

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARI İÇİN GEOMETRİK
ÖZELLİKLER VE ALTYAPI**

İnş. Müh. Orçun Ekim

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında

Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın EREL

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. DEMİRYOLUNA AİT BİLGİLER.....	2
2.1 Demiryolunun Doğuşu	2
2.2 Demiryolu Altyapısı	3
2.2.1 Oturma Durumunun İncelenmesi	7
2.2.1.1 Dolgu ve Yarmada Oturma Durumu	9
2.2.2 Altyapı Zemininin Taşıma Kapasitesine Göre Sınıflandırılması	9
2.2.3 Zeminlerin Donmaya Duyarlılıkları	11
2.2.4 Yol Yatağı Tabakalarında İstenilen Taşıma Kapasitesini Verecek Kompozisyonun ve Kalınlıkların Belirlenmesi.....	13
2.2.5 Altyapının Drenajı	15
2.2.6 Altyapının İyileştirilmesi için Özel Yapım Yöntemleri ve Malzemeler	16
2.2.6.1 Bağlayıcı Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirilmesi	17
2.2.6.2 Asfalt Beton	19
2.2.6.3 Zeminin Taşıma Kapasitesinin Arttırılması için Kullanılabilecek Geosentetikler	20
2.3 Demiryolu Üstyapısı.....	21
2.3.1 Balastlı Üstyapı.....	23
2.3.2 Rijit Üstyapı.....	24
2.4 Demiryollarının Geometrik Karakteristikleri	32
2.4.1 Yatay Geometri.....	33
2.4.1.1 Hat Genişliği	33
2.4.1.2 Yatay Kurp	34
2.4.1.3 Dever, Birleştirme Eğrisi ve Dever Rampası	35
2.4.2 Düşey Geometri	37
2.4.2.1 Eğim.....	37
2.4.2.2 Düşey Kurp.....	38
2.4.3 Geometrik Kalite	40
2.5 Demiryolunda Yol-Taşıt İlişkisi	41
2.5.1 Kurbada Taşıta Etkiyen Kuvvetler	42
2.5.2 Teorik Dever ve Teorik Hız.....	43
2.5.3 Eksik ve Fazla Dever	44

2.5.4	Limit Hız.....	45
2.5.5	Deverin Zamana Göre Değişimi (Deverin Eğimi).....	46
2.5.6	Eksik Deverin Zamana Göre Değişimi.....	46
3.	YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLUNUN İNCELENMESİ	47
3.1	Japonya ve Asya’da Yüksek Hızlı Demiryolları	48
3.2	Avrupa’da Yüksek Hızlı Demiryolları	51
3.3	Amerika’da Yüksek Hızlı Demiryolları	55
3.4	Yüksek Hızlı Demiryollarının Diğer Ulaştırma Türleri ile Karşılaştırılması.....	55
3.5	Yüksek Hızlı Demiryolları için Geometrik Standartlar.....	60
3.5.1	Hat Genişliği.....	61
3.5.2	Geometrik Kalite	61
3.5.3	Yüksek Hızlı Demiryolları için TSI ve CEN Standartları	62
3.5.3.1	Dever, Eksik Dever ve Fazla Dever	64
3.5.3.2	Yatay Kurp Yarıçapı.....	68
3.5.3.3	Birleştirme Eğrisi ve Dever Rampası	68
3.5.3.4	Eğim.....	70
3.5.3.5	Düşey Kurp Yarıçapı	70
3.6	Farklı Projelerin ve Standartların Karşılaştırılması	71
3.7	Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapı.....	74
3.7.1	Hat Merkezleri Arasındaki Mesafe.....	81
3.7.2	Tüneller.....	83
3.7.3	Gabariler	85
3.7.4	Köprüler.....	89
3.7.5	Geçiş Yerlerinin Tasarımı	91
3.7.5.1	Toprak İşleri-Köprü Geçişi.....	92
3.7.5.2	Toprak İşleri-Tünel Geçişi.....	97
3.7.5.3	Balastsız Yol–Balastlı Yol Geçişi ve Farklı Türlerde Balastsız Üstyapılar Arası Geçiş	98
3.7.5.4	Toprak İşleri-Menfez Geçişi.....	100
3.7.6	Çimento, Uçucu Kül ve Çakıl Karışımı Kolonlar ile Zeminin İyileştirilmesi.....	100
3.7.7	Kazık Temel Üzerinde Balastsız Yol Uygulaması	100
4.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	105
	ÖZGEÇMİŞ	107

SİMGE LİSTESİ

Δ_{σ}^0	Standart sapma (yatay yönde)
$\Delta_{\max}^0$	Mutlak maksimum değer (yatay yönde ortalamadan sapma)
Δy_{σ}^0	Standart sapma (düşey yönde)
$\Delta y_{\max}^0$	Mutlak maksimum değer (düşey yönde ortalamadan sapma)
φ	Yanal kuvvet açısı
φ_t	Dever Açısı
$2b_0$	Hat genişliği
A	Eğimlerin cebirsel farkı
a,b	Düşey kurptaki eğimler
a_y	Düşey ivme
a_z	Yatay ivme
D	Güvenlik mesafesi
E	Hat merkezleri arasındaki mesafenin yarısı
g	Yer çekimi ivmesi
hd	Eksik dever
h_e	Fazla dever
h_{eq}	Teorik dever
h_t	Dever
i	Deverin değişimi
k	Eğrilik
L	Tanjant noktaları arasında kalan kurBun uzunluğu
L_t	Birleştirme eğrsinin uzunluğu
P	Yürüme yolu
R	Yarıçap
Rv	Düşey kurp yarıçapı
T	Temel tabakasının genişliğinin yarısı
ta	a noktasındaki teğet noktası
tb	b noktasındaki teğet noktası
V	Taşı hızı

KISALTMA LİSTESİ

ATD	Asfalt taşıma tabakası üzerine direkt döşeme.
ATD-G	ATD sistemin kentsel ulaşım için geliştirilmiş şekli.
CEN	European Committee for Standardisation: Avrupa standartları komitesi
DB	Deutsche Bahn: Almanya Demiryolları
ERC	Embedded Rail Construction : Gömülü raylı yol yapısı.
EARI	European Association For Railway Interoperability: Avrupa demiryolları birliği
FS	Ferrovie dello Stato: İtalya Demiryolları
GETRAC	German Track Corporation
JR	Japan Railways: Japonya Demiryolları
LRT	Light Rail Transit : Hafif raylı toplu taşıma sistemi.
LVT	Low Vibration Track : Düşük vibrasyonlu yol.
MAV	Macaristan Demiryolları
SBB/CFF	Swiss Federal Railways: İsviçre Demiryolları
SNCB	Société Nationale des Chemins de fer Belges: Belçika Demiryolları
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français: Fransa Demiryolları
TGV	Train Grand Vitesse, Fransa’da yüksek hızlı trenlere verilen isim
TSI	Technical Specification for Interoperability: Ülkelerarası işletim için kriterler
UIC	International Union of Railways: Uluslararası demiryolları birliği
YHD	Yüksek Hızlı Demiryolu
YHT	Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 17. yüzyılda tahta raylar üzerinde kömür taşımacılığı	2
Şekil 2.2 Yol yatağı tabakaları (YYT) (Erel, 2006)	5
Şekil 2.3 Yol Yatağı İçin Minimum Kalınlıklar (Erel, 2006)	14
Şekil 2.4 Çimento Katkılı Kireçtaşı Tabakası İçin Kırma Kireçtaşı Dane Dağılımı Zarfı.....	18
Şekil 2.5 Asfalt Konglomeraya İlişkin Dane Dağılımı Zarfı.....	19
Şekil 2.6 19 yy. Başlarında kullanılan üstyapı şekilleri (Yılmaz, 2004).	22
Şekil 2.7 Balastlı üstyapı.	24
Şekil 2.8 Rheda 2000 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Yalçın, 2006).	26
Şekil 2.9 PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	27
Şekil 2.10 LVT, TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	27
Şekil 2.11 ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	27
Şekil 2.13 GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	27
Şekil 2.12 Rasengleis monolitik rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	28
Şekil 2.14 Shinkansen prefabrik üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).	28
Şekil 2.15 Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı (tek ray) kesiti (Erel, 2002).	29
Şekil 2.16 Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).	30
Şekil 2.17 Gömülü ray yapısı (Erel,2002).	31
Şekil 2.18 Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi (Erel,2002).	31
Şekil 2.19 Hat genişliğinin bileşenleri.....	33
Şekil 2.20 Yatay kurbanın bileşenleri	34
Şekil 2.21 Dever ve dever açısı	36
Şekil 2.22 İki ardışık eğim arasında oluşan düşey geometrik durum.....	39
Şekil 2.23 Yanal ivme ve yanal kuvvet açısının bileşenleri	42
Şekil 3.1 Japonya'daki yüksek hızlı demiryolu ağı.....	49
Şekil 3.2 Japonya'da 1964 yılından bugüne YHD'nda yolcu trafiğinin gelişimi(milyon-yolcu)50	
Şekil 3.3 Shinkansen demiryoluna ait bir resim	50
Şekil 3.4 TGV demiryoluna ait bir resim	51
Şekil 3.5 Avrupa ve Japonya'da YHD için yolcu trafiğinin değişimi (UIC, 2005)	52
Şekil 3.6 Avrupa'da 2010 yılında oluşacak yüksek hızlı demiryolu ağı.....	53
Şekil 3.7 Güneydoğu Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağı	54
Şekil 3.8 Uzun vadede ortalama maliyetin bileşenleri	58

Şekil 3.9 Balastlı sistem için YHD ve konvansiyonel demiryoluna ait bileşenler	76
Şekil 3.10 Balastlı yüksek hızlı demiryollarına ait tipik enkesitler	77
Şekil 3.11 Yüksek hızlı demiryollarında toplam oturmayı oluşturan oturmalar	78
Şekil 3.12 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996).....	86
Şekil 3.13 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996).....	87
Şekil 3.14 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996).....	87
Şekil 3.15 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996).....	88
Şekil 3.16 Geçiş noktası (Slab Track, 2006)	91
Şekil 3.17 Toprak işleri - köprü geçişi (Esveld).....	93
Şekil 3.18 Toprak işleri - köprü geçişi (RTR, 2006).....	93
Şekil 3.19 Almanya (DB)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006).....	94
Şekil 3.20 İtalya (FS)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006).....	95
Şekil 3.21 Macaristan (MAV)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006).....	95
Şekil 3.22 İsviçre (SBB/CFF)'de kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (normal yapı) (Erel, 2006).....	96
Şekil 3.23 İsviçre (SBB/CFF)'de kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (mevcut hatların varyantı için) (Erel, 2006).....	96
Şekil 3.24 Fransa (SNCF)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (köprü dolgudan önce yapılmış) (Erel, 2006)	97
Şekil 3.25 Toprak işleri –tünel geçiş noktası (RTR, 2006)	98
Şekil 3.26 Balastlı yol- balastsız yol geçişi (RTR, 2006)	99
Şekil 3.27 Kazıklar üstünde balastsız yol enkesiti (RTR, 2006).....	101

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Altyapı işleri ve altyapı türleri (Erel, 2006)	4
Çizelge 2.2 Zemin kalite sınıfları (Erel, 2006)	10
Çizelge 2.3 Altyapı İçin Taşıma Kapasitesi Sınıfları	11
Çizelge 2.4 Zeminlerin dona duyarlılıkları (Erel, 2006)	12
Çizelge 2.5 Zeminlerin dona duyarlılıkları için Casagrande Kriterleri (Erel, 2006).....	12
Çizelge 2.6 Bağlayıcı katkı malzemeleriyle zemin iyileştirilmesi (Erel, 2006).....	17
Çizelge 2.7 Kireçtaşı ve çimento karışımıyla oluşturulan veya asfalt konglomera tabakalar (Erel, 2006)	18
Çizelge 2.8 Asfalt Betonun SBB/CFF tarafından belirlenen özellikleri (Erel, 2006)	19
Çizelge 2.9 Yol Tipleri ve Bileşenlerine Genel Bir Bakış (Yalçın, 2006).	23
Çizelge 2.10 Yapı tipi ve döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002).	26
Çizelge 2.11 Demiryolu geometrik kalite limitleri (Erel, 2006)	41
Çizelge 3.1 Başlıca ulaşım türlerinin maliyet bileşenleri (Levinson, D., Gillen, D., Kanafani, A., Mathie, J., 1996)	57
Çizelge 3.2 Uzun vadede ortalama maliyetin bileşenleri (Amerika, Kaliforniya Eyaleti için) (Levinson, 1993)	57
Çizelge 3.3 Dünyadaki YHD yatırımlarının büyüklüğü.....	58
Çizelge 3.4 YHD projelerinin toplam maliyeti	59
Çizelge 3.5 TGV hatlarının maliyetleri	59
Çizelge 3.6 New York-Montreal hattının maliyeti (Parsons-Clough, 2003).....	60
Çizelge 3.7 YHD ve karayolu karşılaştırmalı arazi kullanımı.....	60
Çizelge 3.8 YHD için geometrik kalite limitleri (Erel, 2006)	61
Çizelge 3.9 300 km/sa hız için düşey ve yatay yönde hedef ve limit sapmalar (Esveld, 2001).....	62
Çizelge 3.10 Deverin limit değerleri (Lindahl, 2001)	64
Çizelge 3.11 Özellikle Yüksek Hız için yapılmış demiryollarında izin verilen eksik dever değerleri (TSI, 2002).....	64
Çizelge 3.12 Yüksek hız için iyileştirilmiş hatlarda ve bağlantı hatlarında izin verilen eksik dever değerleri (TSI, 2002).....	65
Çizelge 3.13 Çok zorlu topoğrafik kısıtlara sahip YHD için eksik dever değerleri (TSI, 2002).....	65
Çizelge 3.14 CEN standartlarına göre eksik deverin limit değerleri (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001)	66
Çizelge 3.15 130 mm eksik dever için 250 km/sa ve 300 km/sa hızlarında farklı dever değerlerinde yatay kurp yarıçapı için örnek değerler (yatar gövdesiz	

konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001)	66
Çizelge 3.16 Yanal ivme, yanal kuvvet açısı ve eksik dever arasındaki ilişkiler (Lindahl, 2001)	67
Çizelge 3.17 Optimum dever ve optimum yatay kurp yarıçapı için örnekler (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001)	68
Çizelge 3.18 Deverin zamana ve mesafeye bağlı değişimi için limit değerler.....	69
Çizelge 3.19 Eksik deverin zamana bağlı değişiminin limit değerleri. Değerler tüm birleştirme eğrisi formları için uygulanabilir (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001).....	69
Çizelge 3.20 Düşey ivmenin limit değerleri $a_{v,lim}$ (Lindahl, 2001)	70
Çizelge 3.21 Düşey kurp yarıçapının limit değerleri (Lindahl, 2001)	71
Çizelge 3.22 Yüksek hızlı demiryollarının geometrik büyüklüklerinin karşılaştırılması (Lindahl, 2001)	71
Çizelge 3.23 Farklı demiryolları için parametreler ve yol geometrisi (UIC, 2001)	72
Çizelge 3.24 Hızın yolun geometrik parametrelerinin seçimine etkileri (UIC, 2001)	73
Çizelge 3.25 Japonya ve Avrupa’da YHD’ler için üstyapı tipine göre tünel ve köprü oranları.....	75
Çizelge 3.26 Yüksek hızlı demiryollarının tipik enkesiti (UIC, 2001)	81
Çizelge 3.27 Yüksek hızlı demiryollarının enkesitlerinin karşılaştırılması (UIC, 2001).....	82
Çizelge 3.28 Özellikle yüksek hız için yapılmış hatlarda hat merkezleri arasındaki mesafe (TSI, 2002).....	82
Çizelge 3.29 İyileştirilmiş yollarda ve bağlantı yollarında hat merkezleri arasındaki mesafe (TSI, 2002).....	82
Çizelge 3.30 Yüksek hızlı demiryollarında farklı ülkelerde hat eksenleri arasındaki mesafeler için tasarım kriterleri (UIC, 2001).	83
Çizelge 3.31 Farklı ülkelerde tünel kesitleri için tasarım kriterleri (UIC, 2001).	83
Çizelge 3.32 Yürüme yolunun dış raya olan uzaklığı için tasarım kriterleri (UIC, 2001).....	88

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi, kaynak ve deneyimleri ile bana destek olan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Aydın Erel'e ve bu çalışmanın her aşamasında bana destek olan ve sabır gösteren sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Aralık, 2006

Orçun Ekim

ÖZET

Günümüzde gelişen teknoloji ile demiryollarında 360 km/sa hıza ulaşmak mümkündür. Konvansiyonel demiryolundan farklı geometrik standartlara sahip yüksek hızlı demiryollarının altyapı ve üstyapı özellikleri de farklı olmaktadır. Yüksek hızlı demiryollarının (YHD) geometrik özellikleri, altyapısı ve üstyapısı bu hıza ulaşmayı mümkün kılmaktadır.

Demiryollarında yüksek hıza ulaşmak için gerekli olan geometrik özellikler, altyapı, farklı ülkelerdeki uygulamalar ve standartlarının araştırıldığı bu çalışma, yerli ve yabancı kaynaklardan derlenmiştir. Tezin içeriğinde, konvansiyonel demiryolunun doğuşu, üstyapısı ve altyapısı ayrı bir bölümde verilerek mevcut tanımlar ve ifadelerin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Yüksek hızlı demiryollarına ait bilgiler ise ayrı bir bölümde verilerek gerektiğinde konvansiyonel demiryolu bölümüne atıfta bulunulmuştur. İncelenen makalelerden; YHD için bakım maliyetinin ve bakım süresinin az olmasının amaçlandığı, geçiş bölgelerinde rijitliğin sürekliliğinin sağlanmasının şart olduğu ve ülkelerarası işletim için kriterler’de (TSI) verilmiş büyüklüklerin değerlerini sağlayacak şekilde yolun inşaa edilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu altyapısı, demiryolu üstyapısı, yüksek hızlı demiryolu, yol geometrisi, Ülkelerarası işletim için kriterler.

ABSTRACT

Today it is now possible to operate trains with 360 km/h on railways. High speed railways geometric specifications, infrastructure and superstructure are different from conventional railways. These geometric specifications, infrastructure and superstructure are required to achieve these speeds.

This work is compiled with Turkish and English sources. The content of the work is divided into conventional railway and high speed railway. The geometric specifications, infrastructure and superstructure of conventional railways are given in the second section. So that it helps to understand much better the general information of railways. The information regarding to high speed railway is given in another section and it is referred to conventional railways when needed. As a result, maintenance period and maintenance cost of high speed lines should be profitable, transition areas should be taken into consideration and the construction should at least match with the TSI specifications.

Keywords: Railway infrastructure, railway superstructure, high speed railway, track geometry, Technical Specification for Interoperability.

1. GİRİŞ

Demiryollarında ilerleyen teknoloji ile birlikte 360 km/sa hıza ulaşmak mümkün olmuştur. Konvansiyonel demiryolundan farklı olarak bu derece yüksek hıza ulaşan demiryollarına “High Speed Railway” – “Yüksek Hızlı Demiryolu (YHD)” adı verilmektedir. YHD’nda, konvansiyonel demiryoluna göre kullanılan taşıtlar, güç temini sistemleri, sinyalizasyon sistemi, üstyapıya ait bağlantı elemanları ve altyapı farklılık göstermektedir. Bunlara ilave olarak, YHD’nda istenilen hıza ulaşılabilmesi ve güvenli bir şekilde işletilebilmesi için yol geometrisinin belirli standartlar içinde yapılması şart olmaktadır. Aksi takdirde bu kadar yüksek hıza ulaşmak mümkün olamamaktadır.

Yüksek hızlı demiryolu konusunun iyi anlaşılabilmesi için konvansiyonel demiryolu konusu 2. bölümde, demiryolunun doğuşu, demiryolu üstyapısı, demiryolu altyapısı, demiryollarının geometrik karakteristikleri ve demiryollarında yol-taşıt ilişkisi başlıkları altında anlatılmıştır. Demiryolu konusundan sonra YHD konusuna giriş yapılmış ve YHD’nun tarifi, tarihçesi ve dünyadaki uygulamaları hakkında bilgi verilmiştir. Devam eden bölümlerde YHD’a ait geometrik karakteristikler anlatılmış, farklı ülkelerde geometrik karakteristiklerin büyüklükleri verilmiştir. YHD’nda konvansiyonel demiryolundan farklı olarak altyapıda dikkat edilmesi gereken noktalar ayrıca açıklanmıştır. Yüksek hız altında altyapıda meydana gelen rijitliğin değişimini kompanse etmek için geçiş yerlerinde sağlanması gereken koşullar tarif edilmiştir. Sonuçlar kısmında çalışma sonucunda elde bilgiler ışığında çeşitli önerilerde bulunulmuş ve gelecekte yapılacak çalışmalarda dikkat edilmesi muhtemel noktalara değinilmiştir.

Çeşitli ülkelerde kilometrelerce YHD inşaatı devam etmektedir. Bununla birlikte ülkemizde sadece Ankara-İstanbul arasında yapılan YHD inşaatı halen devam etmektedir. Gelişmiş ülkelerde mevcut olan, ülkemizin de dahil olduğu bir çok ülkede inşaatları devam eden “Yüksek Hızlı Demiryolları” hakkında Türkçe dilinde yeterli sayıda kaynak olmaması, konu ile ilgili çalışma yapmak isteyenlerin önüne bir engel olarak çıkacaktır. Bu tezin amaçlarından biri de bu sıkıntıyı azaltmaktır. Yüksek Hızlı Demiryolları hakkında akademik çalışma yapmak isteyen kişiler veya inşaatını yapacak olan özel şirketler veya kamu kuruluşlarının çalışanları konu ile ilgili olarak bu çalışmadan fayda sağlayabilirler.

Bu çalışma hazırlanırken, dilimizde konu ile ilgili kaynak olmamasından dolayı İngilizce kaynaklardan yararlanılmıştır. Ülkemizde yapılan bu çalışma için bilgilerin derlenmesi yöntemi seçilmiştir. Deneysel çalışmaya konu itibari ile imkan doğmamıştır.

2. DEMİRYOLUNA AİT BİLGİLER

Bir yerden bir yere madeni bir yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen madeni tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin tümüne birden demiryolu denir(Evren, 1998).

Prof. Dr. Güngör Evren'in tanımından anlaşıldığı gibi demiryolu yalnızca ray, travers, balast gibi üstyapı ve drenler, yarma ve dolgu gibi altyapı elemanlarından ibaret olmayıp, iki nokta arasında yer alan istasyon, emniyet ve sinyalizasyon tesisleri ile birlikte raylar üstünde hareket eden araçların tümünün oluşturduğu bir bütündür.

2.1 Demiryolunun Doğuşu

Ulaşım alanında demirden yapılmış lamalar ilk olarak İngiltere'de 18. yüzyılda maden ocaklarında bir kriz nedeniyle kullanılmıştır.

1767 yılında Reynold isminde bir demir sanayicisinin arabaların üstünde hareket ettiği ahşap kalasları korumak için kapladığı demir tarihe ilk demiryolu olarak geçmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 17. yüzyılda tahta raylar üzerinde kömür taşımacılığı

Tarihe bakıldığında demiryolunun bugünkü durumuna ulaşmasını sağlayan önemli buluşlar ve kişiler aşağıdaki şekilde olmuştur;

- 1687 yılında Denis Rapin buharın elastiki gücünü buldu,
- Bundan yararlanan İskoçya'lı makina mühendisi James Watt buhar makinasını buldu,
- Buhar ile çalışan ilk demiryolu arabası 1803 yılında lokomotifin babası sayılan İngiliz Richard Trevithick tarafından yürütülmüştür,
- 1814 yılında İngiliz George Stephenson 2 silindirli bir lokomotif yapmıştır. Ancak 4-5 ton ağırlığındaki bu araç en fazla 4-5 beygir gücü üretebiliyor ve sürekli çalıştırılamıyordu,
- 1825 yılında Marc Seguin'in borulu kazanı icad etmesi ile George Stephenson aracını geliştirmiş, yatay borulu bir kazan koyarak pistonu doğrudan doğruya tekerleğe bağlamış ve baca sistemi kullanarak buharı dışarı vermeyi başarmıştır. Bu başarı kendisine Liverpool-Manchester şirketinin inşaa ettiği hat için yapılan yarışmasında ödül kazandırmakla kalmamış (6 Ekim 1829), modern demiryolu araçlarının temelini de oluşmasını sağlamıştır.

2.2 Demiryolu Altyapısı

Bir ulaşım yolunda üzerinde taşıtların hareket edeceği yuvarlanma yüzeyine destek olan platformun ve tesviye yüzeyinin altında kalan yapıya “altyapı” denir. Boykesitte arazinin yükseltisini gösteren siyah çizgiyi, yol platformunun yükseltisini gösteren kırmızı çizgi düzeyine getirmek ve bu konumda korumak için oluşturulan yapılara “altyapı”, bu işlemi gerçekleştirmek için yapılan işlere de “altyapı işleri” adı verilir. Çizelge 2.1’de demiryollarında altyapı işleri ve altyapı türleri gösterilmiştir. Yüksek hızlı demiryollarında “hat merkezleri arasındaki mesafe, tüneller, gabariler ve köprüler” yolun geometrisinin belirlenmesine ve maliyetine direkt etki ettiğinden bölüm 3.7’de ayrıca incelenmiştir.

Çizelge 2.1 Altyapı işleri ve altyapı türleri (Erel, 2006)

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, pere, 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 iyileştirilmesi	CFG yöntemi, bağlayıcı katkı malzemeleri, asfalt beton
Altyapı tesislerinin sürekli denetimi, bakımı, onarımı ve korunması.	

Görüldüğü gibi altyapı, özgün mühendislik yapıları (sanat yapıları), tesisleri ve işleri ile oluşturulmakta olup, ulaştırma yapısının hizmet ömrü boyunca sürekli olarak denetlenmesi, bakımının yapılması ve korunması gereken bir yapıdır.

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.

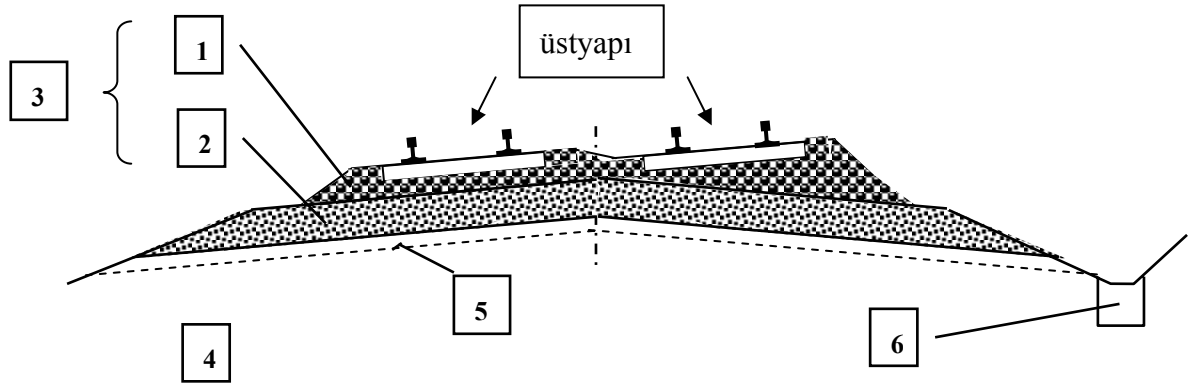
Kısaca altyapı, bir ulaştırma yapısının konumunu oluşturan ve yolu dış etkilere koruyan, ancak genelde yuvarlanma yüzeyinin altında kaldığı için gözden ırak olan bir yapıdır. Oysa bir yolun hizmet düzeyi ve kalitesi en az % 50 oranında altyapının kalitesine ve korunma

koşullarına bağlıdır.

Altyapı, toprak işlerinin üst kısmı olup, bunun üzerinde balast altı tabakaları yer alır. Altyapı, dolgularda dışarıdan getirilen zemin ile oluşturulmasına karşın, yarmalarda doğal zeminden oluşur. Altyapı tüm sistemin performansı için büyük öneme sahiptir.

Altyapıda meydana gelen en büyük problemler oturma ve kabarma olayıdır. Oturma ve kabarma olayları, altyapı türlerinin istenilen süre boyunca ihtiyaç duyulduğu şekilde görevlerini yerine getirmesini engellemektedir. Problemin daha iyi anlaşılabilmesi için oturma olayı bölüm 2.1.1’de ayrıca incelenmiştir.

Altyapı konusunun daha iyi anlaşılabilmesi için demiryollarında yolu oluşturan diğer altyapı elemanlarından söz etmek gerekmektedir. Şekil 2.2’de alt yapı elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yol yatağı tabakaları (YYT) (Erel, 2006)

- 1) Balast
- 2) Balast altı (Blanket) tabakası
- 3) Toprak işleri (Earthworks)
- 4) Altyapı (Subgrade)
- 5) Hazırlanmış altyapı (Prepared Subgrade)
- 6) Yan drenler

Yol yatağı tabakaları, özellikleri ve kalınlıkları ile, yolun rijitliği, yol geometrisinin ve drenaj sisteminin korunması açısından, yol performansı üzerinde önemli rol oynarlar. “Yol Yatağı Tabakaları (YYT) : track-bed layers” terimi, balastı ve balast altı tabakalarını kapsar.

YYT'nın tasarım kalınlıkları aşağıdaki faktörlere bağlı olarak değişmektedir:

- Altyapıyı oluşturan zeminlerin özgün karakteristikleri (doğal yapısı, taşıma kapasitesi, suya ve dona tepkisi, vb.),
- Bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik koşulları,
- Bölgenin iklim koşulları,
- Trafik (brüt-ton, dingil yükleri, hızlar),
- Yol kompozisyonu (ray kesiti, traverslerin tipi ve aralıkları, vb.)

Balast ve balast altı tabakası yol üstyapısının birer parçası olarak kabul edildiğinden bu çalışmada detaylı incelenmemiştir.

Balast

Balast, kırılmış taşlardan oluşturulan ve 20 ile 60 mm boyutları arasındaki danelerle özel granülometrede hazırlanan tabakadır. Balastın omuz genişliği yanal stabilite kontrolünde önemli rol oynadığından birçok demiryolunda yol yatağı genişliği minimum 14 metre olarak belirlenmiştir.

