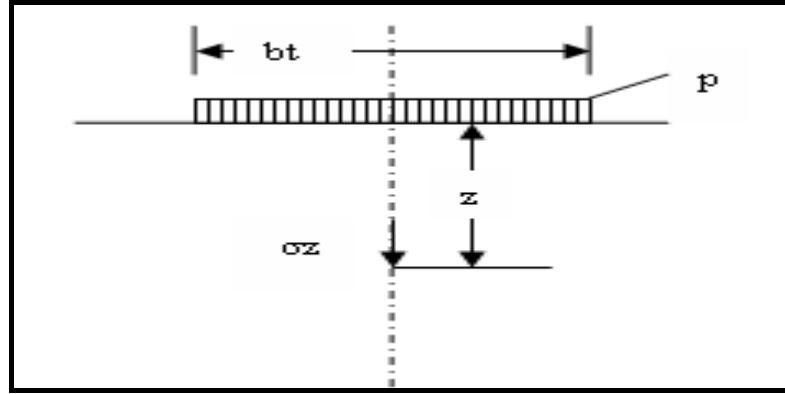
Formüllerde;

z_i :Travers tabanından itibaren derinlik (mm)

h_i :Tabaka kalınlığı (mm)

$E = E_{v2}$: Balast ya da zeminin plaka yükleme deneyinin ikinci yüklemesinde elde edilen şekil değiştirme modülü (N/mm²).

Balast tabakası tabanında oluşan ve taban zeminini zorlayan dinamik basınç gerilmesi (Şekil 8.4) aşağıda verilecek olan formüller yardımı ile hesaplanabilir.



Şekil 8.4 Taban zemininde oluşacak basınç gerilmesi (Erel, 1989)

$$\gamma_o = \frac{2}{\pi} \left[\text{ArcTg} \frac{b_t}{2z} + \frac{2b_t \cdot z}{b_t^2 + 4z^2} \right] \quad (8.21)$$

$$\eta_A = \frac{\cos(A/L) + \sin(A/L)}{e^{A/L}} \quad (8.22)$$

$$p_{dn} = \rho \frac{Q}{2BL} \eta \quad (N/mm^2) \quad (8.23)$$

Taban zemininde oluşan basınç gerilmesi;

$$(\sigma_z)_{dn} = p_{dn} (\gamma_o + 0,1\eta_A) \quad (N/mm^2) \quad (8.24)$$

Taban zemini tabakasının taşıma gücü;

$$(\sigma_z)_{em} = \frac{(1,15 \sim 2,35)E_z}{1000} \cong \frac{1,75E_z}{1000} \quad (N/mm^2) \quad (8.25)$$

Burada;

σ_z (N/mm²) : Bir tekerleğin geçtiği traversin tabanından itibaren “z” derinliğindeki düşey basınç gerilmesi,

$(\sigma_z)_{em}$ (N/mm²) : Taban zemini emniyet gerilmesi

p (N/mm²) : Dinamik düşey basınç gerilmesi (travers taban basıncı),

b_t (mm) : Travers genişliği,

z (mm) : Travers tabanından itibaren derinlik,

A (mm) : Travers aralığı,

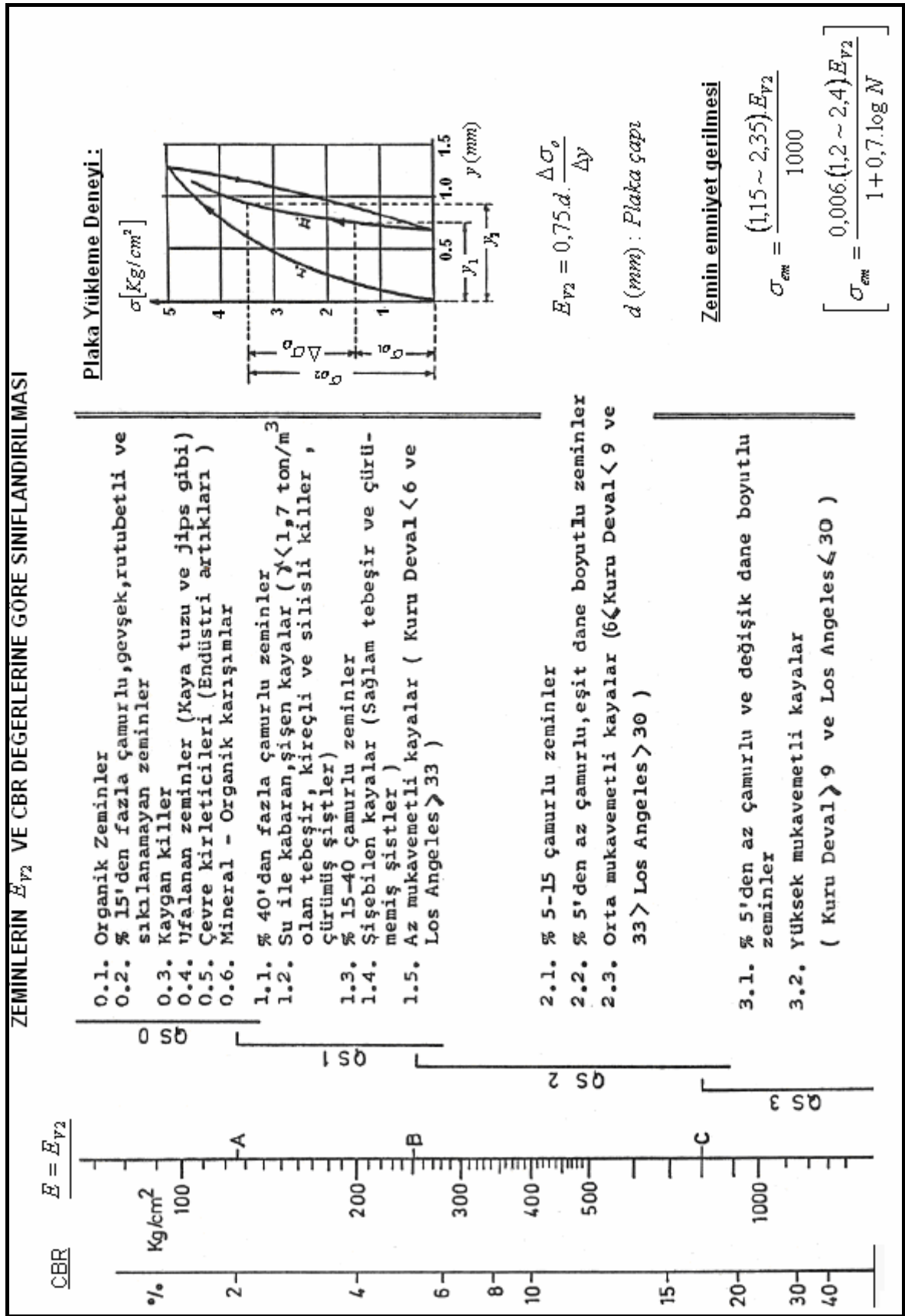
L (mm) : Elastik kiriş uzunluğu.

göstermektedir.

Çizelge 8.1’de, değişik zemin türleri için plaka yükleme deneyinde ikinci yükleme sonucu elde edilen zemin şekil değiştirme değerleri (E_{v2}) gösterilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 8.5’de, zeminlerin E_{v2} ve CBR değerlerine göre sınıflandırılması verilmektedir.

Çizelge 8.1 Değişik zemin türleri için E_{v2} değerleri (UIC Code 719R, 1994)

E_{v2}	< 30 N/mm ²	Çok kötü; iyileştirilmesi gerekir.
	= 30 – 50 N/mm ²	Kötü; koruma tabakası gerekir.
	= 50 – 70 N/mm ²	Orta; koruma tabakası gerekebilir.
	= 70 – 90 N/mm ²	İyi.
	> 90 N/mm ²	Çok iyi.



Şekil 8.5 UIC zemin sınıflandırması ve zemin özellikleri (UIC Code 719R, 1994)

9. SONUÇLAR

Bu örnek tasarım çalışması, sınırsız trafik yüküne sahip ve dingil yükleri 20 ton olan katarların konvansiyonel bir demiryolu hattı üzerinde çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Örnek çalışmanın amacı, düşünülen bu konvansiyonel hattın üzerine gelen dinamik etkileri güvenli bir şekilde karşılamasının sağlayacak bir altyapı konfigürasyonu oluşturmaktır. Bu altyapı konfigürasyonları, Çizelge 9.1’de verilen üç farklı ana çerçeve ve bunların değişik varyasyonları için hesaplarla ortaya konulmuştur. Her üç durum için de üstyapıyı oluşturan elemanların standartları, özellikleri ve kullanım koşulları aynı alınmıştır.

Taban zemini şekil değiştirme modülü (E_{v2}) için belirlenen aralık, her üç durum için aynı olup, bu aralık 200 ile 1600 kg/cm²’dir. Buna ek olarak yine her üç hesap durumu için, balast ve alt balast şekil değiştirme modülleri (E_{v2}) sırası ile 1200 kg/cm² ve 1000 kg/cm² olarak hesaba katılmıştır.

Örnek çalışmada her üç durum için de, S49 ve UIC 60 olmak üzere, iki farklı ray tipi kullanılmıştır. Raylarda meydana gelecek yorulma durumu araştırılırken, iç gerilmelerin 100 N/mm², gerilme meydana getirecek sıcaklık farkının 50°C olduğu kabul edilmiştir. Bu değerler, sırasıyla, rayların yapımından sonraki soğutulma ve doğrultulma koşulları ile rayların bağlanma durumuna, üstyapının sahip olduğu boyuna ve yanıl kayma dirençlerine ve ray sıcaklığının değişimine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kullanılan traversler 30cm kalınlığa sahip beton traversler olup her üç hesap durumu için yerleştirilme aralıkları 60 cm’dir. Travers boyları altyapı hesabında, 260cm ve 280cm olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmıştır. Bu travers boylar Çizelge 9.1’de verilen her üç durumda da hesaba katılmıştır.

Quasi-statik yöntemde kullanılan dinamik etki katsayısını belirlenmesinde, (t) güvenlik katsayısı, yatak katsayısı ve ray gerilmelerinin hesabında 3, diğer altyapı elemanları ile taban zeminin zorlanmasının hesabında ise 2 değeri kullanılmıştır. Bütün yapı elemanlarına gelen gerilmelerin hesabında, üstyapı durumu ve bakım koşulları “orta” olarak kabul edilmiş ve dinamik etki katsayısı hesabında “0.2φ” değeri kullanılmıştır.

Altyapı tasarımlarının hesap çizelgeleri, ekler bölümünde Ek 1-36 verilmiştir. Ayrıca çizelgelerdeki değerlerin grafik gösterimleri de ekler bölümünde yer almaktadır. Bu sonuçlarla ilgili, aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

- a) Ek 37-40’da ki şekillerde, altyapı ve üstyapı elemanlarında meydana gelen gerilmelerin hız (80 – 120 -160 km/sa) ile değişimi görülmektedir. Bu hız değişiminin en büyük etkiyi rayda meydana gelen gerilmelerde, en küçük etkiyi ise taban zemininde meydana gelen gerilmelerde gösterdiği görülmektedir. Hız artıkça artan

dinamik kuvvetlerin oluşturduğu gerilmelerin, rayın yorulma mukavemetini aşmadığını, buna karşın alt balast kullanılmayan durumlarda, balast ve taban zemini için bu yorumun yapılamayacağı açıkça görülmüştür. Buradan şu sonuç çıkmaktadır; eğer balast ve taban zemini arasına alt balast tabakası yok ise ve buna karşın taban zemininde kalıcı şekilde değiştirme ve bozulma istenmiyorsa, çözüm tekerlek yüklerinin azaltılması ve/ve ya hızın kısıtlanmasıdır.

Çizelge 9.1 Örnek altyapı çalışmasında kullanılan kompozisyonlar

	I. DURUM	II. DURUM	III. DURUM
Proje Hızı (km/sa)	80	120	160
En Büyük Tekerlek Yükü (Ton)	10	10	10
Trafik Miktarı	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız
Üstyapı Bakım Durumu	Orta	Orta	Orta
Rayda Gerileme Oluşturan Sıcaklık Farkı (°C)	50	50	50
Taban Zeminin E_{v2} Değeri (kg/cm ²)	200-1600	200-1600	200-1600
Balast E_{v2} Değeri (kg/cm ²)	1200	1200	1200
Alt Balast E_{v2} Değeri (kg/cm ²)	1000	1000	1000
Travers Aralığı (cm)	60	60	60
Travers Kalınlığı (cm)	30	30	30
Traversin Yük İletmeyen Uzunluğu (cm)	60	60	60

- b) Alt balast kullanılmayarak yapılan hesaplarda, ray tipinin değiştirilmesi, rayın, balastın ve zeminin zorlanmasında belli bir artış ya da azalış oluşturmalarına rağmen, taban zeminin kötü ya da yetersiz olması durumunda, büyük kesitli ve yüksek mukavemetli ray kullanılmasının, tek başına altyapıdan istenilen performansın sağlanmasına etkisi yoktur. Bununla birlikte travers uzunluğunun arttırılması, raya ve

- altyapı elemanlarına gelen gerilmelerde azalmaya yol açsa da tek başına büyük bir etkisi yoktur (Ek 37–40).
- c) Ek 41-48’de, yatak katsayısının farklı hızlarda, ray tiplerinde ve travers boylarında alt balast tabakası ile değişimi gösterilmiştir. Alt balastın olmaması, 20cm ve 30cm olması, elastisite modülü düşük olan zeminlerde yatak katsayısının 0.33 kg/cm^3 artmasına, zemin değerinin $E_{v2}=1000 \text{ kg/cm}^2$ ’nin üstüne çıktığında ise bu artış etkisini kaybetmektedir.
- d) Alt balast kullanılmayarak yapılan hesaplarda, ray tipinin değiştirilmesi, rayın, balastın ve zeminin zorlanmasında belli bir artış ya da azalış oluşturmaya rağmen, taban zeminin kötü ya da yetersiz olması durumunda, büyük kesitli ve yüksek mukavemetli ray kullanılmasının, tek başına altyapıdan istenilen performansın sağlanmasına etkisi yoktur. Bununla birlikte travers uzunluğunun arttırılması, raya ve altyapı elemanlarına gelen gerilmelerde azalmaya yol açsa da tek başına büyük bir etkisi yoktur (Ek 37–40).
- e) Balast kalınlığının 30 cm olarak kullanıldığı alt balast tabakasının kullanılmadığı bir alt yapı tasarımında, tekerlek yüklerinin balast ve taban zeminine olumsuz etkisi oldukça yüksektir. Hız ve ray kesiti değişimine bağlı olarak, bu etki değişim göstermektedir. Fakat alt balast kullanılmadığında görülmektedir ki, E_{v2} değeri, 70 N/mm^2 ’nin altında olan zemin üzerine gelen etkileri güvenli bir şekilde karşılayamamaktadır (Ek 49-56).
- f) Ek 49–56 arasındaki şekillerde, balast ve taban zemini arasına yerleştirilen değişken kalınlıktaki alt balast tabakasının, balasta ve zemine gelen gerilmelere olan etkisi görülmektedir. Alt balast tabakası kullanılmayan tasarımlarda, 70 N/mm^2 ’den daha aşağı elastisite modülüne sahip zeminler, üzerlerine gelen dinamik etkileri güvenli bir şekilde karşılayamazken, 20 cm ile 30 cm kalınlığında bir alt balast tabakası yerleştirildiğinde bir 10 tonluk tekerlek yüküne sahip tren katarı, 120 km/sa ile E_{v2} değeri 30 N/mm^2 olan zeminlerden bile güvenli bir şekilde geçirilebilmektedir. Alt balast tabakasının yerleştirilmesinin en fazla olumlu etkisi, zemin ve daha sonra raya gelen gerilmeler üzerindedir. Fakat alt balast yerleştirilmesi, az da olsa balast tabakasına gelen gerilmeler üzerine olumsuz etki yapar. Alt balast tabakası ile kullanılan rayın kesiti de büyütülürse, E_{v2} değeri 20 N/mm^2 olan zeminlerde bile 120 km/sa hıza sahip tren katarları güvenli bir şekilde geçirilebilir. Yerleştirilen koruma tabakası her ne kadar kötü zeminlerde, üzerine gelen kuvvetleri güvenli karşılayabilen

bir altyapı tasarımına imkan veriyor olsa da, zorunlu olmadıkça E_{v2} değeri 50 N/mm^2 altında olan zeminlerde tasarım yapılmaması, zemin mekaniği ve maliyetler konusunda daha uygundur.

Bu örnek tasarımdan da görülebileceği gibi, iyi bir altyapı tasarımı yapılmadan, üstyapıda en iyi malzemeler kullanılmış olsa bile bir demiryolu hattının, üzerine gelen kuvvetleri güvenli şekilde karşılaması, seyir güvenliği sağlaması, üst yapı elemanlarında şekil değiştirmeye ve bozulmalara neden olacak etkilerin ortadan kaldırılması mümkün olmayacaktır.

Ülkemiz demiryolu ağının büyük bir kısmı, yetersiz ve bakımsız altyapı ile hizmet vermektedir. Bu hatların altyapılarının iyileştirilmesi zor ve yüksek maliyetli olmasına karşın, bu iyileştirmenin yapılması durumunda, üstyapıda meydana gelen bozulmaların daha az olacağı, buna bağlı olarak da işletme maliyetlerinin düşeceği, daha konforlu ve hızlı bir seyahat imkanı sağlanacağı bir gerçektir.

KAYNAKLAR

- Burrow, M., Ghataora, G. ve Stirling, A., (2005), “A Rational Approach To Railway Track Substructure Design”, Excellence In Railway Systems Engineering and Integration National Conference, 25-26 November 2005, Catalis Training Center, London.
- Burrow, M., Bowness, D., ve Ghataora, G., (2006), “ A Comparison of Railway Track Foundation Design Methods”, Rail and Rapid Transit, Volume 221 (ISSN 0954-4097): 1-12.
- Erel, A., (1989), Demiryollarında Üstyapı Testi ve Boyutlandırılması (Mikroyol Yöntemi), İstanbul.
- Erel, A., Yalçın, N. S., (2007), “ Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi Ve Tasarım İlkeleri”, IMO 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül 2007, İstanbul.
- Esveld, C., (2001), Modern Rail Track, MRT Productions, Duisburg.
- Güngör, E., (2001), Toprak İşleri, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Güngör, E., (2002), Demiryolu, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Industrial Track Construction Specifications, (2001), RailAmerica Engineering.
- Ionescu, D., (2004), Evaluation of The Engineering Behaviour of Railway Balast, PhD Thesis, University of Wollongong, Wollongong.
- Li, D., (1994), Railway Track Granular Layer Thickness Design Based On Subgrade Performance Under Repeated Loading, PhD Thesis, University of Massachusetts, Massachusetts.
- Lim, W. L., (2004), Mechanics of Railway Balast Behaviour, PhD Thesis, The University of Nottingham, Nottingham.
- Mittal, A. V., Maurya, S. K., (2007), “Ballast Specification For High Axle Load And High Speed”, Indian Railways Institute of Civil Engineering, Research Project: Sesion No.721.
- Pita, A. L., Teixeira, P.F.ve Robuste, F. (2004), “High Speed And Track Deterioration: The Role of Vertical Stiffness of The Track”, Rail and Rapid Transit, Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part F J.
- Radamplo, S. S., (2006), Evaluation And Modelling Performance Of Capping Layer In Rail Track Substructure, PhD Thesis, Central Queensland University, Queensland.
- Teixeira, P.F., (2003), Contribución A La Reducción De Los Mediante La Optimización De Su Rigidez Vertical, PhD Thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona.
- UIC Code 714R, (1989), Classificaiton of Lines For The Purpose od Track Maintenance, International Union of Railways, 3rd Edition.
- UIC Code 719R, (1994), Eartworks And Track-Bed Layers For Railway Lines, International Union of Railways, 2rd Edition.
- Yalçın, N. S., (2006), Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

Ek 1 Hesap çizelgesi-I

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	154,860	217,140	0,160	0,210	İyi	0,070	0,035	Kötü
300	144,570	217,140	0,171	0,210	İyi	0,083	0,053	Kötü
400	137,630	217,140	0,180	0,210	İyi	0,093	0,070	Kötü
500	132,430	217,140	0,187	0,210	İyi	0,101	0,088	Kötü
600	128,300	217,140	0,193	0,210	İyi	0,109	0,105	Kötü
700	124,880	217,140	0,198	0,210	İyi	0,115	0,123	İyi
800	121,980	217,140	0,203	0,210	İyi	0,122	0,140	İyi
900	119,470	217,140	0,207	0,210	İyi	0,127	0,158	İyi
1000	117,250	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,132	0,175	İyi
1100	115,280	217,140	0,215	0,210	Kötü	0,137	0,193	İyi
1200	113,500	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,142	0,210	İyi
1300	111,870	217,140	0,221	0,210	Kötü	0,146	0,228	İyi
1400	110,390	217,140	0,224	0,210	Kötü	0,150	0,245	İyi
1500	109,020	217,140	0,227	0,210	Kötü	0,154	0,263	İyi
1600	107,750	217,140	0,230	0,210	Kötü	0,158	0,280	İyi

Ek 2 Hesap çizelgesi-II

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	174,780	217,140	0,168	0,210	İyi	0,074	0,035	Kötü
300	163,180	217,140	0,180	0,210	İyi	0,087	0,053	Kötü
400	155,340	217,140	0,189	0,210	İyi	0,098	0,070	Kötü
500	149,470	217,140	0,197	0,210	İyi	0,107	0,088	Kötü
600	144,810	217,140	0,203	0,210	İyi	0,115	0,105	Kötü
700	140,960	217,140	0,209	0,210	İyi	0,122	0,123	İyi
800	137,680	217,140	0,214	0,210	İyi	0,128	0,140	İyi
900	134,840	217,140	0,218	0,210	İyi	0,134	0,158	İyi
1000	132,340	217,140	0,222	0,210	Kötü	0,140	0,175	İyi
1100	130,110	217,140	0,226	0,210	Kötü	0,145	0,193	İyi
1200	128,100	217,140	0,230	0,210	Kötü	0,150	0,210	İyi
1300	126,270	217,140	0,233	0,210	Kötü	0,154	0,228	İyi
1400	124,600	217,140	0,236	0,210	Kötü	0,159	0,245	İyi
1500	123,050	217,140	0,239	0,210	Kötü	0,163	0,263	İyi
1600	121,620	217,140	0,242	0,210	Kötü	0,167	0,280	İyi

Ek 3 Hesap çizelgesi-III

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	195,180	217,140	0,177	0,210	İyi	0,078	0,035	Kötü
300	182,220	217,140	0,189	0,210	İyi	0,092	0,053	Kötü
400	173,470	217,140	0,199	0,210	İyi	0,103	0,070	Kötü
500	166,910	217,140	0,207	0,210	İyi	0,112	0,088	Kötü
600	161,710	217,140	0,213	0,210	Kötü	0,121	0,105	Kötü
700	157,400	217,140	0,219	0,210	Kötü	0,128	0,123	Kötü
800	153,750	217,140	0,224	0,210	Kötü	0,135	0,140	İyi
900	150,580	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,141	0,158	İyi
1000	147,790	217,140	0,233	0,210	Kötü	0,147	0,175	İyi
1100	145,300	217,140	0,237	0,210	Kötü	0,152	0,193	İyi
1200	143,050	217,140	0,241	0,210	Kötü	0,157	0,210	İyi
1300	141,010	217,140	0,244	0,210	Kötü	0,162	0,228	İyi
1400	139,140	217,140	0,248	0,210	Kötü	0,167	0,245	İyi
1500	137,410	217,140	0,251	0,210	Kötü	0,171	0,263	İyi
1600	135,810	217,140	0,254	0,210	Kötü	0,175	0,280	İyi

Ek 4 Hesap çizelgesi-IV

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	152,060	217,140	0,163	0,210	İyi	0,050	0,035	Kötü
300	142,760	217,140	0,173	0,210	İyi	0,058	0,053	Kötü
400	136,370	217,140	0,182	0,210	İyi	0,065	0,070	İyi
500	131,540	217,140	0,188	0,210	İyi	0,071	0,088	İyi
600	127,680	217,140	0,194	0,210	İyi	0,076	0,105	İyi
700	124,470	217,140	0,199	0,210	İyi	0,081	0,123	İyi
800	121,740	217,140	0,203	0,210	İyi	0,085	0,140	İyi
900	119,360	217,140	0,207	0,210	İyi	0,090	0,158	İyi
1000	117,250	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,093	0,175	İyi
1100	115,370	217,140	0,215	0,210	Kötü	0,097	0,193	İyi
1200	113,680	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,101	0,210	İyi
1300	112,130	217,140	0,221	0,210	Kötü	0,104	0,228	İyi
1400	110,710	217,140	0,224	0,210	Kötü	0,107	0,245	İyi
1500	109,400	217,140	0,226	0,210	Kötü	0,110	0,263	İyi
1600	108,190	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,113	0,280	İyi

Ek 5 Hesap çizelgesi- V

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	171,620	217,140	0,171	0,210	İyi	0,053	0,035	Kötü
300	161,130	217,140	0,183	0,210	İyi	0,061	0,053	Kötü
400	153,920	217,140	0,191	0,210	İyi	0,069	0,070	İyi
500	148,470	217,140	0,198	0,210	İyi	0,075	0,088	İyi
600	144,110	217,140	0,204	0,210	İyi	0,080	0,105	İyi
700	140,490	217,140	0,209	0,210	İyi	0,086	0,123	İyi
800	137,400	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,090	0,140	İyi
900	134,720	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,095	0,158	İyi
1000	132,340	217,140	0,222	0,210	Kötü	0,099	0,175	İyi
1100	130,220	217,140	0,226	0,210	Kötü	0,102	0,193	İyi
1200	128,310	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,106	0,210	İyi
1300	126,560	217,140	0,232	0,210	Kötü	0,110	0,228	İyi
1400	124,960	217,140	0,235	0,210	Kötü	0,113	0,245	İyi
1500	123,480	217,140	0,238	0,210	Kötü	0,116	0,263	İyi
1600	122,110	217,140	0,241	0,210	Kötü	0,119	0,280	İyi

Ek 6 Hesap çizelgesi- VI

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	191,650	217,140	0,180	0,210	İyi	0,055	0,035	Kötü
300	179,930	217,140	0,192	0,210	İyi	0,065	0,053	Kötü
400	171,880	217,140	0,201	0,210	İyi	0,072	0,070	Kötü
500	165,800	217,140	0,208	0,210	İyi	0,079	0,088	İyi
600	160,930	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,085	0,105	İyi
700	156,890	217,140	0,220	0,210	Kötü	0,090	0,123	İyi
800	153,440	217,140	0,225	0,210	Kötü	0,095	0,140	İyi
900	150,440	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,099	0,158	İyi
1000	147,790	217,140	0,233	0,210	Kötü	0,104	0,175	İyi
1100	145,420	217,140	0,237	0,210	Kötü	0,108	0,193	İyi
1200	143,280	217,140	0,241	0,210	Kötü	0,112	0,210	İyi
1300	141,330	217,140	0,244	0,210	Kötü	0,115	0,228	İyi
1400	139,540	217,140	0,247	0,210	Kötü	0,119	0,245	İyi
1500	137,890	217,140	0,250	0,210	Kötü	0,122	0,263	İyi
1600	136,360	217,140	0,253	0,210	Kötü	0,125	0,280	İyi

Ek 7 Hesap çizelgesi- VII

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	149,500	217,140	0,166	0,210	İyi	0,044	0,035	Kötü
300	141,010	217,140	0,176	0,210	İyi	0,051	0,053	İyi
400	135,120	217,140	0,183	0,210	İyi	0,057	0,070	İyi
500	130,650	217,140	0,190	0,210	İyi	0,062	0,088	İyi
600	127,050	217,140	0,195	0,210	İyi	0,067	0,105	İyi
700	124,040	217,140	0,200	0,210	İyi	0,071	0,123	İyi
800	121,480	217,140	0,204	0,210	İyi	0,075	0,140	İyi
900	119,240	217,140	0,208	0,210	İyi	0,078	0,158	İyi
1000	117,250	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,082	0,175	İyi
1100	115,480	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,085	0,193	İyi
1200	113,870	217,140	0,217	0,210	Kötü	0,088	0,210	İyi
1300	112,400	217,140	0,220	0,210	Kötü	0,091	0,228	İyi
1400	111,060	217,140	0,223	0,210	Kötü	0,093	0,245	İyi
1500	109,810	217,140	0,225	0,210	Kötü	0,096	0,263	İyi
1600	108,660	217,140	0,228	0,210	Kötü	0,098	0,280	İyi

Ek 8 Hesap çizelgesi- VIII

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	168,740	217,140	0,174	0,210	İyi	0,047	0,035	Kötü
300	159,150	217,140	0,185	0,210	İyi	0,054	0,053	Kötü
400	152,510	217,140	0,193	0,210	İyi	0,061	0,070	İyi
500	147,460	217,140	0,200	0,210	İyi	0,066	0,088	İyi
600	143,400	217,140	0,205	0,210	İyi	0,071	0,105	İyi
700	140,010	217,140	0,210	0,210	Kötü	0,075	0,123	İyi
800	137,110	217,140	0,215	0,210	Kötü	0,079	0,140	İyi
900	134,580	217,140	0,219	0,210	Kötü	0,083	0,158	İyi
1000	132,340	217,140	0,222	0,210	Kötü	0,086	0,175	İyi
1100	130,340	217,140	0,226	0,210	Kötü	0,089	0,193	İyi
1200	128,520	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,093	0,210	İyi
1300	126,870	217,140	0,232	0,210	Kötü	0,096	0,228	İyi
1400	125,350	217,140	0,235	0,210	Kötü	0,098	0,245	İyi
1500	123,940	217,140	0,237	0,210	Kötü	0,101	0,263	İyi
1600	122,640	217,140	0,240	0,210	Kötü	0,104	0,280	İyi

Ek 9 Hesap çizelgesi- IX

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	188,420	217,140	0,183	0,210	İyi	0,049	0,035	Kötü
300	177,720	217,140	0,194	0,210	İyi	0,057	0,053	Kötü
400	170,310	217,140	0,202	0,210	İyi	0,064	0,070	İyi
500	164,670	217,140	0,209	0,210	İyi	0,069	0,088	İyi
600	160,130	217,140	0,215	0,210	Kötü	0,074	0,105	İyi
700	156,350	217,140	0,220	0,210	Kötü	0,079	0,123	İyi
800	153,110	217,140	0,225	0,210	Kötü	0,083	0,140	İyi
900	150,290	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,087	0,158	İyi
1000	147,790	217,140	0,233	0,210	Kötü	0,091	0,175	İyi
1100	145,550	217,140	0,237	0,210	Kötü	0,094	0,193	İyi
1200	143,520	217,140	0,240	0,210	Kötü	0,097	0,210	İyi
1300	141,670	217,140	0,243	0,210	Kötü	0,101	0,228	İyi
1400	139,980	217,140	0,246	0,210	Kötü	0,104	0,245	İyi
1500	138,410	217,140	0,249	0,210	Kötü	0,107	0,263	İyi
1600	136,950	217,140	0,252	0,210	Kötü	0,109	0,280	İyi

Ek 10 Hesap çizelgesi- X

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	154,000	217,140	0,146	0,210	İyi	0,064	0,035	Kötü
300	143,600	217,140	0,157	0,210	İyi	0,076	0,053	Kötü
400	136,570	217,140	0,165	0,210	İyi	0,085	0,070	Kötü
500	131,310	217,140	0,171	0,210	İyi	0,093	0,088	Kötü
600	127,130	217,140	0,177	0,210	İyi	0,100	0,105	İyi
700	123,670	217,140	0,182	0,210	İyi	0,106	0,123	İyi
800	120,740	217,140	0,186	0,210	İyi	0,112	0,140	İyi
900	118,190	217,140	0,190	0,210	İyi	0,117	0,158	İyi
1000	115,950	217,140	0,194	0,210	İyi	0,122	0,175	İyi
1100	113,950	217,140	0,198	0,210	İyi	0,126	0,193	İyi
1200	112,150	217,140	0,201	0,210	İyi	0,130	0,210	İyi
1300	110,510	217,140	0,204	0,210	İyi	0,134	0,228	İyi
1400	109,010	217,140	0,206	0,210	İyi	0,138	0,245	İyi
1500	107,630	217,140	0,209	0,210	İyi	0,142	0,263	İyi
1600	106,350	217,140	0,212	0,210	Kötü	0,145	0,280	İyi

Ek 11 Hesap çizelgesi- XI

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	173,820	217,140	0,154	0,210	İyi	0,068	0,035	Kötü
300	162,080	217,140	0,165	0,210	İyi	0,080	0,053	Kötü
400	154,150	217,140	0,173	0,210	İyi	0,089	0,070	Kötü
500	148,210	217,140	0,180	0,210	İyi	0,098	0,088	Kötü
600	143,490	217,140	0,186	0,210	İyi	0,105	0,105	Kötü
700	139,590	217,140	0,192	0,210	İyi	0,112	0,123	İyi
800	136,270	217,140	0,196	0,210	İyi	0,118	0,140	İyi
900	133,400	217,140	0,200	0,210	İyi	0,123	0,158	İyi
1000	130,870	217,140	0,204	0,210	İyi	0,128	0,175	İyi
1100	128,620	217,140	0,208	0,210	İyi	0,133	0,193	İyi
1200	126,580	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,138	0,210	İyi
1300	124,740	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,142	0,228	İyi
1400	123,040	217,140	0,217	0,210	Kötü	0,146	0,245	İyi
1500	121,480	217,140	0,220	0,210	Kötü	0,150	0,263	İyi
1600	120,040	217,140	0,223	0,210	Kötü	0,153	0,280	İyi

Ek 12 Hesap çizelgesi- XII

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	194,100	217,140	0,161	0,210	İyi	0,071	0,035	Kötü
300	180,990	217,140	0,173	0,210	İyi	0,084	0,053	Kötü
400	172,140	217,140	0,182	0,210	İyi	0,094	0,070	Kötü
500	165,500	217,140	0,189	0,210	İyi	0,103	0,088	Kötü
600	160,230	217,140	0,196	0,210	İyi	0,111	0,105	Kötü
700	155,870	217,140	0,201	0,210	İyi	0,117	0,123	İyi
800	152,180	217,140	0,206	0,210	İyi	0,124	0,140	İyi
900	148,970	217,140	0,210	0,210	Kötü	0,130	0,158	İyi
1000	146,140	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,135	0,175	İyi
1100	143,630	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,140	0,193	İyi
1200	141,360	217,140	0,222	0,210	Kötü	0,145	0,210	İyi
1300	139,290	217,140	0,225	0,210	Kötü	0,149	0,228	İyi
1400	137,40	217,140	0,228	0,210	Kötü	0,153	0,245	İyi
1500	135,660	217,140	0,231	0,210	Kötü	0,157	0,263	İyi
1600	134,050	217,140	0,234	0,210	Kötü	0,161	0,280	İyi

Ek 13 Hesap çizelgesi- XIII

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	151,290	217,140	0,149	0,210	İyi	0,045	0,035	Kötü
300	141,840	217,140	0,159	0,210	İyi	0,053	0,053	Kötü
400	135,350	217,140	0,168	0,210	İyi	0,059	0,070	İyi
500	130,450	217,140	0,173	0,210	İyi	0,065	0,088	İyi
600	126,530	217,140	0,178	0,210	İyi	0,070	0,105	İyi
700	123,270	217,140	0,183	0,210	İyi	0,074	0,123	İyi
800	120,500	217,140	0,187	0,210	İyi	0,078	0,140	İyi
900	118,080	217,140	0,191	0,210	İyi	0,082	0,158	İyi
1000	115,950	217,140	0,194	0,210	İyi	0,086	0,175	İyi
1100	114,050	217,140	0,197	0,210	İyi	0,089	0,193	İyi
1200	112,330	217,140	0,200	0,210	İyi	0,092	0,210	İyi
1300	110,760	217,140	0,203	0,210	İyi	0,095	0,228	İyi
1400	109,320	217,140	0,206	0,210	İyi	0,098	0,245	İyi
1500	108,000	217,140	0,208	0,210	İyi	0,101	0,263	İyi
1600	106,770	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,104	0,280	İyi