Balast altı tabakası

Balast tabakasının miktarı sistemin rijitliğini belirler. Balast ve balast altı tabakası yük altında kombine çalışmaktadır. Dolayısı ile balast altı tabakasının tasarımında, balast tabakasının kalınlığı dikkate alınmalıdır. Balast ve altyapı arasında oluşturulan bu tabakanın işlevleri şunlardır:

- Rijitliği ayarlanarak yolun taşıma kapasitesini arttırmak ve yukarıdan iletilen yüklerin altyapıya daha iyi dağılımını sağlamak,
- Yolun dinamik performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmak,
- Balast ve altyapı 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).

Toprak işleri

Toprak işleri sırasında kullanılan toprak elastik veya plastik davranışa sahip olabilir. Toprakda elastik deformasyonu (elastik oturma) trafik yükleri oluşturur. Toprak işlerine etki eden yük ortadan kalkar kalkmaz yapı oturmadan önceki durumuna geri döner. Esas olarak bu elastik deformasyon ray ve balasttan oluşan üstyapıyı gerer. Bu yüzden yol yapısı, rayların aşırı gerilmesini engellemek için belirli kriterler ile kısıtlanmalıdır. Yolun yapısına uygun yük kapasitesi ve bu yük kapasitesine göre özel olarak tasarlanmış koruyucu tabakalar ile üstyapının elastik deformasyonunun belirli limitler içinde kalması sağlanır. Taşıt-yol-toprak işleri üçlüsünün doğru ve dinamik bir şekilde işlemesi-özellikle ray/tekerlek sürtünmesini minimize edilmesi-en başta yapılan toprak işlerinin performansına bağlıdır.

Peyzaj ve ses duvarları da dahil olacak şekilde yapılacak tüm toprak işleri için, jeoteknik incelemeler yapılarak işlemlere başlanmalıdır. Çevresel koşulları yerine getirmek için toprak işleri yapılırken aşağıdaki kriterlere uyulmalıdır:

- Kullanılan malzemeler ve özellikle yapının yüzeye yakın olan yerleri, bitkilerin büyümesinden zarar görmemelidir.
- Hidrolojik koşulların oluşturacağı etki kontrol edilmelidir,
- Arkeolojik alanlar mümkün olan en iyi şekilde korunmalıdır.

Hazırlanmış Altyapı

Yol altyapısının üst kısmı, özel oluşturulmuş bir altyapı tabakası olup, enine eğime sahiptir. Bu tabakanın işlevi, değişik demiryollarında farklı olarak tanımlanabilmektedir.

Yan Drenler

Yan drenler yüzeysel suları, sızıntı suları ve yeraltı sularını toplayarak yoldan uzaklaştırma görevini yaparlar. Genelde iki türü vardır:

- Gömülü drenler,
- Yan hendekler.

2.2.1 Oturma Durumunun İncelenmesi

Elastik deformasyonlardan farklı olarak ortaya çıkan plastik deformasyonlar, oturmalar ve kabarmalar olarak tanımlanır. Kabarma, toprağın yapısından dolayı şişmesi sonucu meydana gelir. Örnek olarak; derin yarmalarda şişme kapasitesi yüksek olan toprak, yüksek

kabarmalara yol açabilir. Toprakda yük altında, zamana ve su süzme kapasitesine bağlı olarak plastik oturmalar ve geçici çökmeler oluşabilir.

Altyapıyı oluşturan toprağa ve taban zeminine (subsoil) etki eden her yük oturmaya neden olur ve toprak gövde ile taban zemininde geç-sıkıştırma (post compaction) oluşturur. Eğer oturma çok büyür ise yol bundan olumsuz olarak etkilenebilir. Bu nedenle toprak işleri oturmaya en aza indirilecek şekilde yapılmalıdır. Demiryollarında 3 türlü oturma meydana gelebilir:

- Taban zemininin oturması,
- Dolguda oturma,
- Trafik yükünden kaynaklanan oturma,
- Ayrıca kazı, hafriyat veya yükün kalkması durumunda kabarma oluşma tehlikesi vardır.

Oturmaların büyük bölümünü taban zemini oturması ve toprak işlerinin yapımı sırasında oluşan oturmalar oluşturur. Bu oturmalar ile karşılaştırıldığında trafik yükünden kaynaklanan oturma önensenebilecek derecededir. İşletme esnasında oluşacak oturma maksimum 15 mm olarak sınırlandırılmıştır. Günümüzde bağlantı elemanlarının ayarlanması ile 20 mm ye kadar düzeltme yapmak mümkün olabilmektedir.

Oluşacak oturma, deformasyon sınırını aşmayacak şekilde öngörülmelidir. Aşağıdaki durumlar için toprak malzemesinin kullanım amacı tanımlanmıştır:

- Deformasyonlar belirlenen sınırlar içinde ise,
- Oluşan deformasyon toprak malzemesinin kendisini olumsuz etkilemiyor ise,
- Deformasyonlar seyahat konforu ve güvenliği etkilemiyor ise,
- Toprak malzemesindeki deformasyonların çevre yapılara olumsuz etkisi olmuyor ise.

Yolun sürekli iyi hizmet verebilmesi için oturmalar ve oturmalar arasındaki farklar önceden hesaplanarak zarar verebilecek büyüklüklere ulaşmaları engellenmelidir. Özellikle toprak malzemesinin konsolidasyonu gözönüne alındığında, kaliteli koşullarını sağlarken, oturmaya tamamen ortadan kaldırmak yerine azaltmak mümkün olmaktadır. Bu nedenle oturma büyüklüğü belirlenmeli ve belirlenen standartlara uygunluğu kontrol edilmelidir. Toprak malzemesinin oturması hesaplanmalı ve uygun bir model ile davranışı gözlenmelidir. Aynı zamanda bu model ile elde edilecek değerler oturma gelecekteki durumunu tahmin etmek

için kullanılır.

Demiryollarında “oturma” sürekli gözlemlenmesi gereken bir olaydır. Oturma, belirli bir yükün zamana karşı fonksiyonu ile ifade edilir. Oturmanın etkilerini tespit edebilmek için toprak malzemesinin her tabakasındaki oturmaları ifade eden diagramlar kullanılmalıdır. Bilindiği gibi uygun ve sağlam bir altyapıya sahip olan bir yolda meydana gelecek toplam oturmanın sebebi balastta meydana gelen oturmadan kaynaklı olmaktadır.

2.2.1.1 Dolgu ve Yarmada Oturma Durumu

En çok kullanılan toprak işi yapısı “dolgu”dur. Dolgu, koruyucu tabakalar ve geçiş bölgeleri gibi diğer dolgu tabakaları çok dikkatli şekilde standartlara uygun olarak inşa edilmelidir. Kendi kendine oturma ihtimalini azaltmak için tabakaların sıralaması ve dolgu sevi uygun olarak inşa edilmelidir. Bu şekilde kararlı ve oturma miktarının az olacağı, su akışına karşı uygun dirence sahip bir altyapı inşaatı yapmak mümkün olmaktadır. Tabakaların -bir kohesiv bir kohesiv olmayan- değişiminden kaçınılmalıdır. Eğer farklı tabakalar kullanılacak ise enine eğim tüm kohesiv toprak tabakalarında % 2.5 dışarı olacak şekilde yapılmalıdır.

Taban zemini gerekli şartları sağlamak adına, uzun dönem oturmaları engellemek ve bazı durumlarda oturmaları hızlandırmak için sıkıştırılabilir. Eğer gerekli şartlar standart sıkıştırma yöntemleriyle sağlanamazsa veya toprağın malzemesi yeterli özelliklere sahip değilse altyapı iyileştirilmeli veya oturmanın hızlandırılması sağlanmalıdır. Mevcut toprak, taşıma kapasitesi yetersiz ise başka bir toprak malzemesi ile değiştirilmelidir. Taban zeminini oluşturan yumuşak, kohesiv veya organik toprak yol yüzeyinden en az 4m aşağıda olacak derinliğe kadar değiştirilmelidir.

Yarma için de aynı şekilde kesin kurallar uygulanmalıdır. Dolgudaki özelliklere benzer şekilde tabakaların gerekli düzenlemesi ve sıkıştırılması rayın en az 3 m altına kadar inilecek şekilde gerçekleştirilmelidir. Genelde yarmalarda yolun her iki tarafında drenaj yapılması gerekmektedir. Şev eğimleri yönetmeliklere göre veya kazık ve ankraj gibi uygun zemin güçlendirme elemanlarıyla yapılmalıdır.

2.2.2 Altyapı Zeminin Taşıma Kapasitesine Göre Sınıflandırılması

Altyapıda yapılacak işlemler için zeminin taşıma kapasitesinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sınıflandırma için aşağıdaki kriterlerin bilinmesi gerekir:

- Altyapıyı oluşturan her bir zemin tipinin kalitesinin belirlenmesi,
- Tüm altyapının (hazırlanmış altyapı ve taban zemini) taşıma kapasitesinin belirlenmesi.

Zemin Kalite Sınıfları

Bir zeminin kalitesi aşağıdaki 2 faktöre bağlıdır:

- Zeminin geoteknik özellikleri,
- Yerel hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar: bu koşullar aşağıdaki durumlarda taşıma kapasitesini etkilemeleri açısından olumlu kabul edilebilirler:
 - 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),
 - Altyapı içinde, düşey, boyuna ve enine doğrultularda hiçbir doğal su akıntısı bulunmuyorsa,
 - Yağış suları altyapıdan doğru biçimde uzaklaştırılıyor, boyuna ve enine drenaj sistemi doğru olarak çalışıyorsa.

Bu üç kriterden herhangi birisi bile sağlanmıyorsa, hidrojeolojik ve hidrolojik koşullar zayıf olarak değerlendirilmelidir. Yukarıdaki bilgiler temel alınarak, zeminlerin kalite sınıfı çizelge 2.2'deki “**QSi**” sınıflandırması ile belirlenebilir:

Çizelge 2.2 Zemin kalite sınıfları (Erel, 2006)

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 ve “iyi düzeyde bir bakım uygulanması” koşullarıyla, doğal halleriyle kullanılabilirler. Bunlar için uygun yöntemlerle (örn. Bağlayıcı katkısı ile stabilizasyon) kalite arttırımı da düşünülebilir.
QS2	<i>Orta düzeydeki zeminler</i>
QS3	<i>İyi zeminler</i>

Yukarıda verilen malzeme kategorileri hazırlanmış altyapıya uygulanabilir. Bununla birlikte en büyük parçacığın boyu seçeneklerden küçük olanı seçilecek şekilde, tabakanın

kalınlığının yarısından veya 200 mm'den küçük olmalıdır (yapıların yanında maksimum 100 mm olmalıdır).

Altyapının taşıma kapasitesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Dolgu yada yarma tabanı zemininin kalite sınıfı,
- Varsa, altyapının üzerindeki hazırlanmış (iyileştirilmiş) tabakanın kalınlığı.

Bunlara göre 3 taşıma kapasitesi sınıfı sözkonusudur:

- P1 : Zayıf altyapı,
- P2 : Orta düzeyde altyapı,
- P3 : İyi altyapı.

Sınıflandırma yöntemleri değişik demiryollarında farklı olup, bunlardan birisi çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Altyapı İçin Taşıma Kapasitesi Sınıfları

Zeminin Kalite Sınıfı	Altyapı İçin Gerekli Taşıma Kapasitesi Düzeyi	Hazırlanmış Altyapı Tabakası Özellikleri	
		Kalite Sınıfı	Minimum kalınlık "ef" (m) Şek.2.3
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	---

2.2.3 Zeminlerin Donmaya Duyarlılıkları

Dona duyarlılık konusunda zeminler 3 sınıfa ayrılmaktadır:

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

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. Zeminlerin türlerine göre dona duyarlılıkları Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Zeminlerin dona duyarlılıkları (Erel, 2006)

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

Aslında bu zemin türlerinin değişik karışımlarına göre dona duyarlılıklarının da bilinmesi gerekir. İnce partiküller için kritik yüzdelerin önemi büyüktür. Casagrande Kriteri, düzenlilik katsayısı $C_u = 5$ ve 15 olan zeminler için $d < 0,02$ mm çapındaki partiküllere ait kritik yüzdeleri vermektedir. Diğer C_u değerleri için interpolasyon ile hesaplanabilir.

NOT: Üniformluk katsayısı, bir zeminin elek analizinde ağırlığa göre % 60’ının altına geçtiği elek çapının, %10’unun altına geçtiği elek çapına oranı ($C_u = d_{60} / d_{10}$) olup, daneli zeminlerin sıkıştırılmaya uygunlukları ve travers tabanına en yakın olan yol yatağı tabakalarının taşıma kapasiteleri konularındaki özelliklerini değerlendirmek için çok önemli bir göstergedir. $C_u > 6$ değerine sahip bir daneli zemin “iyi derecelenmiş” kabul edilir. Bazı demiryolları balast altı tabakası için üniformluk katsayıları daha büyük olan zemin kullanırlar.

Çizelge 2.5 Zeminlerin dona duyarlılıkları için Casagrande Kriterleri (Erel, 2006)

C_u Üniformluk Katsayısı	$d > 0,02$ mm çapındaki partiküllerin ağırlığa göre Kritik Oranları
5	10
15	3

Belirli bir yolun dona duyarlılığı, aynı zamanda

- Jeolojik koşullara,
- Altyapıyı oluşturan zemin danelerinin doğal özelliklerine (mineral ve kimyasal kompozisyon, ince danelerin biçimleri),
- Yol geometrisinden beklenen kaliteye bağlıdır.

Bu nedenlerle bazı demiryolları dona duyarlılık konusunda ek kriterler koymuşlardır; bunlar Beskow ve Schaible kriterleridir. Bu çalışmada bu kriterlere değinilmemiştir.

2.2.4 Yol Yatağı Tabakalarında İstenilen Taşıma Kapasitesini Verecek Kompozisyonun ve Kalınlıkların Belirlenmesi

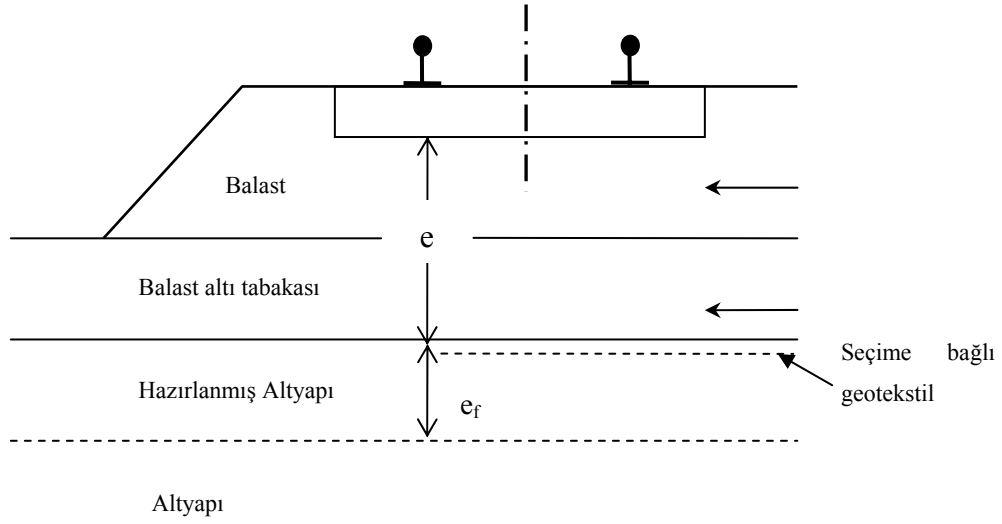
Bir demiryolu hattının inşaatında, yol yatağı tabakalarının uygun mekanik karakteristiklere sahip ve yeterli kalınlıklarda olmaları çok önemlidir. Balast altı tabakasının en eksiksiz şekli şöyle tanımlanır:

- Kumlu çakıldan oluşan alt balast tabakasının aşınma sınırları, Los Angeles Deneyi ile < 20 ya da 25 , su içermesi durumunda Mikrodeval Deneyi ile < 15 ya da 20 'dir. Bazı demiryolları, bu tabakanın özellikle yeni hatlarda en az % 30 oranında kırma taş içermesi istenir,
- İyi derecelenmiş kumlu çakıldan oluşturulacak bir "temel" tabakası iyi bir filtreleme özelliğine sahiptir. QS3 sınıfı zeminler için bu tabakaya gereksinim duyulmaz,
- Altyapı zemininin taşıma kapasitesi P1 sınıfı ise kumdan oluşturulacak bir filtre tabakasına gereksinim duyulur,
- P1 ve P2 sınıfındaki zeminlerden oluşan altyapıların üst tabakasında, bir geotekstil filtre tabakasının üzerine serilmiş "hazırlanmış altyapı" tabakası oluşturulmalıdır. Bu tabaka, yol yatağı tabakalarının filtreleme özelliklerini iyileştirir; ayrıca geotekstil de hazırlanmış altyapının QS1 ve QS2 sınıfı zeminlerin içine girmesini engeller,

Yol yatağı tabakalarının boyutlandırılmasında aşağıdaki maddeler dikkate alınmalıdır.

- istenen taşıma kapasitesi,
- donmaya karşı korunma problemleri

Önerilen minimum tabaka kalınlıkları Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu değerler 0.60 m travers aralığına sahip ve çekilen katarlarda maksimum dingil yükünün 250 kN olduğu hatlar için geçerlidir.



$$e = E + ax + bx + c + d + f + g$$

Şekil 2.3 Yol Yatağı İçin Minimum Kalınlıklar (Erel, 2006)

$$e = E + a + b + c + d + f + g$$

$E = 0.70 \text{ m}$: Taşıma gücü sınıfı P1 olan zeminler için

$E = 0.55 \text{ m}$: Taşıma gücü sınıfı P2 olan zeminler için

$E = 0.45 \text{ m}$: Taşıma gücü sınıfı P3 olan zeminler için

$ax = 0$: UIC Grup 1 ve 2 (veya UIC Grup 2 hesaba katılmaz ise $V > 160 \text{ km/sa}$)

$ax = -0.05 \text{ m}$: UIC Grup 3 ve 4

$ax = -0.10 \text{ m}$: UIC Grup 5,6 ve “7,8,9 yolcu ile”

$ax = -0.15 \text{ m}$: UIC Grup “7,8,9 yolcusuz”

$bx = 0$: 2,60 m uzunluğunda ahşap traversler için

$bx = \frac{2.50 - L}{2}$: L uzunluğundaki beton traversler için ; b (m), L (m), $L > 2,50 \text{ m}$ ise b negatif

$c = 0$: Alışlagelmiş boyutlar için

$c = -0.10 \text{ m}$: UIC Grup “7,8,9 yolcusuz” dışındaki mevcut hatlarda zor çalışma koşulları için özel durum

- c = -0.05 m : UIC grup “7,8,9 yolcusuz” dışındaki mevcut hatlarda zor çalışma koşulları için özel durum
- d = 0 : Çekilen katarların nominal maksimum dingil basıncı 200 kN değerini aşmadığı durumlarda
- d = +0.05 m : Çekilen katarların nominal maksimum dingil yükü değeri 225 kN değerini aşmadığı durumlarda
- d = +0.12 m : Çekilen katarların nominal maksimum dingil yükü değeri 250 kN değerini aşmadığı durumlarda
- f = 0 : Hat hızı $V \leq 160$ km/sa ve altyapı taşıma kapasitesi P3 sınıfı olan Yüksek Hızlı Demiryollarında
- f = +0.05 m : YHD’nda temelin taşıma kapasitesi P2 sınıfı ise
- f = +0.10 m : YHD’nda temelin taşıma kapasitesi P1 sınıfı ise
- g = + : Hazırlanmış altyapı tabakası QS1 veya QS2 zemin sınıfından oluştuğu takdirde yol yatağında geotekstil olmak zorundadır.
- g = 0 : Hazırlanmış altyapı tabakası QS3 zemin sınıfından oluştuğu takdirde (geotekstil gerekmez)

Yol yatağı tabakaları için kullanılacak malzemeler dona duyarlı olmamalıdır (Çizelge 2.3-2.4). Toplam kalınlık önce yukarıda açıklandığı gibi, zeminin taşıma kapasitesine göre belirlenmelidir. Daha sonra dona duyarlı zeminlerde istenilen korumayı sağlamak için bu kalınlık arttırılmalıdır.

2.2.5 Altyapının Drenajı

Altyapının görevini öngörülen süre boyunca yerine getirebilmesi için yüzeyden gelen suların ve yeraltı sularının altyapıdan doğru bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir.

Yeraltı Suyu

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 0,80 m ile 2,50 m arasında aşağıya çekilmesi gerektiğini belirtmektedirler. Minimum 0,80 m değerine, ancak balast altındaki altyapı zemininin iyi olması durumunda (P3 sınıfı), don zemin içine girmiyor ve yeraltı su akımı düşük ise izin verilmektedir.

Yüzeysel Sular

Yüzeye düşen ve altyapıya girmesi sözkonusu olan yağış suları hızlı bir şekilde uzaklaştırılmalıdır.

Bunun için, aşağıdaki hususlara uyulmalıdır;

- 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. Balast altı tabakasının üst yüzeyine de yukarıda belirtilen enine eğimler verilmelidir. Bu tabakanın 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 tabakasında girerek 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 ile, yarma şevlerinden ve yol üzerine akan sulardan oluşur. Farklı kaynaklardan gelen suların akış katsayıları farklı olduğundan, bunların büyük olanına göre boyutlandırma yapılması fazla hata vermez.

2.2.6 Altyapının İyileştirilmesi için Özel Yapım Yöntemleri ve Malzemeler

Tasarım aşamasında taban zeminini farklı sıkıştırma methodlarıyla güçlendirmek için bir çok yöntem gözden geçirilir. Toprak kendisini çevreleyen toprağın itilmesi ile sıkışır. Oturma hali ve oturma için geçen sürenin azaltılması hesaplanmalı ve sıkıştırma için uygulama şartları belirlenmelidir. Özellikle kohesiv toprak tabakalarında izin verilen oturma limit değerlerini aşmamak için oturma hızlandırılmalıdır. Süzülme ile taban zemininin dayanıklılığı artar buna karşılık sıkıştırılma özelliği azalır. Yumuşak, doymuş ve tortul toprağı konsolide etmenin en başarılı yöntemleri olarak boyuna drenler ve ön yükleme metodu gösterilmektedir.

Killi ve bitkisel toprak gibi doğal alüvyol toprakların genel özelliği çok büyük oturma ve

konsolidasyon kapasitelerine sahip olmalıdır. Oturma boyunca zayıf kesme mukavemeti ve konsolidasyon davranışı stabilite bozukluklarına yol açar. Kohesiv toprakların konsolide edilmesi dolgunun ön yükleme ile ilave yüklemesi ile gerçekleştirilir. En çok kabul gören metot inşaattan önce yapıya eşdeğer ağırlığın uygulanarak gelecekte oluşacak oturmaların gerçekleşmesinin sağlanmasıdır.

Kohesiv toprakların geçirgenliği oldukça zayıftır ve içinde kalan suyun yüzeye ulaşması zaman alır. Bu nedenle ön yükleme boyuna drenlerin kullanımı ile birlikte gerçekleştirilir. Boyuna drenler, 10 m'den daha fazla derinlikte daha etkin çalışırlar. Bunun anlamı; daha derine sürülen drenler daha büyük aralıklarla zemine uygulanabilirler. Bu şekilde daha önceden belirlenmiş konsolidasyon oranını istenen zamanda sağlamak için gerekli olan drenlerin sayısının azaltılması sağlanır. Düşey drenler yumuşak toprağa deplasman metodu ile uygulanır. Dren borusu gerekli derinliğe sürülür. Drenin sonunda yer alan özel tasarlanmış pabuç muhafaza geri çekilirken ankraj vazifesini gerçekleştirir.

2.2.6.1 Bağlayıcı Katkı Malzemeleriyle Zemin İyileştirilmesi

Bağlayıcı malzemelerle (kireç, çimento ve bitüm) iyileştirme sözkonusu olduğunda, bunların uygunluğunu araştırmak ve en uygun koşulları belirlemek için gerekli deneylerin yapılması gerekir. Ayrıca laboratuvarında belirlenen katkı oranlarının uygunluğu arazide de kanıtlanmalıdır. Çizelge 2.6'da bu yöntemler özetlenmiştir.

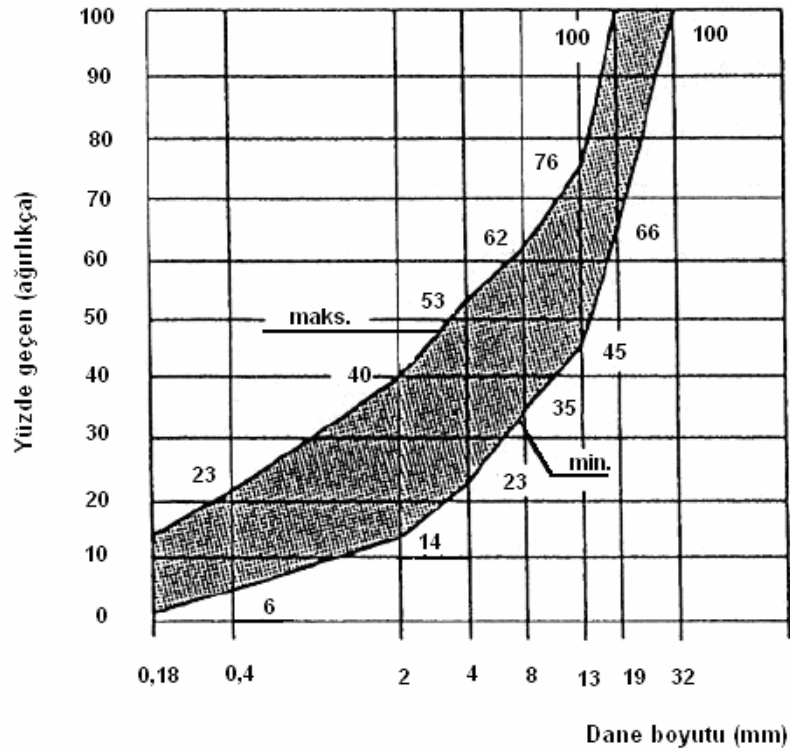
Çizelge 2.6 Bağlayıcı katkı malzemeleriyle zemin iyileştirilmesi (Erel, 2006)

Katkı Malzemesi	Açıklama
Kireç	Kireç stabilizasyonu (CaO veya Ca(OH)_2) sadece kil zeminlere uygulanır. Kirecin yağmur suları ile çözülüp ayrışmaması 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.
⁽¹⁾ Her ne kadar kaynakta bitümlü stabilizasyonun kullanılmadığı belirtilmekte ise de, son yıllarda bu konuda araştırmalar yapılmaktadır.	

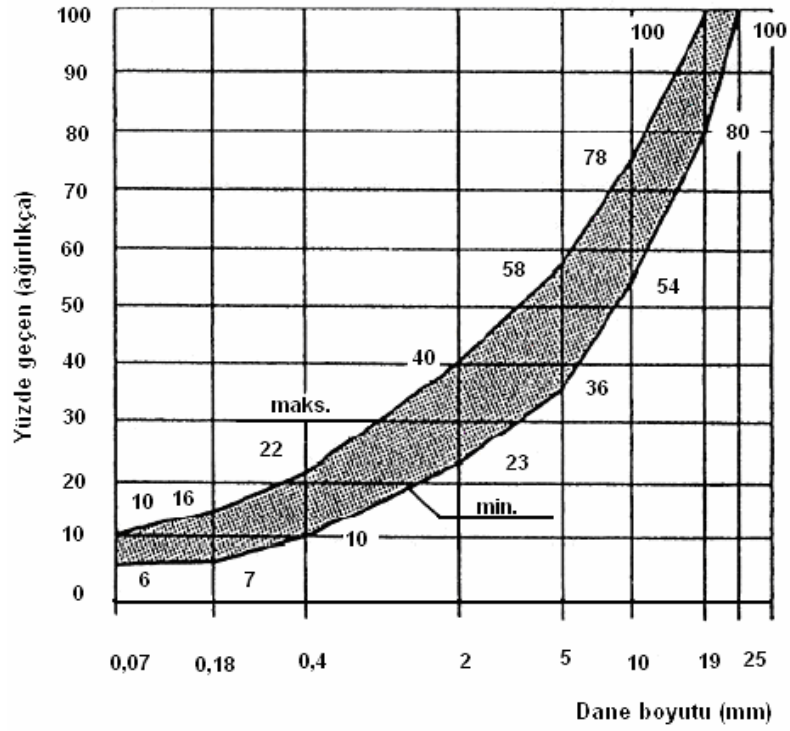
Bağlayıcı katkı malzemelerinden başka zemini iyileştirmek için kireçtaşı ve çimento karışımı ile oluşturulan tabakalar veya asfalt konglomera tabakalar kullanmak mümkündür.

Çizelge 2.7 Kireçtaşı ve çimento karışımıyla oluşturulan veya asfalt konglomera tabakalar (Erel, 2006)

Yöntem	Açıklama
Çimento ile Sağlamlaştırılmış Kireçtaşı	Kırılmış kireçtaşı (CaCO_3) çimento ile karıştırılarak, 30 – 50 cm kalınlığındaki çakıl tabakanın üzerinde, 20 cm kalınlığında bir balast altı tabakası olarak kullanılır. Kırılmış kireçtaşının Şekil 2.4’de görülen dane dağılımına sahip olması gerekir. Çimento oranı en çok % 3 – 4, su oranı ise yaklaşık % 6 olmalıdır.
Asfalt Konglomera	Asfalt konglomera, 30 – 50 cm kalınlığındaki çakıl tabakanın üzerinde, 12 cm kalınlığında bir tabaka şeklinde oluşturulur. Dane dağılımı eğrisi, Şekil 2.5’deki zarf içinde bulunmalı ve bitüm oranı ağırlığın yaklaşık % 5’i olmalıdır.



Şekil 2.4 Çimento Katkılı Kireçtaşı Tabakası İçin Kırma Kireçtaşı Dane Dağılımı Zarfı



Şekil 2.5 Asfalt Konglomeraya İlişkin Dane Dağılımı Zarfı

2.2.6.2 Asfalt Beton

Bir alt balast tabakası olarak kullanılan asfalt betonun SBB/CFF tarafından belirlenen özellikleri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir. Yeterli kalınlıktaki bir çakıl tabakası yatağı üzerinde oluşturulan asfalt betonun minimum kalınlığı 6 cm olmalıdır.