Ek 14 Hesap çizelgesi- XIV

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	107,750	217,140	0,157	0,210	İyi	0,048	0,035	Kötü
300	160,090	217,140	0,167	0,210	İyi	0,056	0,053	Kötü
400	152,770	217,140	0,175	0,210	İyi	0,063	0,070	İyi
500	147,240	217,140	0,182	0,210	İyi	0,069	0,088	İyi
600	142,810	217,140	0,187	0,210	İyi	0,074	0,105	İyi
700	139,140	217,140	0,192	0,210	İyi	0,078	0,123	İyi
800	136,000	217,140	0,197	0,210	İyi	0,083	0,140	İyi
900	133,280	217,140	0,201	0,210	İyi	0,087	0,158	İyi
1000	130,870	217,140	0,204	0,210	İyi	0,091	0,175	İyi
1100	128,720	217,140	0,208	0,210	İyi	0,094	0,193	İyi
1200	126,780	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,097	0,210	İyi
1300	125,010	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,101	0,228	İyi
1400	123,390	217,140	0,217	0,210	Kötü	0,104	0,245	İyi
1500	121,900	217,140	0,219	0,210	Kötü	0,107	0,263	İyi
1600	120,510	217,140	0,222	0,210	Kötü	0,110	0,280	İyi

Ek 15 Hesap çizelgesi- XV

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	190,680	217,140	0,164	0,210	İyi	0,051	0,035	Kötü
300	178,770	217,140	0,175	0,210	İyi	0,059	0,053	Kötü
400	170,600	217,140	0,184	0,210	İyi	0,066	0,070	İyi
500	164,420	217,140	0,191	0,210	İyi	0,072	0,088	İyi
600	159,480	217,140	0,197	0,210	İyi	0,078	0,105	İyi
700	155,370	217,140	0,202	0,210	İyi	0,082	0,123	İyi
800	151,870	217,140	0,206	0,210	İyi	0,087	0,140	İyi
900	148,830	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,091	0,158	İyi
1000	146,140	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,095	0,175	İyi
1100	143,740	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,099	0,193	İyi
1200	141,580	217,140	0,221	0,210	Kötü	0,103	0,210	İyi
1300	139,600	217,140	0,224	0,210	Kötü	0,106	0,228	İyi
1400	137,790	217,140	0,227	0,210	Kötü	0,109	0,245	İyi
1500	136,120	217,140	0,230	0,210	Kötü	0,112	0,263	İyi
1600	134,570	217,140	0,233	0,210	Kötü	0,115	0,280	İyi

Ek 16 Hesap çizelgesi- XVI

Q=10 ton - S 49 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h_b=30 cm – h_{ab}=30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E_z (Kg/cm²)	(σ_Q)_{din} (N/mm²)	σ_{ya} (N/mm²)	P_{din} (N/mm²)	(σ_b)_{din} (N/mm²)	Durum	(σ_z)_{din} (N/mm²)	(σ_z)_{em} (N/mm²)	Durum
200	148,770	217,140	0,151	0,210	İyi	0,041	0,035	Kötü
300	140,120	217,140	0,161	0,210	İyi	0,047	0,053	İyi
400	134,130	217,140	0,168	0,210	İyi	0,052	0,070	İyi
500	129,570	217,140	0,174	0,210	İyi	0,057	0,088	İyi
600	125,910	217,140	0,179	0,210	İyi	0,061	0,105	İyi
700	122,860	217,140	0,183	0,210	İyi	0,065	0,123	İyi
800	120,240	217,140	0,187	0,210	İyi	0,069	0,140	İyi
900	117,970	217,140	0,191	0,210	İyi	0,072	0,158	İyi
1000	115,950	217,140	0,194	0,210	İyi	0,075	0,175	İyi
1100	114,150	217,140	0,197	0,210	İyi	0,078	0,193	İyi
1200	112,510	217,140	0,200	0,210	İyi	0,081	0,210	İyi
1300	111,030	217,140	0,203	0,210	İyi	0,083	0,228	İyi
1400	109,660	217,140	0,205	0,210	İyi	0,086	0,245	İyi
1500	108,400	217,140	0,208	0,210	İyi	0,088	0,263	İyi
1600	107,220	217,140	0,210	0,210	İyi	0,090	0,280	İyi

Ek 17 Hesap çizelgesi- XVII

Q=10 ton - S 49 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	167,920	217,140	0,159	0,210	İyi	0,043	0,035	Kötü
300	158,160	217,140	0,169	0,210	İyi	0,050	0,053	İyi
400	151,400	217,140	0,177	0,210	İyi	0,055	0,070	İyi
500	146,250	217,140	0,183	0,210	İyi	0,060	0,088	İyi
600	142,110	217,140	0,188	0,210	İyi	0,065	0,105	İyi
700	138,670	217,140	0,193	0,210	İyi	0,069	0,123	İyi
800	135,720	217,140	0,197	0,210	İyi	0,072	0,140	İyi
900	133,150	217,140	0,201	0,210	İyi	0,076	0,158	İyi
1000	130,870	217,140	0,204	0,210	İyi	0,079	0,175	İyi
1100	128,840	217,140	0,208	0,210	İyi	0,082	0,193	İyi
1200	126,990	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,085	0,210	İyi
1300	125,310	217,140	0,213	0,210	Kötü	0,088	0,228	İyi
1400	123,770	217,140	0,216	0,210	Kötü	0,090	0,245	İyi
1500	122,350	217,140	0,219	0,210	Kötü	0,093	0,263	İyi
1600	121,020	217,140	0,221	0,210	Kötü	0,095	0,280	İyi

Ek 18 Hesap çizelgesi- XVIII

Q=10 ton - S 49 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	187,510	217,140	0,167	0,210	İyi	0,045	0,035	Kötü
300	176,610	217,140	0,177	0,210	İyi	0,053	0,053	İyi
400	169,060	217,140	0,185	0,210	İyi	0,070	0,070	İyi
500	163,320	217,140	0,192	0,210	İyi	0,088	0,088	İyi
600	158,700	217,140	0,197	0,210	İyi	0,105	0,105	İyi
700	154,850	217,140	0,202	0,210	İyi	0,123	0,123	İyi
800	151,550	217,140	0,207	0,210	İyi	0,140	0,140	İyi
900	148,680	217,140	0,211	0,210	Kötü	0,158	0,158	İyi
1000	146,140	217,140	0,214	0,210	Kötü	0,175	0,175	İyi
1100	143,870	217,140	0,218	0,210	Kötü	0,193	0,193	İyi
1200	141,810	217,140	0,221	0,210	Kötü	0,210	0,210	İyi
1300	139,940	217,140	0,224	0,210	Kötü	0,228	0,228	İyi
1400	138,210	217,140	0,227	0,210	Kötü	0,245	0,245	İyi
1500	136,620	217,140	0,229	0,210	Kötü	0,263	0,263	İyi
1600	135,150	217,140	0,232	0,210	Kötü	0,280	0,280	İyi

Ek 19 Hesap çizelgesi- XIX

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	115,970	255,00	0,140	0,210	İyi	0,062	0,035	Kötü
300	108,270	255,00	0,150	0,210	İyi	0,073	0,053	Kötü
400	103,070	255,00	0,158	0,210	İyi	0,082	0,070	Kötü
500	99,170	255,00	0,164	0,210	İyi	0,090	0,088	Kötü
600	96,080	255,00	0,170	0,210	İyi	0,097	0,105	İyi
700	93,520	255,00	0,174	0,210	İyi	0,103	0,123	İyi
800	91,350	255,00	0,178	0,210	İyi	0,108	0,140	İyi
900	89,470	255,00	0,182	0,210	İyi	0,113	0,158	İyi
1000	87,810	255,00	0,186	0,210	İyi	0,118	0,175	İyi
1100	86,330	255,00	0,189	0,210	İyi	0,122	0,193	İyi
1200	84,990	255,00	0,192	0,210	İyi	0,126	0,210	İyi
1300	83,780	255,00	0,194	0,210	İyi	0,130	0,228	İyi
1400	82,670	255,00	0,197	0,210	İyi	0,133	0,245	İyi
1500	81,640	255,00	0,200	0,210	İyi	0,137	0,263	İyi
1600	80,690	255,00	0,202	0,210	İyi	0,140	0,280	İyi

Ek 20 Hesap çizelgesi- XX

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	130,890	255,00	0,148	0,210	İyi	0,066	0,035	Kötü
300	122,200	255,00	0,158	0,210	İyi	0,077	0,053	Kötü
400	116,330	255,00	0,166	0,210	İyi	0,087	0,070	Kötü
500	111,940	255,00	0,173	0,210	İyi	0,095	0,088	Kötü
600	108,440	255,00	0,178	0,210	İyi	0,102	0,105	İyi
700	105,560	255,00	0,183	0,210	İyi	0,108	0,123	İyi
800	103,110	255,00	0,188	0,210	İyi	0,114	0,140	İyi
900	100,980	255,00	0,192	0,210	İyi	0,119	0,158	İyi
1000	99,110	255,00	0,199	0,210	İyi	0,124	0,175	İyi
1100	97,440	255,00	0,195	0,210	İyi	0,129	0,193	İyi
1200	95,930	255,00	0,202	0,210	İyi	0,133	0,210	İyi
1300	94,560	255,00	0,205	0,210	İyi	0,137	0,228	İyi
1400	93,310	255,00	0,207	0,210	İyi	0,141	0,245	İyi
1500	92,150	255,00	0,210	0,210	Kötü	0,144	0,263	İyi
1600	91,080	255,00	0,212	0,210	Kötü	0,148	0,280	İyi

Ek 21 Hesap çizelgesi- XXI

Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	146,160	255,00	0,155	0,210	İyi	0,069	0,035	Kötü
300	136,460	255,00	0,166	0,210	İyi	0,081	0,053	Kötü
400	129,900	255,00	0,175	0,210	İyi	0,091	0,070	Kötü
500	125,000	255,00	0,181	0,210	İyi	0,100	0,088	Kötü
600	121,100	255,00	0,187	0,210	İyi	0,107	0,105	Kötü
700	117,870	255,00	0,192	0,210	İyi	0,114	0,123	İyi
800	115,140	255,00	0,197	0,210	İyi	0,120	0,140	İyi
900	112,760	255,00	0,201	0,210	İyi	0,125	0,158	İyi
1000	110,670	255,00	0,205	0,210	İyi	0,130	0,175	İyi
1100	108,810	255,00	0,208	0,210	İyi	0,135	0,193	İyi
1200	107,120	255,00	0,212	0,210	Kötü	0,140	0,210	İyi
1300	105,600	255,00	0,215	0,210	Kötü	0,144	0,228	İyi
1400	104,190	255,00	0,218	0,210	Kötü	0,148	0,245	İyi
1500	102,900	255,00	0,220	0,210	Kötü	0,152	0,263	İyi
1600	101,710	255,00	0,223	0,210	Kötü	0,155	0,280	İyi

Ek 22 Hesap çizelgesi- XXII

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	113,87	255,00	0,143	0,210	İyi	0,044	0,035	Kötü
300	106,900	255,00	0,152	0,210	İyi	0,052	0,053	İyi
400	102,120	255,00	0,159	0,210	İyi	0,058	0,070	İyi
500	98,510	255,00	0,165	0,210	İyi	0,063	0,088	İyi
600	95,620	255,00	0,170	0,210	İyi	0,068	0,105	İyi
700	93,210	255,00	0,175	0,210	İyi	0,072	0,123	İyi
800	91,160	255,00	0,179	0,210	İyi	0,076	0,140	İyi
900	89,380	255,00	0,182	0,210	İyi	0,080	0,158	İyi
1000	87,810	255,00	0,186	0,210	İyi	0,083	0,175	İyi
1100	86,400	255,00	0,189	0,210	İyi	0,087	0,193	İyi
1200	85,130	255,00	0,191	0,210	İyi	0,090	0,210	İyi
1300	83,970	255,00	0,194	0,210	İyi	0,093	0,228	İyi
1400	82,910	255,00	0,196	0,210	İyi	0,095	0,245	İyi
1500	81,930	255,00	0,199	0,210	İyi	0,098	0,263	İyi
1600	81,020	255,00	0,201	0,210	İyi	0,101	0,280	İyi

Ek 23 Hesap çizelgesi- XXIII

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	128,520	255,00	0,151	0,210	İyi	0,047	0,035	Kötü
300	120,660	255,00	0,160	0,210	İyi	0,055	0,053	Kötü
400	115,270	255,00	0,168	0,210	İyi	0,061	0,070	İyi
500	111,190	255,00	0,174	0,210	İyi	0,067	0,088	İyi
600	107,920	255,00	0,179	0,210	İyi	0,072	0,105	İyi
700	105,210	255,00	0,184	0,210	İyi	0,076	0,123	İyi
800	102,900	255,00	0,188	0,210	İyi	0,080	0,140	İyi
900	100,890	255,00	0,192	0,210	İyi	0,084	0,158	İyi
1000	99,110	255,00	0,195	0,210	İyi	0,088	0,175	İyi
1100	97,520	255,00	0,198	0,210	İyi	0,091	0,193	İyi
1200	96,080	255,00	0,201	0,210	İyi	0,095	0,210	İyi
1300	94,780	255,00	0,204	0,210	İyi	0,098	0,228	İyi
1400	93,580	255,00	0,207	0,210	İyi	0,101	0,245	İyi
1500	92,470	255,00	0,209	0,210	İyi	0,103	0,263	İyi
1600	91,440	255,00	0,212	0,210	Kötü	0,106	0,280	İyi

Ek 24 Hesap çizelgesi- XXIV

Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	143,520	255,00	0,158	0,210	İyi	0,049	0,035	Kötü
300	134,740	255,00	0,168	0,210	İyi	0,058	0,053	Kötü
400	128,720	255,00	0,176	0,210	İyi	0,064	0,070	İyi
500	124,160	255,00	0,183	0,210	İyi	0,070	0,088	İyi
600	120,510	255,00	0,188	0,210	İyi	0,075	0,105	İyi
700	117,490	255,00	0,193	0,210	İyi	0,080	0,123	İyi
800	114,900	255,00	0,197	0,210	İyi	0,085	0,140	İyi
900	112,660	255,00	0,201	0,210	İyi	0,089	0,158	İyi
1000	110,670	255,00	0,205	0,210	İyi	0,092	0,175	İyi
1100	108,900	255,00	0,208	0,210	İyi	0,096	0,193	İyi
1200	107,300	255,00	0,211	0,210	Kötü	0,099	0,210	İyi
1300	105,840	255,00	0,214	0,210	Kötü	0,103	0,228	İyi
1400	104,500	255,00	0,217	0,210	Kötü	0,106	0,245	İyi
1500	103,260	255,00	0,220	0,210	Kötü	0,109	0,263	İyi
1600	102,110	255,00	0,222	0,210	Kötü	0,112	0,280	İyi

Ek 25 Hesap çizelgesi- XXV

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	111,950	255,00	0,145	0,210	İyi	0,040	0,035	Kötü
300	105,590	255,00	0,154	0,210	İyi	0,046	0,053	İyi
400	101,190	255,00	0,161	0,210	İyi	0,051	0,070	İyi
500	97,840	255,00	0,166	0,210	İyi	0,056	0,088	İyi
600	95,140	255,00	0,171	0,210	İyi	0,060	0,105	İyi
700	92,890	255,00	0,175	0,210	İyi	0,063	0,123	İyi
800	90,970	255,00	0,179	0,210	İyi	0,067	0,140	İyi
900	89,290	255,00	0,182	0,210	İyi	0,070	0,158	İyi
1000	87,810	255,00	0,186	0,210	İyi	0,073	0,175	İyi
1100	86,480	255,00	0,188	0,210	İyi	0,076	0,193	İyi
1200	85,270	255,00	0,191	0,210	İyi	0,078	0,210	İyi
1300	84,180	255,00	0,194	0,210	İyi	0,081	0,228	İyi
1400	83,170	255,00	0,196	0,210	İyi	0,083	0,245	İyi
1500	82,230	255,00	0,198	0,210	İyi	0,086	0,263	İyi
1600	81,370	255,00	0,200	0,210	İyi	0,088	0,280	İyi

Ek 26 Hesap çizelgesi- XXVI

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	126,360	255,00	0,153	0,210	İyi	0,042	0,035	Kötü
300	119,180	255,00	0,162	0,210	İyi	0,049	0,053	İyi
400	114,210	255,00	0,169	0,210	İyi	0,054	0,070	İyi
500	110,430	255,00	0,175	0,210	İyi	0,059	0,088	İyi
600	107,390	255,00	0,180	0,210	İyi	0,063	0,105	İyi
700	104,850	255,00	0,185	0,210	İyi	0,067	0,123	İyi
800	102,680	255,00	0,188	0,210	İyi	0,071	0,140	İyi
900	100,780	255,00	0,192	0,210	İyi	0,074	0,158	İyi
1000	99,110	255,00	0,195	0,210	İyi	0,077	0,175	İyi
1100	97,610	255,00	0,198	0,210	İyi	0,080	0,193	İyi
1200	96,250	255,00	0,201	0,210	İyi	0,083	0,210	İyi
1300	95,010	255,00	0,204	0,210	İyi	0,085	0,228	İyi
1400	93,870	255,00	0,206	0,210	İyi	0,088	0,245	İyi
1500	92,820	255,00	0,209	0,210	İyi	0,090	0,263	İyi
1600	91,840	255,00	0,211	0,210	Kötü	0,093	0,280	İyi

Ek 27 Hesap çizelgesi- XXVII

Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=260 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	141,100	255,00	0,161	0,210	İyi	0,044	0,035	Kötü
300	133,090	255,00	0,170	0,210	İyi	0,051	0,053	İyi
400	127,540	255,00	0,178	0,210	İyi	0,057	0,070	İyi
500	123,310	255,00	0,184	0,210	İyi	0,062	0,088	İyi
600	119,920	255,00	0,189	0,210	İyi	0,066	0,105	İyi
700	117,080	255,00	0,194	0,210	İyi	0,071	0,123	İyi
800	114,660	255,00	0,198	0,210	İyi	0,074	0,140	İyi
900	112,540	255,00	0,201	0,210	İyi	0,078	0,158	İyi
1000	110,670	255,00	0,205	0,210	İyi	0,081	0,175	İyi
1100	109,000	255,00	0,208	0,210	İyi	0,084	0,193	İyi
1200	107,480	255,00	0,211	0,210	Kötü	0,087	0,210	İyi
1300	106,090	255,00	0,214	0,210	Kötü	0,090	0,228	İyi
1400	104,820	255,00	0,216	0,210	Kötü	0,093	0,245	İyi
1500	103,650	255,00	0,219	0,210	Kötü	0,095	0,263	İyi
1600	102,560	255,00	0,221	0,210	Kötü	0,098	0,280	İyi