Çizelge 2.8 Asfalt Betonun SBB/CFF tarafından belirlenen özellikleri (Erel, 2006)

Özellik	Değerler
Sıkıştırma Miktarı	Ortalama % 98
Boşluk Oranı	Hacme göre ortalama % 3
Döşenme Sonrası 25°C’deki Penetrasyon	En az 70 mm (1/10 mm)

Endüstri Yan Ürünleri ve Yeniden Değerlendirilen Ürünler

Altyapının iyileştirilmesi için kullanılabilecek ürünler:

- Kömür ocağı şeyli,
- Yüksek fırın cürufu,
- Çöp fırını atıkları,
- Yapı molozları,
- Uçucu küller.

Bunlar, ancak fiziksel ve mekanik karakteristiklerinin demiryolu ve çevre için uygunlukları ve diğer yapı bileşenlerine uyumlulukları deneylerle kanıtlandıktan sonra, toprak işlerinde ve yol yatağı tabakalarında kullanılabılırler.

2.2.6.3 Zeminin Taşıma Kapasitesinin Arttırılması için Kullanılabilecek Geosentetikler

Günümüzde demiryollarında çeşitli avantajlar sağladıkları için, toprak işlerinde ve yol yatağı yapılarında sentetik malzemeli yapı elemanları kullanılmaktadır. Geosentetiklerin türlerinden aşağıda bahsedilmiştir.

Geotekstiller

Bunlar (dokunmuş ya da dokunmamış) geosentetikler olup, aşağıdaki amaçlarla kullanılabılır:

- Ayırma,
- Filtreleme,
- Drenaj,
- Kuvvetlendirme.

Geomembranlar

Sentetik ya da bitümlü tabakalar halinde olup, su geçirmezler ve duyarlı altyapıların yüzeysel suların girmesine karşı korunması ya da yeraltı suyunun kirlenmesini önlemek amacıyla kullanılırlar.

Geogridler

İnce ya da kaba dokulu (ızgaralı, gözlü) olan bu geosentetikler, ayırma ve kuvvetlendirme amaçlarıyla kullanılırlar. Geogrid ile güçlendirme, zeminlerde aşağıda belirtilen özellikleri sağlar:

- Kesme gerilmelerinin ve düşey yönde oturmaların minimize edilerek, kontrol edilebileceği rijit bir platform yaratır,
- Taşıma kapasitesinin yük dağılımını arttırarak düşey gerilmeyi azaltır,
- Toprağın sıkıştırılması ile toprağın rijitliğini arttırarak iç gerilmeler oluşturur ve kritik hızlarda bile yüksek dinamik yükler altında zeminde kohezyonun oluşumunu sağlar,
- Dolgunun sönümleme verimliliğini arttırarak daha yüksek hız yapılmasına olanak sağlar,
- Toprağın ayrılmasını, filtrelenmesini ve güçlendirilmesini sağlar.

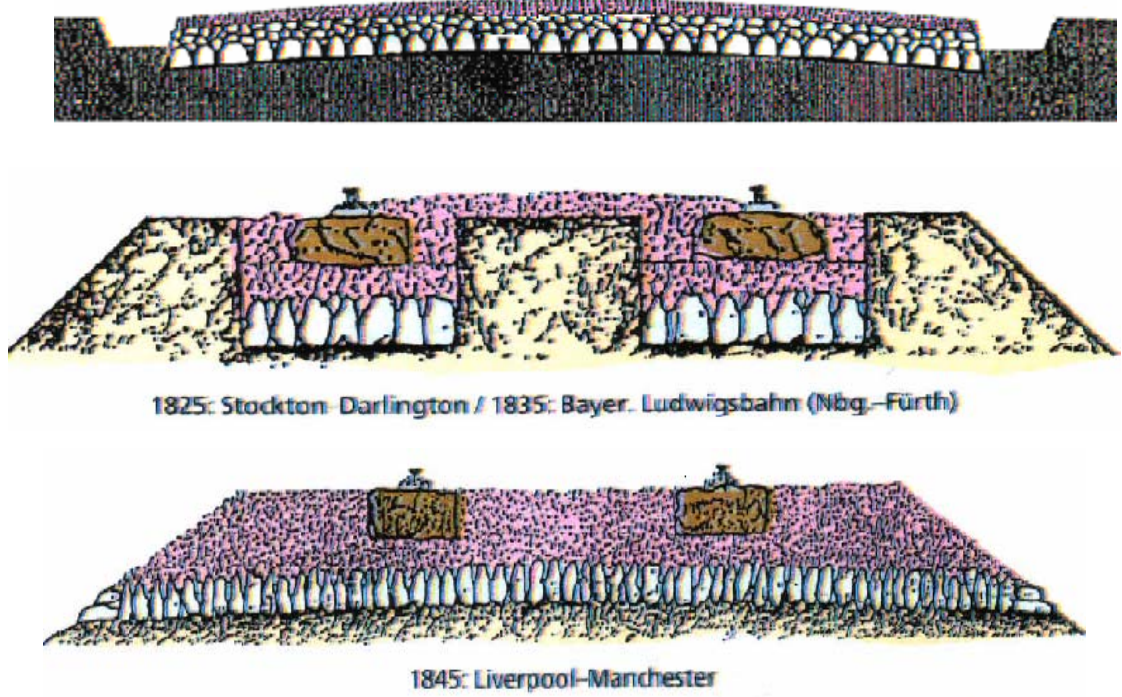
Bu sebeplerden ötürü geogrid ile güçlendirme yeni yapılan hatlarda ve mevcut hatların güçlendirilmesinde sık olarak kullanılan bir yöntem olmaktadır.

Geokompozitler

En az iki geosentetik malzeme tabakasından oluşturulan bileşik yapılardır.

2.3 Demiryolu Üstyapısı

Bir demiryolunda altyapı platformu üzerine oturan yapı kısmına ‘üstyapı’ denir. Raylı ulaşırma sistemlerinin üstyapı tipi, günümüzdeki yapısına ve boyutlarına ulaşıncaya dek, teknik ve ekonomik gereksinimlerle değişik aşamalar geçirmiştir. Stephenson’un 1825 yılında Stockton-Darlington arasında döşettirdiği taş mesnetler üzerindeki ve açıklıklarda balık karnı kesiti verilmiş olan dökme demirden rayların yerini, bugün kırma taş tabakasından oluşan bir yatak içine gömülü traversler üzerine rijit ya da elastik olarak bağlanmış olan geniş tabanlı ray dizileri almıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 19 yy. Başlarında kullanılan üstyapı şekilleri (Yılmaz, 2004).

Demiryolu arabalarından gelen statik ve dinamik kuvvetler tekerleklerden üstyapıya ve buradan altyapıya aktarılır. Ayrıca üstyapı dış etkilerden de doğrudan doğruya etkilenir. Şu halde bütün bunlara yeterince dayanabilecek bir yapıda olmalıdır.

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

Demiryolu yapı tipleri 3 ana grupta toplanabilir bunlar;

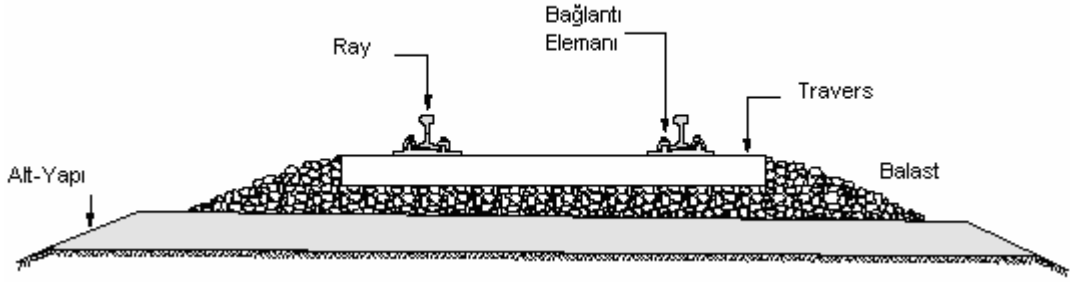
- Balastlı yol yapıları (Ballasted Track Structures),
- Plaklı (rijit) yol yapıları (Slab Track Structures),
- Gömülü raylı yol yapıları (Embedded Rail Structures)

Çizelge 2.9 Yol Tipleri ve Bileşenlerine Genel Bir Bakış (Yalçın, 2006).

Yol Tipleri	Yol Bileşenleri	Raylar	Traversler	Bloklar	Ray Altı Levhası	Beton Plak	Ray Elastik Mesnedi	Gömülü Ray	Ray Altı Levhası Padi	Blok Kılıf / travers çizmesi	Balast Materyali	Zemin / Tabakalaşmış Ortam	Mühendislik Yapıları	Elastik Tabaka Sayısı
Balastlı Yol		X	X				X				X	O	X	2
İndirekt Bağlanmış Balastlı Yol		X	X		X		X				X	O	X	3
Çizmeli Balastlı Yol		X	X				X			X	X	O	X	2
Çizmeli Plak Yol		X	X			X	X			X			X	2-3
Direkt Bağlı Yol		X				X	X						X	1-2
Direkt Bağlı Blok Yol		X		X		X	X			X			X	2-3
İndirekt Bağlı Yol		X			X	X	X		X				X	2-3
İndirekt Bağlı Blok Yol		X		X	X	X	X		X	X			X	3-4
Gömülü Yol		X				X		X				O	X	1-2
Not: X): Zorunlu, O):Kullanılır														

2.3.1 Balastlı Üstyapı

Bugün dünyada kullanılan demiryollarının çoğunluğunun üstyapısı, balast tabakası üzerine döşenmiş ahşap, çelik veya betonarme traverslere mesnetlenmiş ray dizilerinden meydana gelmektedir. Balastlı üstyapı elemanları balast tabakası, traversler, çelik ray ve bağlantı elemanlarından oluşur (Şekil 2.7). Yapım, bakım, onarım kolaylıkları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle balastlı üstyapı sistemlerinin gelecekte de uzun bir süre kullanılacağı aşikârdır. Fakat rijit üstyapının maliyeti daha fazla olmasına ve kalifiye işçilik gerektirmesine karşın, kullanılabilirlik süresi klasik üstyapıdan daha fazla, bakımı için harcanan zaman ve maliyet ise daha azdır. Bu durum, günümüzün gittikçe artan trafik yoğunluğunda bakım ve yenileme işlemlerinin yapılabilmesi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.7 Balastlı üstyapı.

2.3.2 Rijit Üstyapı

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

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

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

Rijit üstyapının en önemli nitelikleri;

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

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

- Taşıma tabakası içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (PORR - Avusturya, Rheda, Züblin - Almanya, Stedef, Sonneville LVT-Fransa) (Şekil 2.8, Şekil 2.9, Şekil 2.10),
- Taşıma tabakası üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (ATD sistemi - Nant, GETRAC) (Şekil 2.11, Şekil 2.12),

- Monolitik rijit üstyapı sistemi (Rasengleis) (Şekil 2.13),
- Prefabrik balastsız üstyapı sistemi (Shinkansen - Japonya, Güney Kore, IP İtalya) (Şekil 2.14),
- Gömülü raylı üstyapı (Embedded Rail Structure) (Infundo üstyapı sistemi - Hollanda) (Şekil 2.16),
- Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı sistemi (Hollanda Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi) (Şekil 2.18).

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

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

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

Uygulama yerine göre rijit üstyapı tipleri şunlardır:

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

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

Rijit üstyapı sistemlerinin yapı tipi ve döşenme şekline göre sınıflandırılması en yaygın olanıdır (Çizelge 2.10). Döşenme şekline göre rijit üstyapı tipleri mesnetli döşeme ve sürekli döşeme olmak üzere başlıca iki grupta incelenebilir.

Çizelge 2.10 Yapı tipi ve döşeme şekline göre rijit üstyapı tipleri (Erel, 2002).

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

Mesnetli döşeme, ray tabanının 0,50 m ile 0,80 m arasında (en çok 0.65 m) değişen sabit aralıklı mesnetlere, 2 parçalı olan ve yaylı elemanları ile ayarlanabilen bağlantılar yardımıyla, alttaki taşıma tabakası üzerine bağlanmasından oluşur. Taşıma tabakası içine bağlantı, değişik türdeki ankraj elemanları yardımıyla olabilir (Şekil 2.8, Şekil 2.9, Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil 2.14).

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

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



Şekil 2.8 Rheda 2000 Taşıma Tabakası (TT) içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı (Yalçın, 2006).



Şekil 2.9 PORR TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).



Şekil 2.10 LVT, TT içine gömülü travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).



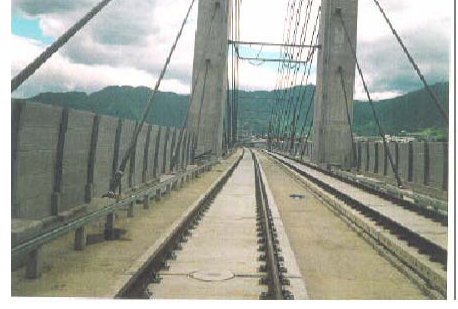
Şekil 2.11 ATD sistemi, Nant 1993 TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).



Şekil 2.13 GETRAC TT üzerine döşeli travers mesnetli rijit üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).

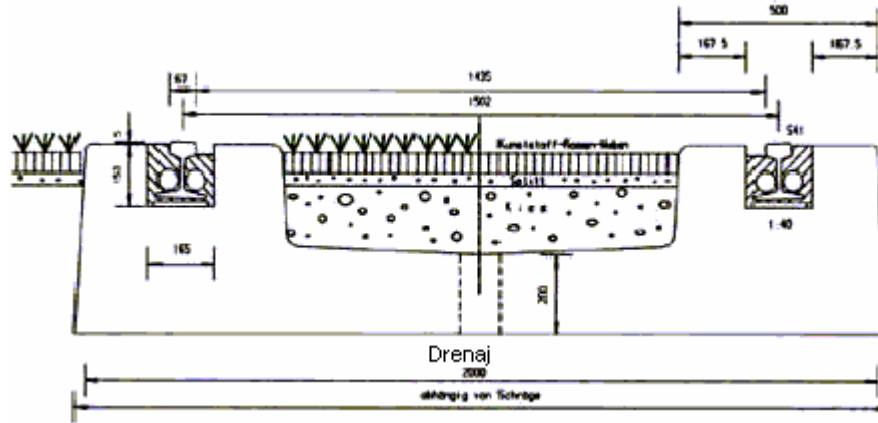


Şekil 2.12 Rasengleis monolitik rijit
üstyapı sistemi (Yalçın, 2006).



Şekil 2.14 Shinkansen prefabrik üstyapı
sistemi (Yalçın, 2006).

tramvay yollarında ve kentlerarası demiryollarında kullanılmıştır (Şekil 2.16). Infundo yol sistemi, Hollanda'nın yanı sıra İngiltere, İspanya, Macaristan ve Hong Kong'da kullanılmaktadır. Bu yol tipi "U" kesitindeki betonarme boyuna kirişler içinde de uygulanabilir ve üst yüzeydeki boş alanlar çimle kaplanabilir. Sürekli gömülü raylı rijit üstyapı tipi Almanya'da bugüne dek sadece tramvay yollarında kullanılmıştır.



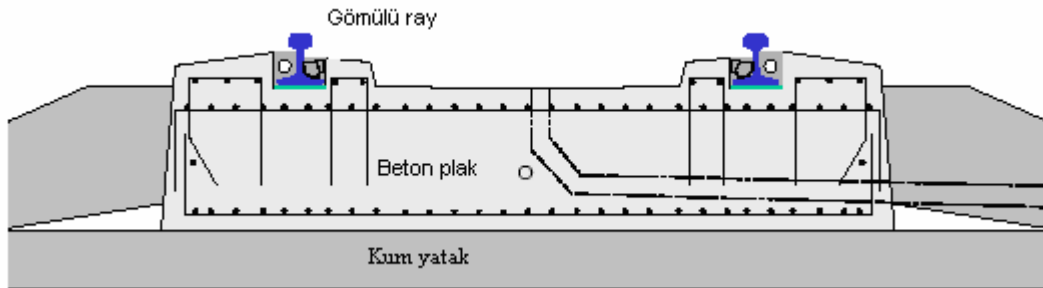
Şekil 2.16 Infundo üstyapı sistemi (Erel, 2002).

Kama sistemi ile sıkıştırılmış raylı rijit üstyapı tipinde ise, raylar yine beton taşıma tabakası üzerinde olukların içine elastik yataklı olarak döşenmekte, ancak konumlarını koruyabilmeleri için gövdelerinin her iki yanından kamalarla sıkıştırılmaktadırlar. Günümüzde bu tipte gelişen rijit üstyapı tipleri SFF (Ortec), Saargummi ve ERC (Embedded Rail Construction)'dir.

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

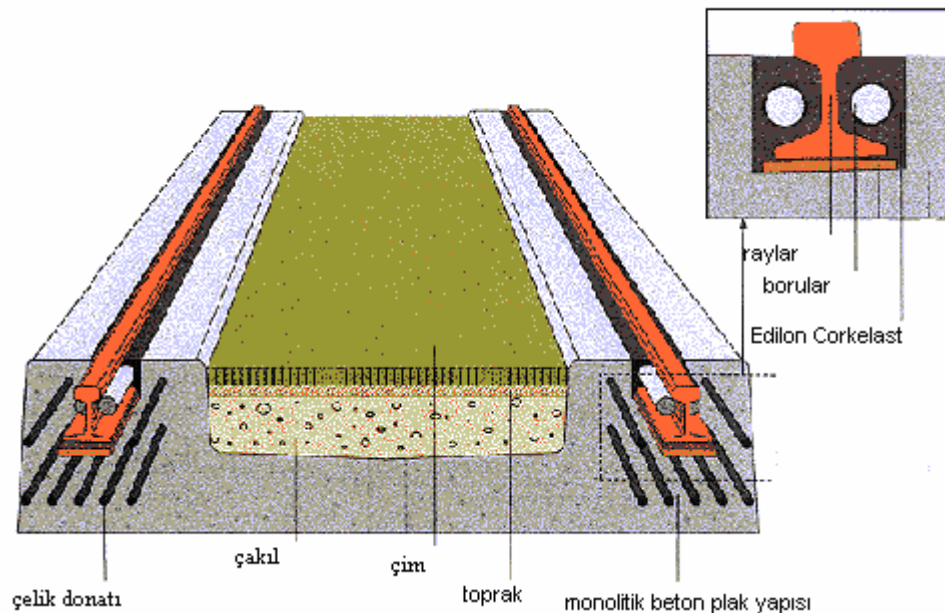
Edilon blok rijit üstyapı sisteminin uygulama alanı genelde köprü ve tünellerdir. Raylar ve blokların pozisyonlarına yerleştirilmeleri yapım aşamasında ilk sırayı alır. Daha sonra bloklar gerekli elastik desteği sağlamak amacıyla, Corkelast kullanılarak yerleştirilir. Kullanılmakta olduğu önemli uygulama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

Edilon Corkelast gömülü sisteminde, geleneksel balast yatağının yerini, çelik veya beton yapılar alır. Bu temel, gömülü raya da yapılabildiği gibi otomatik olarak yerleştirilebilir. Raylar kaldırılır ve Edilon Corkelast maddesi etrafına dökülür. Edilon Corkelast maddesi akışkan olduğundan istenilen şekli alabilir (Şekil 2.18).



Şekil 2.17 Gömülü ray yapısı (Erel,2002).

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



Şekil 2.18 Edilon Corkelast gömülü raylı yol sistemi (Erel,2002).

2.4 Demiryollarının Geometrik Karakteristikleri

Dünya’da demiryollarının gerek tasarımı, gerekse inşaatı ve işletimi için bilinmesi gereken temel özelliklerin en önemlisi “geometrik karakteristikleri”dir. Bu geometrik karakteristikleri belirleyen temel özellik hız olduğundan, bu karakteristikleri daha iyi anlayabilmek için demiryollarında önemli 2 hız kavramından bahsetmek gerekmektedir.

- Proje Hızı (Hat sınır hızı): İlerde olası ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde belirlenen güzergah planı yani kurbalara göre uygulanabilecek maksimum hızdır.
- Uygulanabilir maksimum hız: Demiryolunun sistem olarak tüm elemanları ile üstünde hareket eden taşıta izin vereceği en yüksek hızdır. Bir çok farklı elmanın izin vereceği hızlar farklı olabileceğinden, bütün elemanlara ait hızların en küçüğü maksimum uygulanabilir hız olarak belirlenir.

Yol geometrisi taşıtların davranışı açısından çok önemlidir. Yol geometrisi; yol profili, dever, güzergah (alignment) ve hat genişliğine bağlıdır. Yol profili her rayın yüksekliğindeki değişimi ifade ederken, dever sağ ve sol rayın arasındaki yükseklik farkını ifade eder. Güzergah yoldaki eğriliğin değişimini belirtir, hat genişliği ise iki ray arasındaki mesafeyi tariflemektedir. Taşıt hareketini yaparken, yol geometrisindeki değişimlerden ve bozukluklardan etkilenir. Deverdeki değişim ve bozukluklar taşıtın devrilmesine, sallanmasına ve burulmasına yol açar. Yol profilindeki bozukluklar, taşıtın hareket halindeyken zıplamasına neden olur. Taşıtın çok büyük hareketler yapması tekerlek yükünün boşalmasına veya taşıtın çok kuvvetli ivmelenmesine yol açar. Güzergah ve hat genişliği değişimleri, yanal tekerlek kuvveti ve aks kuvvetlerine büyütme etkisi yapar ki bu da deraymana veya yol yapısının bozulmasına yol açar (El-Sibaie, 1997).

Yol geometrisini belirleyen en önemli parametreler aşağıda verilmiştir;

Yatay geometri:

- Hat genişliği,
- Yatay kurplar,
- Dever, birleştirme eğrisi, dever rampası,
- Gabariler: Demiryolu taşıtlarının mümkün olan en büyük yapım çerçevesini ve ayrıca yola göre sabit engellerin ve özellikle sanat yapılarının konumlarını belirlemek amacıyla gabarilerin saptanması gerekmektedir. Bölüm 3.7.3’de gabariler konusu

detaylı olarak incelenmiştir.

Düşey geometri:

- Eğim
- Düşey kurplar

Geometrik kalite:

- Doğrultu (Dresaj)
- Boyuna Yükselti (Nivelman)

2.4.1 Yatay Geometri

2.4.1.1 Hat Genişliği

Bir demiryolu hattında iki ray mantarının iç yanakları arasında kalan aralığa hat genişliği denir. Herhangi bir yol boyunca her noktada hat genişliği sabittir. Ancak yolun döşenmesi sırasındaki hatalardan ve aşınmadan dolayı kabul edilebilir ölçüde farklar bulunabilir. Ayrıca küçük yarıçaplı kurbalarda katarların rahat geçebilmesi için küçük ölçüde genişlik arttırılabilir. Hat genişliği demiryolları için tüm dünyada genelde 1435 mm olarak kabul edilmektedir. Dünyadaki 1 milyon km'den fazla demiryolunun %75 dolayındaki kısmı bu hat genişliğine sahiptir. Yeni yapılacak yolların mevcut demiryolları ile uyumu için standart hat genişliğine uygun inşaat yapılması gerekmektedir. Hat genişliği bakımından demiryolları üçe ayrılır; hat genişliği 1435 mm olan hatlara normal hatlar, bundan küçük olanlara dar hatlar, büyük olanlara ise geniş hatlar denir.

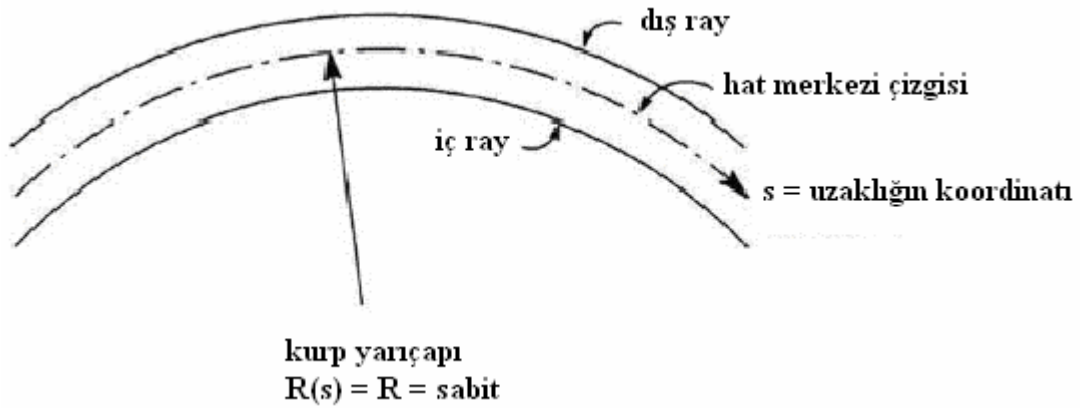


Şekil 2.19 Hat genişliğinin bileşenleri

2.4.1.2 Yatay Kurp

Demiryollarında güzergahın eğri kesimlerine kurba adı verilir. Planda görünen yolun farklı doğrultudaki doğru kesimlerini birleştirmek için kullanılan R yarıçaplı eğrilerin tümü yatay kurp olmaktadır. Daire parçalarından oluşan kurbalar, seyahat güvenliği ve yolcu konforu için demiryollarında özel uygulamalar yapılması gereken noktalardır. Dairesel bir kurpta en önemli faktörler yarıçap (R) ve tersi olan eğrilik ($k=1/R$) olmaktadır. Demiryollarında yatay kurbalar istenmeyen etkilerin ortaya çıkmasına sebep olurlar. Seyir konforu ve seyir güvenliği açısından oluşması istenmeyen bu etkiler aşağıda sıralanmıştır:

- Yolcu konforuna olumsuz etkisi,
- Vagonlardaki yüklerin kayması,
- Kuvvetli rüzgarda devrilme tehlikesi,
- Dış rayda buden tırmanması veya tekerlek-ray temasının kaybedilmesi ile derayman riski,
- Yüksek yanal kuvvetler.



Şekil 2.20 Yatay kurbanın bileşenleri

Maksimum işletme hızında uygulanabilecek minimum kurp yarıçapı aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$R = \frac{11,8}{h_t + h_d} \cdot V_{maks}^2 \text{ (m)} \quad (2.1)$$

h_t = deyer (mm)

h_d = eksik deyer (mm)

V_{maks} = Maksimum hız (km/sa)

Minimum işletme hızında uygulanabilecek minimum kurp yarıçapı ise aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$R = \frac{11,8}{h_t - h_e} V_{\min}^2 \text{ (m)} \quad (2.2)$$

h_e = fazla dever (mm)

Dever, eksik dever ve fazla dever değerlerinin CEN standartlarında belirtilen limitlere uygun hale getirilmesi için minimum kurp yarıçapı optimize edilmelidir. Bunun için 2.3 denkleminde faydalanılır.

$$\frac{11,8}{h_t - h_e} V_{\min}^2 \geq R \geq \frac{11,8}{h_t + h_d} \cdot V_{maks}^2 \quad (2.3)$$

$V_{\min}$ = Minimum hız

2.4.1.3 Dever, Birleştirme Eğrisi ve Dever Rampası

Kurbalarda oluşan merkezkaç kuvvetinin doğurduğu sakıncaları ortadan kaldırmak için yolun doğru kısımlarında yatay düzleme paralel olan yuvarlanma yüzeyi kurbalarda dış ray dizisine doğru yükselen bir eğik yüzey haline getirilir. Bu eğik yuvarlanma yüzeyini oluşturabilmek için dış ray dizisine içteğine göre verilen yükseklik fazlasına “dever” denir. Dever sayesinde merkezkaç kuvveti, taşıt ağırlığının aynı doğrultu ve karşıt yöndeki bileşeni ile ya yok edilir ya da zararsız ölçülere düşürülür. Kurbada trenin yavaşlaması veya durması durumunda meydana gelebilecek istenmeyen olayları önlemek için maksimum dever sınırlandırılmıştır. Bölüm 2.5.3’te bu konu detaylı şekilde açıklanmıştır. Trenin kurbada durması veya yavaşlaması durumlarında aşağıdaki problemler ortaya çıkmaktadır:

- Durağan halde veya düşük hızlarda yolcu konforuna olumsuz etkisi,
- Küçük yarıçaplı kurbalarda düşük hızda dış rayda hareket eden tekerlekte yüksek yanal kuvvet ve düşük düşey kuvvetin oluşturduğu kombine etki ile yük trenlerinde derayman tehlikesi,
- Vagonlardaki yüklerin kayması, yer değiştirmesi.

Deverin uygulandığı yerlerde doğal olarak yatay düzlem ile yol düzlemi arasında bir açı

oluşur. Bu açı 2.4 fomülü ile hesaplanır. Şekil 2.21’de dever ve dever açısı gösterilmiştir.

$$\varphi_t = a \sin \frac{h_t}{2b_0} \quad (2.4)$$

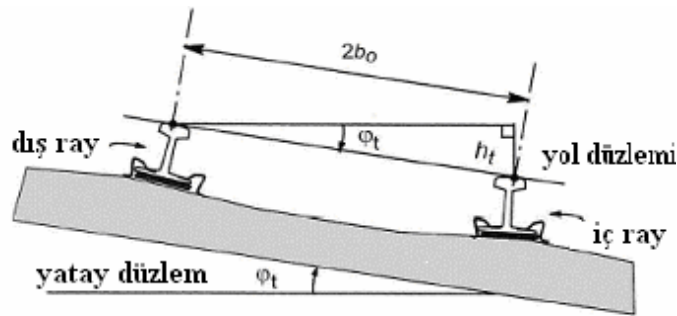
φ_t = dever açısı

h_t = dever (mm)

$$h_t = \frac{11,8V^2}{R} \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

$2b_0$ = hat genişliği (mm)

Yapılacak hesaplamalarda bu formül için hat genişliği $2b_0 = 1500\text{mm}$ standart olarak kabul edilir.



Şekil 2.21 Dever ve dever açısı

Güzergahın doğru kısmından doğrudan doğruya yatay kurbaya girilmesi halinde, bu kesimde dış raya dever miktarı kadar iç raya göre yükseklik fazlası verildiğinden, taşıt dingilleri deverin oluşturduğu çıkıntıyı aşamaz ve boyuna yönde bir çarpma olur. Diğer taraftan kurbaya girişte dengelenmemiş merkezkaç veya merkezci kuvvet ani olarak değişeceğinden enine yönde de bir şok etkisi oluşmaktadır. Bu nedenle deverin uygun bir uzaklıktan yavaş yavaş arttırılarak dairesel kurba başında “ h_t ” değerine ulaştırılması gerekir. Bu işlem üç biçimde gerçekleştirilebilir.