Ek 28 Hesap çizelgesi- XXVIII

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	115,330	255,00	0,128	0,210	İyi	0,057	0,035	Kötü
300	107,540	255,00	0,138	0,210	İyi	0,067	0,053	Kötü
400	102,270	255,00	0,145	0,210	İyi	0,075	0,070	Kötü
500	98,330	255,00	0,151	0,210	İyi	0,082	0,088	İyi
600	95,200	255,00	0,156	0,210	İyi	0,089	0,105	İyi
700	92,610	255,00	0,160	0,210	İyi	0,094	0,123	İyi
800	90,420	255,00	0,164	0,210	İyi	0,099	0,140	İyi
900	88,510	255,00	0,167	0,210	İyi	0,104	0,158	İyi
1000	86,830	255,00	0,171	0,210	İyi	0,108	0,175	İyi
1100	85,340	255,00	0,174	0,210	İyi	0,112	0,193	İyi
1200	83,990	255,00	0,176	0,210	İyi	0,116	0,210	İyi
1300	82,760	255,00	0,179	0,210	İyi	0,119	0,228	İyi
1400	81,640	255,00	0,181	0,210	İyi	0,123	0,245	İyi
1500	80,600	255,00	0,184	0,210	İyi	0,126	0,263	İyi
1600	79,640	255,00	0,186	0,210	İyi	0,129	0,280	İyi

Ek 29 Hesap çizelgesi- XXIX

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	130,170	255,00	0,135	0,210	İyi	0,060	0,035	Kötü
300	121,380	255,00	0,145	0,210	İyi	0,071	0,053	Kötü
400	115,440	255,00	0,152	0,210	İyi	0,079	0,070	Kötü
500	110,990	255,00	0,159	0,210	İyi	0,087	0,088	İyi
600	107,450	255,00	0,164	0,210	İyi	0,093	0,105	İyi
700	104,530	255,00	0,168	0,210	İyi	0,099	0,123	İyi
800	102,050	255,00	0,172	0,210	İyi	0,104	0,140	İyi
900	99,900	255,00	0,176	0,210	İyi	0,109	0,158	İyi
1000	98,010	255,00	0,180	0,210	İyi	0,114	0,175	İyi
1100	96,320	255,00	0,183	0,210	İyi	0,118	0,193	İyi
1200	94,790	255,00	0,186	0,210	İyi	0,122	0,210	İyi
1300	93,410	255,00	0,188	0,210	İyi	0,126	0,228	İyi
1400	92,140	255,00	0,191	0,210	İyi	0,129	0,245	İyi
1500	90,980	255,00	0,193	0,210	İyi	0,133	0,263	İyi
1600	89,890	255,00	0,196	0,210	İyi	0,136	0,280	İyi

Ek 30 Hesap çizelgesi- XXX

Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =0 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	145,36	255,00	0,142	0,210	İyi	0,063	0,035	Kötü
300	135,54	255,00	0,152	0,210	İyi	0,074	0,053	Kötü
400	128,91	255,00	0,160	0,210	İyi	0,084	0,070	Kötü
500	123,94	255,00	0,166	0,210	İyi	0,091	0,088	Kötü
600	119,99	255,00	0,172	0,210	İyi	0,098	0,105	İyi
700	116,73	255,00	0,177	0,210	İyi	0,104	0,123	İyi
800	113,96	255,00	0,181	0,210	İyi	0,110	0,140	İyi
900	111,56	255,00	0,185	0,210	İyi	0,115	0,158	İyi
1000	109,44	255,00	0,188	0,210	İyi	0,120	0,175	İyi
1100	107,56	255,00	0,192	0,210	İyi	0,124	0,193	İyi
1200	105,86	255,00	0,195	0,210	İyi	0,128	0,210	İyi
1300	104,31	255,00	0,198	0,210	İyi	0,132	0,228	İyi
1400	102,90	255,00	0,200	0,210	İyi	0,136	0,245	İyi
1500	101,59	255,00	0,203	0,210	İyi	0,140	0,263	İyi
1600	100,38	255,00	0,205	0,210	İyi	0,143	0,280	İyi

Ek 31 Hesap çizelgesi- XXXI

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	113,290	255,00	0,131	0,210	İyi	0,041	0,035	Kötü
300	106,220	255,00	0,139	0,210	İyi	0,047	0,053	İyi
400	101,360	255,00	0,146	0,210	İyi	0,053	0,070	İyi
500	97,690	255,00	0,152	0,210	İyi	0,058	0,088	İyi
600	94,750	255,00	0,156	0,210	İyi	0,062	0,105	İyi
700	92,310	255,00	0,160	0,210	İyi	0,066	0,123	İyi
800	90,240	255,00	0,164	0,210	İyi	0,070	0,140	İyi
900	88,430	255,00	0,167	0,210	İyi	0,073	0,158	İyi
1000	86,830	255,00	0,171	0,210	İyi	0,076	0,175	İyi
1100	85,410	255,00	0,173	0,210	İyi	0,080	0,193	İyi
1200	84,120	255,00	0,176	0,210	İyi	0,082	0,210	İyi
1300	82,940	255,00	0,179	0,210	İyi	0,085	0,228	İyi
1400	81,870	255,00	0,181	0,210	İyi	0,088	0,245	İyi
1500	80,880	255,00	0,183	0,210	İyi	0,090	0,263	İyi
1600	79,960	255,00	0,185	0,210	İyi	0,093	0,280	İyi

Ek 32 Hesap çizelgesi- XXXII

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	127,870	255,00	0,138	0,210	İyi	0,043	0,035	Kötü
300	119,890	255,00	0,147	0,210	İyi	0,050	0,053	İyi
400	114,410	255,00	0,154	0,210	İyi	0,056	0,070	İyi
500	110,260	255,00	0,160	0,210	İyi	0,061	0,088	İyi
600	106,950	255,00	0,165	0,210	İyi	0,066	0,105	İyi
700	104,200	255,00	0,169	0,210	İyi	0,070	0,123	İyi
800	101,850	255,00	0,173	0,210	İyi	0,074	0,140	İyi
900	99,810	255,00	0,176	0,210	İyi	0,077	0,158	İyi
1000	98,010	255,00	0,180	0,210	İyi	0,081	0,175	İyi
1100	96,400	255,00	0,183	0,210	İyi	0,084	0,193	İyi
1200	94,940	255,00	0,185	0,210	İyi	0,087	0,210	İyi
1300	93,620	255,00	0,188	0,210	İyi	0,090	0,228	İyi
1400	92,400	255,00	0,190	0,210	İyi	0,092	0,245	İyi
1500	91,280	255,00	0,193	0,210	İyi	0,095	0,263	İyi
1600	90,250	255,00	0,195	0,210	İyi	0,098	0,280	İyi

Ek 33 Hesap çizelgesi- XXXIII

Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =20 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	142,790	255,00	0,144	0,210	İyi	0,045	0,035	Kötü
300	133,880	255,00	0,154	0,210	İyi	0,053	0,053	Kötü
400	127,760	255,00	0,161	0,210	İyi	0,059	0,070	İyi
500	123,130	255,00	0,167	0,210	İyi	0,064	0,088	İyi
600	119,430	255,00	0,173	0,210	İyi	0,069	0,105	İyi
700	116,350	255,00	0,177	0,210	İyi	0,074	0,123	İyi
800	113,730	255,00	0,181	0,210	İyi	0,078	0,140	İyi
900	111,450	255,00	0,185	0,210	İyi	0,081	0,158	İyi
1000	109,440	255,00	0,188	0,210	İyi	0,085	0,175	İyi
1100	107,640	255,00	0,192	0,210	İyi	0,088	0,193	İyi
1200	106,020	255,00	0,194	0,210	İyi	0,091	0,210	İyi
1300	104,540	255,00	0,197	0,210	İyi	0,094	0,228	İyi
1400	103,190	255,00	0,200	0,210	İyi	0,097	0,245	İyi
1500	101,940	255,00	0,202	0,210	İyi	0,100	0,263	İyi
1600	100,780	255,00	0,205	0,210	İyi	0,103	0,280	İyi

Ek 34 Hesap çizelgesi- XXXIV

Q=10 ton - UIC 60 – V=80 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	111,410	255,00	0,133	0,210	İyi	0,036	0,035	Kötü
300	104,930	255,00	0,141	0,210	İyi	0,042	0,053	İyi
400	100,450	255,00	0,147	0,210	İyi	0,047	0,070	İyi
500	97,030	255,00	0,153	0,210	İyi	0,051	0,088	İyi
600	94,290	255,00	0,157	0,210	İyi	0,055	0,105	İyi
700	92,000	255,00	0,161	0,210	İyi	0,058	0,123	İyi
800	90,050	255,00	0,164	0,210	İyi	0,061	0,140	İyi
900	88,340	255,00	0,168	0,210	İyi	0,064	0,158	İyi
1000	86,830	255,00	0,171	0,210	İyi	0,067	0,175	İyi
1100	85,480	255,00	0,173	0,210	İyi	0,070	0,193	İyi
1200	84,260	255,00	0,176	0,210	İyi	0,072	0,210	İyi
1300	83,140	255,00	0,178	0,210	İyi	0,074	0,228	İyi
1400	82,120	255,00	0,180	0,210	İyi	0,077	0,245	İyi
1500	81,170	255,00	0,182	0,210	İyi	0,079	0,263	İyi
1600	80,300	255,00	0,184	0,210	İyi	0,081	0,280	İyi

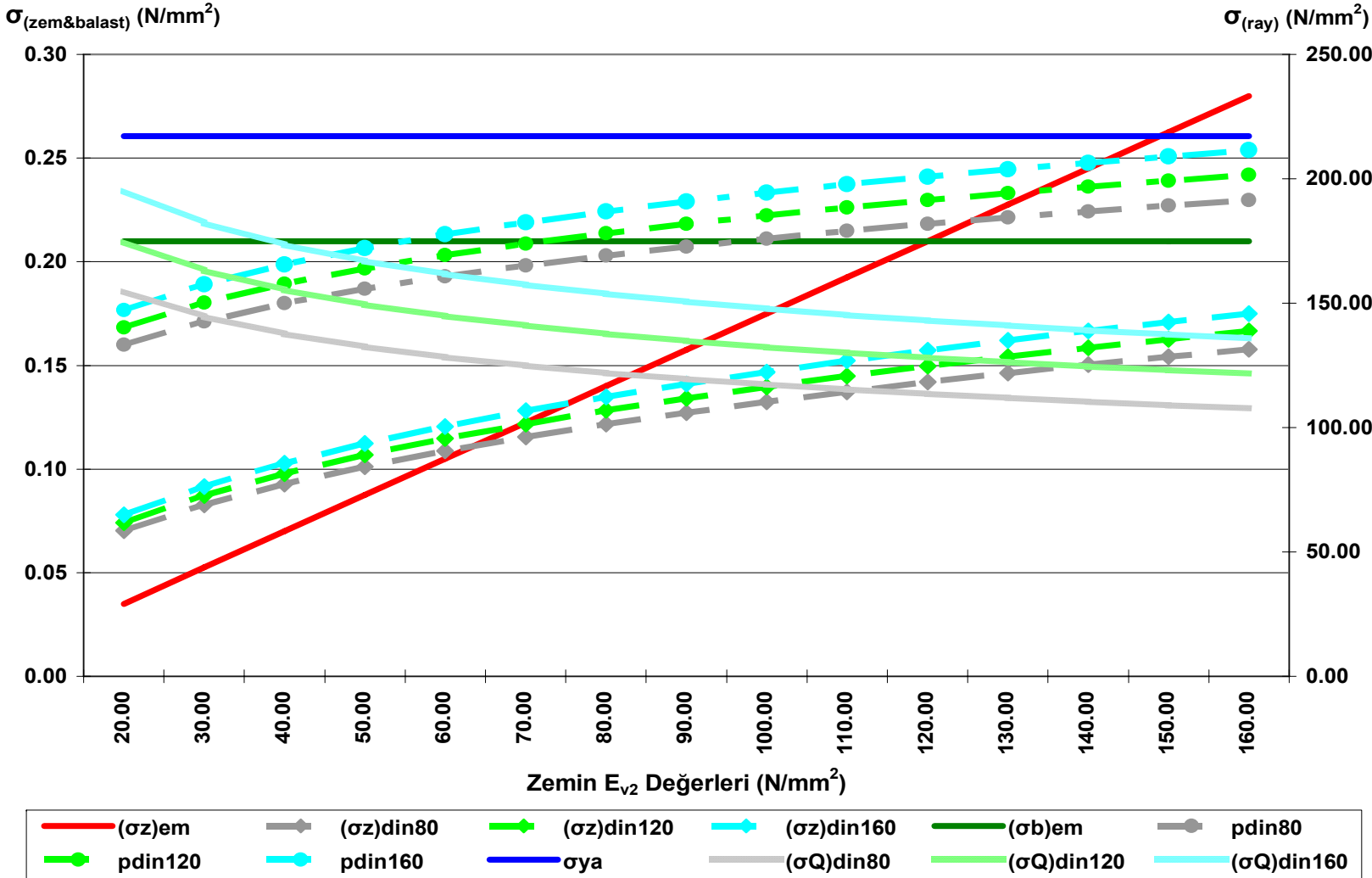
Ek 35 Hesap çizelgesi- XXXV

Q=10 ton - UIC 60 – V=120 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	125,750	255,00	0,140	0,210	İyi	0,038	0,035	Kötü
300	118,440	255,00	0,149	0,210	İyi	0,044	0,053	İyi
400	113,370	255,00	0,155	0,210	İyi	0,050	0,070	İyi
500	109,520	255,00	0,161	0,210	İyi	0,054	0,088	İyi
600	106,420	255,00	0,165	0,210	İyi	0,058	0,105	İyi
700	103,840	255,00	0,169	0,210	İyi	0,061	0,123	İyi
800	101,640	255,00	0,173	0,210	İyi	0,065	0,140	İyi
900	99,710	255,00	0,176	0,210	İyi	0,068	0,158	İyi
1000	98,010	255,00	0,180	0,210	İyi	0,071	0,175	İyi
1100	96,480	255,00	0,182	0,210	İyi	0,073	0,193	İyi
1200	95,100	255,00	0,185	0,210	İyi	0,076	0,210	İyi
1300	93,840	255,00	0,187	0,210	İyi	0,078	0,228	İyi
1400	92,690	255,00	0,190	0,210	İyi	0,081	0,245	İyi
1500	91,620	255,00	0,192	0,210	İyi	0,083	0,263	İyi
1600	90,630	255,00	0,194	0,210	İyi	0,085	0,280	İyi

Ek 36 Hesap çizelgesi- XXXVI

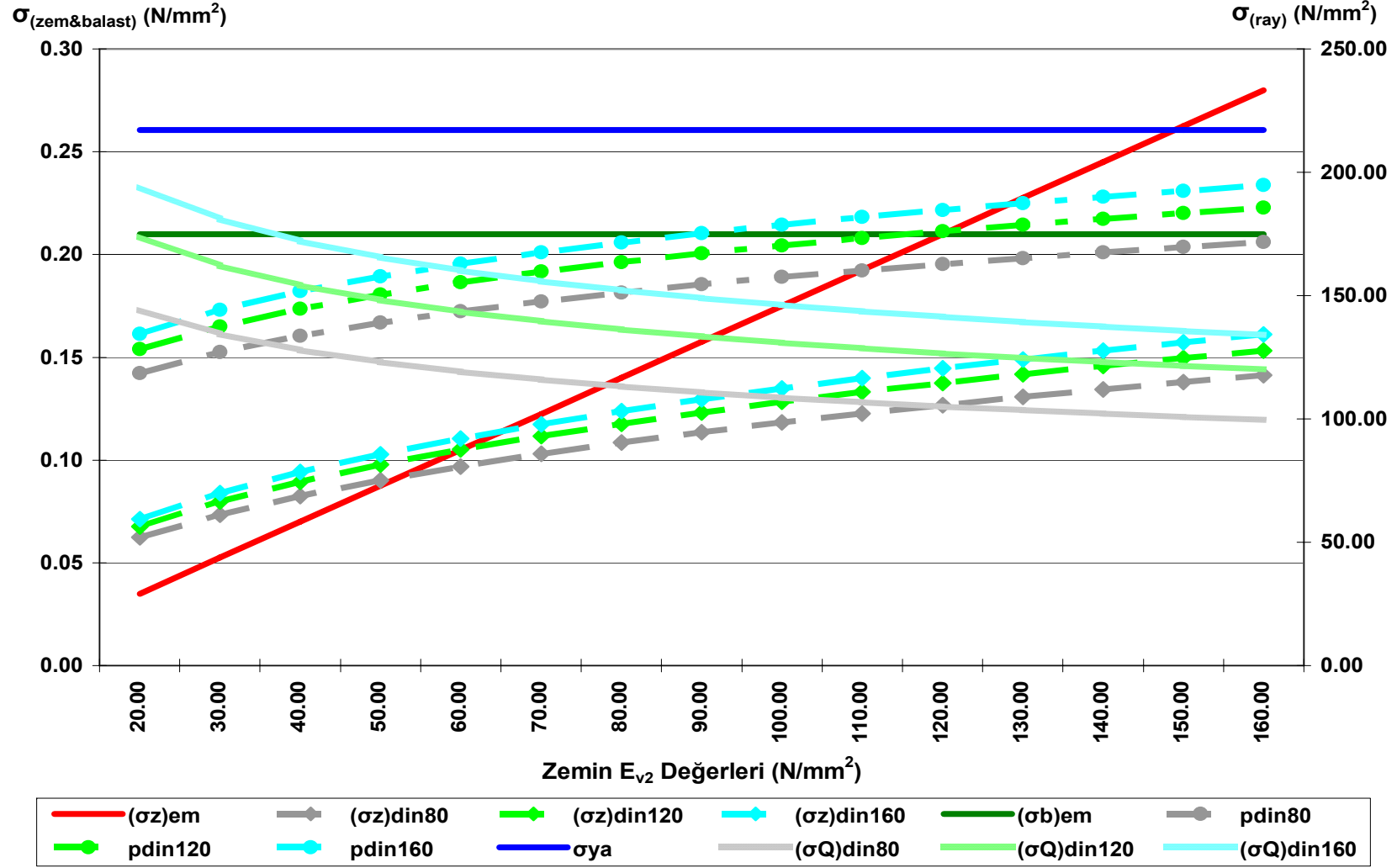
Q=10 ton - UIC 60 – V=160 Km/sa - lt=280 cm – h _b =30 cm – h _{ab} =30 cm								
	RAY		BALAST			ZEMİN		
E _z (Kg/cm ²)	(σ _Q) _{din} (N/mm ²)	σ _{ya} (N/mm ²)	P _{din} (N/mm ²)	(σ _b) _{din} (N/mm ²)	Durum	(σ _z) _{din} (N/mm ²)	(σ _z) _{em} (N/mm ²)	Durum
200	140,420	255,00	0,147	0,210	İyi	0,040	0,035	Kötü
300	132,260	255,00	0,156	0,210	İyi	0,047	0,053	İyi
400	126,600	255,00	0,163	0,210	İyi	0,052	0,070	İyi
500	122,300	255,00	0,169	0,210	İyi	0,057	0,088	İyi
600	118,840	255,00	0,173	0,210	İyi	0,061	0,105	İyi
700	115,960	255,00	0,178	0,210	İyi	0,065	0,123	İyi
800	113,490	255,00	0,182	0,210	İyi	0,068	0,140	İyi
900	111,350	255,00	0,185	0,210	İyi	0,071	0,158	İyi
1000	109,440	255,00	0,188	0,210	İyi	0,074	0,175	İyi
1100	107,740	255,00	0,191	0,210	İyi	0,077	0,193	İyi
1200	106,200	255,00	0,194	0,210	İyi	0,080	0,210	İyi
1300	104,790	255,00	0,197	0,210	İyi	0,083	0,228	İyi
1400	103,500	255,00	0,199	0,210	İyi	0,085	0,245	İyi
1500	102,310	255,00	0,201	0,210	İyi	0,087	0,263	İyi
1600	101,210	255,00	0,204	0,210	İyi	0,090	0,280	İyi