- Dış rayın kurbadan önce “L” uzaklığında yükseltilmeye başlanması,
- Kurba başından itibaren dış rayın yükseltilmeye başlaması,
- Dış rayın kurba başından önce, “L/2” uzaklığında yükseltilmeye başlaması.

Sözü edilen her üç çözümde “L” uzunluğunda sırasıyla merkezciil kuvvet, merkezkaç kuvvet ve ilk yarısında merkezciil, öteki yarısında merkezkaç kuvvet doğması nedenleriyle uygun değildirler.

Yapılması gereken, hem deverin ani olarak başlatılmasının olumsuz etkilerini yok etmek hem de yukarıdaki üç uygulama biçiminin sakıncalarını ortadan kaldıracak bir çözüm bulmaktır. Bu amaçla, deverin sıfırdan başladığı kesimle “ h_i ” değerine ulaştığı kurba kesimi arasında aşağıdaki özellikleri sağlayan bir eğri parçasının konulması gerekir. Güzergahın doğrudaki bölümü ile kurbanın başlangıcı arasında veya birbirini takip eden iki kurp arasında, eğrilikte ve yanal kuvvet değişiminde kademeli bir geçiş için kullanılan bu eğriye “*birleştirme eğrisi*” adı verilir.

Birleştirme eğrisinin özellikleri:

- Herhangi bir noktasında dış rayın o noktadaki yükselme miktarıyla dengelenecek bir merkezkaç kuvveti doğuran bir eğriliğin bulunması,
- Başlangıç noktasında güzergahın doğrudaki bölümüne, dış rayın yükselmesinin h_i 'ye eşit olduğu noktada da daireye teğet olması.

Birleştirme eğrisi boyunca deverin kademeli olarak değiştiği bölgelere *dever rampası* adı verilir.

2.4.2 Düşey Geometri

2.4.2.1 Eğim

Topoğrafik koşullardan dolayı yol boyunca farklı düşey-boyuna eğimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte köprü ve tüneller yaparak topoğrafik kısıtları aşmak maliyeti arttırmaktadır. Özellikle ağır yük trenlerinin işletildiği demiryolu hatlarında katarlar büyük boyuna eğimleri aşarken zorluk çekmektedir. Bu nedenle aşağıda verilmiş olan, büyük eğimlerde oluşabilecek durumlar gözönüne alınarak eğimin derecesi için kısıtlamalar yapmak gerekmektedir.

- Büyük eğimlerde gereken ve tüketilen enerji miktarı artar,
- Sıradan lokomotif ile çekilen ağır yük trenleri büyük eğimleri tırmanmakta güçlük yaşayabilir,
- Artan eğim ile birlikte YHT ve yük trenleri için frenleme ve hızlanma mesafesi artar.

Bu yüzden büyük eğimler prensipte ağır lokomotifler için daha fazla güç harcanmasına, ve/veya yük treni toplam ağırlığının azaltılması zorunluluğuna, ve/veya daha düşük hız ve hat kapasitesine, ve/veya yüksek fren kapasitesine, ve/veya daha büyük sinyal mesafesine sebep olmaktadır.

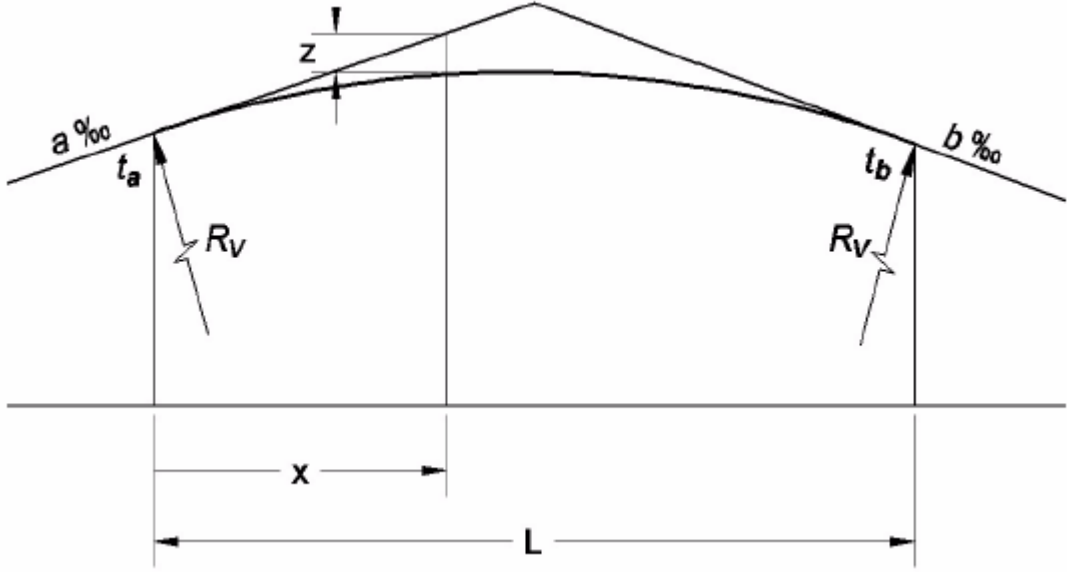
Demiryollarında kullanılan değişik eğim kavramları aşağıda belirtilmiştir;

- Ortalama eğim,
- Uygulama eğimi,
- Kurbalardaki, tünellerdeki eğimler,
- İstasyon eğimleri,
- Maksimum eğim,
- Zararlı ve zararsız eğimler,
- Negatif eğim,
- Ekonomik eğim,
- İstasyon başlangıcı ve sonundaki eğimler.

2.4.2.2 Düşey Kurp

Eğimlerin birleştiği noktalarda, dingillerin geçişinde, tekerleğin raya çarpması ile şoklar meydana gelmektedir. Bu sakıncaların giderilmesi için eğim değişikliklerinin birdenbire değil de yavaş yavaş yapılması gerekmektedir. Bunun için birbirini izleyen eğimler, birleştirme eğrisi olarak kullanılabilecek, eğimin değişimine uygun bir yarıçap kullanılarak, bir daire ya da parabol yayı ile birleştirilirler. Bu şekilde birbirini izleyen eğimlerin arasında düzgün bir geçişin gerçekleşmesini sağlayan geometrik şekillere düşey kurp adı verilir.

Tepe noktalarında düşey ivme fazla olduğu takdirde, taşıtın tekerleklerine etkiyen kuvvetler tekerleklerin raya tırmanmasına ve dolayısıyla deraymana neden olabilirler. Buna ilave olarak taşıtın yanal rüzgar etkisine karşı devrilme direnci de azalmaktadır. Önemli diğer bir konu ise yolcu konforunun sürekliliğinin sağlanabilmesidir. Birbirini takip eden iki eğimin nasıl düşey kurp haline getirilebileceği Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22 İki ardışık eğim arasında oluşan düşey geometrik durum

Şekil 2.22'deki parabolde boyuna yönde verilen herhangi bir x uzaklığındaki düşey mesafe aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$z(x) = -\left[\frac{(a-b)}{2000L}\right]x^2 = -\frac{Ax^2}{2000L} \text{ (m)} \quad (2.6)$$

z = belirli bir x uzaklığındaki düşey mesafe

A = eğimlerin cebirsel farkı ($a-b$)

L = tanjant noktaları arasında kalan kurbun uzunluğu (m)

$x = L/2$ için maksimum z değerini veren formül;

$$z\left(\frac{L}{2}\right) = e = -(a-b)\frac{L}{8000} \text{ (m)} \quad (2.7)$$

verilen formülde L değeri yerine konulursa;

$$L = \frac{R_v(a-b)}{1000} \text{ (m)} \quad (2.8)$$

R = Düşey kurp yarıçapı (m)

Belirli bir x uzaklığındaki z değeri aşağıdaki formül ile bulunur;

$$z\left(\frac{L}{2}\right) = -R_v \cdot \frac{(a-b)^2}{8 \cdot 10^6} \quad (\text{m}) \quad (2.9)$$

Düşey kurp yarıçapı ise aşağıdaki formül ile hesaplanmalıdır.

$$R_v = \frac{V_{maks}^2}{12,96 \cdot a_v} \geq R_{v,lim} \quad (\text{m}) \quad (2.10)$$

a_v = Düşey ivme

V_{maks} = Maksimum hız

Bağıntı 2.10'daki düşey ivme a_v optimum yol kalitesinin sağlanamadığı demiryollarında seyahat konforu düşünülerek seçilmelidir. Aynı zamanda tepe noktalarda tekerlekte tutunma kaybı ile oluşabilecek derayman tehlikesine dikkat edilmelidir. Bununla birlikte güvenlik limitleri maksimum a_v değeri aşılmadığı takdirde dikkate alınmamaktadır.

2.4.3 Geometrik Kalite

Bu bölümde demiryollarında istenen kaliteyi sağlamak için belirlenmiş limitlerden bahsedilmiştir. Standartlar genel olarak taşıt tepkilerine, ray/tekerlek kuvvetlerine ve taşıta etkiyen ivmelere dayanarak hesaplanmıştır. Yol geometrisi ile taşıt tepkileri arasındaki bağıntılar bilindiği takdirde, bahsedilen taşıt tepkileri, ölçülmüş yol geometrisi değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Bunun için çok hızlı bilgisayar ağına ihtiyaç vardır. Unutulmaması gereken yolun farklı geometrik bileşenleri için farklı tepkilerin meydana geleceğidir. Dolayısıyla maksimum taşıt tepkisi değerleri ile izin verilen yol geometrisi arasında özel bir bağıntı kurmak mümkün olmamaktadır.

Taşıt-yol arasındaki muntazam uyum için, yolun geometrik kalitesi yolun bakım kriterlerine bağlı olarak ifade edilir ve üç ayrı kalite seviyesi ile tariflenir.

- **QN1** yolun durumunun gözlemlenmesinin gerekli olduğu veya bakım planına uygun olarak düzenli ölçümlerin yapılması gerektiği değerler için belirlenmiş seviyedir.
- **QN2** kısa süreli bakım işlemlerine ihtiyaç duyulan değerleri belirtir.
- **QN3** yolun genel kalite standartlarını sağlamadığı durumlarda analizden hariç tutulmasını sağlayan değerleri ifade eder.

Çizge 2.11 Demiryolu geometrik kalite limitleri (Erel, 2006)

İzin verilen yerel hız (km/saat)	Doğrultu (Dresaj)		Boyuna Yükselti (Nivelman)	
	Kalite sınıfına göre bozukluk limiti (mm)		Kalite sınıfına göre bozukluk limiti (mm)	
	QN 1	QN 2	QN 1	QN 2
Mutlak maksimum değer $\Delta y_{\max}^0$ ve $\Delta_{\max}^0$ (ortalamadan sapma)				
$V \leq 80$	12	14	12	16
$80 < V \leq 120$	8	10	8	12
$120 < V \leq 160$	6	8	6	10
Standart Sapma Δy_{σ}^0 ve Δ_{σ}^0				
$V \leq 80$	1,5	1,8	2,3	2,6
$80 < V \leq 120$	1,2	1,5	1,8	2,1
$120 < V \leq 160$	1,0	1,3	1,4	1,7
Not: QN 1 uygulanamaz				

Taşıtların yarattığı dinamik etkileri sınırlandırmak için kabul edilebilir sınırlar belirlenmelidir. Her demiryolu elemanının vereceği tepki birbirinden farklı olacağından, standartlar sadece taşıt tepkileri için tanımlanmıştır. Yol geometrisindeki sapmalar, taşıtın tepkisini standartlarda belirtilen değerlerin üzerindeki değerlere çıkarmayacak şekilde olmalıdır. Geometri ve taşıt tepkileri arasındaki geçiş fonksiyonları bilindiği takdirde kayıtlı geometri değerleri kullanılarak taşıt tepkileri hesaplanabilir.

2.5 Demiryolunda Yol-Taşıtlı İlişkisi

Bu bölümde yol/taşıtlı ilişkisinde önemli olan büyüklüklere değinilecektir. Katarların bojilerinden seyir halinde yola iletilen kuvvetler göz önüne alınarak yola etki eden yanal yüklerin büyüklüğü belirlenir. Dolayısıyla yanal yükün belirlenmesinde aşağıdaki elamanların karakteristik özellikleri belirleyici olmaktadır:

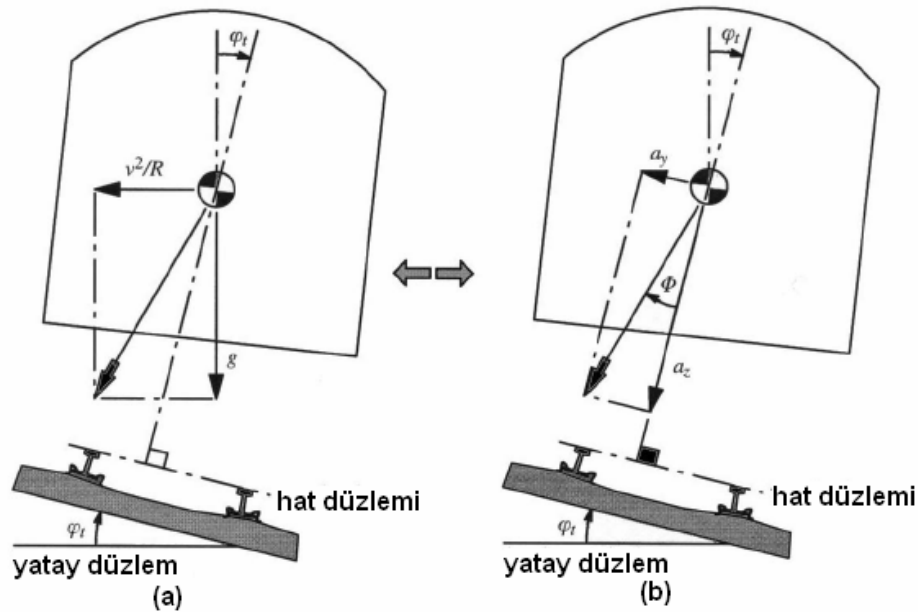
- Hat genişliği,
- Ray profilinin bozulması,
- Ray mantarının profili,
- Bandaj konikliği.

Aşağıdaki ifadeler ise yolda, makaslarda ve kesişim noktalarında oluşan düşey kuvvetin, yanal kuvvetin ve boyuna yönde etki eden kuvvetin büyüklüğünün belirlenmesinde etkili olurlar:

- Dever ve eksik dever,
- Yolun geometrik özellikleri ve kalitesi,
- Seyir direnimleri,
- Yanal rüzgar etkisi.

2.5.1 Kurbada Taşıta Etkiyen Kuvvetler

Mükemmel bir yol geometrisine sahip sabit yarıçaplı bir kurbada sabit hızda ilerleyen taşıt iki farklı ivmeye maruz kalır; yatay merkezkaç ivmesi ve yerçekimi ivmesi. Bu ivmelerin bileşke vektörü iki farklı bileşene ayrılabilir: yol düzlemine paralel olan a_y ve yol düzlemine dik olan a_z .



Şekil 2.23 Yanal ivme ve yanal kuvvet açısının bileşenleri

a_y ivmesine yanal ivme denir. Şekil 2.23’de verilen a_y yanal ivme ve yanal kuvvet açısı “ Φ ” için aşağıdaki denklemler yazılabilir. Eşitliklerde “ V ” taşıtın hızı, “ R ” kurp yarıçapını ifade etmektedir.

$$a_y = \frac{V^2}{R} \cdot \cos \varphi_t - g \cdot \sin \varphi_t = \frac{V^2}{R} \cdot \cos \varphi_t - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (m / sn^2) \quad (2.11)$$

$$a_z = \frac{V^2}{R} \cdot \sin \varphi_t + g \cdot \cos \varphi_t \quad (m / sn^2) \quad (2.12)$$

$(\varphi_t \leq 0.15rad)$ kabul edersek

$$a_y \approx \frac{V^2}{R} - g \cdot \sin \varphi_t = \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h_t}{2b_0} \quad (2.13)$$

$$a_z \approx g \quad (2.14)$$

a_y ve a_z ye bağılı olarak yanal kuvvet açısı (Φ) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\Phi = a \tan \frac{a_y}{a_z} \quad (2.15)$$

2.5.2 Teorik Dever ve Teorik Hız

Verilen bir R yarıçaplı kurpta ve verilen bir hızda yanal ivmeyi sıfır yapan devere “teorik dever” denir. Teorik dever (h_{eq}) 2.16 formülü ile ifade edilir;

$$h_{eq} \approx \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{V^2}{R} \quad (m) \quad (2.16)$$

2.16 eşitliği SI birim sistemindedir. Pratik olması için hızı (km/sa) ve deveri mm olarak göstermek gerekir;

$$h_{eq} \approx \frac{2b_{0,mm}}{g} \cdot \frac{V^2}{3,6^2 R} \quad (mm) \quad (2.17)$$

Formül standart hat genişliği (1500 mm) ve yer çekimi ivmesi (g) değerleri yerine koyularak sadeleştirilirse;

$$h_{eq} \approx \frac{1500}{9,81} \cdot \frac{V^2}{3,6^2 R} \approx 11,8 \frac{V^2}{R} \quad (mm) \quad (2.18)$$

Bu eşitlik (2.18) en çok bilinen ve kullanılan yöntem olmakla beraber, birimlere dikkat edilmelidir.

Verilen bir yarıçap ve dever için yanal ivmeyi sıfır yapan hıza teorik veya dengelenmiş hız denir.

$$V_{eq} = \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot h_t}{2b_0}} \quad (m/sn) \quad (2.19)$$

Teorik hızda yol düzlemindeki yanal ivme $a_y = 0$ olur. Standart hat genişliği için hız (km/sa) ve dever (mm) birimlerine göre belirtildiği takdirde formül aşağıdaki şekilde gösterilir.

$$V_{eq} = \sqrt{\frac{R \cdot h_{t,mm}}{11,8}} \text{ (km/sa)} \quad (2.20)$$

2.5.3 Eksik ve Fazla Dever

Birçok sebepten dolayı yanal kuvvetin tamamen telafi edilmiş olduğu durumlara ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bunun sebepleri:

- Bazen kurbalarda taşıtlar yavaşlamak ve durmak zorunda kalabilir bu gibi durumlar için maksimum dever sınırlandırılır. Diğer sebepler bölüm 2.2.1.3'te belirtilmiştir. Böyle durumlarda eksik devere ihtiyaç duyulmaktadır, ciddi büyüklükte telafi edilemeyen bir yanal kuvvet yol düzleminde etkisini sürdürmektedir.
- Her tren aynı hızda hareket edemeyeceğinden farklı yanal ivmeler etkisinde kalırlar. Bu yüzden tüm trenler için yanal kuvveti tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir.

Eğer uygulanan dever teorik deverden düşük olursa *eksik dever* kavramı ortaya çıkar. Teorik dever (h_{eq}) ile uygulanan dever (h_t) arasındaki farka “eksik dever” (h_d) adı verilir. Yol geometrisi belirlenirken ilk olarak maksimum hıza karar verildikten sonra, belirlenecek ikinci parametre eksik dever olmalıdır. Buna göre hız arttıkça eksik deverin azalması mümkün olmaktadır. Aşağıdaki formül ile eksik dever hesaplanır.

$$h_d = h_{eq} - h_t \quad (2.21)$$

2.16 eşitliği 2.21 eşitliğinde yerine konulur ise SI birim sisteminde aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$h_d = \frac{2b_0}{g} \cdot \frac{V^2}{R} - h_t \text{ (m)} \quad (2.22)$$

2.22 eşitliğinin daha genel ifadesi 2.23 eşitliğinde gösterilmiştir. Hız (km/sa) ve dever (mm) birimleriyle verilmiştir.

$$h_d = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - h_t \text{ (mm)} \quad (2.23)$$

2.13 ve 2.23 eşitliklerini kullanarak SI birim sistemi için eksik dever ile yanal ivme arasındaki ilişki 2.24 bağıntısında gösterilmiştir.

$$h_d = \frac{2b_0}{g} \cdot a_y \text{ (mm)} \quad (2.24)$$

$$(a_y > 0)$$

Eğer uygulanan dever teorik deverden fazla ise fazla dever kavramı ortaya çıkar. Fazla dever uygulanan dever (h_t) ile teorik dever (h_{eq}) arasındaki farktır.

$$h_e = h_t - h_{eq} \quad (2.25)$$

Fazla dever; taşıtın yolun tasarım hızından daha düşük hızlarda hareket ettiği durumlarda meydana gelir. Fazla dever 2.19 eşitliğinde verilmiş olan eksik dever gibi yanal ivme ile ilişkilendirilebilir.

$$h_e = -\frac{2b_0}{g} \cdot a_y \quad (2.26)$$

burada, $a_y < 0$ $h_e > 0$ olmaktadır.

2.5.4 Limit Hız

Belirli bir yatay kurp yarıçapı ve izin verilen yanal ivme ($a_{y,\text{lim}}$), veya izin verilen eksik dever ($h_{d,\text{lim}}$) için, müsaade edilebilecek hız farklı ifadeler ile açıklanabilir:

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{R(a_{y,\text{lim}} + g \cdot \frac{h_t}{2b_0})} = \sqrt{\frac{R \cdot g}{2b_0}(h_{d,\text{lim}} + h_t)} \text{ (m/sn)} \quad (2.27)$$

2.27 eşitliğinde SI birimleri kullanılmıştır. Alternatif olarak 2.28 denkleminde hız V_{lim} (km/sa) dever h_t ve izin verilen eksik dever $h_{d,\text{lim}}$ (mm) olarak verilmiştir. Yarıçap her zaman metre olarak verilmektedir. Standart hat genişliği kabulü yapılmıştır.

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{R(h_{d,\text{lim}} + h_t) \cdot \frac{12,96g}{2b_0}} = \sqrt{\frac{R(h_{d,\text{lim}} + h_t)}{11,8}} \text{ (km/sa)} \quad (2.28)$$

2.5.5 Deverin Zamana Göre Değişimi (Deverin Eğimi)

Bu bağıntı doğrusal dever rampalarında deverin eğimini hesaplamak için kullanılmaktadır. Δh_t , L_t birleştirme eğrisi boyunca deverin değerindeki değişimi ifade etmektedir.

$$\frac{dh_t}{dt} = \frac{\Delta h_t \cdot v_{\max}}{L_t} \quad (2.29)$$

Deverin değişimi:

Dever eğiminin üniform olduğu durumlarda deverin değişimi CEN standartlarına göre istenen şekilde aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır. Δh_t uygulanan deverin değişimini ifade etmektedir.

$$i = \frac{dh_t}{dt} = \frac{\Delta h_t \cdot V_{maks}}{3,6 \cdot L_t} \leq \left(\frac{dh_t}{d_t}\right)_{\lim} \quad (2.30)$$

2.5.6 Eksik Deverin Zamana Göre Değişimi

Eksik deverin değişimi yanal ivmenin zamana göre değişimi anlamına gelmektedir. Başka bir adı “sademe”dir. Eğriliğin doğrusal değiştiği birleştirme eğrileri, deverin doğrusal değiştiği dever rampaları için aşağıdaki eşitlik yazılabilir. Δh_d eksik deverin değişimidir.

$$\frac{dh_d}{dt} = \frac{\Delta h_d \cdot v_{\max}}{L_t} \quad (2.31)$$

$$\frac{dh_d}{dt} = \frac{\Delta h_d \cdot V_{maks}}{3,6 \cdot L_t} \leq \left(\frac{dh_d}{d_t}\right)_{\lim} \quad (2.32)$$

Δh_d = eksik deverin değişimi

L_t = birleştirme rampasının uzunluğu

3. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLUNUN İNCELENMESİ

Yüksek hızlı ulaştırma sistemleri altında 2 farklı teknoloji yer almaktadır; YHD ve MagLev (Manyetik Levistasyon). Her iki sistem de, seyahat konforu ve yüksek hız gibi yüksek hızlı ulaştırma sistemlerinin temel karakteristiklerine sahip olmakla birlikte, yol inşaa farklılıkları ve gereksinimleri, güç kaynakları, işletme karakteristikleri, çevre etkileri ve maliyet kalemlerinde önemli ölçüde farklılıklar göstermektedirler. Sistemlerin hayata geçirilmesi maliyet, politik istekler, sosyal ve kültürel kabullere bağlı olarak yapılmaktadır. Bu çalışma YHD hakkında yapılmıştır, MagLev konusuna girilmemiştir .

Yüksek hızlı demiryolları, elektrik gücüyle çalışan trenler ile 200 km/sa hızın üstünde seyahat etmeye olanak sağlayan demiryolu ulaştırma sistemlerine verilen genel isimdir. Günümüzde şehirlerarası yolculuklarda ortaya çıkan seyahat talebi ve oluşan trafik sıkışıklığı gibi problemler yüksek hızlı ulaştırma sistemlerine olan ihtiyacı zorunlu hale getirmiştir. Artık trafik sıkışıklığı problemleri sadece gelişmiş şehirlerde ve nüfus yoğunluğunun fazla olduğu endüstriyel ülkelerde değil, aynı zamanda kırsal bölgelerde ve gelişmekte olan ülkelerde de ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızı, işletim güvenliği, seyahat güvenliği ve mükemmel güvenlik değerleri ile yüksek hızlı ulaştırma sistemleri şehirlerarası ulaşım problemlerine gerçek bir çözüm olmaktadır .

Dünyada toplam yüksek hızlı demiryolu ağı günümüzde 8000 km'ye ulaşmıştır. Japon Shinkansen, Fransız TGV ve Alman ICE sistemleri demir tekerlek–demir ray sisteminin başarılı örnekleridir. Farklı ülkeler YHD'nı farklı şekilde geliştirmektedirler. Japonya sadece standart hat genişliğinin kullanıldığı bağımsız bir YHD sistemini geliştirmiş olup YHT'leri sadece bu hatlarda işletmektedir. Fransa demiryolu ağını YHT'leri mevcut hatlarda işletilebilecek şekilde oluşturmuştur.

Bu sistemler geleneksel demiryolu taşımacılık bilgisinin yüksek teknoloji ile birlikte geliştirilmesi ile kullanıma hazır hale getirilmişlerdir. YHD'ları şimdiye kadar taşımış oldukları beş milyardan fazla yolcu ile kullanımlarındaki faydayı ve güvenliklerini ispatlamışlardır.

Günümüzde YHD'nda özel trenler ile 350 km/sa hızda işletim yapılabilmektedir. Dünyada YHD'nda hız rekoru 515,3 km/sa ile TGV trenlerine aittir. Gelecekte Avrupa'da ve Japonya'da, YHT ile 350-360 km/sa hızda seyahat edebilmek mümkün olacaktır.

Bu hızlarda yola dışarıdan gelebilecek olası yabancı maddelere karşı (insan, hayvan, karayolu

taşıtlarından düşebilecek maddeler gibi) yol her iki tarafından çitler ile bulunduğu ortamdan izole edilir. YHD’da diğer ulaştırma sistemleri ile kesişen noktalar olamaz ve trenler tamamen yeni ve hata payı konvansiyonel hatlardakinden çok daha düşük olmak zorunda olan yollarda hareket ederler. Aynı zamanda YHD için özel otomatik tren kontrol sistemleri ve sinyalizasyon sistemleri mevcuttur.

Dünyada muazzam sayıda YHD inşaatı devam etmektedir. Balastlı yollar halen popüler olmakla birlikte rijit yol inşaatları her geçen gün artmaktadır. Rijit yolun önemli avantajları arasında düşük bakım masrafları, kolay uygulanabilirliği, yapı yüksekliğinin az olması ve ağırlığının düşük olması sayılabilir.

Yeni yapılacak yolların tasarımında kullanım ömrü, inşaat süresi ve uygulanabilirliği önemli rol oynamaktadır. Bu kriterler göz önüne alındığında rijit yol özellikleriyle öne çıkmaktadır. Yüksek hızlı demiryollarında, özellikle zayıf altyapıya sahip alanlarda, hıza bağlı olarak trenin yarattığı titreşim önemli olmaktadır. Bu gibi yerlerde genellikle rijit yola karar verilmektedir.

Trafik yoğunluğunun artması nedeni ile mevcut hatlarda bakım ve iyileştirme çalışmalarını yapmak günden güne zorlaşmaktadır. Hollanda’da bakım süresi gece 5 saati aşmayacak şekilde düzenlenmiştir. Kore’deki 435 km’lik Pusan-Seul hattında gecelik bakım süresi 1.5 saati aşmayacak şekilde planlanmıştır. Bu bilgilerin ışığında düşük bakım gerektiren yolların tasarımındaki artış şaşırtıcı olmamaktadır (Esveld, 2005).

3.1 Japonya ve Asya’da Yüksek Hızlı Demiryolları

Japonya’da 1872 yılında ilk demiryolu hattının açılmasından bugüne kadar yapılan yeni demiryolları ile toplam demiryolu ağı 30000 km’yi aşmıştır (Papageorgiou 1991). Günümüzde Japonya’da YHD ağının uzunluğu 1850 km’den fazladır ve büyük şehirler arasında yılda 300 milyondan fazla yolcu taşınmaktadır. Dünyanın ilk ve en kalabalık YHD hattı olan, 1964 yılında hizmete açılmış 550 km’lik Tokyo-Osaka bağlantısı günde ortalama 360000 yolcu taşımaktadır. Şekil 3.1’de Japonya’daki yüksek hızlı demiryolu ağı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Japonya'daki yüksek hızlı demiryolu ağı

1964 yılından bu yana toplam 4 milyar yolcu taşımış olmasına rağmen Shinkansen trenleri kusursuz bir güvenlik rekoruna sahiptir ve ortalama 24 saniyelik sapma ile neredeyse kusursuz bir zaman çizelgesi ile hareket etmektedirler (California High-Speed Rail Authority, 2000). Shinkansen demiryolu kontrol sistemi, COMTRAC adı verilen, kalkış-varış zamanları, hatların numaraları ve tren konfigürasyonu gibi işletmesel bilgileri sağlayan bir kontrol sistemi ile sağlanır. Shinkansen hatlarının özellikleri aşağıda verilmiştir (Papageorgiou, 1991):

- Yolun inşaatı olabildiğince az eğim ve kurp olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede trenlerin sabit yüksek hızlarda işletilmesine imkan tanınmıştır.
- Otomatik tren kontrol sistemi ile trenlerin otomatik işletimi güvenli bir şekilde sağlanmıştır.
- Merkezi trafik kontrol merkezi ile tüm trenlerin zaman çizelgeleri yapılabilmektedir.
- Tüm yollara 2 ayrı bariyer konularak güvenlik sağlanmış ve kanunlar ile yola giriş yasaklanmıştır.
- Tüm trenler aynı performas ile aynı hızda hareket edebilmektedir.
- Japonların belirlemiş olduğu standartlar ile katarların üretim ve bakım maliyetleri azalmıştır.
- Yolda meydana gelen bozukluklar yolcu trenleri ile aynı hızda hareket edebilen bakım trenleri ile tespit edilebilmektedir.