B.D:Orta - S49 - It=260cm - A=60cm - hb=30cm - hab=0cm



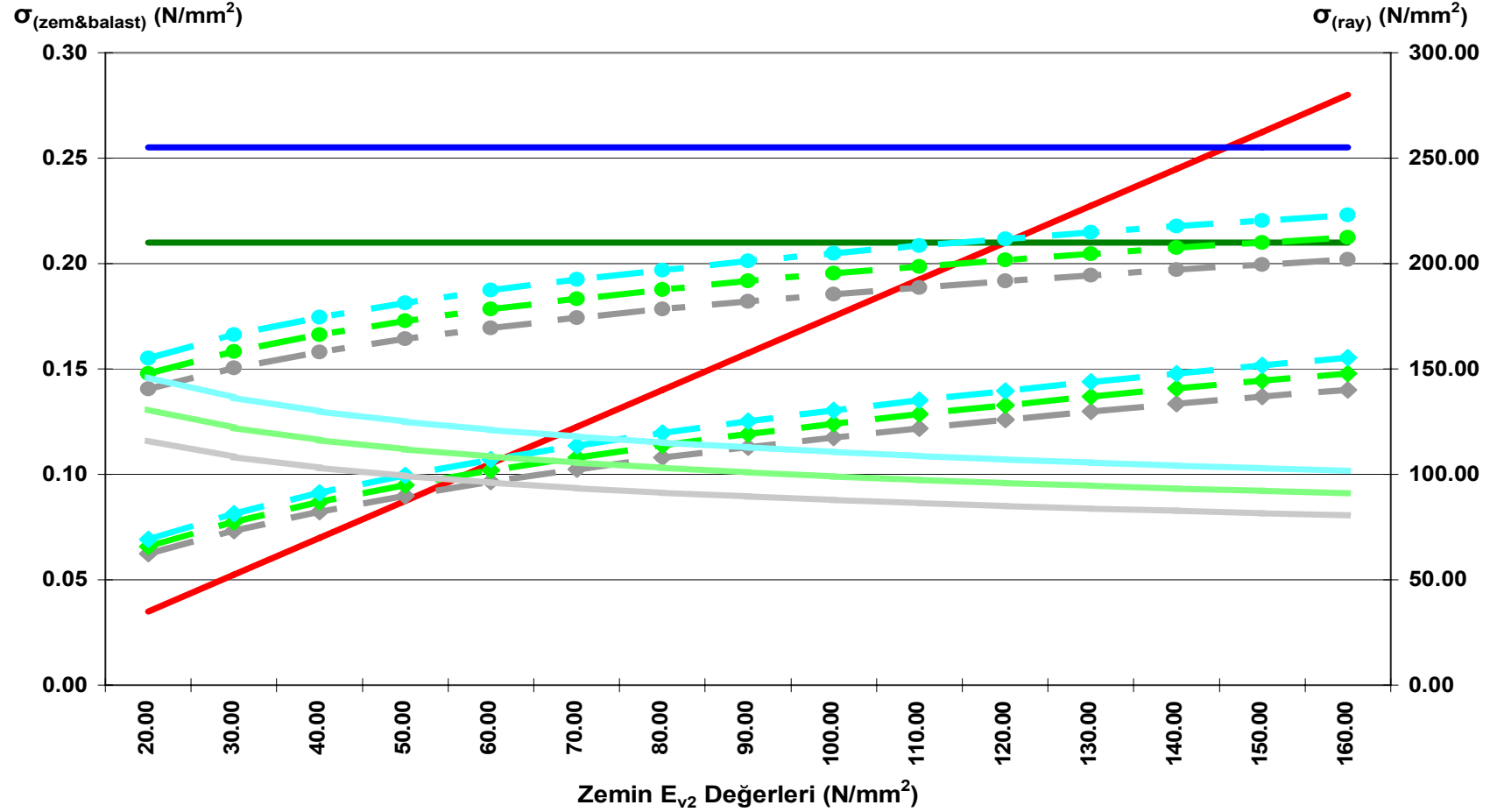
Ek 37 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-

B.D:Orta - S49 - It=280cm - A=60cm - hb=30cm - hab=0cm



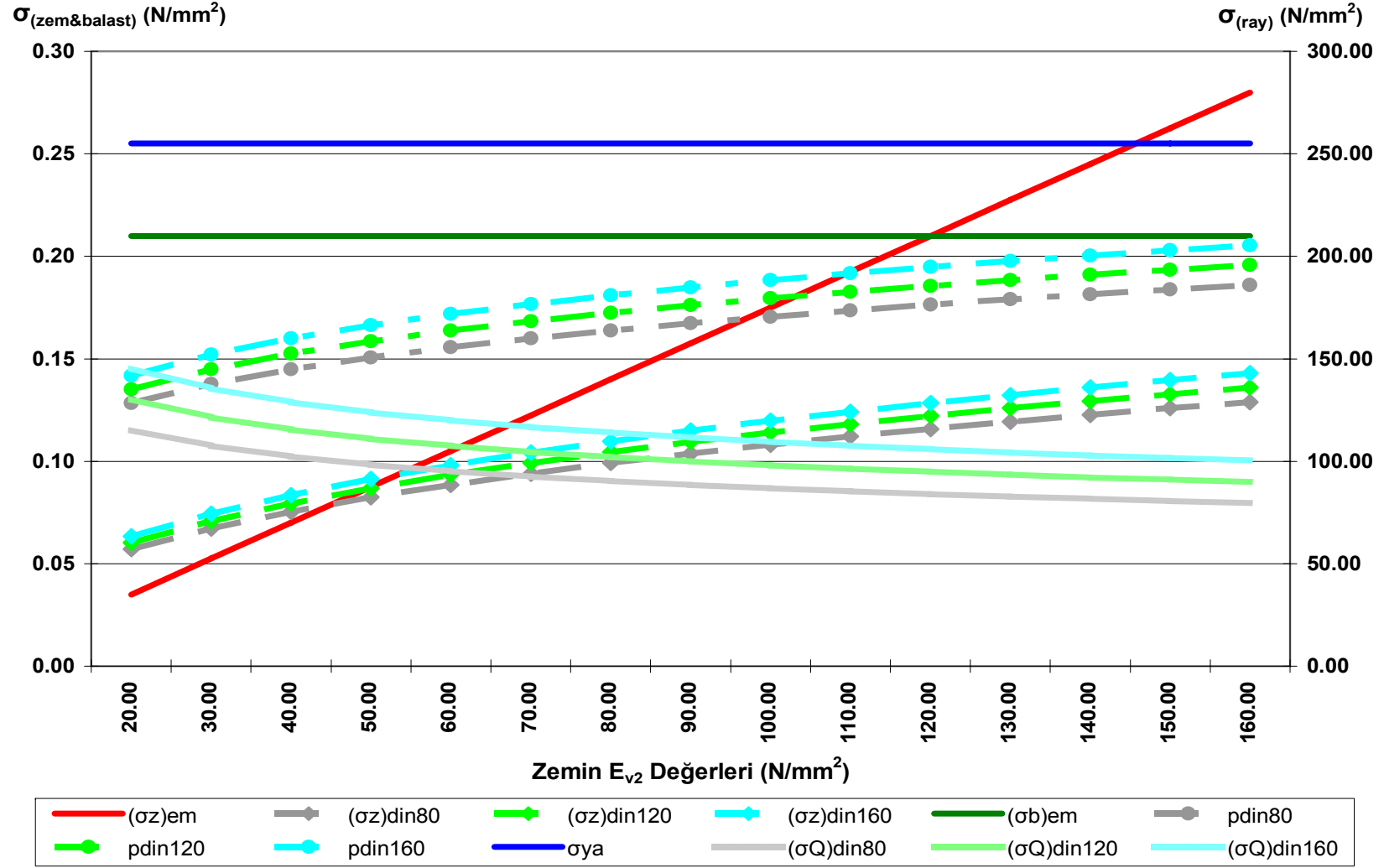
Ek 38 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-II

B.D:Orta - UIC60 - lt=260cm - A=60cm - hb=30cm - hab=0cm



Ek 39 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-III

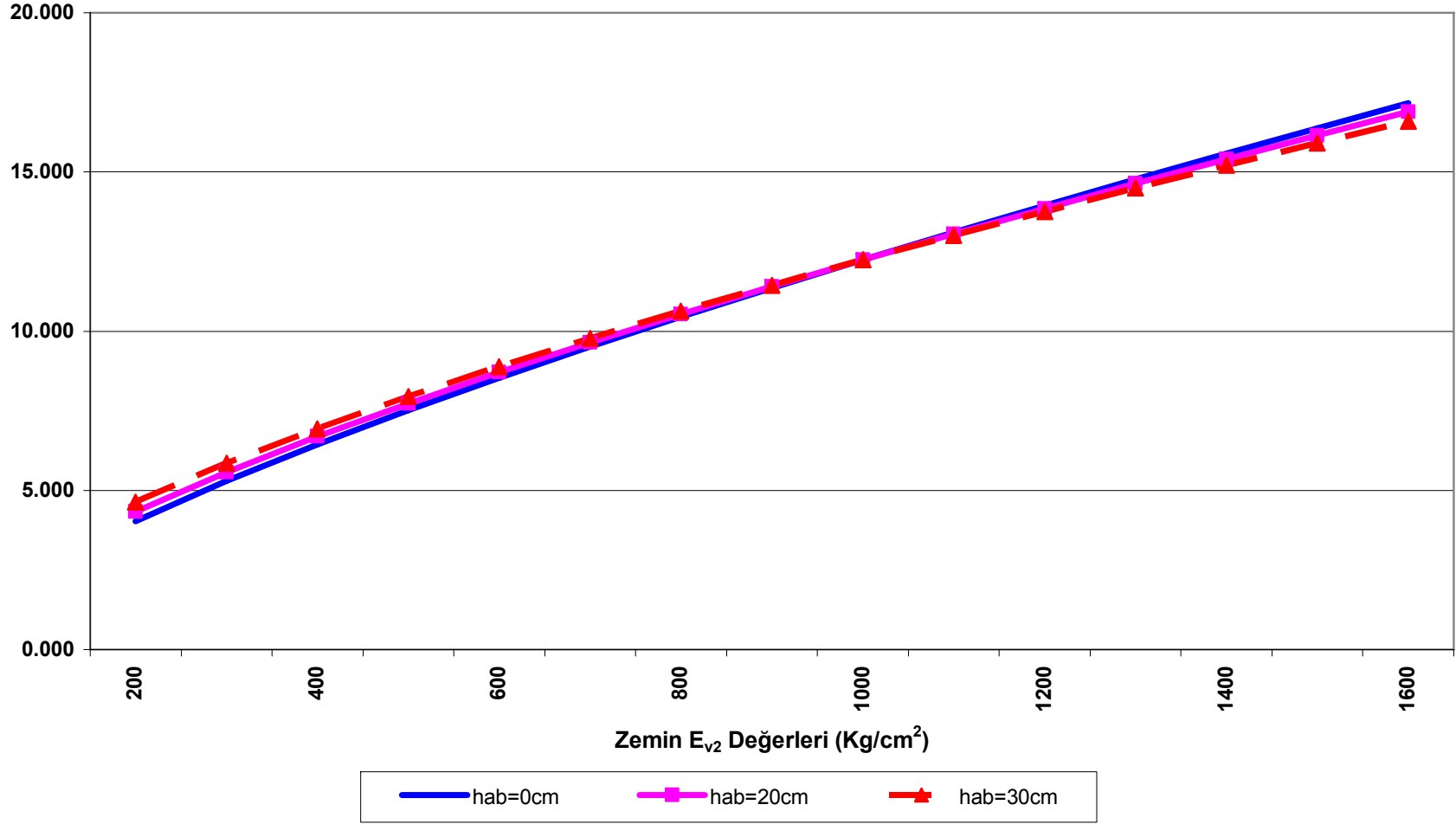
B.D:Orta - UIC60 - It=280cm - A=60cm - hb=30cm - hab=0cm



Ek 40 Gerilmelerin Hız İle Değişimi-IV

B.D:Orta - S49 - $l_t=260\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

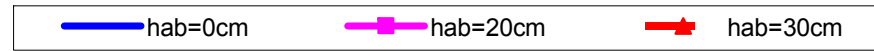
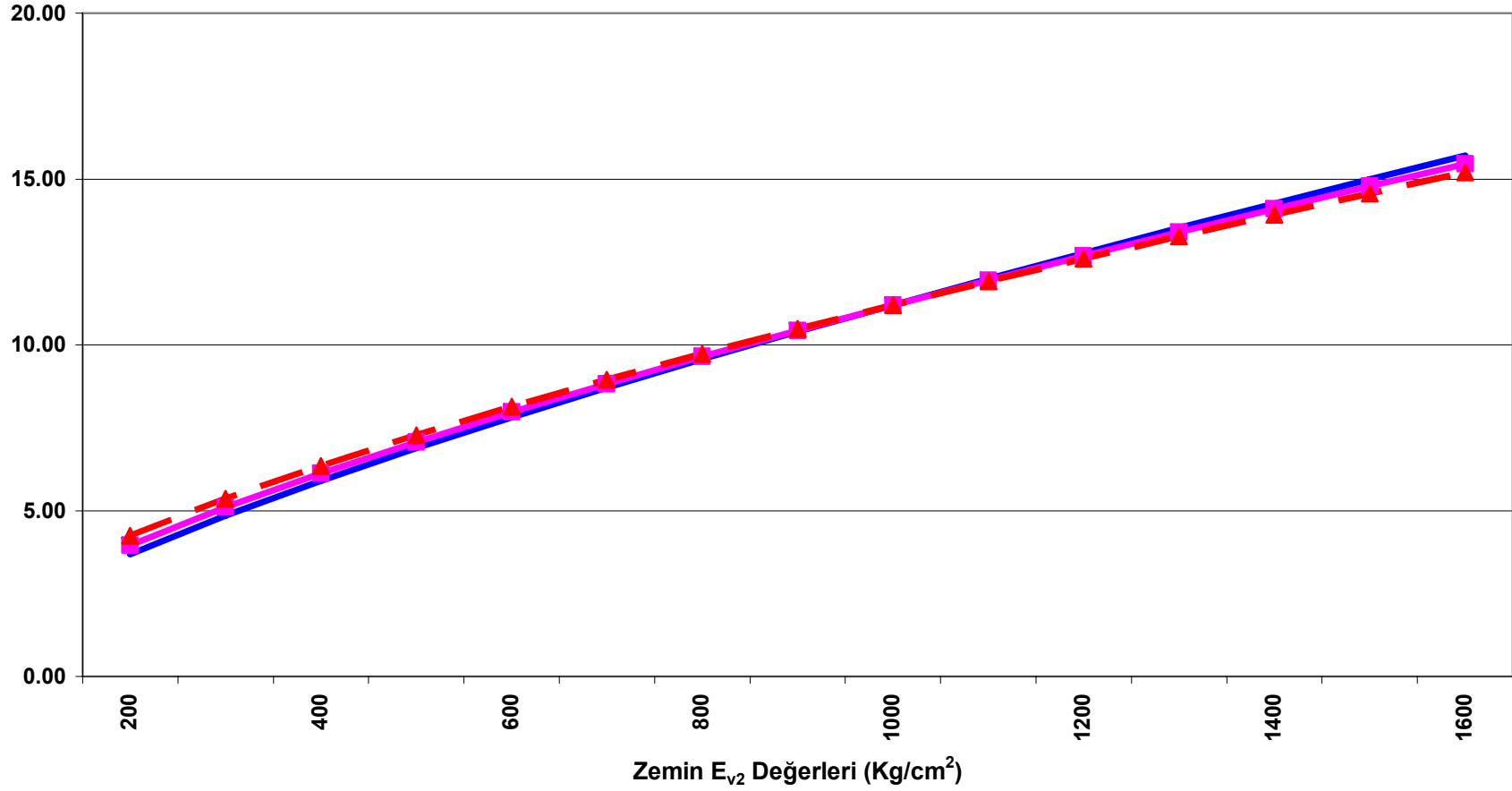
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



Ek 41 Yatak Katsayısının Değişimi-I

B.D:Orta - S49 - $l_t=260\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

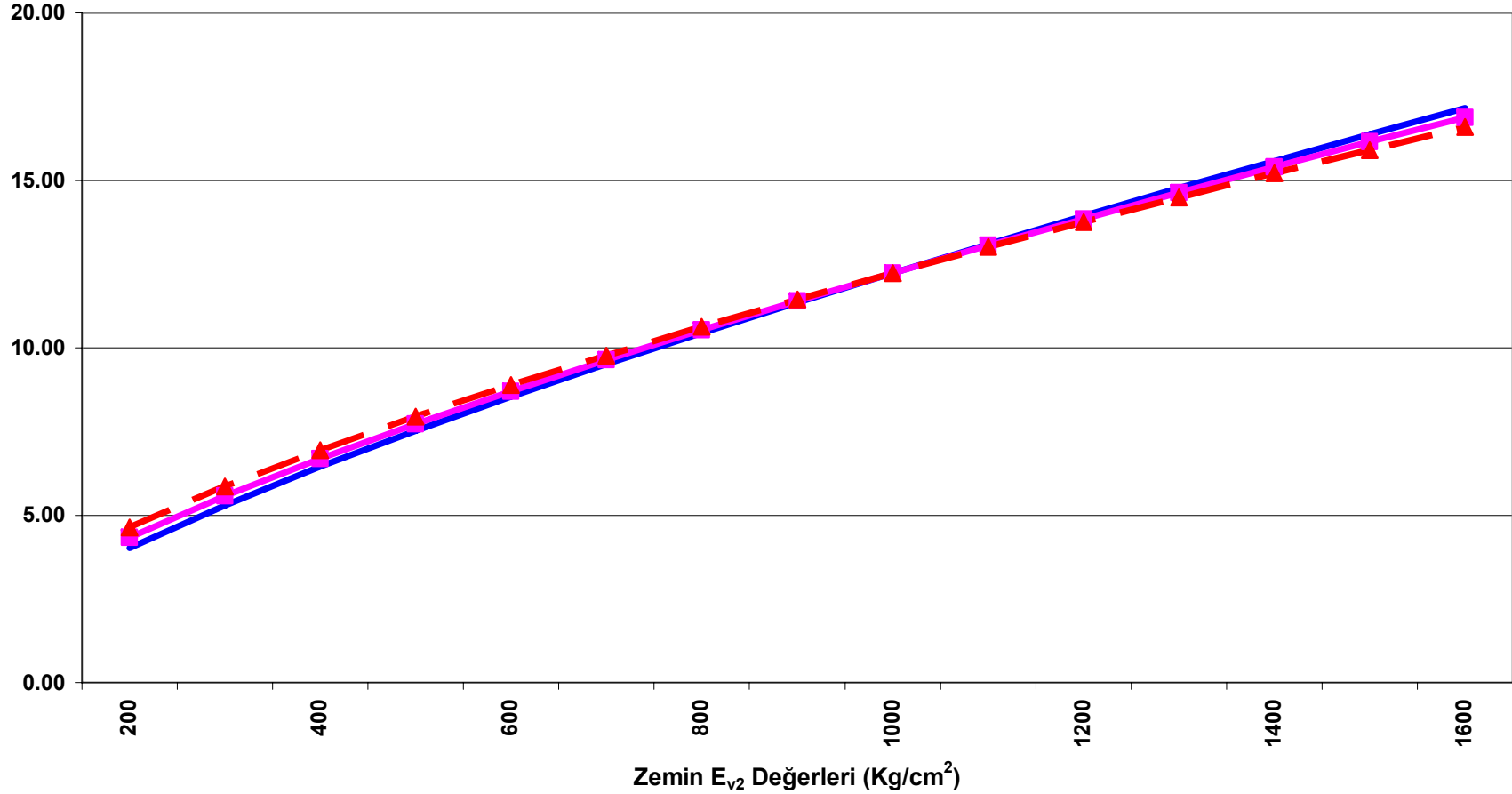
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



Ek 42 Yatak Katsayısının Değişimi-II

B.D:Orta - UIC60 - $l_t=260\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)

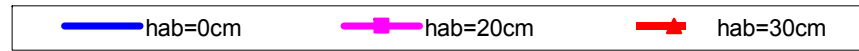
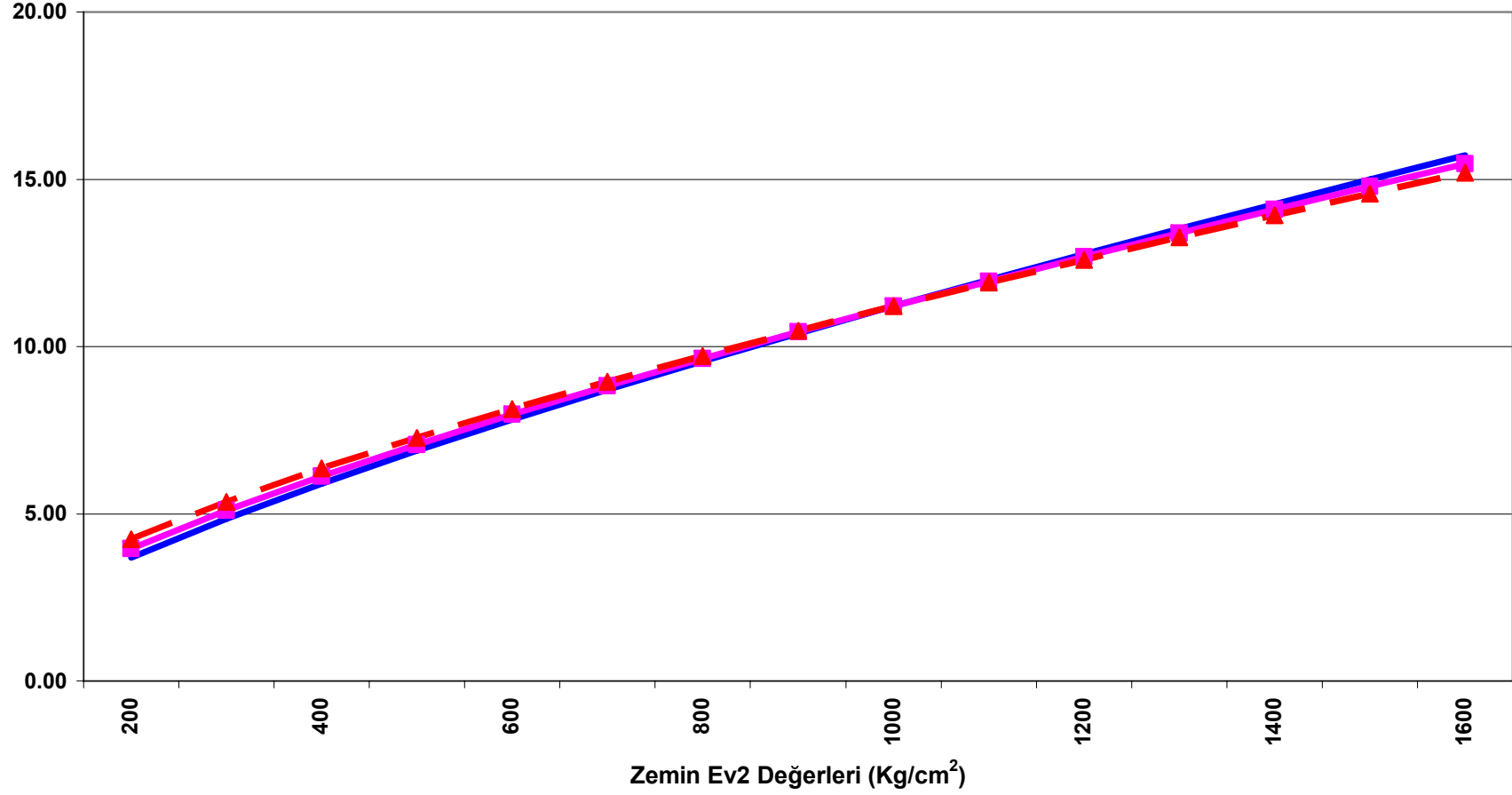


— $h_{ab}=0\text{cm}$ —■— $h_{ab}=20\text{cm}$ —▲— $h_{ab}=30\text{cm}$

Ek 43 Yatak Katsayısının Değişimi-III

B.D:Orta - UIC60 - $l_t=260\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

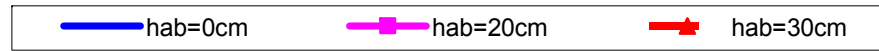
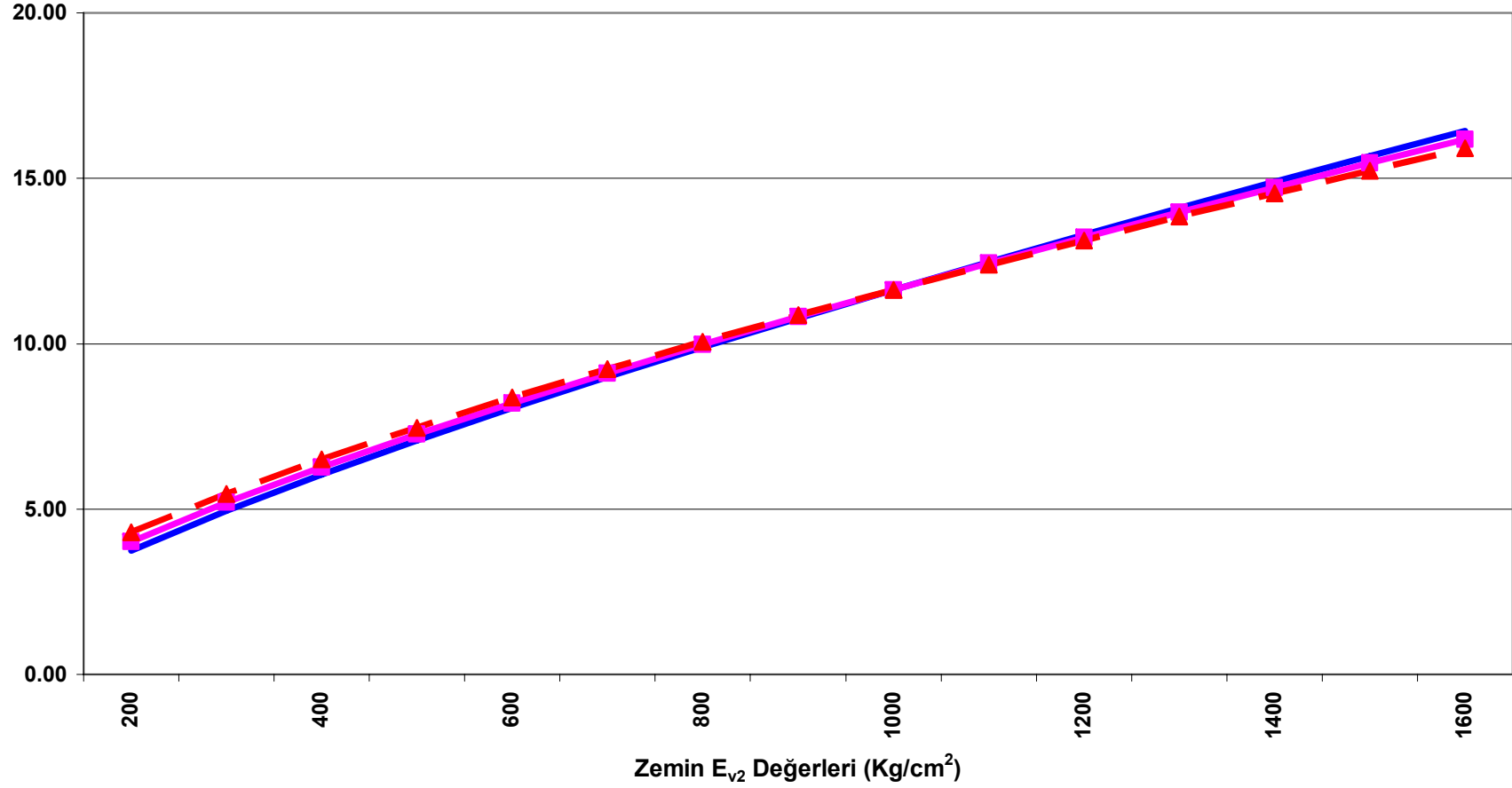
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



Ek 44 Yatak Katsayısının Değişimi-IV

B.D:Orta - S49 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

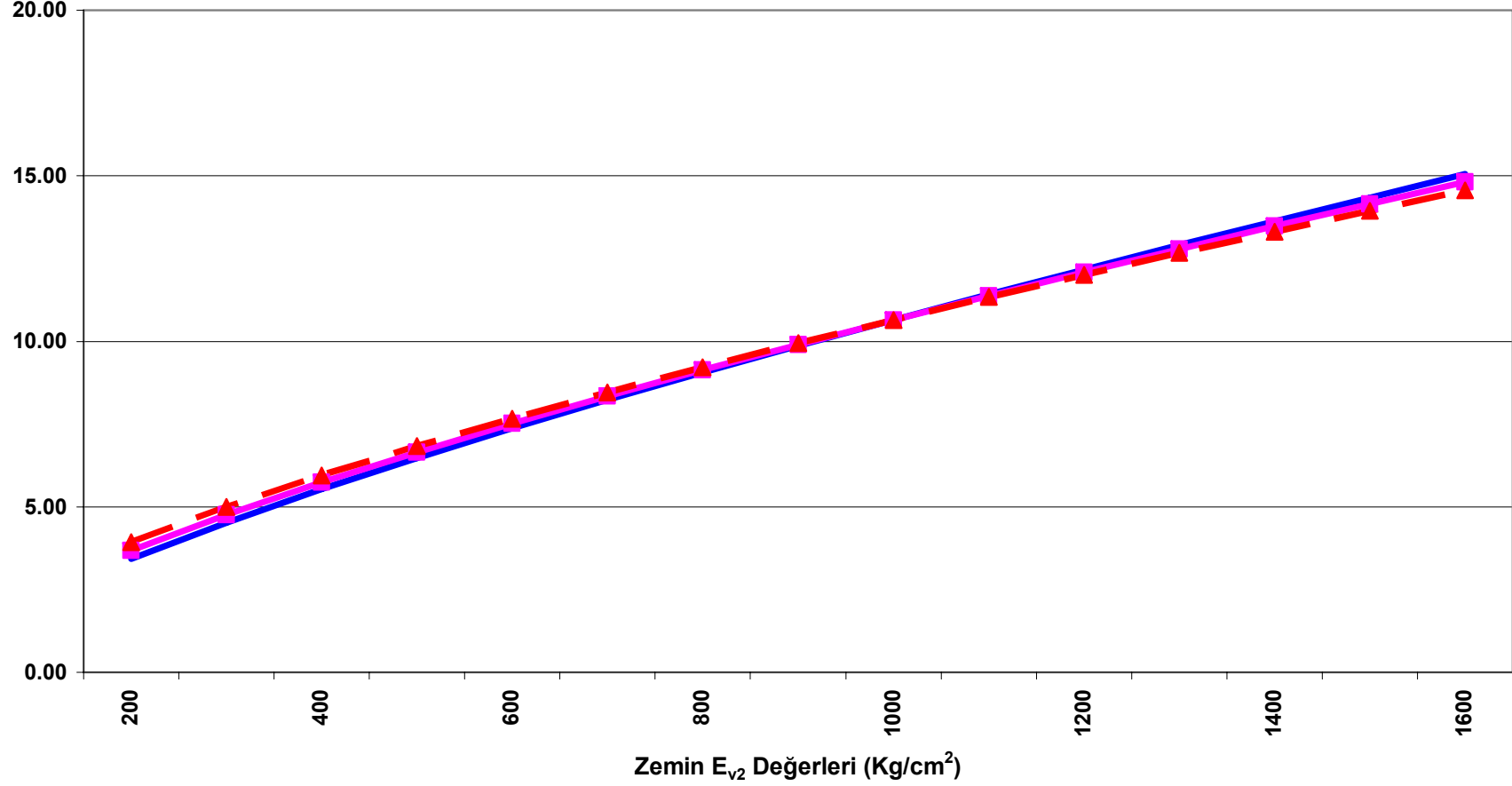
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



Ek 45 Yatak Katsayısının Değişimi-V

B.D:Orta - S49 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

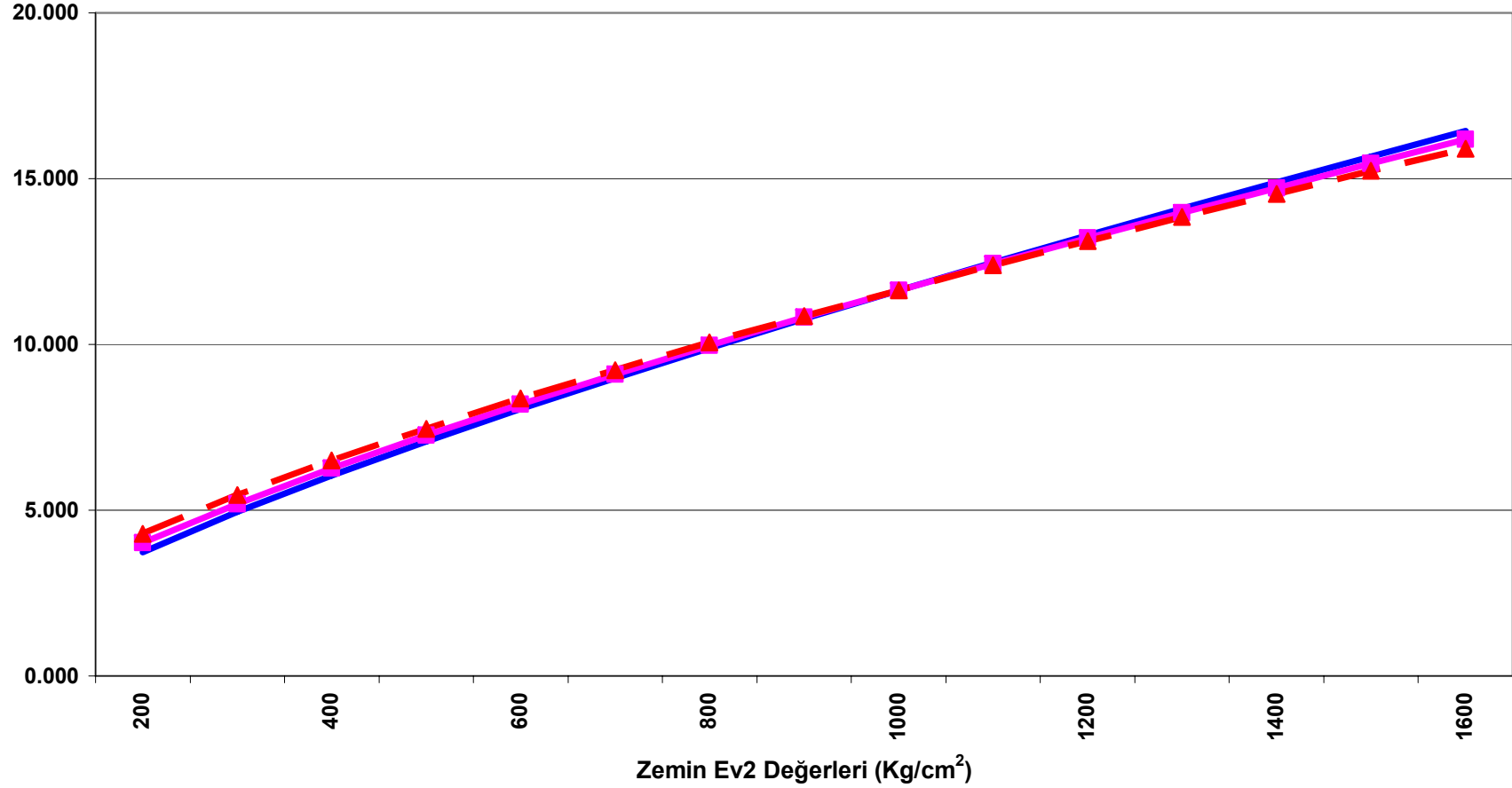
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