- Yolcular yapılmış olan tren çizelgesi ile neredeyse her an tren bulabilmektedir.
- Rezervasyonlar merkezi bilgisayar tarafından takip edilmektedir. Bu şekilde çok daha uygun ve güvenilir bir sistem yolcuların hizmetine sunulabilmektedir.

Şekil 3.2’de 1964 yılından bu yana Japonya’daki yüksek hızlı demiryolu yolcu trafiğinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Japonya’da 1964 yılından bugüne YHD’nda yolcu trafiğinin gelişimi(milyon-yolcu)

Günümüzde diğer asya ülkeleri kendi YHD’lerini oluşturmak için çalışmalarına hız kazandırmışlardır. Kore’de 2004 yılında hizmete girmiş KTX hızlı trenleri ile şimdiye kadar 40 milyondan fazla yolcu taşınmıştır. Tayvan ise yeni bir YHD sistemi inşaatına başlayacaktır.



Şekil 3.3 Shinkansen demiryoluna ait bir resim

3.2 Avrupa’da Yüksek Hızlı Demiryolları

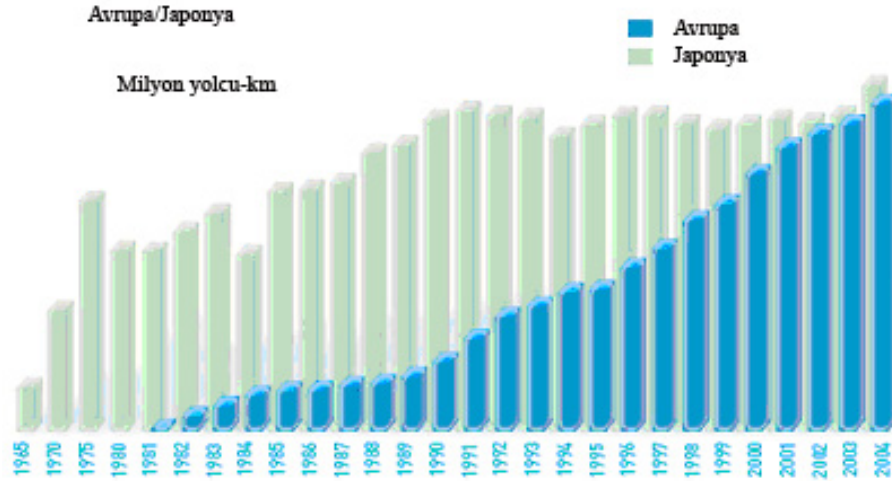
Avrupa’da ilk hızlı tren 1976 yılında, Roma-Floransa arasında yapılan ve 1992 yılında tamamlanmış olan hattın küçük bir kısmında işletilmeye başlamıştır. 1960’lar ile 1970’lerin başında planlanmaya başlanmış olan yüksek hızlı demiryolları, ancak 1981’de Fransa’da ve 1991’de Almanya’da gerçek anlamda işletilmeye başlanmıştır. Avrupa’da yüksek hızlı trenler sadece yüksek hız için ayrılmış hatlarda işletilmemekte, aynı zamanda mevcut “geliştirilmiş” hatlarda daha düşük hızlarda işletilebilmektedir. Bu şekilde YHT’ler ile daha geniş bir alanda yüksek hızlı hizmet verilebilmektedir. Avrupa’da 250 km/sa’in üstünde hıza izin verilen yeni yapılan hatların uzunluğu 3750 km’dir. Her yıl 170 km yol bu miktara eklenmektedir (UIC, 2005).

Fransa’da TGV, 298 km’lik YHD hattına ilave olarak 880 km’lik “iyileştirilmiş” bir demiryolu ağında hizmetine başlamıştır. Günümüzde TGV, 1280 km’nin üstünde yüksek hıza adanmış demiryolunda ve 5600 km’nin üstünde “geliştirilmiş” demiryolunda işletilmekte ve yılda 45 milyondan fazla yolcu taşımaktadır. 2005 yılının temmuz ayında yoğun bir haftasonu tatilinde 1000 setten fazla TGV treni ile hizmet verilmiştir. İspanya’da Madrid-Sevilla arasındaki YHD hattında bir haftasonu tatilinde 136 tren ile 47000’den fazla yolcu taşınmıştır.



Şekil 3.4 TGV demiryoluna ait bir resim

Şekil 3.5’de Avrupa ile Japonya’ya ait yüksek hızlı demiryolu yolcu trafiğinin gelişimi gösterilmiştir. Şekil 3.5’de görülen fark, Japonya’da kişi başına yüksek hızlı demiryolu seyahatinin 2,27 seyahat/yıl olmasına karşın, Avrupa’da bu rakamın kişi başına ortalama 0,38 seyahat/yıl olmasıdır.



Şekil 3.5 Avrupa ve Japonya’da YHD için yolcu trafiğinin değişimi (UIC, 2005)

Avrupa’da geçtiğimiz 10 yıl içerisinde YHD ağı 1.7 kat, trafik (yolcu-km) ise 2.6 kat artmıştır. Yüksek hızlı trenler günümüzde İngiltere, Fransa, Belçika, Almanya, İsveç, İtalya ve İspanya’da işletilmekte ve bir çok ülkeyi birbirine bağlamaktadır. İleride tüm Avrupa’da bütünleştirilmiş bir YHD ağı oluşturulması planlanmaktadır. 2010 yılında, Avrupa’da yeni yapılmış YHD’nın uzunluğunun 6000 km olması planlanmaktadır.

Avrupa’da, 2010 yılında muhtemel yüksek hızlı demiryolu ağı şekil 3.6’daki gibi olacaktır.



Şekil 3.6 Avrupa’da 2010 yılında oluşacak yüksek hızlı demiryolu ağı

UIC’ye üye olan 13 güney doğu avrupa ülkesinde planlanan yüksek hızlı demiryolu ağı şekil 3.7’deki haritada gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Güneydoğu Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağı

Bu ülkelerin çoğunun demiryollarında aşağıdaki özellikler görülmektedir (UIC, 2001);

- Altyapı ve katarlar eskidir, dolayısıyla sistem yaşlıdır,
- Yetersiz ödenek,
- Zorlu topoğrafik koşullar,
- Nispeten düşük hızlar (birçok ana hatta ortalama hız 60 km/sa) 250 km/sa hız için geçici kabul edilebilir hız en az 160 km/sa olmalıdır.

Ortalama işletim hızının 60 km/sa olduğu birçok demiryolu için birdendire 250 km/sa gibi yüksek bir hıza ulaşmak gerçekçi olmayan bir hedef olarak görünmektedir. Bunun yerine orta vadede 160 km/sa maksimum hıza ulaşmak daha uygun bir hedef olarak belirlenmiştir. Bu şekilde iyileştirilen hatlar için “yüksek kaliteli hatlar” veya “yüksek performanslı hatlar” terimleri kullanılmaktadır.

3.3 Amerika’da Yüksek Hızlı Demiryolları

New York ile Washington arasında işletimde olan Amtrak sistemi Amerika’da yüksek hız standartlarında çalıştığı kabul edilen tek sistemdir. Metroliner trenleri ortalama 200 km/sa hız ile 362 km’lik mesafeyi 3 saatten az sürede kat edebilmektedir.

3.4 Yüksek Hızlı Demiryollarının Diğer Ulaştırma Türleri ile Karşılaştırılması

Demiryolu ulaşımı, diğer ulaştırma türleri ile karşılaştırıldığında düşük hızından dolayı yetersiz kalmaktadır. Kural olarak özel oto ile ulaşım kısa mesafede, havayolu ise uzun mesafede baskın olmaktadır. En azından bu baskınlığı ortadan kaldırmak için orta-uzun mesafede demiryolunda hız 200 km/sa’e çıkarılmalıdır (Papageorgiou M., 1991). Aksi takdirde, tür seçimine büyük etkisi olan, yolcunun sisteme ulaşmak için kaybettiği zaman olan erişim süresinin de dahil olduğu kapıdan-kapıya taşıma süresi diğer sistemlerden daha fazla olmaktadır. Yüksek hızlı demiryolları özellikle Avrupa ve Japonya’daki gibi orta-uzun mesafeler için (160-800 km) ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgeler için yüksek verimli, güvenilir, güvenli ve keyifli bir yolculuk sağlayarak, yolcuların seyahat talebini karşılama potansiyeline sahiptir. Yüksek hızlı demiryolları son 20 yılda göstermiş olduğu gelişimle, hava ve karayolu taşımacılığının baskın olduğu gelişmiş ülkelerde demiryollarına büyük miktarda yolcu kazandırmıştır. YHD’nın diğer ulaştırma sistemlerine göre sağladığı faydalar; seyahat süresinde kazanç sağlaması, daha az enerji ihtiyacı, gürültü ve hava kirliliği gibi çevreye olan etkilerinin düşük olması olarak belirtilebilir. YHD, yolcu başına otomobil ve uçak yolcusu kadar enerji kullanılarak güvenli, verimli ve zevkli yolculuk sağlar.

Kaza istatistikleri (milyar yolcu-km başına ölüm) açısından farklı ulaştırma türleri karşılaştırıldığında YHD ile havayolu en güvenli türler olmaktadır. Katedilen mesafe baz alındığında demiryolu taşımacılığı, karayol taşımacılığına göre 40 kat daha güvenli olmaktadır. Yapılan yolculuk sayıları karşılaştırıldığında, karayolunda ölümlü kaza geçirme riski demiryoluna göre 125 kat fazla olmaktadır.

Ne varki, Kuzey Almanya’da, 3 Haziran 1998 Çarşamba günü, 193 km/sa hız ile seyir halinde olan bir hızlı tren derayman sonucu bir üstgeçidin ayağına çarpmıştır. 101 insanın öldüğü 88 insanın yaralandığı bu kaza YHD tarihine geçen en kritik kaza olmuştur. Bu kaza 1991 yılından beri işletimde olan ICE adı verilen Alman hızlı trenlerinin ilk kazasıdır. Kaza gününe kadar 7 yıldan fazladır işletimde olan ICE trenleri, Almanya’nın en büyük şehirleri arasında 130 milyondan fazla yolcu taşımıştır.

YHD genel olarak maliyet ve seyahat süresi açısından, şehir merkezinden şehir merkezine hızlı ulaşım imkanı sağladığı için havayolu taşımacılığı ile karşılaştırılır. Aynı zamanda YHD, şehirlerarası seyahatlerde maliyet ve seyahat süresi açısından özel oto ile rekabet edebilmektedir.

Otomobil, otobüs, tren ve uçak gibi modern ulaştırma türleri sadece gelişmiş ülkelerde kullanılmamakta aynı zamanda gelişmekte olan ülkelerde de kullanılmaktadır. ABD’de şehirlerarası yolculukların büyük bölümü otomobil ve havayolu ile yapılmaktadır. ABD ulaştırma departmanına (1997) göre havayolu ve otomobilin pazardaki payı %97 olmaktadır. Çin’de otomobil sahipliliği önemli ölçüde artıyor olmasına rağmen seyahat eden yolcuların sayısının 1/3’ü şehirlerarası trenleri kullanmaktadır. Otomobil ve havayolu türlerinde seyahat talebinin artmasıyla çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Bunları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Seyahat süresinin artması,
- Maliyetlerin artması,
- Kaza oranlarının artması,
- Çevre kirliliğinin artması,
- Enerji tüketiminin hızlanması.

Finansal açıdan bir sistemin karlı olmaması o sistemin yapılmayacağı anlamına gelmeyeceği gibi, karlı olması da kesinlikle yapılacağı anlamına gelmemektedir. Hangi ulaştırma sisteminin seçileceği ancak ekonomik sebepler, politik sebepler, sosyal ve çevreye olan etkiler göz önüne alınarak tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte özellikle havayolu ve karayolu sistemlerinin yetersiz kaldığı veya arzulanan seviyeye ulaşamadığı şehirlerarası ağlarda YHD’na öncelik vermek mantıklı görünmektedir. Çizelge 3.1’de karayolu, havayolu ve YHD türleri için maliyet bileşenleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Başlıca ulaşım türlerinin maliyet bileşenleri (Levinson, D., Gillen, D., Kanafani, A., Mathie, J., 1996)

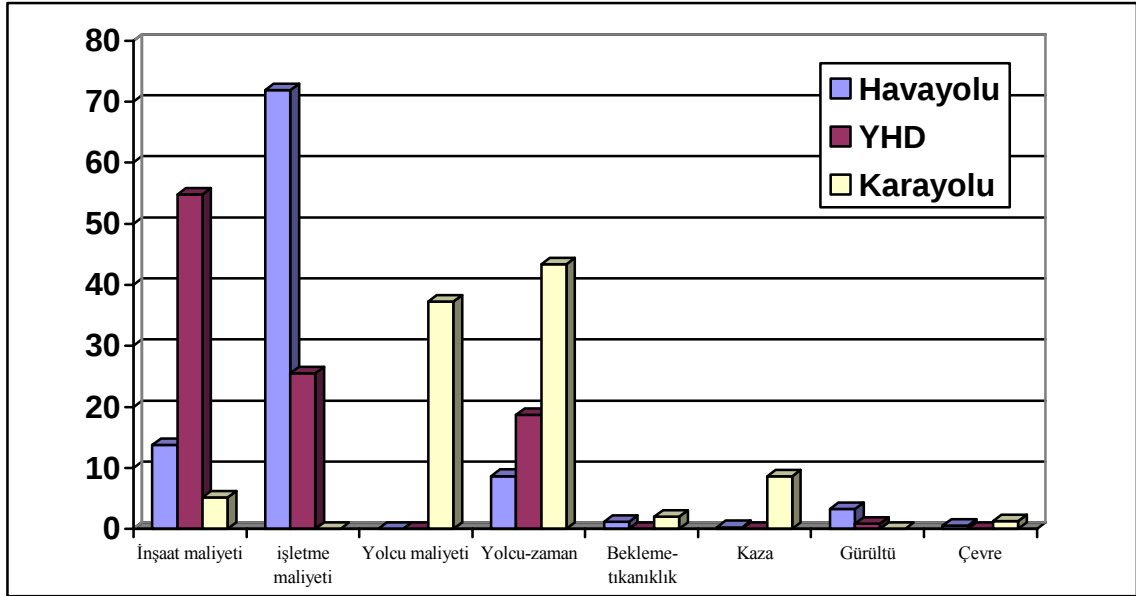
Karayolu	İnşaat: arazi, sermaye, işletme, sinyalizasyon, bakım Yolcu maliyeti: taşıt sahipliği ve kullanımı, zaman Sosyal maliyet: hava kirliliği, gürültü kirliliği, güvenlik, tıkanıklık
Havayolu	Havacılık sistemi: hava trafik kontrolü, sermaye ve işletme Havaalanı: arazi, sermaye, bakım, işletme İşletme maliyeti Yolcu maliyeti: zaman Sosyal maliyet: hava kirliliği, gürültü kirliliği, güvenlik, tıkanıklık
YHD	İnşaat: arazi, sermaye, işletme ve bakım maliyetleri Taşıtlar: sermaye, işletme ve bakım Yolcu maliyeti: zaman Sosyal maliyet: hava kirliliği, gürültü kirliliği, güvenlik, tıkanıklık

Çizelge 3.2’de uzun vadede başlıca ulaşım türlerinin ortalama maliyet bileşenleri gösterilmiştir. Şekil 3.8’de Çizelge 3.2’de verilen bileşenler karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Uzun vadede ortalama maliyetin bileşenleri (Amerika, Kaliforniya Eyaleti için) (Levinson, 1993)

Maliyetin Tanımı	Havayolu	YHD	Karayolu
İnşaat maliyeti	%13,8	%54,8	%5,2
İşletme maliyeti	%71,9	%25,5	%0,0
Yolcu maliyeti	%0,0	%0,0	%37,3
Yolcu zaman maliyeti	%8,7	%18,7	%43,4
Bekleme-tıkanıklık maliyeti	%1,2	%0,0	%2,0
Kaza maliyeti	%0,3	%0,0	%8,6
Gürültü maliyeti	%3,3	%0,9	%2,0
Çevre maliyeti	%0,6	%0,0	%1,3

Karayolunda bir taşıt 1.5 yolcu olarak kabul edilmiştir. Yuvarlamadan dolayı toplamlar tam %100 etmemektedir.



Şekil 3.8 Uzun vadede ortalama maliyetin bileşenleri

Çizelge 3.2’de dikkat edilmesi gereken nokta mevcut durumda Kaliforniya’da havaalanı ve karayolu ağının zaten var olduğudur. YHD için ise sıfırdan bir inşaat yapılması öngörülmüştür. Uzun vadede YHD sisteminin yolcu maliyeti, kaza oranı, bekleme-tıkanıklık ve çevre etkisi olmaması bu sistemi avantajlı kılmaktadır.

Bir mühendislik projesinden bahsedildiğinde maliyet kaleminden bahsetmeden geçmek mümkün olamayacağından YHD’na dünyada verilen önemi ifade eden büyüklükler Çizelge 3.3 ve 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Dünyadaki YHD yatırımlarının büyüklüğü

İşletimde olan 8750 km yol	170 milyar Euro
İnşaatı devam eden 6240 km yol	109 milyar Euro
Planlanan hatlar 3040 km	84 milyar Euro

Çizelge 3.3’de teknolojinin ilerlemesi ile YHD inşaat maliyetlerinde meydana gelen azalma açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.4 YHD projelerinin toplam maliyeti

Proje geliřtirmeye harcanan miktar	8,5 milyar Euro
İnřaata harcanan miktar:	170 milyar Euro
- Altyapı	105 milyar Euro
- Yol	30 milyar Euro
- Enerji ihtiyacı	15 milyar Euro
- Güvenlik ve sinyal araçları	20 milyar Euro
Katarların satınalma maliyeti	26 milyar Euro

Çizelge 3.4’de dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, YHD hatlarının proje geliştirme maliyetinin toplam inşaat maliyetinin %5’i kadar olduğudur. Yapılan her mühendislik projesinde tasarım aşamasının ne kadar önemli olduğu YHD inşaatlarında da karşımıza çıkmaktadır. 1994 yılına ait verilere göre Fransız TGV hatları için toplam maliyet Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 TGV hatlarının maliyetleri

Hat	Uzunluk (km)	Maliyet (US \$)	Km başına maliyet (US \$)
Güney-Doğu	1004	2.058.000.000 \$	2.049.000 \$
Atlantik	726	1.724.000.000 \$	2.375.000 \$
Akdeniz	800	4.047.000.000 \$	5.058.000 \$
Doğu	1080	4.371.000.000 \$	4.047.000 \$
Toplam	3610	12.200.000.000 \$	3.380.000 \$

2003 yılına ait dolar paritesine göre New York-Montreal arasında yapılması planlanan 300 km’lik YHD’nun maliyetleri Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Son yirmi yılda Avrupa’da (1981-2001) işletimde olan hatlar göstermiştir ki; YHD, diğer ulaştırma sistemlerinin (havayolu, özel oto ve otobüs) kullanıldığı herhangi bir şehirlerarası hatta tüm pazarın %50’sini ele geçirebilmektedir. Hatta, sadece havayolu olan bir hatta pazarın %80-90’ını ele geçirmektedir (Pita).

Çizelge 3.6 New York-Montreal hattının maliyeti (Parsons-Clough, 2003)

İş	Birim	Miktar	Birim Maliyeti	Toplam Maliyet (milyon \$)
Toprak işleri	m ³	91.450.000	5\$	458\$
Çift hat	m	300.000	600\$	180\$
Çeşitli inşaat işleri	m	300.000	500\$	150\$
Büyük köprü	m	19.352	20.000	387\$
Tünel	m	5.840	131.000	765\$
Küçük köprü	adet	125	650.000	81\$
İstasyon	adet	3	5.000.000	15\$
Bakım binaları	götürü			50\$
Sinyal ve haberleşme	km	300	650.000	195\$
Alt Toplam				2.281\$
İdari işler	%15			342\$
Tasarım/Çevre etkisi	%20			456\$
Riskler	%35			798\$
Genel Toplam				3878\$

Arazi kullanımı yeni yapılacak sistemin seçiminde etkili olacağından Çizelge 3.7’de YHD ile karayolu arazi kullanımı karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 YHD ve karayolu karşılaştırmalı arazi kullanımı

Yüksek Hızlı Demiryolu	Karayolu
Çift hat	2X3 şerit
25 m	75 m
12 tren/yön-saat	4500 otomobil/yön-saat
666 yolcu/tren	1,7 yolcu/otomobil
Kapasite = 8000 yolcu/saat	Kapasite = 7650 yolcu/saat

3.5 Yüksek Hızlı Demiryolları için Geometrik Standartlar

Bir demiryolu hattının etüdü, tasarımı ve işletimi için bilinmesi gereken en önemli karakteristikleri geometrik özellikleridir. Bölüm 2.4’de demiryollarının geometrik karakteristiklerinden bahsedilmiştir. Geometrik karakteristikler güvenlik açısından kritik olarak değerlendirilmeli ve detaylı olarak incelenmelidir. Bu bölümde YHD’nda geometrik karakteristiklerin büyüklüklerinin ne olması gerektiği açıklanmıştır.

3.5.1 Hat Genişliği

YHD inşaatı sırasında yol boyunca hat genişliğinde oluşacak farklılıklar için kabul edilebilir limitler konvansiyonel demiryoluna göre çok daha az olmaktadır. Bazı YHT'ler şehir merkezlerine giriş ve çıkışlarda ve hatta bazı iyileştirilmiş hatlarda mevcut konvansiyonel trenlerin hatlarını kullanırlar. Buna ilave olarak uluslararası taşımacılık için gereklilikler de gözönüne alındığında YHD için hat genişliği demiryolları için standart hat genişliği olan 1435 mm seçilmiştir.

3.5.2 Geometrik Kalite

Bu bölümde YHD'nda istenen kaliteyi sağlamak için uygulanması gereken standartlar verilmiştir. Bölüm 1.4.3 Geometrik kalite bölümünde anlatıldığı üzere YHD'nda geometrik kalite limitleri Çizelge 3.8'deki gibi olmaktadır.

Çizelge 3.8 YHD için geometrik kalite limitleri (Erel, 2006)

İzin verilen yerel hız (km/saat)	Doğrultu (Dresaj)		Boyuna Yükselti (Nivelman)	
	Kalite sınıfına göre bozukluk limiti (mm)		Kalite sınıfına göre bozukluk limiti (mm)	
	QN 1	QN 2	QN 1	QN 2
Mutlak maksimum değer $\Delta y_{\max}^0$ ve $\Delta_{\max}^0$ (ortalamadan sapma)				
$160 < V \leq 200$	5	7	5	9
$200 < V \leq 300$	4	6	4	8
Standart Sapma Δy_{σ}^0 ve Δ_{σ}^0				
$160 < V \leq 200$	0,8	1,1	1,2	1,5
$200 < V \leq 300$	0,7	1,0	1,0	1,3
Not: QN 1 uygulanamaz				

Yüksek hızda ray – tekerlek kuvvetleri ve taşıtın gövdesinin ivmelenmesi kabul edilebilir limitlerde olmalıdır. Taşıtın etki altında kalacağı kuvvetler yol geometrisinden direkt olarak etkilenmektedir. Kurbalarda oluşan hemen hemen statığe yakın kuvvetlere ek olarak tepki kuvvetlerinin bileşenleri dinamik kuvvetleri oluşturmaktadır. Dinamik bileşenler ikiye ayrılmaktadır;

- dengeli düşük frekanslı kuvvetler,
- yüksek frekanslı çarpma etkisi ile kaynak yerlerinde ve tekerleğin yassılaşmasından oluşan yüksek frekanslı kuvvetler.

Tüm standart sapmaları 0-25 metre dalga aralığında kabul ederek incelemek çok genel kalmaktadır. Bu dalga aralığı Q ve Y kuvvetlerini tam olarak kapsar ancak taşıt gövdesine etkiyen ivmeler daha uzun dalgalardan oluşmaktadır. 0,7-0,9 Hz aralığında doğal frekanslar içinde 300 km/sa'te baskın olan dalga boyu 119-93 metre olmaktadır. Bu yüzden toplam ölçme menzilin dalga boyu uzunluğu 120 metre kabul edilmektedir. Bu dalga boyu da tek bir standart sapmayı hesaplamak için çok uzun olduğundan aşağıdaki şekilde üç bölümde incelenmektedir:

- 3-25 metre: Q ve Y kuvvetleri, buraj işlemleri ve yerel bozukluklardan dolayı bozulmalar ile ilişkili kısa dalga,
- 25-70 metre: orta hızda taşıt gövdesi ivmelenmesi ile ilgili dalga,
- 70-120 metre: yüksek hızda taşıta etkiyen yanal ivmeler ile ilgili dalga.

Çizelge 3.9 300 km/sa hız için düşey ve yatay yönde hedef ve limit sapmalar (Esveld, 2001)

Dalga boyu	Boyuna Yükselti (Nivelman)		Doğrultu (Dresaj)	
	$\sigma_{hedef} (mm)$	$\sigma_{limit} (mm)$	$\sigma_{hedef} (mm)$	$\sigma_{limit} (mm)$
3-25 m	1.0	1.5	0.7	1.0
25-70 m	2.0	3.0	1.3	2.0
70-120 m	2.7	4.0	3.4	5.0

3.5.3 Yüksek Hızlı Demiryolları için TSI ve CEN Standartları

Bu bölümde TSI ve CEN standartlarının YHD için belirlemiş olduğu kriterlerden bahsedilmiştir. Avrupa Birliği'nin 96/48 yönetmeliği 2B maddesine göre Avrupa'da yüksek hızlı trenlerin birlikte işletimi için tüm kurallar, teknik ve işletim koşulları yüksek hızlı trenlerin güvenli ve kesintisiz seyrini istenen performans seviyesinde sağlaması yönünde belirlenmiştir.

Trans-Avrupa yüksek hızlı demiryolu ağının birlikte işletiminin sağlanması için TSI ile aşağıdaki hususların sağlanması hedeflenmektedir.

- Altyapı ve ara birimleri için gerekli ihtiyaçların belirlenmesi,
- Gerekli şartların sağlanması için önemli olan ana parametrelerin belirlenmesi,
- Aşağıda belirtilen farklı demiryolu performanslarına ulaşmak için koşulların oluşmasını sağlamak:

- Kategori I: Hızın genellikle 250 km/sa ve daha yüksek olduğu, özel olarak yüksek hız için yapılmış hatlar,
- Kategori II: 200 km/sa civarında hızlar için iyileştirilmiş hatlar bağlantı hatlar,
- Kategori III: Topoğrafik ve şehir planı açısından engelleri olan özel olarak yüksek hız için yapılmış veya geliştirilmiş demiryolları,
- Bazı özel durumlarda mümkün uygulama koşullarının ortaya çıkartılması,
- Gerekli ihtiyaçlara cevap verecek, Avrupa birliği standartlarını kapsayacak şekilde Avrupa kriterlerine uyan ve Trans-Avrupa YHD sisteminin çoklu işletim yapı taşlarını belirlemek.

Trans-Avrupa YHD sistemi, TSI'da yapısal ve fonksiyonel özellikleri yönünden aşağıdaki alt başlıklara ayrılmıştır:

- Yapı alt sistemleri: Altyapı, enerji, kontrol-yönetim, sinyalizasyon ve demiryolu araçları.
- İşletim alt sistemleri: Bakım, çevre, işletim ve kullanıcı.

Kullanımda olan Kategori II tip demiryollarının kalitesinin TSI'da belirlenen seviyeye çıkartılması çok yüksek maliyetler gerektirmektedir. Dolayısı ile bu yollarda iyileştirme kademeli olarak gerçekleştirilmelidir. Demiryolu yapısını oluşturan farklı elemanların öngörülen ömürleri dikkate alınarak, iyileştirme yapılması gereken birimler zorluk derecesine göre aşağıdaki şekilde sıralanmıştır. İnşaat mühendisliği konuları; yolun performansının artırılması için iyileştirmelerin ilk olarak yapılması gereken birimlerdir.

- Yolun planı (kurp yarıçapı, hat merkezleri arasındaki mesafe, eğimler),
- Tüneller (gabari ve enkesit alanları),
- Demiryolu yapıları (düşey yüklere karşı direnç),
- Yol yapıları (gabariler),
- İstasyonlar (yolcu platformları),

Yol üstyapısı; bölümlere ayrılarak altyapıdan bağımsız olarak iyileştirilebileceğinden, daha az kritik olan elemanlardır. Mevcut üstyapı elemanlarını, TSI'da istenilen özelliklere sahip üstyapı elemanları ile bölüm bölüm veya tek seferde değiştirmek mümkündür. Makaslar ve kesişim noktaları, yol üstyapısı ve ayrıca çeşitli araçlara ve birimlere ait parametreler, istasyonlarda, işletmecilerin ihtiyaçlarına göre belirlenecek koşullara göre iyileştirilmelidir.

3.5.3.1 Dever, Eksik Dever ve Fazla Dever

TSI'da tasarım aşamasındaki YHD için dever 180 mm ile sınırlandırılmıştır. İşletimde olan demiryolları için TSI'da, maksimum dever 190 mm olacak şekilde ± 20 mm bakım toleransına izin verilmiştir. Bu değer sadece yolcu trafiğine ayrılmış hatlarda 200 mm'ye kadar çıkabilir.