Ek 46 Yatak Katsayısının Değişimi-VI

B.D:Orta - UIC60 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

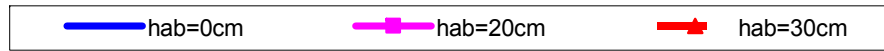
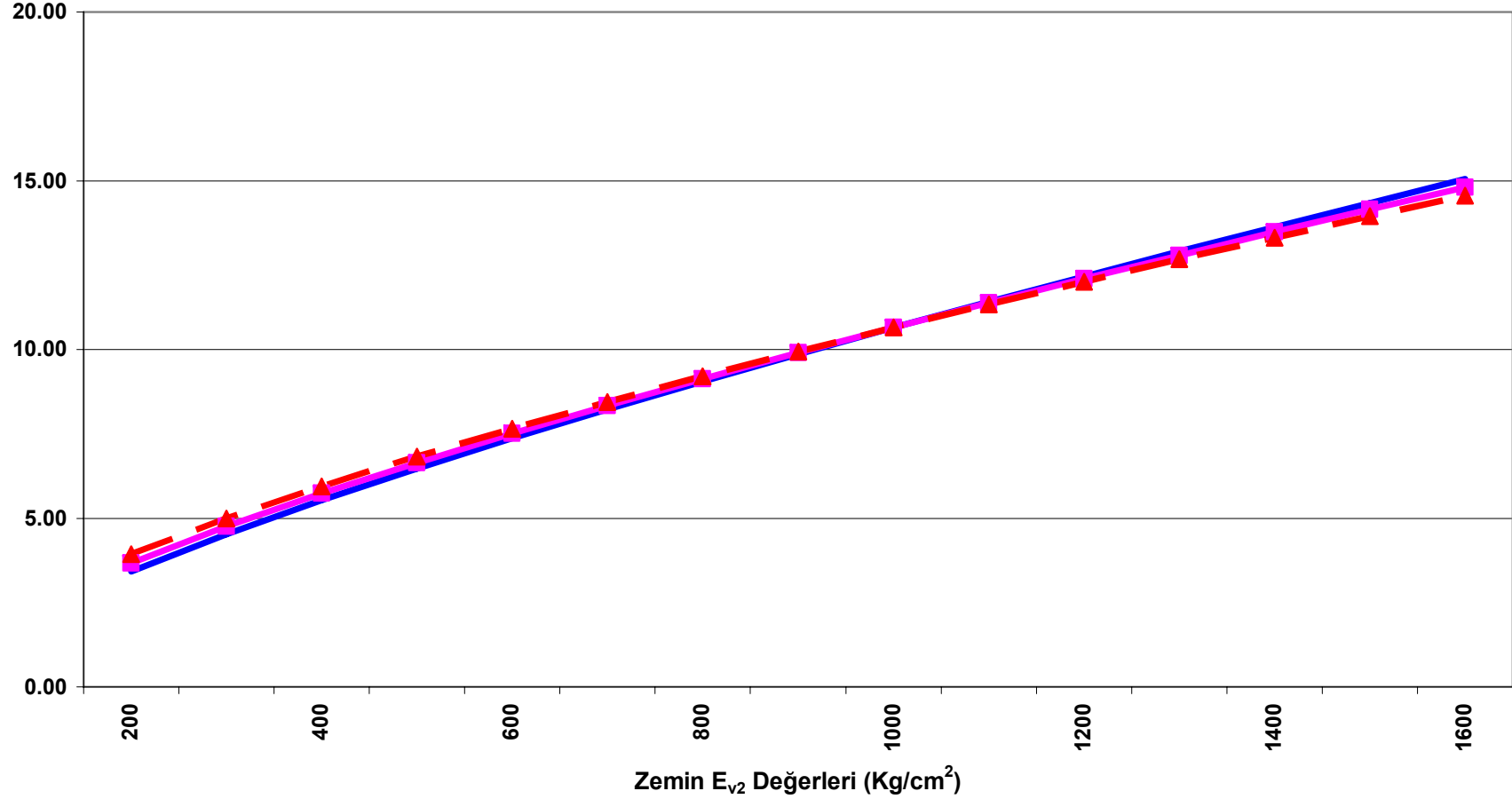
Yatak Katsayısı (Kg/cm^3)



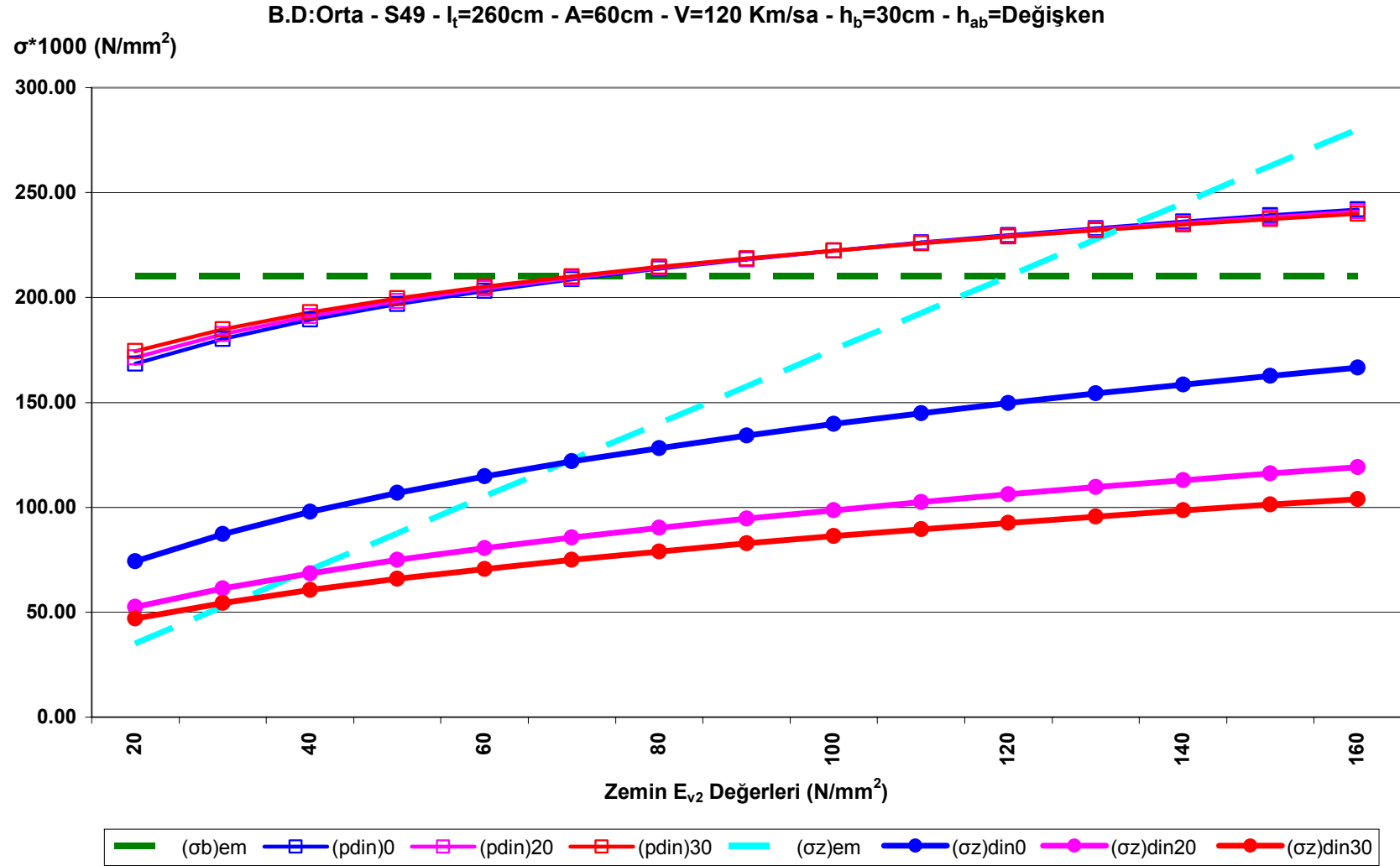
Ek 47 Yatak Katsayısının Değişimi-VII

B.D:Orta - UIC60 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

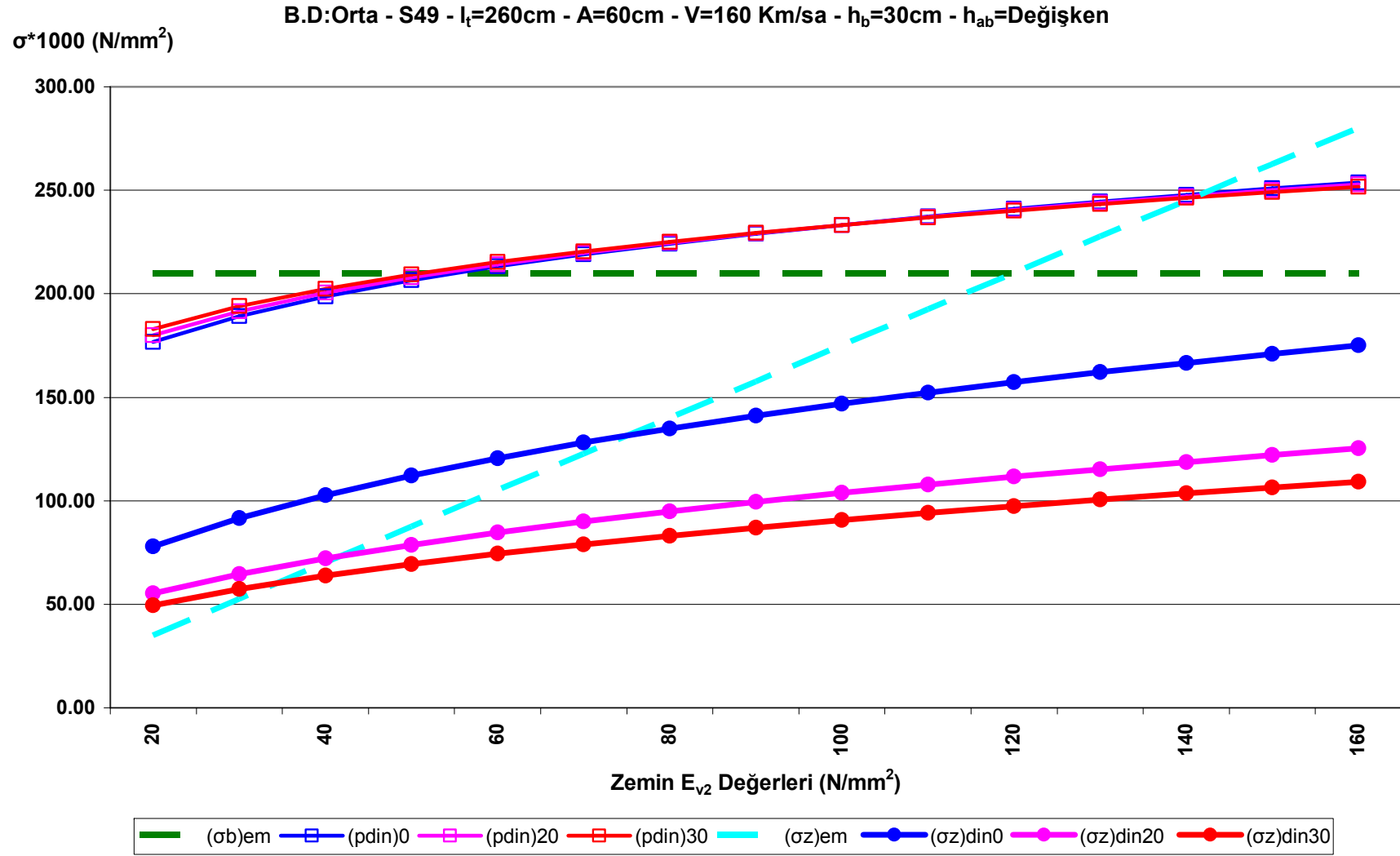
Yatak Kaysayı (Kg/cm^3)



Ek 48 Yatak Kaysayısının Değişimi-VIII

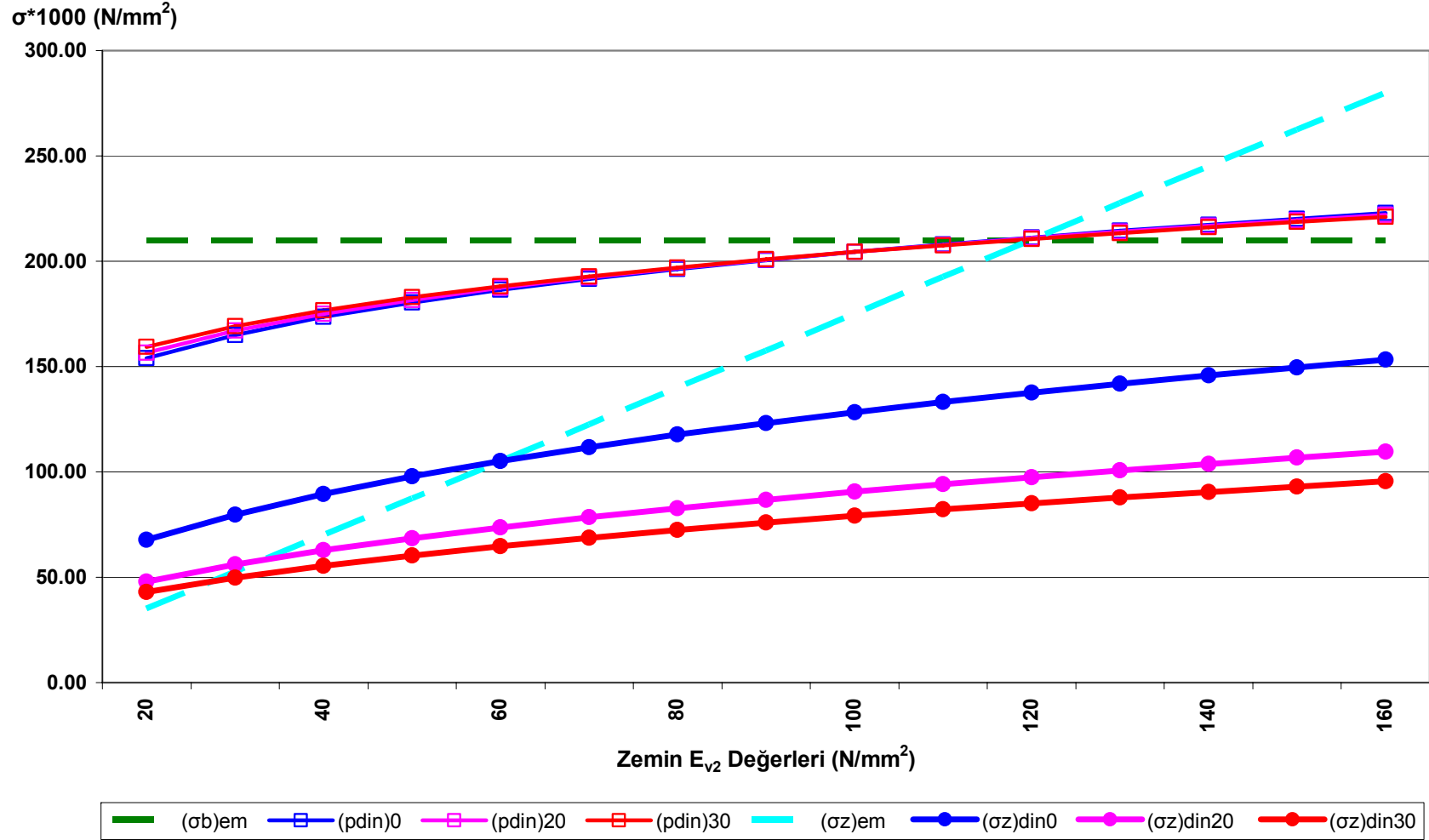


Ek 49 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-I



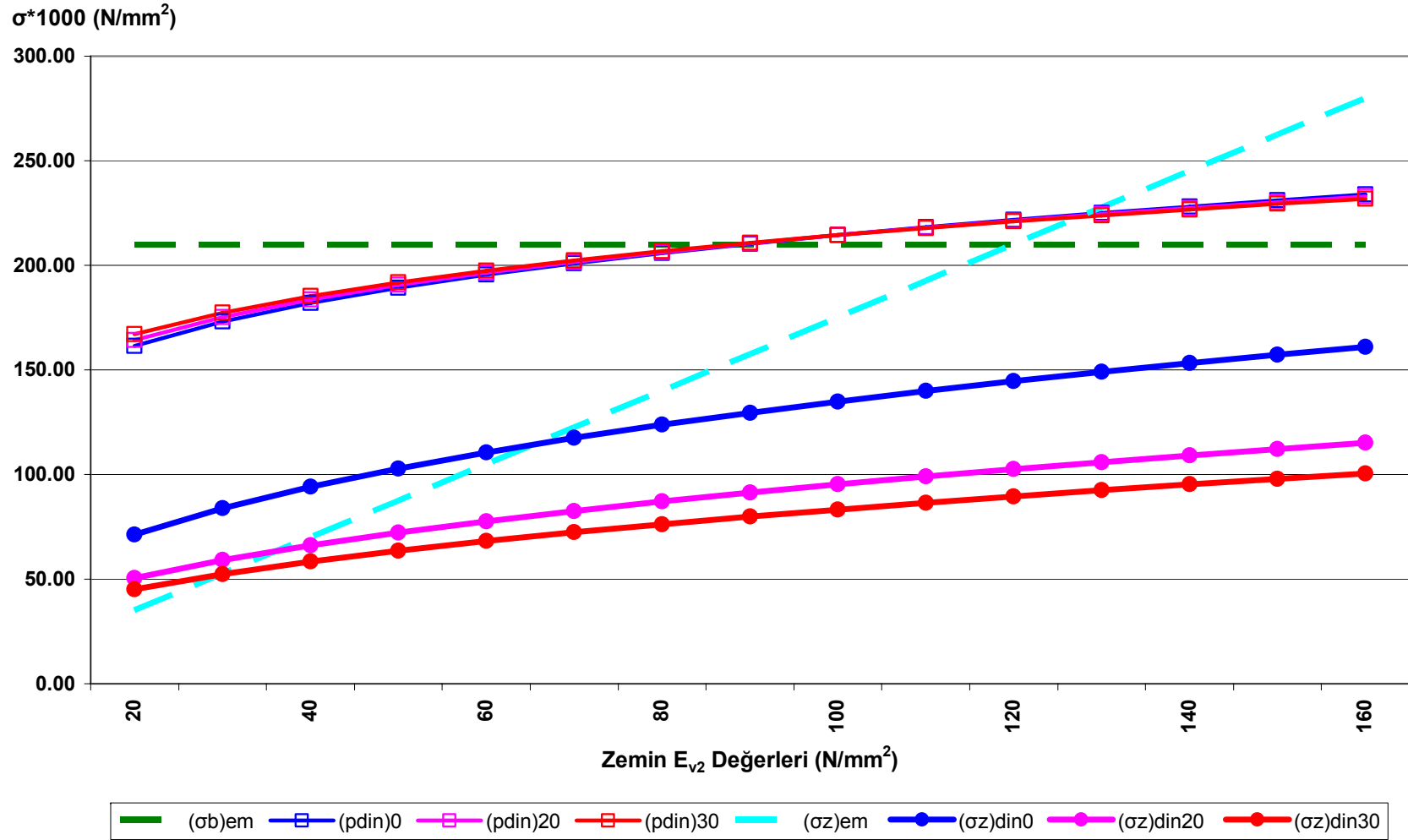
Ek 50 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-II