Çizelge 3.10 Deverin limit değerleri (Lindahl, 2001)

Trafik Kategorisi	Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	Özel teknik tasarıma sahip yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$ (iyileştirilmiş hatlarda $V \leq 250$)	Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 \leq V \leq 300$
Önerilen limit değer (mm)	160	160	160
Maksimum limit değer (mm)	180	180	200

Özellikle yüksek hız için yapılacak hatlarda tasarım aşamasında kullanılacak maksimum eksik dever değerleri, maksimum hıza bağlı olarak Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11 Özellikle Yüksek Hız için yapılmış demiryollarında izin verilen eksik dever değerleri (TSI, 2002)

Hız (km/sa)	Limit Değer (mm)
$250 \leq V \leq 300$	100
$V > 300$	80

Zorlu topoğrafik kısıtlara sahip demiryollarının inşaatında Çizelge 3.10'daki değerlerden daha yüksek eksik dever değerlerine izin verilebilir.

Tasarım aşamasında, yüksek hız için iyileştirilmiş hatlarda ve bağlantı hatlarında, maksimum hıza bağlı olarak seçilebilecek maksimum eksik dever değerleri Çizelge 3.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.12 Yüksek hız için iyileştirilmiş hatlarda ve bağlantı hatlarında izin verilen eksik dever değerleri (TSI, 2002)

Hız (km/sa)	Limit değer (mm)
$V \leq 160$	160
$160 < V \leq 200$	150
$200 < V \leq 230$	140
$230 < V \leq 250$	130

Yeni yapılan hatlarda olduğu gibi, çok sert topoğrafik kısıtlara sahip iyileştirilmiş hatlarda ve bağlantı hatlarında daha yüksek eksik dever değerlerine izin verilebilir.

Her iki tip yol için, planda belirlenen kurp yarıçapı değerleri zor topoğrafik kısıtlar olmasından dolayı yukarıda verilen eksik dever değerlerinin uygulanmasına izin vermiyor ise Çizelge 3.13’de verilen daha yüksek eksik dever değerlerini uygulamak mümkündür.

Çizelge 3.13 Çok zorlu topoğrafik kısıtlara sahip YHD için eksik dever değerleri (TSI, 2002)

Hız (km/sa)	Maksimum limit değer (mm)
$V \leq 160$	180
$160 < V \leq 230$	165
$230 < V \leq 250$	150
$250 < V \leq 300$	130 *

*= balastsız yollarda 150 mm’ye çıkabilir.

Yukarıdaki çizelgelerde verilen eksik dever değerlerine temel oluşturan kurp yarıçaplarında hareket edecek trenlerde, yatar gövde sistemi olduğu takdirde daha yüksek eksik dever değerlerinde izin verilebilmektedir.

CEN standartlarına göre eksik dever ve eksik devere bağlı yanal ivme aşağıdaki nedenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır :

- Yola etkiyen kuvvetler ve güvenlik,
- Yolun bakımının ekonomik etkisi,
- Seyahat konforu ve taşıtların yuvarlanma katsayıları.

Çizelge 3.14 CEN standartlarına göre eksik deverin limit değerleri (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindhahl, 2001)

Trafik tipi		Önerilen limit değer (mm)		Maksimum limit değer (mm)	
		Yük	Yolcu	Yük	Yolcu
Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	$200 < V \leq 250$	100	100	150	150
	$250 < V \leq 300$	80	80	130	130
Özel teknik tasarıma sahip yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$ (iyileştirilmiş hatlarda 250)	$V \leq 160$	110	160	160	160
	$160 < V \leq 200$	x	140	x	160
	$200 < V \leq 230$	x	120	x	160
	$230 < V \leq 250$	x	100	x	160
Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 < V \leq 300$	$V = 250$	x	100	x	150
	$V > 250$	x	80	x	130

Yüksek hız için yapılmış veya geliştirilmiş, özel karakteristikleri olan demiryollarında, 300 km/sa'e kadar yatar gövdeli sistem kullanmadan 130 mm eksik devere izin verilebilmektedir.

Çizelge 3.15 130 mm eksik dever için 250 km/sa ve 300 km/sa hızlarında farklı dever değerlerinde yatay kurp yarıçapı için örnek değerler (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindhahl, 2001)

V_{maks} (km/sa)	h_d (mm)	h_t (mm)	R (m)
250	130	160	2543
300	130	160	3662
250	130	180	2379
300	130	180	3425
250	130	200	2235
300	130	200	3218

TSI konuları arasında *fazla dever* yer almamaktadır, ancak CEN fazla deveri sınırlamakta rehberlik edecek değerler vermiştir.

- önerilen limit değer 110 mm,
- maksimum limit değer 130 mm olmalıdır.

Bölüm 2.5.3’de anlatılmış olan yanal kuvvet açısı ve eksik dever arasındaki ilişki gözönüne alınarak yapılan hesaplar ile YHD’nda olması gereken büyüklükler Çizelge 3.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.16 Yanal ivme, yanal kuvvet açısı ve eksik dever arasındaki ilişkiler (Lindahl, 2001)

Yanal ivme a_y (m/sn ²)	Yanal kuvvet açısı Φ (°)	Eksik dever h_d (m)
0,654	3,81	0,1
0,981	4,71	0,15
1,176	6,84	0,18
1,307	7,61	0,2
1,471	8,53	0,225
1,634	9,51	0,25
1,797	10,46	0,275

$a_y = 1,307$ değeri için hesaplama örnek olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$h_d = \frac{1500}{9,81} \cdot 1,307 = 200mm \quad 200mm = 0,2 m$$

YHD’nda izin verilen eksik dever aşağıdaki faktörlere bağlı olarak hesaplanır:

- Yolun inşaatı (büyük kuvvetlere dayanma kapasitesi),
- Yol elemanlarının durumu,
- Doğrultu (geometrik bozuklukların şekli ve şiddeti),
- Taşıt tipi ve yürüyen aksam (süspansiyon, ağırlık merkezi, yanal rüzgara karşı duyarlılık),
- Dingil yükleri ve sabit kütleler (tekerlekler, bojiler vb.),
- Katarların bakım durumu,
- Yolcu konforu.

Eksik dever için yüksek değerlere izin verildiği takdirde yol elemanları buna göre tasarlanmalı ve burajdan hemen sonra, yanal yol dirençlerinin aşılması riski oluşmamalıdır.

3.5.3.2 Yatay Kurp Yarıçapı

Yüksek hızlı demiryolları için TSI’da, istasyonlar gibi yavaş hareket edilen bölgelerde minimum tasarım kurp yarıçapının 150 m’den az olmayacağı belirtilmiş, işletim esnasında bu yarıçapın 125 m’den küçük olamayacağı ifade edilmiştir. CEN standartlarına göre minimum kurp yarıçapı (R) hesaplanırken hesaba katılması gereken parametreler aşağıda verilmiştir:

- maksimum ve minimum işletme hızları,
- uygulanan dever,
- fazla ve eksik deverin limit değerleri.

Bölüm 2.4.1.2’deki denklemlerden faydalananarak Çizelge 3.17’de kurp yarıçapı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.17 Optimum dever ve optimum yatay kurp yarıçapı için örnekler (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001)

V_{maks} (km/sa)	V_{min} (km/sa)	h_d (mm)	h_e (mm)	h_t (mm)	R (m)
300	80	100	110	126	4696
300	120	100	110	150	4247
300	160	100	110	193	3618
350	80	80	110	120	7209
350	120	80	110	135	6713
350	160	80	110	160	6017

Hesaplamalar konvansiyonel hızlı trenler ve yük trenleri için yapılmıştır. Eksik dever ve fazla dever değerleri TSI’nin belirlemiş olduğu değerlere uygundur.

3.5.3.3 Birleştirme Eğrisi ve Dever Rampası

Deverin değişimi için bölüm 2.5.5’deki denklemler kullanılarak bulunmuş olan değerler çizelge 3.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.18 Deverin zamana ve mesafeye bağlı değişimi için limit değerler

Trafik tipi	Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	Yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$	Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 < V \leq 300$
Önerilen limit değerler (mm/sn)	50	50	50
Maksimum limit değerler (mm/sn)	60	60	60
Önerilen limit değerler (mm/m)	2,25		
Maksimum limit değerler (mm/m)	2,5		

Eksik deverin değişimi:

Çizelge 3.19’da bölüm 2.5.6’da verilen 2.32 formülü kullanılarak yüksek hız için hesaplanmış olan değerler gösterilmiştir.

Çizelge 3.19 Eksik deverin zamana bağlı değişiminin limit değerleri. Değerler tüm birleştirme eğrisi formları için uygulanabilir (yatar gövdesiz konvansiyonel trenler) (Lindahl, 2001)

Trafik tipi	Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	Yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$	Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 < V \leq 300$
Önerilen limit değerler (mm/sn)	50	50	50
Maksimum limit değerler (mm/sn)	75	90	75

Yüksek hızlı demiryollarında geçiş eğrisi ve dever rampası şekil ve pozisyon bakımından birbirleriyle çakışmalıdır. Yüksek hızlı demiryollarında geçiş eğrisinin uzunluğu eksik deverdeki değişime göre hesaplanır. Yatar gövdeli trenin 350 km/sa civarında birleştirme eğrisinden geçişi, en azından 4-5 saniye sürmelidir. Birleştirme eğrileri, eğriliğin doğrusal değişimine göre (klotoid), dever rampaları deverin doğrusal değişimine göre ayarlanmalıdır.

Yatay düzlemde birleştirme eğrisinin uzunluğu, CEN standartlarına göre 3.1 ve 3.2 eşitliklerinde gösterildiği gibi, eksik deverin zamana göre değişimi ve deverin mesafeye göre değişimine göre hesaplanır.

$$L_t \geq \frac{V_{maks}}{3,6} \cdot \Delta h_d \left(\frac{dh_d}{d_t} \right)_{lim}^{-1} \quad (3.1)$$

$$L_t \geq \Delta h_t \left(\frac{dh_t}{dx} \right)_{lim}^{-1} \quad (3.2)$$

Birleştirme eğrisinin uzunluğu yukarıdaki bağıntıların sonuçlarından elde edilen değerlerden büyük olanı kadar olmalıdır.

3.5.3.4 Eğim

TSI'ya göre ana hatlar için tasarım aşamasında aşağıdaki koşullar sağlandığında %0.35 eğime izin verilebilir.

- 10 km üzerindeki mesafelerde eğim %0.25'e eşit veya daha düşük olmalıdır.
- Sürekli bir %0.35'lik eğimin uzunluğu 6 km'yi geçmemelidir.

Bu değerler sadece yüksek hızda yolcu trafiğine izin verilen demiryolları için geçerlidir. Fransa'da mevcut demiryollarında %0.4 eğim ile işletim sağlanabilmektedir.

3.5.3.5 Düşey Kurp Yarıçapı

Yüksek Hız için TSI'da düşey kurp yarıçapı tepe noktada 600 m'den, çukur noktada ise 900 metreden az olmayacak şekilde belirlenmiştir.

Çizelge 3.20 Düşey ivmenin limit değerleri $a_{v,lim}$ (Lindahl, 2001)

Trafik tipi	Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	Yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$	Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 < V \leq 300$
Önerilen limit değerler (mm/sn^2)	0.22	0.22	0.22
Maksimum limit değerler (mm/sn^2)	0.44 ^a	0.31	0.44 ^a

a. tepe noktada %10 çukur notada % 30 tolerans

2.10 denklemi ve Çizelge 3.20'deki düşey ivmenin limit değerleri kullanılarak elde edilen düşey kurp yarıçapı için limit değerler Çizelge 3.21'de verilmiştir.

Çizelge 3.21 Düşey kurp yarıçapının limit değerleri (Lindahl, 2001)

Trafik tipi	Yolcu trenleri için tasarlanmış karışık işletimde olan hatlar $200 < V \leq 300$	Yolcu trenleri ile birlikte işletilen karışık hatlar $V \leq 230$	Yolcu trafiğine adanmış yüksek hızlı hatlar $250 < V \leq 300$
Önerilen limit değerler (m)	$0.35 V_{maks}^2$	$0.35 V_{maks}^2$	$0.35 V_{maks}^2$
Maksimum limit değerler (m)	$0.175 V_{maks}^2$	$0.25 V_{maks}^2$	$0.175 V_{maks}^2$

3.6 Farklı Projelerin ve Standartların Karşılaştırılması

Bu bölümde farklı YHD'nın projeleri ve standartlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.22 Yüksek hızlı demiryollarının geometrik büyüklüklerinin karşılaştırılması (Lindahl, 2001)

Demiryolu	V_{lim} (km/sa)	R_{min} (m)	$h_{t,maks}$ (mm)	$h_{d,maks}$ (mm)	a_y (m / sn^2)
DB a	300	3200	200	130	0.85
JR b	350	4000	200	160	1.05
SNCF a	350	4000	200	160	1.05

DB: Almanya Demiryolları

JR: Japonya Demiryolları

SNCF: Fransa Demiryolları

a: balastlı yol

b: rijit üstyapı

Avrupa'da bulunan farklı YHD'na ilişkin parametreler çizelge 3.23'de verilmiştir.

Çizelge 3.23 Farklı demiryolları için parametreler ve yol geometrisi (UIC, 2001)

Parametre	HIZ (km/sa)										TSI (taslak)
	Fransa		Almanya			İtalya		İspanya		Belçika	
	300	350	300 (1)	300 (2)	350 (3)	300	350 (3)	300	350	300	350
Trafik tipi	Yolcu	Yolcu	Yolcu Yük	Yolcu	Yolcu	Yolcu Yük	Yolcu Yük	Yolcu	Yolcu	Yolcu	Yolcu
Katarların maksimum hız için maksimum dingil yükü (t)	17	17	17	17	<16	17	17	17	18	17	17
Lokomotifler için maksimum dingil yükü (t)	-	-	20	-	-	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	-
Yük trenleri için maksimum dingil yükü (t)	-	-	22.5	-	-	22.5	22.5	-	-	22.5	-
Maksimum tasarım hızı (km/sa)	300	350	300 (tünellerde 330)	300 (tünellerde 330)	350	250-300	350	270	350	320	>300
Maksimum işletme hızı (km/sa)	300	320	300 (tünellerde 330)	300	330	300	350	270 (300)	>300	300	-
Maksimum hız için minimum kurp yarıçapı (m)	4000	6250 istisna (5556)	4000	3350 (4)	5120	5450	7000	4000	6500	4800	
Maksimum dever (mm)	180	180	160	160	170	105	130	150	150	150	200
Maksimum eğim (mm/m)	35	35	20	20	40	12 (6)	12(6)	12.5	25	15-21 (6)	35 < 6 km'den az uzunluklar için)
Deverin zamana bağlı değişimi (mm/sn)	50	50	34.7	34.7	34.7	27	37	32	30	37	-
Minimum düşey kurp yarıçapı (m)	16000	21000	14000 12000	14000 12000	20000	25000	25000	24000 (17000)	25000	20000-17000	Konfor belirtilmemiş
Tasarım hızı için eksik dever(mm)	85	65 (85)	105	Balastlı yol için 130 balastsız yol için 150	112	90	75	100	65	100	80(8)
Birleştirme eğrisi uzunluğu (m)	300	350	384	408	476	330	330	360	460	420	Konfor

(1) Nurnberg-Ingolstadt

(2) Cologne-Frankfurt

(3) Hipotez

(4) 180 mm dever ve 150 mm eksik dever ile bu değer 3250 metreye düşürülebilir

Hız arttığı takdirde geometrik parametrelerde meydana gelen değişiklikler Çizelge 3.24’de verilmiştir.

Çizelge 3.24 Hızın yolun geometrik parametrelerinin seçimine etkileri (UIC, 2001)

PARAMETRE	HIZ		
	270	300	350
Minimum Eğrilik Yarıçapı (m)			
Önerilen	3846	4545	7143
Normal	3226	4000	6250
İstisna	3125	4000	5556
Maksimum Dever (mm)			
Normal	180	180	180
İstisna	180	1802	180
Eksik Dever (mm)			
Normal	100	85	65
İstisna	130	100	85
Normal Koşullarda Yük Trenleri İçin Fazla Dever (mm)			
Normal	100	100	-
İstisna	110	110	-
Eksik Deverin Değişim Hızı (mm/sn)			
Normal	30	30	30
İstisna	50	50	50
Parabolik Bağlantıların Uzunluğu	R=3125 m	R=4000 m	R=5556 m
	d=180 mm	d=180 mm	d=180 mm
	Lt=270 m	Lt=300 m	Lt=350 m
Deverin Değişimi (mm/m)			
Normal	0,30<i<0,67	0,30<i<0,60	0,30<i<0,52
İstisna	0,67<i<,80	0,60<i<0,72	0,52<i<0,62

3.7 Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapı

Altyapı, üstünde demiryolu hattının döşenebilmesi için zeminde yapılması gerekli her türlü yapı ve işleri içerir (sanat yapıları, yarma, dolgu gibi). Yani dolgu ve yarmadaki esas platformun oluşturulması ile, demiryolunun sürekliliğinin sağlanması için yolların altında veya üstünde kalan bütün sanat yapılarını ihtiva eder. Demiryollarının toprak işlerinin tasarımı ve inşaatı için belirlenmiş olan kuralların büyük bir kısmı karayolları için geliştirilmiş tekniklere dayanmaktadır (UIC 719, S. 43).

Altyapı yolun en önemli elemanlarından elemanlarından bir tanesidir. Mevcut bir yolun bakım işlemi sırasında altyapıyı iyileştirmek çoğu zaman mümkün değildir veya çok az bir iyileştirme yapılabilir. YHD gibi inşaat maliyeti yüksek olan yollarda altyapının önemi bu sebepten ötürü öne çıkmaktadır. Yüksek hızlı demiryollarında hız arttığı takdirde en önemli parametreler hat merkezleri arasındaki mesafe, tünel kesitleri, köprüler ve bakım ekibi için yürüme yollarının pozisyonu olmaktadır. YHD’nda toprak işlerinin tasarımı ve inşaatı çok dikkatli kontrol edilmelidir. Yüksek hızlı demiryollarında altyapının iyileştirilmesi ve korunması için kullanılabilecek bazı yöntemler devam eden bölümlerde açıklanmıştır.

Yüksek hız için gerekli geometrik büyüklükler ve ihtiyaç duyulacak bakımın büyüklüğü tamamen altyapı inşaatına bağlıdır. Dolguda iyi sıkıştırma yapılmalı ve zaman içinde sıkışabilecek organik malzemeler ve yumuşak killeri olabildiğince az kullanılmalıdır. Katarlardan iletilen yüklerin altyapıya zarar vermemesi için altyapıda drenajı sağlayacak sistem oluşturulmalıdır.

Yüksek hızlı demiryolu inşaatlarında maliyeti çok fazla arttırmadan ileride doğacak bakım maliyetlerinin azaltılması için çalışmalar devam etmektedir. Japonya ve Avrupa’daki ilk hızlı demiryolları klasik demiryolunun yapısında iyileştirmeler yapılarak geliştirilmiş sistemlerdir. Bu ilk YHD’nda yüksek hız için gerekli olan kaliteyi sağlamak yolun farklı elemanlarının iyileştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Üstyapı (ray, travers, bağlantı elemanları ve balast) ve altyapıda (alt balast ve altyapı) önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. UIC 60 rayının, daha büyük ve ağır traverslerin, kaliteli balast malzemesinin ve farklı daneli balast altı tabakalarının kullanılması yüksek hızlı trafik için iyi bir yapı oluşmasına imkan sağlamıştır.

Fakat, özellikle karışık işletim, çok yüksek hız ve özellikle Avrupa’da birlikte işleme duyulan ihtiyaç, bakım ihtiyacının artmasına ve bakımlar arası sürenin azalmasına yol

açmıştır. Bu faktörlerin sonucunda bakım maliyetinin artışı gibi istenmeyen bir sonuç ortaya çıkmıştır.

Artan maliyeti azaltmak için mümkün olan çözümlerden bir tanesi daha az bakıma ihtiyaç duyulan tamamen farklı bir yapıya sahip, maliyeti yüksek, rijit yolların yapılmasıdır (Teixeira, Lopez-Pita, Casas-Esplugas, Bachiller, 2005). Maliyet açısından balastlı yol ile karşılaştırılan rijit yol, tünellerde ve köprülerde daha az maliyet oluşturmaktadır. Avrupa’da bir çok uzun tünelde bu sebepten ötürü rijit yol kullanılmaktadır. Below ve Randich çalışmalarında rijit yol inşaatı maliyetinin balastlı yolun maliyetinden %30 daha pahalı olması duruma kadar efektif olduğunu ifade etmişlerdir (Below D. N., Randich). Çizelge 3.25’de Japonya ve Avrupa’da YHD’ler için üstyapı tipine göre yoldaki toplam tünel ve köprü oranları verilmiştir.

Çizelge 3.25’de de görüldüğü gibi Avrupa’da balastlı tip yol halen daha efektif olmaktadır. Bu yüzden balastlı yollar için artan hız ve trafik talebine karşılık bakım maliyetlerini azaltmak üzere araştırmalar yapılmaktadır. Bu hedef için iki yaklaşım kullanılmaktadır:

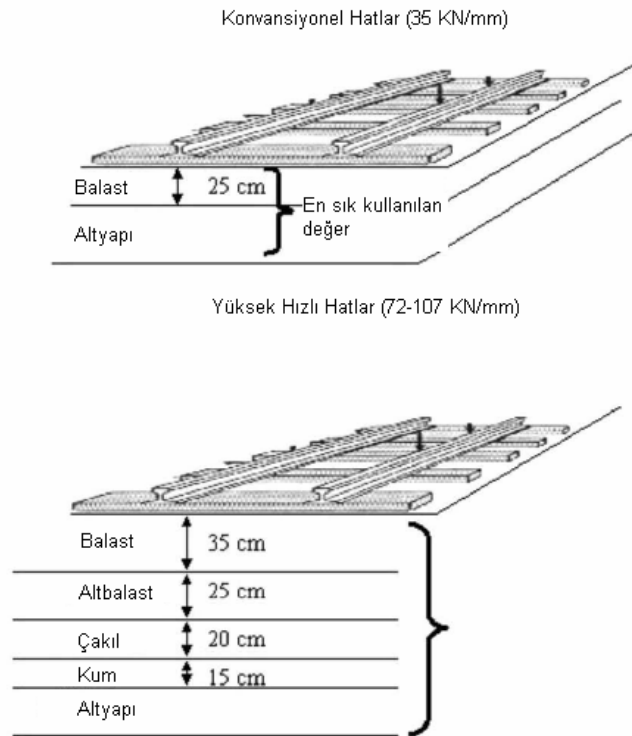
- Tüm yolun tasarımı iyileştirmek, düşey rijitlik gibi önemli parametreleri optimize etmek,
- Yol elemanlarının tasarımı iyileştirmek (yeni malzeme ve şekiller gibi iyileştirmeler sağlamak), altyapının taşıma kapasitesini arttırmak (yani alt balast malzemeleri kullanmak gibi)

Çizelge 3.25 Japonya ve Avrupa’da YHD’ler için üstyapı tipine göre tünel ve köprü oranları

	%Tünel	%Köprü veya Viyadük	Toplam	Üstyapı
Japon'daki yüksek hızlı demiryolları				
Tokaido: Tokyo-Osaka (515 km)	13	33	46	Balastlı
Sanyo: Osaka-Hakata (554 km)	51	38	89	Rijit
Tohoku: Tokyo-Morioka (497 km)	24	71	95	Rijit
Joetsu: Tokyo-Niigata (270 km)	40	60	100	Rijit
Avrupa'daki yüksek hızlı demiryolları				
Paris-Lyon (480 km)	0,8	0,7	1,5	Balastlı
TGV Atlantique (280 km)	4,7	1,1	5,8	Balastlı
Valence-Marsilya (295 km)	5,1	6,8	11,9	Balastlı
Hannover-Würzburg (326 km)	19,3	10,4	29,7	Balastlı
Köln-Frankfurt (177 km)	22,6	3,4	26	Rijit
Roma-Napoli (220 km)	11,4	15,9	27,3	Balastlı
Madrid -Sevilla (471km)	1,9	3,4	5,3	Balastlı
Madrid-Lleida (481km)	5,4	5,8	11,2	Balastlı

YHD’nda, yüksek hıza imkan sağlaması için altyapı olabildiğince çok sanat yapıları kullanılarak daha düz ve eğimin belli sınırlar içinde tutulabildiği şekilde inşaa edilmektedir. Örneğin Almanya’da maksimum kurp yarıçapının 5100 m , maksimum eğimin %1.5 ve maksimum rampa uzunluğunun 10 km olmasının sonucunda Hannover-Würzburg ve Mannheim-Stuttgart arasındaki toplam 478km’lik iki yolun; %33’ü tünel , %29’u yarma, %23’ü dolgu , %8’i köprü olarak ve sadece %7’si doğal zeminde yapılmıştır.

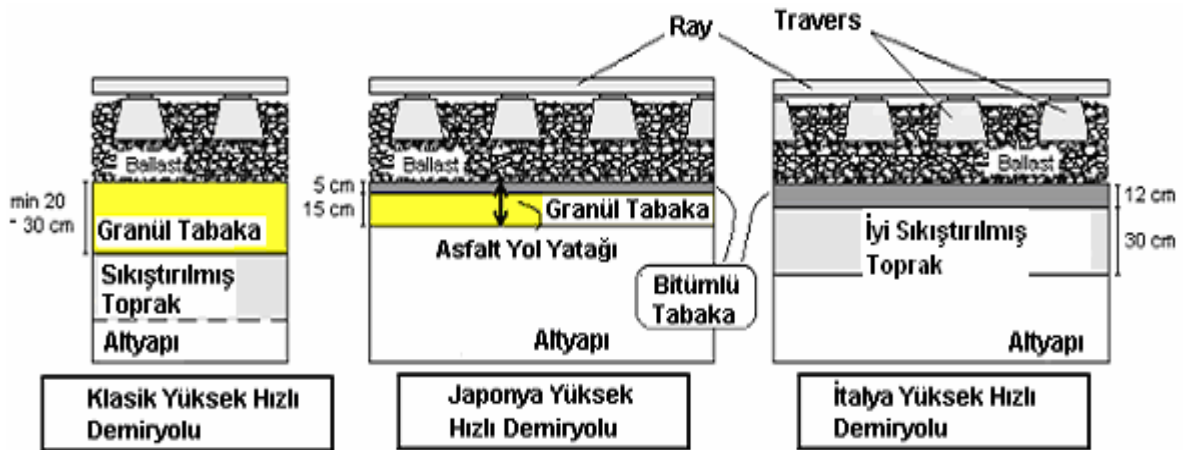
Şekil 3.9’da, yolun enkesiti gözönüne alındığında konvansiyonel yol ile YHD için tipik bileşenler gösterilmiştir. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi YHD’nda balastın altına koyulan farklı tabakalar ile konvansiyonel demiryoluna göre 2-3 kat daha rijit bir sistem oluşması sağlanmaktadır. Şekil 3.9’da belirtilen tabaka kalınlıkları Fransa Demiryolları tasarım kriterleri ile uyusmaktadır. Yoldaki bozulmaları azaltmak için düşey rijitliğin azaltılması çoğu zaman uygun görünmektedir. Bunun iki nedeni vardır; amortisörüz araçların yolda oluşturacağı düşey dinamik gerilmelerin belli bir limitte kalmasını sağlamak ve balast tanelerinin titreşim hızını azaltmak (Pita). Diğer taraftan düşey rijitliğin azalması yüksek hızda yolun daha fazla yıpranmasına ve dolayısıyla bakım maliyetlerinin yükselmesine sebep olur. Bu iki farklı etki gözönüne alınarak yapılan araştırmaların sonucunda YHD için düşey rijitliğin optimum değeri 70-80 kN/mm olarak belirlenmiştir (Pita).



Şekil 3.9 Balastlı sistem için YHD ve konvansiyonel demiryoluna ait bileşenler

Balastlı yol daha ucuz ve uygulama kolaylığına sahip olmasına rağmen Yüksek hız yapılan yollarda rijit yol balastlı yolun yerini almaktadır. Balastın yeni yapılacak YHD’nda kullanılmaya devam etmesi, yüksek hız altında fiziksel davranışının tam olarak anlaşılması ile olabilecektir (Dahlberg, 2003).

Yüksek hızlı demiryollarında altyapının taşıma kapasitesi yüksek olması gerektiğinden, balast altı tabakaların kalınlığı konvansiyonel demiryollarına göre daha fazla olmaktadır. Balast altı tabakaların taşıma kapasitesi 80-120 Mpa değerleri arasında olmalıdır (Teixeira, Lopez-Pita, Casas-Esplugas, Bachiller, 2005). Bugüne kadar Avrupa’daki balastlı yüksek hızlı demiryollarında genellikle daneli (kum, çakıl v.b) malzeme kullanılmıştır. Bazı durumlarda istenen taşıma kapasitesini sağlamak için geleneksel daneli malzemeler yerine çimento katkılı toprak ve çimento ile karıştırılmış çakıl kullanılmıştır. Buna ilave olarak bazı ülkelerde geleneksel daneli malzemeye alternatif olarak asfalt yol yatağı tabakaları kullanılmaktadır. Bu yöntem yük taşımacılığı içinde demiryollarında faydalı olmaktadır. Asfalt yol yatağı tabakaları ilk yapılan Japonya ve İtalya yüksek hızlı demiryollarında kullanılmıştır. Bu ülkelerde yapılan uygulamaların sonucunda yolda iyi bir uzun dönem yapısal davranışı ortaya çıktığı tespit edilmiş ve yeni yapılacak tüm balastlı yüksek hızlı demiryollarında aynı yöntemin kullanılması öngörülmüştür. Şekil 3.10’da Japonya ve İtalya’daki balastlı yüksek hızlı demiryoluna ait tabakalar ile Avrupa’daki genel yüksek hızlı demiryoluna ait tabaka kalınlıkları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



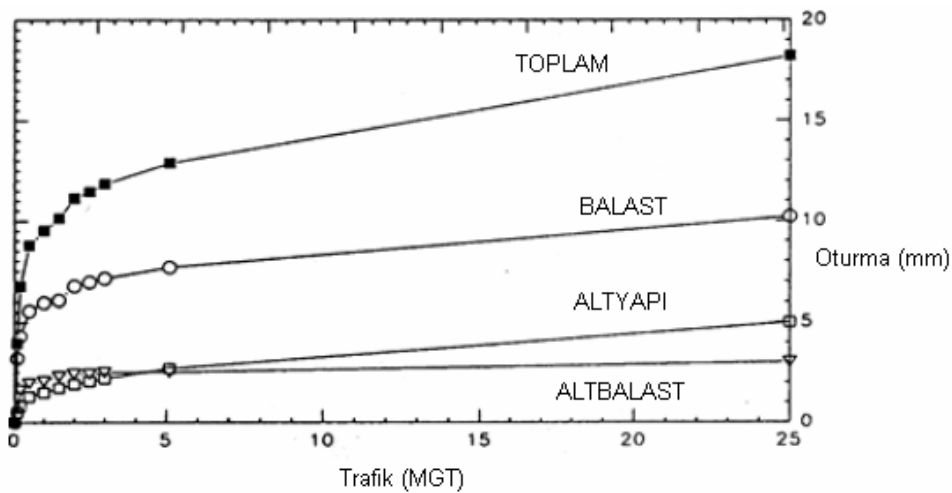
Şekil 3.10 Balastlı yüksek hızlı demiryollarına ait tipik enkesitler

Japonya’da 5 cm kalınlığında asfalt yol yatağı tabakası altında kalan 15 cm kalınlığındaki granül tabaka 60 cm’ye kadar değişebilmektedir. İtalya’da iyi sıkıştırılmış toprak tabaka üstünde yer alan 12 cm bitümlü tabaka 80 Mpa taşıma kapasitesi elde edilmektedir. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi 15 cm granül tabaka yerine 12-14 cm bitümlü tabaka kullanarak yolun yüksek hızdaki davranışını iyileştirmek, taşıma kapasitesini arttırmak ve oturmaları azaltmak mümkündür. Bitümlü alt balast tabakasının kullanılmasına karar vermek için oluşturacağı olumlu etkiler gözönünde bulundurulmalıdır:

- Yeni yapılacak yüksek hızlı demiryolunun istenen standartlarını sağlamak için sağlayacağı teknik uygunluk ve tasarım kolaylığı,
- Bakım maliyetlerini azaltma kapasitesi (bu konuda yeterli verilerin oluşması devam etmektedir),
- Daha rijit ve deforme olmayan bir tabaka oluşturarak yoldaki toplam oturmaları azaltır,
- Yol yapısını homojen hale getirip düşey rijitlik değişimine olumlu etki yaparak yoldaki farklı oturmaları azaltması,
- Üstünde bulunduğu tabakaları kullanım ömrü boyunca koruyarak altyapının ömrünü uzatması.

Diğer taraftan bitümlü tabakanın kullanılması daneli malzemelere göre çok daha pahalı bir uygulama olmaktadır.

Yüksek kaliteli altyapıya sahip yüksek hızlı demiryolları için yoldaki oturmaların genelde %50-%70’ini balastta meydana gelen oturmalar oluşturmaktadır. Şekil 3.11’de yüksek hızlı demiryollarında farklı tabakalarda oluşan oturmaların toplam oturmadaki payı gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Yüksek hızlı demiryollarında toplam oturmaya oluşturan oturmalar

Kum ve çakıl gibi daneli tabakalar yolun taşıma kapasitesini arttırmak yanında aynı zamanda yolu çevre etkilerine de karşı koruma görevini yerine getirmektedirler. Ancak yapılan araştırmalarda yolun ömrü boyunca bu tabakaların filtre özelliklerini kaybederek balastın ve altyapının bozulmasına yol açtıkları saptanmıştır (Teixeira, Lopez-Pita, Casas-Esplugas, Bachiller, 2005).

Yüksk hızlı demiryollarında yol altyapısını olumsuz etkileyen 3 temel etken vardır:

- Kabarmaya müsait toprak
- Dondan dolayı yolun kabarması
- Yolun altındaki toprağın çamurlaşması

Kabarmaya müsait toprak:

Kabarmaya müsait toprak içindeki nem oranının değimi ile farklı hacim değişiklikleri göstermektedir. Kabaran toprak yolu bozarak işletimi olumsuz yönde etkiler. Aşağıdaki teknikler ile kabaran toprağı kontrol altına almak mümkündür:

- Kompaksiyon sırasında men ve yoğunluk ölçümleri yapılarak kabarmalar azaltılabilir. Altyapıyı oluşturan toprak optimum nem muhtevasının %1-3 fazlası nem muhtevasına sahip olacak şekilde sıkıştırılmalıdır.
- Dolgu ve yarmada kabarma fazla yükleme ile azaltılabilir. Altan yukarı doğru kabarma oranı yüksek topraktan daha az kabaran toprak sıralaması yapılarak bu sorun giderilebilir.
- Yağış oranı düşük olan bölgelerde altyapıda, kabarma potansiyeline sahip toprağın üstüne tüm genişliği boyunca plastik özellik göstermeyen toprak serilerek potansiyel kabarma oranı azaltılabilir.
- Çimento ve kireç katkısı kullanılarak toprağın kabarma potansiyeli azaltılabilir.

Don etkisi:

Dondan etkilenen toprak soğuk havada kabarma ve baharda buzların çözülmesiyle altyapıyı zayıflatma etkisi yapar. Özellikle don etkisiyle kabarma yolun farklı noktalarında farklı büyüklüklerde olduğundan yol geometrisini olumsuz etkilemektedir. Don etkisiyle toprağın şişmesinin 3 farklı sebebi vardır.

- Dona duyarlı toprak olması
- Dondurucu soğğun toprağın içine işlemesi
- Su muhtevası

Genelde düşük plastisiteye sahip ince daneli dane büyüklüğü 0.05-0.005 mm olan siltli topraklar dona duyarlı olmaktadır. Don etkisi aşağıdaki uygulamalar ile kontrol altına alınabilir:

- İnce daneli zeminlerin geçirgenliği kompaksiyon ile nem oranı optimum nem oranının üstünde kalacak şekilde azaltılabilir. Kompaksiyon ile altyapı düzgün olmayan nem değişimlerine karşı da korunmuş olur.
- Dolgu ve yarmada dona duyarlı toprak daha alt katmanlarda kullanılarak dondan dolayı kabarma kontrol altına alınabilir. Dona duyarlı ve duyarlı olmayan toprağın karıştırılıp kullanılmasında ilave bir çözümdür.
- Dona duyarlı toprak duyarlı olmayan toprak ile değiştirilebilir.
- Çimento katkısı dondan dolayı kabarmayı engeller.
- Drenaj sistemi kullanılarak su seviyesinin dona duyarlı tabakalara ulaşması engellenmelidir.

Her türlü toprak için tüm altyapıda sağlanması gereken kriterler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Bilow, Lotfi, 2003):

- Oranik toprak gibi zararlı toprakların kullanımı tamamen önlenmelidir. Altyapının üstteki 60 cm kalınlığındaki bölümünde keslikle hiçbir organik ve zararlı malzeme kullanılamaz.
- Toprak optimum nem oranına göre sıkıştırılmalıdır.
- Zayıf topraklar çimento veya kireç katkısı ile iyileştirilmeli veya tamamen değiştirilerek altyapı güçlendirilmelidir.
- Drenaj sistemi doğru şekilde yapılmalıdır.

Çizelge 3.27 Yüksek hızlı demiryollarının enkesitlerinin karşılaştırılması (UIC, 2001)

Hat	SNCF	SNCF	DB AG	FS	SNCB
Hız (km/sa)	300	350	300	300	320
Hat merkezleri arasındaki mesafe (m)	4.5	5	4.5	5	4.5
L (m)	6.95	7.4	6.05	6.8	6.96
E (m)	2.25	2.5	2.25	2.5	2.25
D (m)	2.3	2.5	2.2	2.8	2.91
P (m)	1.4	1.4	8	0.7	0.8

Özellikle yüksek hız için yapılmış hatlar:

Tasarım aşamasında 4.5 metre olarak belirlenen hat merkezleri arasındaki mesafe işletim performansına göre Çizelge 3.28'deki değerlere indirilebilir.

Çizelge 3.28 Özellikle yüksek hız için yapılmış hatlarda hat merkezleri arasındaki mesafe (TSI, 2002)

	Tren hızı (Yatar gövde sistemine sahip olmayan trenler)	Hat merkezleri arasındaki minimum mesafe
Yeni Yollar	$V \leq 250$ km/sa	4,00 m
	$250 < V < 300$ km/sa	4,20 m

İyileştirilmiş yollar ve bağlantı hatları:

Tasarım aşamasında iyileştirilmiş yollar için olması gereken değerler Çizelge 3.29'de verilmiştir.

Çizelge 3.29 İyileştirilmiş yollarda ve bağlantı yollarında hat merkezleri arasındaki mesafe (TSI, 2002).

	Tren Hızı	Hat merkezleri arasındaki minimum mesafe
İyileştirilmiş Yollar	$V \leq 230$ km/sa	CEN standartlarına göre hesaplanır (mevcut UIC 505-4)
	$230 < V < 250$ km/sa	4.00 m

Çizelge 3.30'da farklı ülkelerde hat merkezleri arasındaki mesafeler karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3.30 Yüksek hızlı demiryollarında farklı ülkelerde hat eksenleri arasındaki mesafeler için tasarım kriterleri (UIC, 2001).

PARAMETRE	ÜLKE (km/sa)										STI tasarımı
	Fransa		Almanya			İtalya		İspanya		Belçika	
	300	350	300 Yolcu Yük	300 Yolcu	350 Hipotez	300	350 Hipotez	300	350	320	350
Hat merkezleri arasındaki minimum mesafe	4.2	4.5	4.5	4.5	4.7	5	5	4.3	4.7	4.5	4.5

3.7.2 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 3.31’de farklı ülkelerde uygulanan tünel enkesit değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.31 Farklı ülkelerde tünel kesitleri için tasarım kriterleri (UIC, 2001).

PARAMETRE	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

Açık arazideki durum;

Açık arazi için havanın sıkıştırılamayacağı kabulü yapılır. Tren boyunca hava basıncının değişmesinden dolayı trenin önünde ve arkasında oluşan hava basıncı farklı olmaktadır. Aynı zamanda trenin yüzey direncinden dolayı tren boyunca sürtünme farkı meydana gelmektedir.

Tünel durumu;

Trenler tünele girip çıkarken bir basınç dalgası oluşturmaktadır. Trenin 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 4 ana kriter vardır;

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

Trene etkiyen dış basıncın hesaplanması için gerekli veriler;

- Trenin hızı,
- Trenin enkesiti,
- Trenin gabarisi,
- Trenin uzunluğu,
- Trenin şekli,
- Trenin dış yüzeyinin sürtünmesi,

Hava basıncının hesaplanması için dikkate alınacak hususlar;

- Tünel kesiti,
- Tünel uzunluğu,
- Tünel kaplamasının sürtünmesi,
- Şaftlar,
- Tünel duvarlarındaki delikler.

Farklı tasarım çözümleriyle dış basıncı azaltmak mümkün olabilmektedir. Düşey şaftlar ve her 1 m'de 0,01 m² alanlı yanal delikli borular iyi sonuçlar vermektedir. Hesaplamalara göre düşey şaftlı 50 m² kesitinde bir tünel ile şaftsız 70 m² kesitinde bir tünel aynı performansa sahiptir.

TSI'nın taslağında tünellerin bölümlerinin izin verilen maksimum basınç kriterlerine uyması gerekliliği belirtilmiştir. Bu nedenle trenin izin verilen maksimum hızda geçişi sırasında maksimum basınç değişiminin 10 kPa değerini geçmeyecek şekilde tünelin tasarımının yapılması gerekmektedir. Bu kısıtlama sealing system (taşıtların körük bölümleri, katarların birleşim noktaları) yeterli olmadığı durumlar için gereklidir. Belirlenen basınç değerleri yolcu konforundan önce yolcu sağlığı düşünülerek belirlenmiş değerlerdir.

2 hattın geçtiği karma trafik hatlara ait tünellerde, yük trenlerinin geçişi iki probleme yol açmaktadır. Bunlar aerodinamik etki ve kaza durumunda güvenliğin sağlanabilmesidir. Bu nedenler, YHT'lerin tünellerde hızının azaltılmasının, aynı anda karma trafiğe izin verilmemesi ve günün farklı zamanlarında YHT ve yük trenlerinin ayrı işletilmesinin nedenini açıklamaktadır. Aerodinamik etkiler açısından bakıldığında tünellerdeki kaplamanın uygun olması gerekmektedir.

Tünellerde acil durumlarda güvenliğin sağlanabilmesi için alınacak önlemler UIC tarafından uygun görülen altyapı standartları ile uyumlu olmalıdır. Tartışmaya açık bir diğer konu da, çift hatlı tünellerde izin verilen tünel uzunluğunun, karışık trafik (yolcu-yük) için tüm olasılıklar gözönüne alınarak belirlenmesi gerektiğidir. Günümüzde, uygulamada güvenlik için bağımsız tüneller yapılmakta, 300 km/sa üzerinde hızlar için iki yönü bağlayan ara geçişler, acil çıkışlar inşa edilmektedir (çıkışlar arası maksimum mesafeler, bekleme alanları, ekipmanlar v.b).

3.7.3 Gabariler

200 - 300 km/sa hızlar arasında, normal demiryolları için belirlenmiş önlemlere ek olarak; insanları, trenlerin aerodinamik etkilerinden ve hızından dolayı oluşan olumsuz etkilerden, trenleri, yol boyunca oluşabilecek muhtemel tehlikelerden korumak için ilave önlemler alınmalıdır. YHD tasarımı yapılırken YHT'lerin birbirleri yanından ve daha yavaş trenlerin yanından geçerken oluşturacağı ilave aerodinamik etkiler dikkate alınmalıdır.

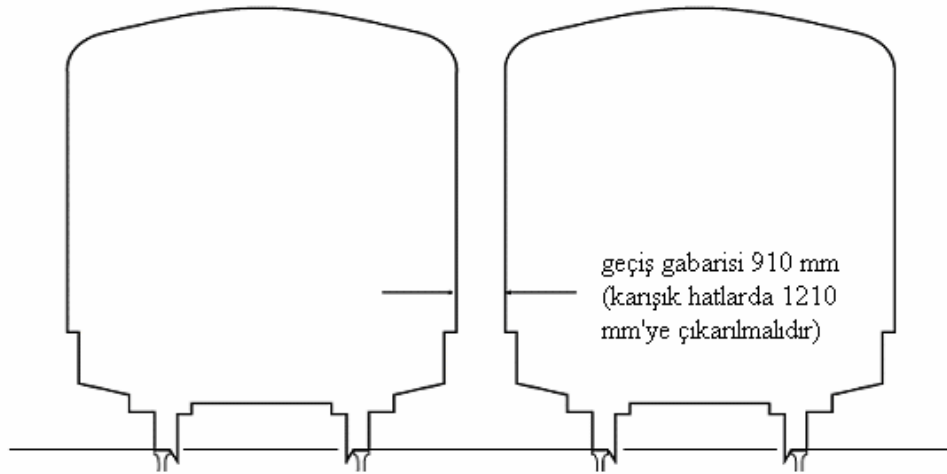
200 km/sa'ten fazla hızlarda işletilen hatlar ve YHT ile fiziki olarak ayrılmamış olan diğer trenlerin işletildiği hatlar için aşağıdaki önlemler alınmalıdır:

- Trenlerin normal hızda seyri sırasında hiçbir insan en yakın raya 2750 mm'den daha fazla yaklaşmamalıdır,
- Bakım ekibinin hat boyunca çalışması gerektiği durumlarda ilave çit ve bariyerler ile 2750 mm'den daha yakın çalışması engellenmelidir,
- Hatlarda geçişi sağlayan yürüme yolları ve diğer geçişler olmamalıdır,
- Hatlar ile bitişik yürüme yolları olmamalıdır.

Yoldaki karşılaşmalar sırasında katarların birbirlerine hava basıncı uyguladıkları gözlemlenmektedir. Katarların birbirlerine yakın geçmeleri ölçüsünde bu basınçların şiddeti artmaktadır. Bu basınçlar, direnimi arttırdığı gibi, katarların stabilitesini de olumsuz biçimde etkilerler. Bitişik hatlarda trenlerin birbirini etkilemeyeceği şekilde gabariler sağlanmalıdır. Tünellerde ve trenlerin yakın geçtiği yapılarda tren ile yapı arasında hava basıncının olumsuz etkisini ortadan kaldıracak şekilde gabari bırakılmalıdır.

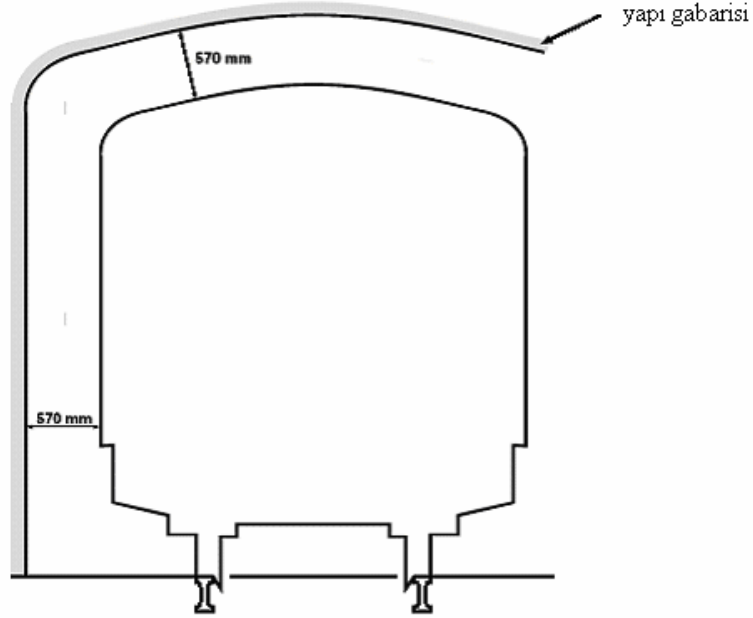
Servis hattı iç rayı ile ana hattın dış rayı arasındaki mesafenin ne olması gerektiği önemli bir sorudur. Bunun için birçok tanım vardır. TSI, 250 km/sa hız ile geçen bir trenin kendisinden 2 metre uzaklıkta bir insana bir çekim uygulayamayacağını belirtmiştir. Daha yüksek hızlar için, her demiryolu ilave perdeler koyarak ve mesafeleri arttırarak ilave önlemler almalıdır.

Hızın kontrol edilebildiği ve sınırlandırıldığı yerler dışında taşıtların gabarilerinin en yakın noktaları arasında 910 mm mesafe olmalıdır (Şekil 3.12).



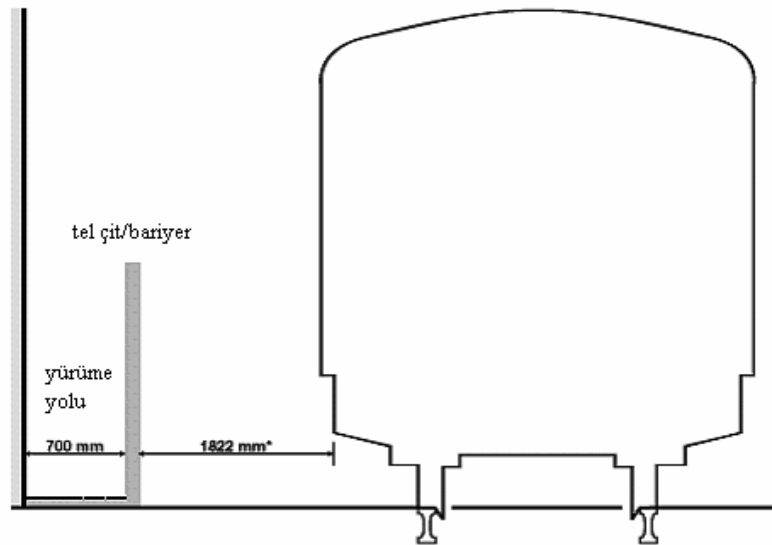
Şekil 3.12 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996)

Karışık işletilen hatlarda geçiş gabarisi farklı aerodinamik şekiller gözönünde bulundurularak 1210 mm'ye çıkarılabilir. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi yüksek hızlı trenler ile yapılar arasındaki minimum gabari 570 mm olmalıdır.



Şekil 3.13 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996)

Şekil 3.14'de görüldüğü gibi yürüme yolu ile trenler arasında bariyer konulduğunda güvenli mesafe en azından 1812 mm olmalıdır. Yürüme yolunun dış raya olan uzaklığı için farklı ülkelerin belirlemiş olduğu kriterler Çizelge 3.32'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Geçiş gabarisi (Health & Safety, 1996)

3.7.4 Köprüler

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. YHT'in hareketi, özellikle rezonans durumunda, zeminde çok büyük titreşimlere sebep olmaktadır.

YHD inşaatları, dünyada bir çok ülkede, inşaat mühendisliği alanında en önemli ve değerli projelerin başında gelmektedir. Demiryolu köprüleri sözkonusu olduğunda hareketli (dinamik) yük etkisi en temel tasarım olmaktadır. Bununla birlikte YHD'nda köprülerde oluşan rezonans durumu, hareketli tekil yük etkisinden çok daha büyük etkiye neden olmaktadır (Goicolea, Domínguez, Gabaldón & Navarro). YHD için 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 ziyade yolcu konforuna önem verilerek yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Kargarnovin, 2005).

İlk yapılan YHD'ndan sonra köprülerde balastın dökülmesi sonucu hat geometrisinde ve stabilizasyonunda bozulma görülmüştür. Bunun sebebinin trenlerin oluşturduğu düşey ivmenin döşemede yarattığı etkidir. Bu sorunun teorik ve uygulama analizleri aşağıdaki verileri ortaya çıkarmıştır:

- Köprülerde oluşan 0.7 – 0.8 g düşey ivme balastın likit davranmasına sebep olur ve gelen yükleri taşıma kapasitesini yitirir,
- Döşeme ve balast arasında elastik hasır konulması ivmeyi arttırdığından durumu daha da kötüleştirmektedir,
- Balastsız sistemlerde 1.0 g düşey ivme oluştuğu takdirde ray-tekerlek sürtünmesinin oluşturduğu Q yükleri kabul edilebilir limitlerin altına iner (hatta ray-tekerlek teması yitirilebilir),
- Belirli hız aralıklarında yürüyen aksamın düzenli ve tekrarlı hareketi rezonans durumunu ortaya çıkartır, döşeme bu harekete ilave olarak büyütme etkisi ekler bunun sonucunda hem düşey ivme hem de sehim artar.

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 20 Hz'in altında olmalıdır,
- Balastsız sistemde; düşey ivme 0.5g değerini aşmamalı ve düşey ivmenin frekansı 20 Hz'in altında olmalıdır.

Yeni yapılan YHD'nda 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,
- Rijitliğin değişmesi.

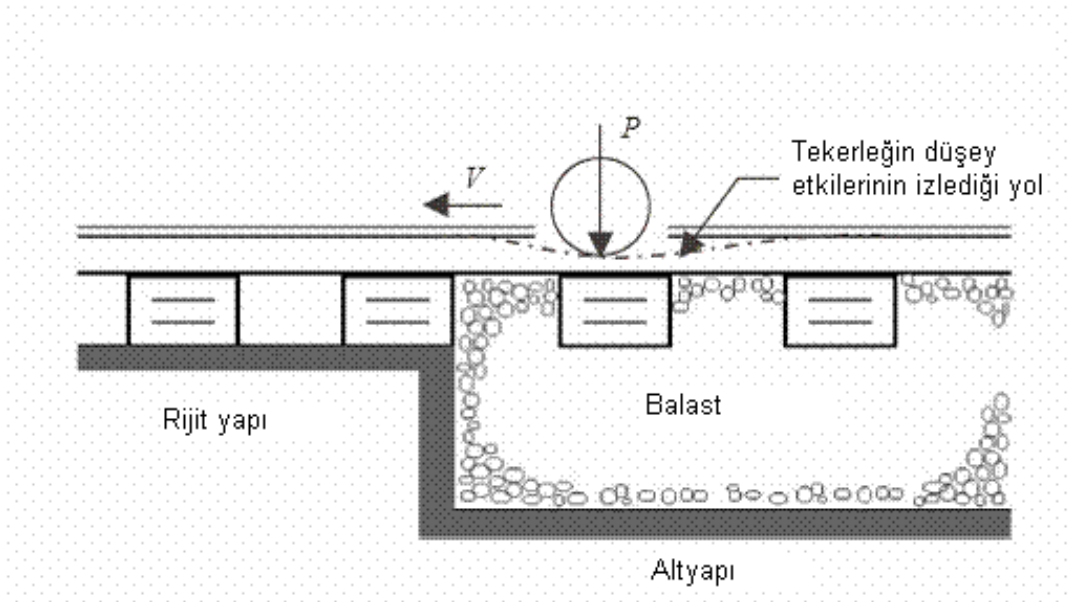
Çökme problemi iki farklı yapı arasında farklı oturmaların meydana gelmesi sebebiyle ortaya çıkar. Bu problem genelde hattın işleme açılmasından sonraki ilk beş yıl içerisinde meydana gelerek bakım maliyetini artırır. Daha sonraki yıllarda problem azalır.

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.

Ayrıca YHD'nda yola yakın noktalara köprü ayaklarının yerleştirilmemesi ve yeraltı istasyonlarında, YHD ile birleşen hatlarda, alt ve üst geçitlerde yapıların kolonlarının YHT'lerin derayman tehlikesine karşı korunması sağlanmalıdır. Uzun viyadüklerde amaç bakımı zorlaştıran genişleme derzlerinin azaltılmasını, hatta tamamen kullanılmamasını sağlamaktır.

3.7.5 Geçiş Yerlerinin Tasarımı

Geçiş yerleri, demiryollarında düşey rijitlikte birdenbire değişim olduğu bölgelerdir. Genelde köprü başlangıç noktalarında, beton traversden ahşap traverse geçilen tünellerin sonunda, hemzemin geçitlerinde, balastlı yolun devamında oluşturulan menfezlerin olduğu noktalarda (Şekil 3.16) geçiş yerleri oluşur. Geçiş yerleri periyodik bakım gerektiren bölgelerdir. Bu bakım ihmal edildiğinde, geçiş yerleri, hızlandırılmış şekilde bozulmaya uğrarlar. Bunun sonucunda balastın kabarması, traverslerin yüzmesi veya askıda kalması, raylarda kalıcı deormasyonlar, hat malzemelerinin yıpranması, yol yüzeyi ve hat genişliğinin bozulması olayları meydana gelir. Bunların hepsi derayman için potansiyel yaratmaktadır (Lei-Mao, 2003).



Şekil 3.16 Geçiş noktası (Slab Track, 2006)

Yüksek hızlı demiryollarında yolun altyapısındaki rijitliğin değişimi, farklı sertlik ve oturma özelliklerine sahip yapılardan birbirine geçiş sırasında rahatça gerçekleşmelidir. Köprüler gibi rijitliği yüksek sertliğe sahip yapılar ile dolgular gibi düşük rijitliğe sahip yapılar arasındaki oturma farklılıkları özel geçiş alanları uygulanarak azaltılmalıdır. Bunun için köprü, dolgunun içindeki bir süreksizlik olarak kabul edilebilir. Doğal olarak bu süreksizlik noktalarında elastiklik ve oturma tamamen farklı olmaktadır.

Köprülerin oturması genelde işletim sırasında kazık temeldeki rijitliğin değişimine bağlı olarak 0-2 mm arasında gerçekleşir. Toprak işleri yapısında ise oturma işletim sırasında 20

mm'ye kadar çıkabilmektedir.

Geçiş bölgesinde geçişi rahatlatmak için, rijitliği birbirinden farklı yapılar arasındaki taban zemininin iyileştirilmesi gerekmektedir. Rijitliğin değiştiği her süreksizlik noktasında özel geçiş şartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Genelde yüksek hızlı demiryollarında aşağıdaki geçiş alanları bulunur.

- Toprak işleri– köprü geçişi,
- Toprak işleri–tünel geçişi,
- Balastsız yol – balastlı yol geçişi ve farklı türlerde balastsız üstyapılar arası geçiş,
- Toprak işleri– menfez geçişi,

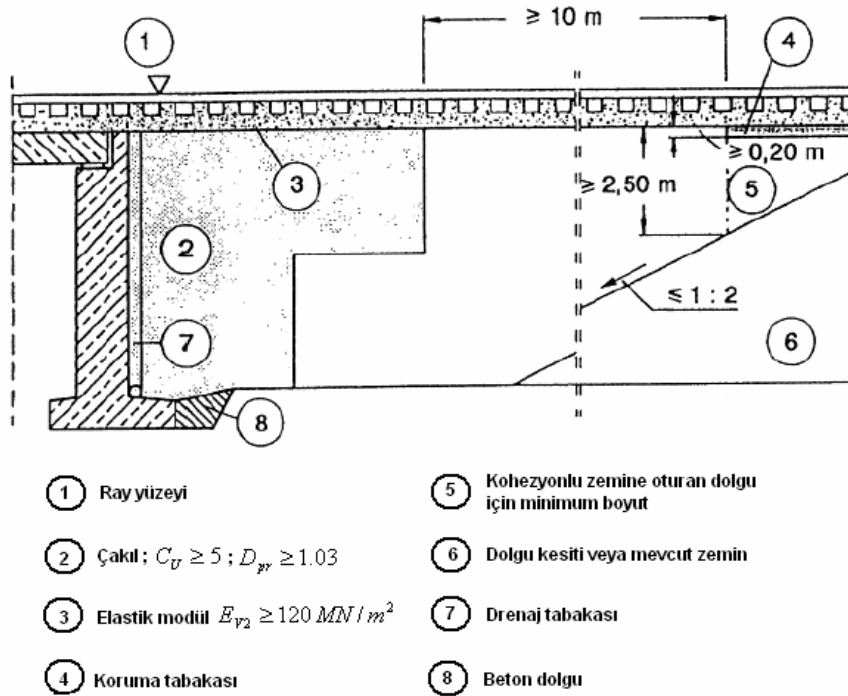
İhtiyaç duyulan noktada uygulanacak geçiş alanının uzunluğu, yanında bulunduğu yapının veya dolgunun yüksekliğinden 4 kat fazla olacak şekilde gerçekleştirilmelidir ($4 \times H$ veya en azından 20 m olmalıdır). Geçiş çizgisinin şekli taban zemini ve taban zemininin taşıma kapasitesi gibi özelliklerine bağlı olarak değişir. Geçiş alanları her farklı yapı için ayrıca tasarlanmalıdır.