B.D:Orta - S49 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$



Ek 51 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-III

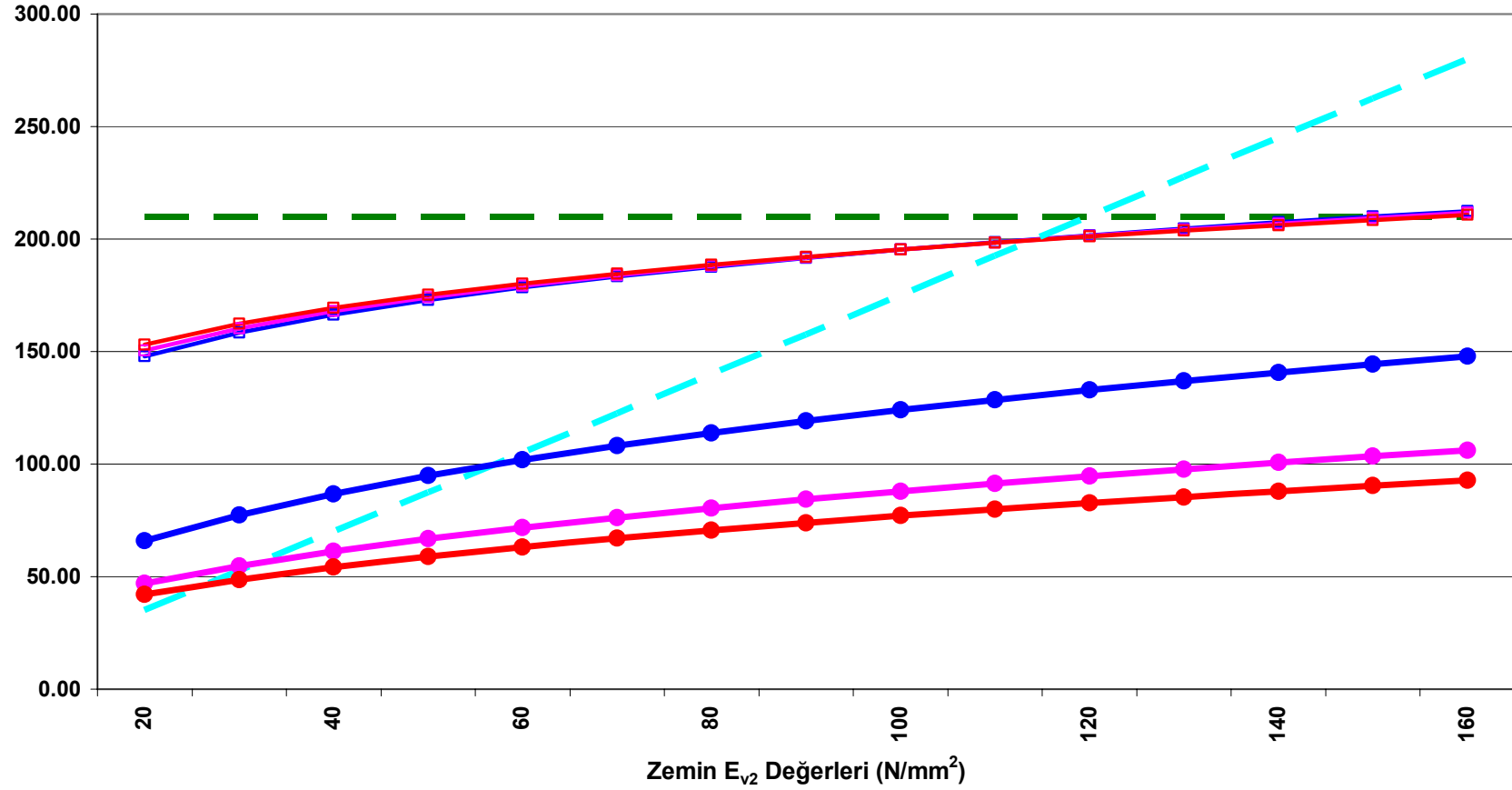
B.D:Orta - S49 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$



Ek 52 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-IV

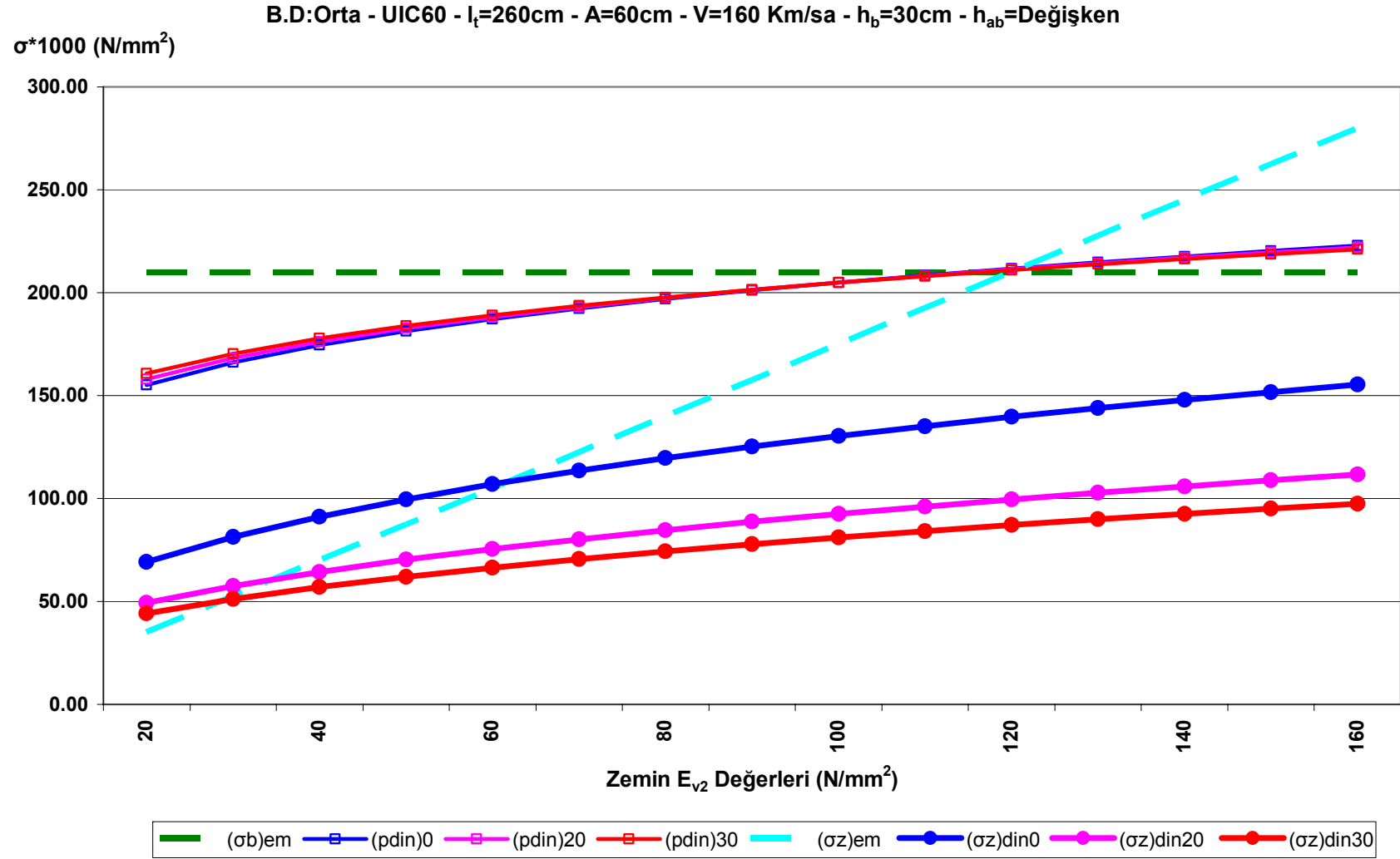
B.D:Orta - UIC60 - $l_t=260\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

$\sigma \cdot 1000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



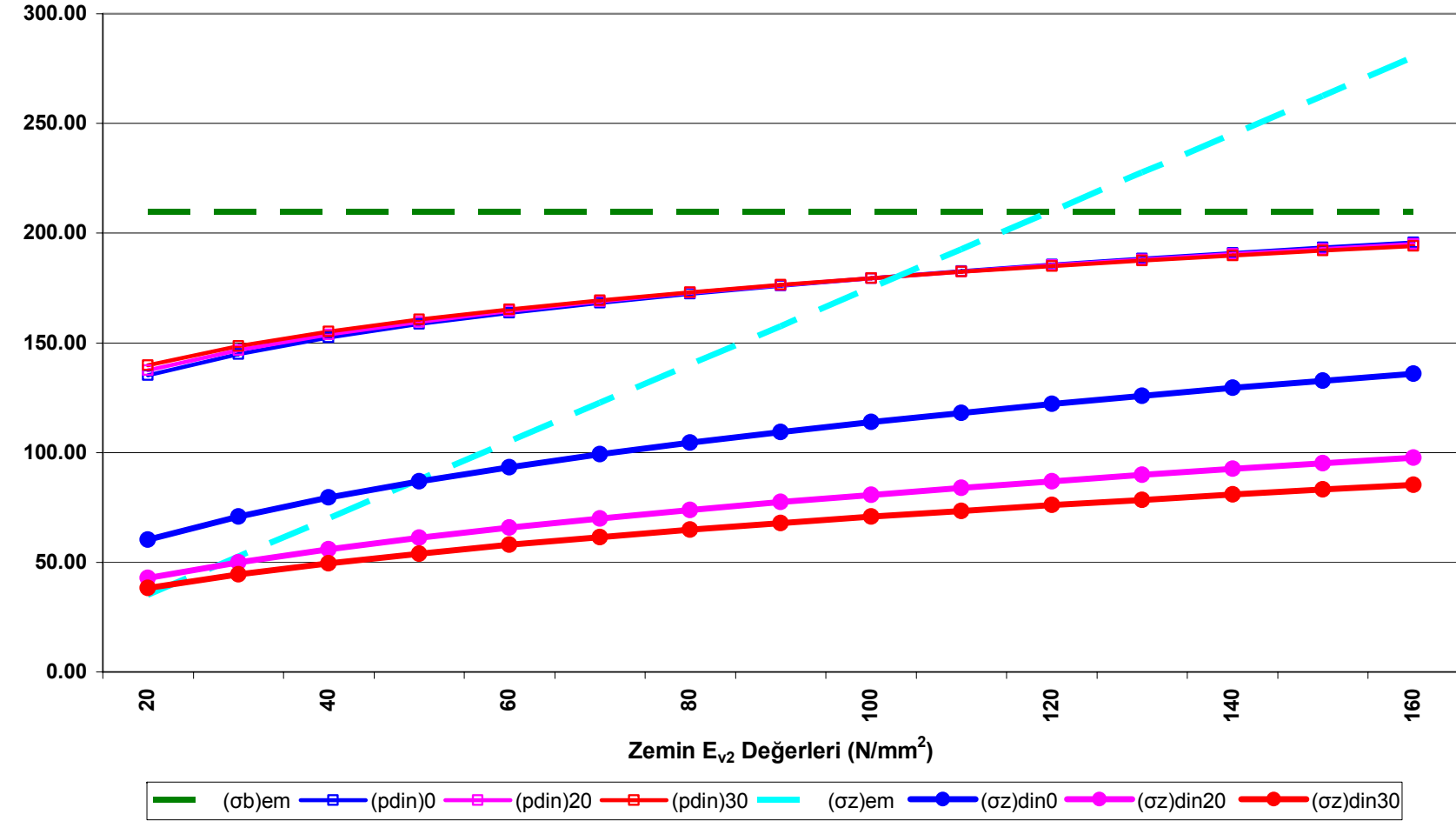
(σ_b)em (pdin)0 (pdin)20 (pdin)30 (σ_z)em (σ_z)din0 (σ_z)din20 (σ_z)din30

Ek 53 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-V



B.D:Orta - UIC60 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=120\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

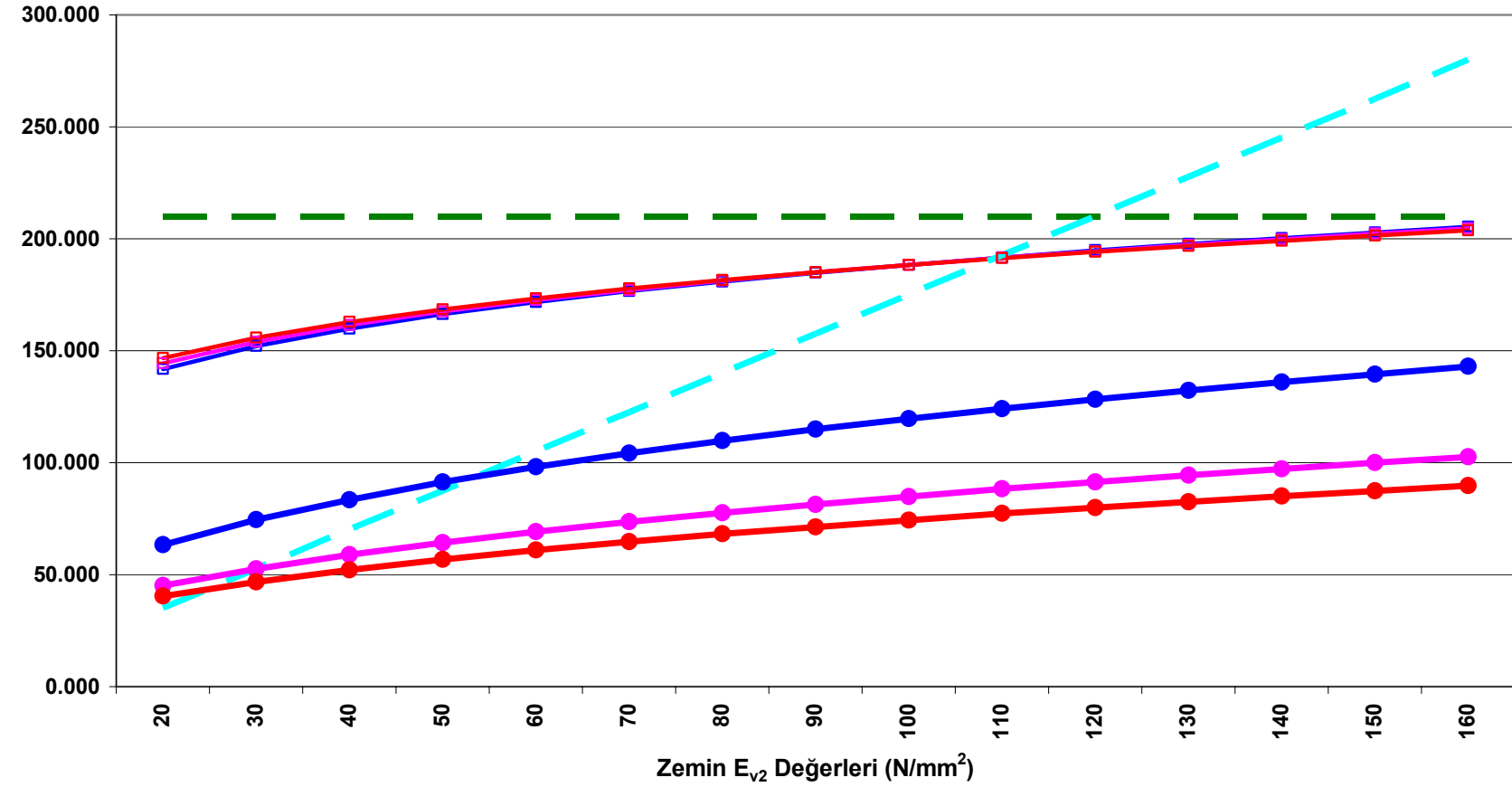
$\sigma \cdot 1000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



Ek 55 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-VII

B.D:Orta - UIC60 - $l_t=280\text{cm}$ - $A=60\text{cm}$ - $V=160\text{ Km/sa}$ - $h_b=30\text{cm}$ - $h_{ab}=\text{Değişken}$

$\sigma \cdot 1000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



(σ_b)em (pdin)0 (pdin)20 (pdin)30 (σ_z)em (σ_z)din0 (σ_z)din20 (σ_z)din30

Ek 56 Tekerlek Yükünün Alt Balast Tabakası Kalınlığı ile Değişimi-VIII

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.03.1980	
Doğum yeri	Diyarbakır	
Lise	1991-1998	Gazi Anadolu Lisesi / ANKARA
Lisans	1999-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
	2004-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2004-2005	MNL İnşaat Proje Ltd Şti
2007-Devam ediyor	ProYapı İnşaat Proje Ltd Şti.