3.7.5.1 Toprak İşleri-Köprü Geçişi

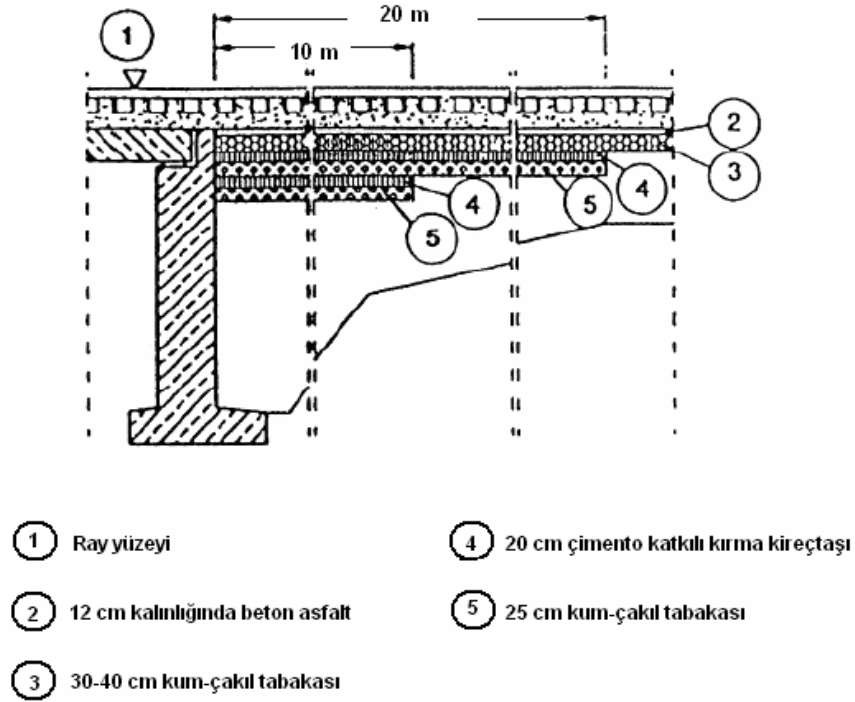
Bugüne kadar yüksek hızlı demiryollarında edinilen tecrübelerle köprü-toprak işleri geçişinde ortaya çıkan problemleri Şekil 3.17’de göstermek mümkündür. Köprüde meydana gelen çökmenin toprak işleri üstünde yer alan yola göre göre çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Rijitlikte meydana gelen bu süreksizlik, hıza, rijitlik oranına, sönümleme kapasitesine ve geçiş bölgesinin uzunluğuna bağlı olarak dinamik kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda çökmelerden dolayı yol geometrisinde oluşan değişikliklerde dinamik kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Altyapıda oluşan oturmaların yarattığı etki gibi, düşey geometride meydana gelen değişimler de araçta düşey ivmenin artmasına ve dolayısıyla yolcu konforunun ve yola etkiyen dinamik yüklerinin değerinin değişmesine yol açmaktadır. Yola etkiyen yüklerde meydana gelen değişim yol geometrisinin hızlıca bozulmasına yol açar ve bu yüzden ilave bakım ihtiyacının doğmasına sebep olur. Yapılan araştırmalarda, yolun düşey geometrisinin bozulmasının yoldaki rijitliğin değişiminden daha olumsuz etki ettiği ortaya çıkmıştır (Esveld).

Toprak gövde ile köprü arasındaki geçiş yerlerinde, çökme farklılıklarını azaltmak ve mesnet rijitliğinin kademeli değişimini sağlamak için uygun önlemler alınmalıdır. Kenar ayak dolgusunda kullanılacak malzeme özel olarak seçilmeli ve iyi sıkıştırılmalıdır. Yapının ön ve arkasında bir drenaj tabakasına ihtiyaç duyulur. Alman demiryollarında üstyapıda da çeşitli iyileştirmeler geliştirmiştir. Köprülerde kullanılan klavuz raylar köprünün her iki tarafında payandanın uzunluğu boyunca balastlı yola monte edilerek rijitliğin sürekliliği ve geçiş bölgesinin konforlu olması sağlanmıştır (Jenks, 2006).

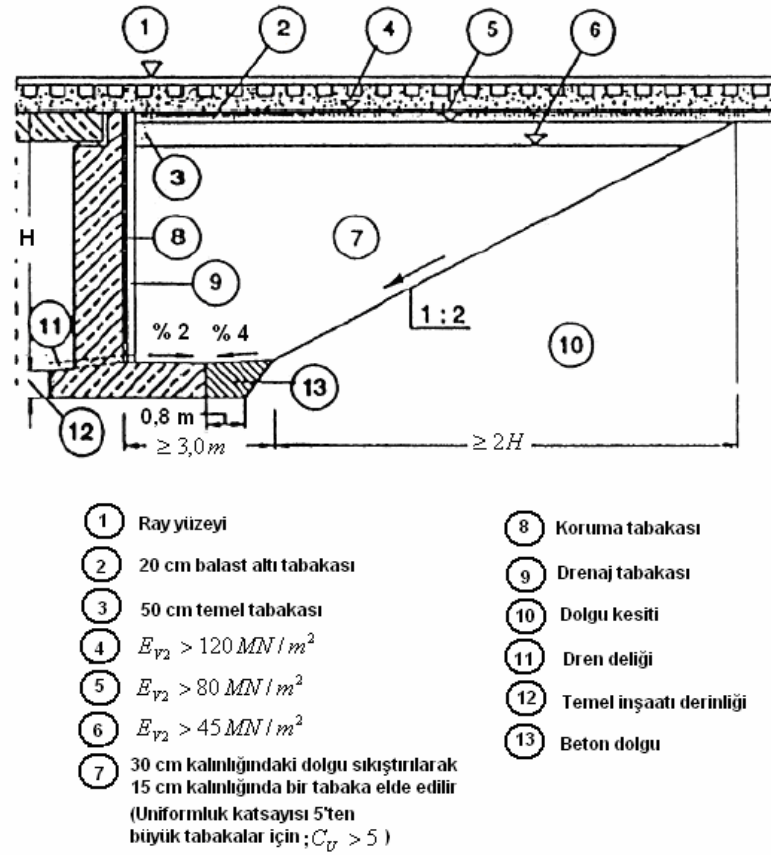
Şekil 3.19'dan 3.24'ye kadar Almanya (DB), İtalya (FS), Macaristan (MAV), İsviçre (SBB/CFF) ve Fransa (SNCF) Demiryolları'nda denenmiş geçiş yeri tasarımları görülmektedir.



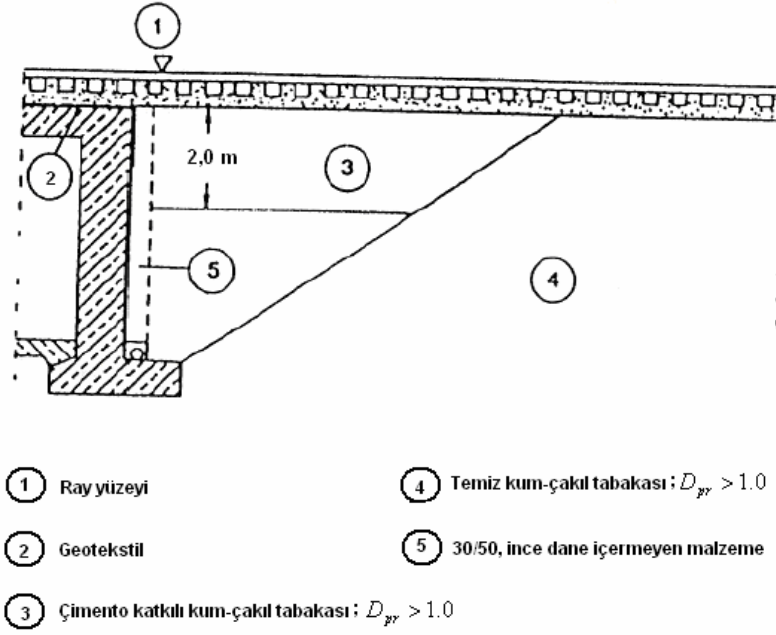
Şekil 3.19 Almanya (DB)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006)



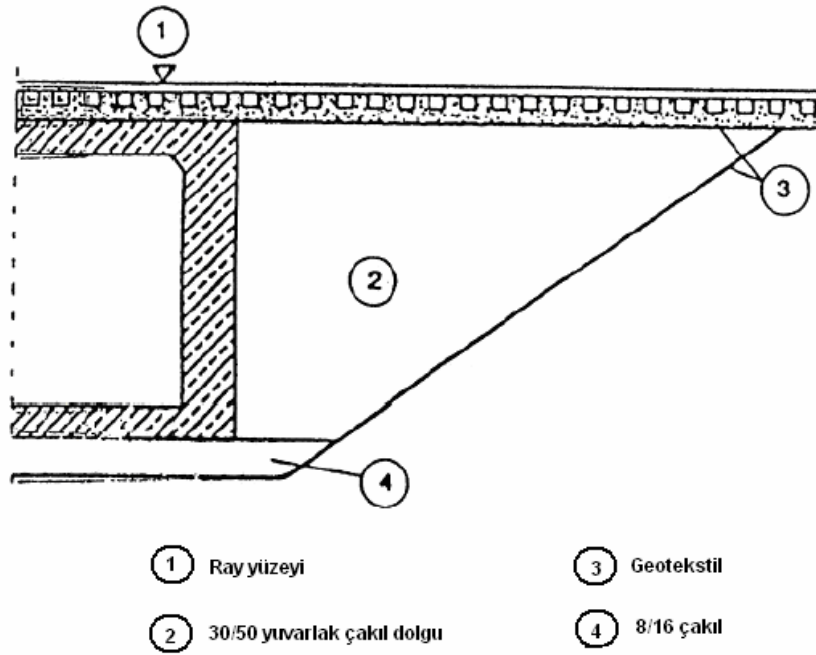
Şekil 3.20 İtalya (FS)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006)



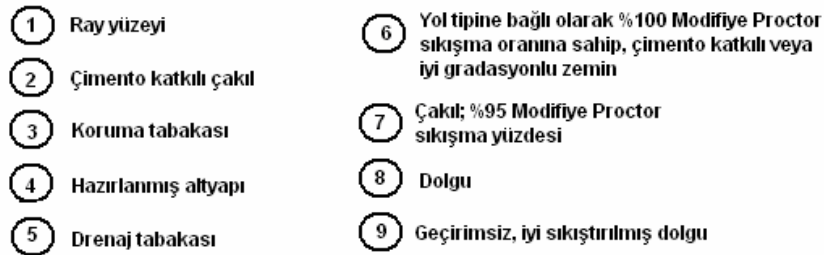
Şekil 3.21 Macaristan (MAV)'da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (Erel, 2006)



Şekil 3.22 İsviçre (SBB/CFF)’de kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (normal yapı) (Erel, 2006)



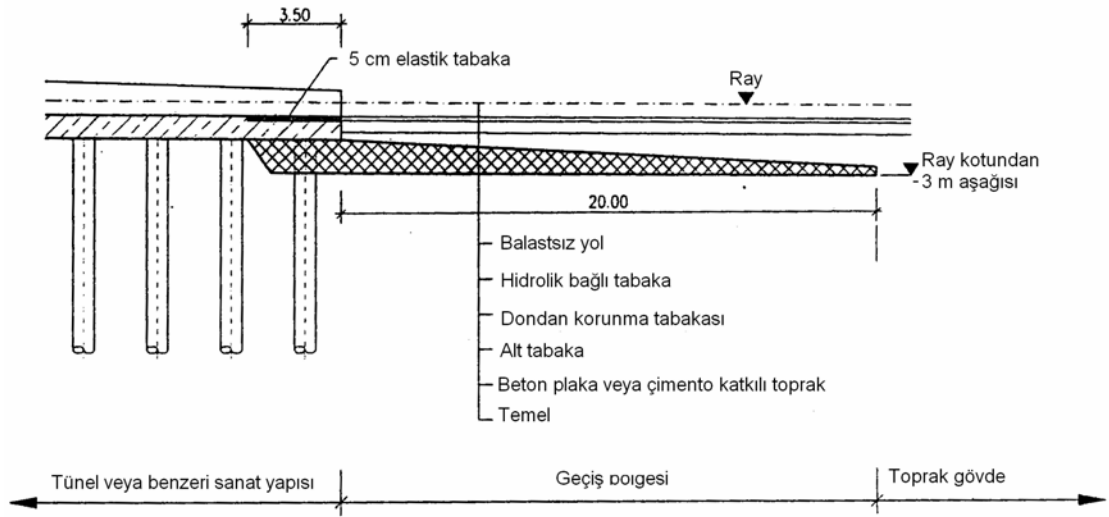
Şekil 3.23 İsviçre (SBB/CFF)’de kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (mevcut hatların varyantı için) (Erel, 2006)



Şekil 3.24 Fransa (SNCF)’da kullanılan bir geçiş yeri tasarımı (köprü dolgudan önce yapılmış) (Erel, 2006)

3.7.5.2 Toprak İşleri-Tünel Geçişi

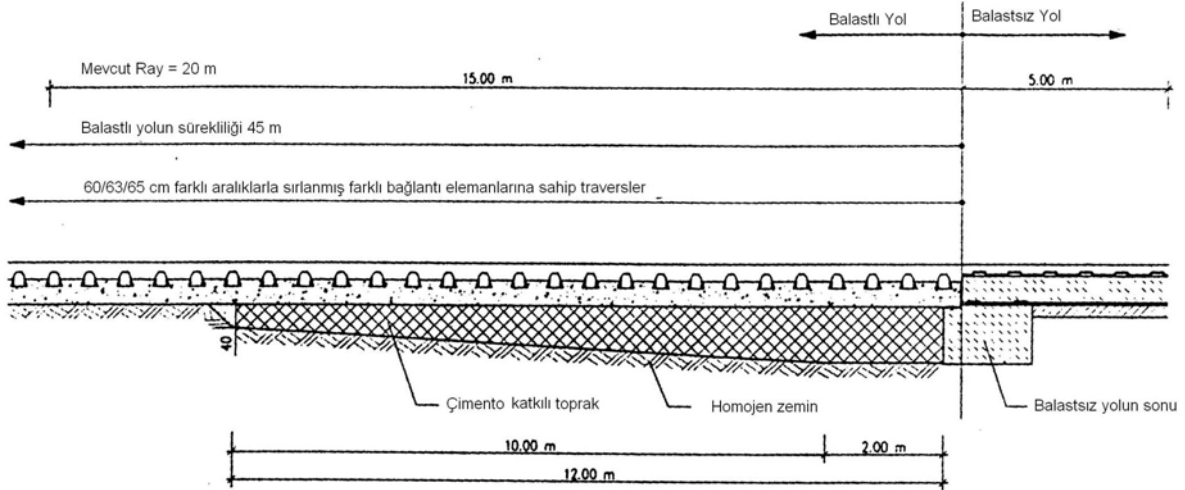
Tünel gibi rijit bir yapıdan, altyapının (subgrade) üzerine inşaa edilen yola geçişte oluşan rijitlik farkını azaltmak için farklı sistemler geliştirilmiştir. Geçiş bölgesinde minimum 3.50 m uzunluğundaki elastik tabaka tüneldeki üstyapının altına konularak bu problem giderilebilir (Şekil 3.25). İlave olarak taban zemininin durumuna ve taşıma kapasitesine bağlı olarak toprak ve çimentodan yapılmış bir kenar ayak dolgusu kullanılabilir. Eğer tünelin temeli çok rijit ise, örneğin kazık temel üzerinde ise betondan yapılmış bir geçiş bölgesi kullanılması daha uygun olacaktır.



Şekil 3.25 Toprak işleri –tünel geçiş noktası (RTR, 2006)

3.7.5.3 Balastsız Yol–Balastlı Yol Geçişi ve Farklı Türlerde Balastsız Üstyapılar Arası Geçiş

Yüksek hızlı demiryolu inşaatları, ekonomik ve fiziksel büyük dikkate alındığında çok kısa sürede sonuçlandırılmayacak projelerdir. Dolayısı ile YHD inşaatı sırasında yolun farklı bölümlerinde, inşaatı yapan firmanın tercihine ve güncel teknolojik kısıtlara bağlı olarak farklı yol teknolojileri uygulanabilmektedir. Ülkemizde Ankara-İstanbul arasında inşaatı devam eden YHD, bu şekilde farklı yükleniciler tarafından yapılmaktadır. Henüz inşaatı tamamlanmamış olan bu yolda, iki farklı inşaat firmasının, projenin şartnamesine uygun şekilde birbirinden teknolojik olarak tamamen bağımsız balastlı veya balastsız yol yapması mümkündür. Yapılacak uygulamada kullanılacak altyapı ve üstyapı yöntemleri farklılık gösterebilir. Bunun gibi iki farklı YHD'nun birleştiği noktalarda geçiş çok rahat gerçekleşmelidir. Şekil 3.26'da balastsız yoldan balastlı yola geçiş gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Balastlı yol- balastsız yol geçişi (RTR, 2006)

Rijitlikleri tamamen farklı balastlı yoldan balastsız yola geçiş çok rahat gerçekleşmelidir. Bu geçiş bölgeleri oturma hesaplama yöntemleri kullanılarak tasarlanmalıdır. Balastlı yola geçişin rahat olabilmesi için geçiş bölgesi homojen, taşıma kapasitesi yüksek ve iyi oturma davranışına taban zemini üzerinde inşaa edilmelidir. Farklı taşıma tabakalarına sahip balastsız yol ile balastlı yolun birleştirilmesi ankraj ve dübeller ile gerçekleştirilir.

Balastlı yolun altındaki yol yapısının rijitliğini arttırmak için balastsız yolun bittiği noktadaki hidrolik bağlı tabakaları büyötmek gerekmektedir. Aynı zamanda balast yapıştırılarak rijitliğin zaman içinde azalması önlenabilir. Balastlı yolda traversler arası maksimum mesafeyi belirlenen aralık ile sınırlandırmak ve yola ilave raylar konularak rijitliğin artması sağlanır. Bu önlemlere ilave olarak aşağıdaki yöntemler uygulanır;

- Bağlantı noktalarında elastik malzeme kullanımı,
- Balastsız yolun bağlantı noktalarında rijitliği azaltmak,
- %3-5 çimento katkılı malzeme ile payanda dolgusu yapılması.

Farklı balastsız yollar sistemlerine bağlı olarak farklı inşaa yüksekliklerine sahiptirler. Bunun gibi farklı balastsız yollar arası geçişte ortaya çıkan kalınlık farklılıkları geçiş tabakaları kullanılarak dengelenmelidir. Farklı kalınlıklar arasındaki geçişi rahatlatmak için hidrolik bağlı tabakalar kullanılabilir. Balastsız yollar arası geçişte altyapıda (subgrade) daha başka işlemlere gerek yoktur.

3.7.5.4 Toprak İşleri-Menfez Geçişi

YHD’nda dolgulardaki menfezler toprak gövde içinde rayın üst kotundan itibaren 3m aşağıda yapıldığı takdirde neredeyse oturmaya hiç etki etmemektedirler. Uzunluğu 2 metreden kısa ve üzerinde 2.30 metreden fazla kaplama toprağı olan menfezler rijitlikte bir değişikliğe ve oturmaya neden olmazlar. Boyuna yönde dolgu ile menfez arasında etkin bir rijitlik farkı gözlemlenmemiştir.

3.7.6 Çimento, Uçucu Kül ve Çakıl Karışımı Kolonlar ile Zeminin İyileştirilmesi

Çimento, uçucu kül ve çakıl karışımı (CFG) yöntemi ile zemini takviye etmek mümkündür. CFG yöntemi ile yapılan uygulamada toprağın yerine geçecek beton kolonları toprağın içine sürmek için özel bir burgu makinasına ihtiyaç duyulur. Toprağın yanıl yönde yer değiştirmesi, etrafını çevreleyen toprağın iyileşmesine katkıda bulunur. Bu metot mevcut yapıların veya inşaa halinde olan yapıların inşaatında kullanılabilir.

Çimento katkısının sıkıştırılma imkanı toprak ile CFG kolonları arasında gerilmenin paylaşımı imkanını sağlar. Bu da drenlerin sürülmesi gereken derinlikte önemli tasarruf sağlar. CFG kolonları etraflarındaki toprağın yetersiz temel üstüne oturması halinde olsa bile deformasyona uğramazlar.

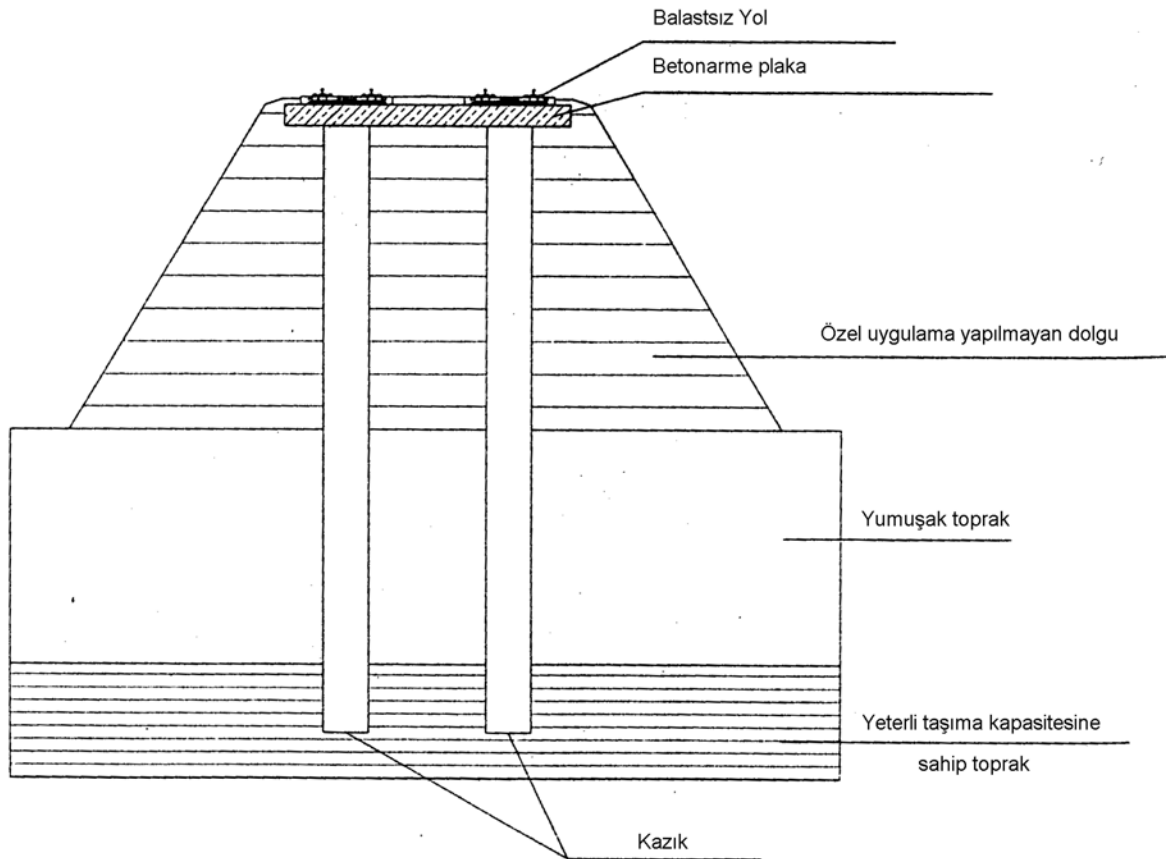
Yükün dağıtımını sağlayacak bir tabakanın CFG kolonlarının üstüne konulabilmesi mümkündür. Bu şekilde pahalı olacak kazık başlık kirişlerinden ve beton plakadan kaçınmak mümkün olmaktadır. Klasik kazık uygulamasında toprağın modülü betonun modülüne etki etmez. Bu demektir ki yüzeye etkileyen yük daha önceden tanımlanan modülün oranına göre kolonlar ve toprak arasında paylaşılır.

3.7.7 Kazık Temel Üzerinde Balastsız Yol Uygulaması

Diğer yöntemlerin mümkün olmadığı, uygulanmasının çok pahalı olduğu ve hatta zamanın elverişli olmadığı durumlarda jeoteknik ve hidrolojik yönden zor bölgelerde özel çözümler gereklidir. Taban zemini zaman içinde oluşabilecek oturmalara karşı uygun taşıma kapasitesine sahip olmalıdır. Taban zeminindeki yumuşak toprağın etkisinden kurtulmak için yumuşak, kohesiv toprak, değiştirilmeli veya alt temelde iyileştirme uygulanmalıdır. Yumuşak toprak, su oranına ve süzme kapasitesine bağlı olarak hızlı ve kontrol edilemeyecek oturmalara neden olabilmektedir. Yumuşak toprak üzerine temel inşa etmek genelde karmaşık yöntemler ile sağlanabilmektedir. Bu yumuşak toprak tabakalarına kazık uygulaması

yapılarak daha derinde yer alan yeterli taşıma kapasitesine toprak tabakaları üstüne temelin oturtulması sağlanır. Uzun dönem oturma ve bilinmeyen konsolidasyon davranışını engellemek için balastsız yolu kazıklar üzerinde inşaa edecek şekilde tasarım yapılmalıdır.

Almanya’da Nuremberg-Ingolstadt YHD hattında geliştirilen yöntem ile yol üstyapısı tamamen kazıkların üstünde duran betonarme plakanın üzerine inşaa edilmiştir (Şekil 3.27). Plaka yol tarafından iletilen trafik yükleri ve sabit yükler betonarme plaka tarafından alınarak gerilme kazıklara iletilir. Taban zemininin zayıflaması veya dolgunun toprak gövdesinin kalitesinin azalması bu durumda sisteme etki etmez. Bu sayede dolguda kullanılacak toprağın ve taban zemininin kalitesinin yüksek olması zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Aslında, dolgu malzemesi sadece dolgu malzemesidir ve sadece kendi yükünü taşımalıdır. Bu tarz bir inşaat yeterince rijittir ve nerdeyse hiç oturma gerçekleşmez. Seçilen sistem, dolguda kullanılan toprak malzemenin kalitesinden tamamen bağımsızdır. Sonuç olarak böyle bir inşaat oturma ve rijitlik yönünden köprülerle karşılaştırılabilmektedir. Bu yapıdan normal dolguya veya yarmaya geçişte daha önce anlatılmış olan geçiş bölgelerinden inşaa edilmelidir.



Şekil 3.27 Kazıklar üstünde balastsız yol enkesiti (RTR, 2006)

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüz teknolojisi ile mevcut YHD’nda hızı 300 km/sa’ten 360 km/sa’e çıkartmak mümkündür.

YHD inşaatları için UIC’nin belirlemiş olduğu ve TSI’da belirtilmiş olan kriterlere uyulması uygundur.

Gelecekte mümkün olacak teknoloji ile hatlarda hızın daha yüksek olabileceği ihtimali gözönünde bulundurularak inşaat yapılmalıdır. Birçok yapı elemanının ve hareketi sağlayan trenlerin kullanım süresinin bir gün dolacağı düşünülerek böyle bir hız rezervasyonu yapmak akıllıca olacaktır.

Hatlardaki trafik tipi de geometri ve altyapı seçimini direkt olarak etkileyecektir. Yük ve yolcu taşımacılığı yapılacak bir hat için belirlenen geometrik parametreler ile sadece yolcu taşımacılığına ayrılmış bir hattaki parametreler birbirinden farklılık gösterecektir. Yük trenleri ve 300 km/sa hıza sahip yolcu trenleri aynı hatta işletildiğinde kapasite ve fazla dever problemleri ortaya çıkacaktır.

Bu sebepten ötürü aynı YHD’nda yük trenleri ile 300 km/sa hız yapan yolcu trenlerinin işletilmesi çok uygun değildir. Bu yüzden trafiğin tipi çok önemli bir seçimdir. Ancak ülkemizin demiryolu taşımacılığına olan ihtiyacı ve yetersiz demiryolu ağı sebebiyle yapılacak hatlarda karışık işletimin yapılması zorunluluğunun doğacağı öngörülebilir.

Bu bilgilerin ışığında arazi ve trafik tipi bilinmeden geometrik büyüklükleri kesin olarak belirlemek mümkün değildir.

Ancak maksimum eğim EARI’nın belirlediği çerçevede 6 km’nin üzerindeki eğimlerde %0,35, 10 km’nin üstündeki eğimlerde %0,25 olmalıdır.

Maksimum hıza karar verildikten sonra eksik deverin değerini belirlemek, yolun geometrik parametrelerinin belirlenmesi için zorunlu öncelik olmaktadır.

Mevcut YHD sistemlerinde geometrik parametreler için farklı değerler uygulanmaktadır. YHD için 160-200 mm dever değeri uygundur. Ancak sadece yüksek hızlı trenlerin işletileceği hatlar söz konusu ise daha yüksek dever değerlerine izin verilebilmektedir.

EARI’nın belirlediği eksik dever değeri 100 mm’dir. Sert arazi koşullarında daha yüksek değerlere izin verilmektedir.

Dever, eksik dever ve hıza bağı olarak yatay kurp yarıçapı belirlenmelidir. Yatay kurp yarıçapı hem konvansiyonel hem de yatar gövdeli trenler için uygun olacak kadar büyük olmalıdır. Örnek olarak, 280 km/sa hıza sahip konvansiyonel tren ve 350 km/sa hıza sahip yatar gövdeli trenin işletildiği hatta kurp yarıçapı en azından 3200 m olmalıdır. Böyle bir yolda dever 200 mm, konvansiyonel tren için eksik dever 100 mm ve yatar gövdeli tren için eksik dever 250 mm olmaktadır. Geometrik parametreleri bu değerlerde olan bir yolda yük trenlerini işletmek mümkün değildir.

Fakat tüm yol boyunca maksimum hızda seyahat sağlanamayacağından, istasyonlarda trenlerin duracağı gözönüne alınarak yolun bazı bölgelerinde çok daha düşük kurp yarıçapları uygulanabilir.

Yolun enkesiti gözönüne alındığında hız arttıkça en önemli parametreler maliyeti ve güvenliği direkt olarak etkileyen hat merkezleri arasındaki mesafe, tünellerin enkesitleri, ve bakım ekibi için gerekli yürüme yollarının konumu olmaktadır.

Tünel enkesitleri TSI'da belirlenmiş olan tünellerde basınç kriterlerine uymalıdır.

Aerodinamik açıdan tünellerin kaplamaları uygun olmalıdır.

Köprülerin kolonlarının yeri, olası kazalarda ve derayman durumunda zarar görmeyecek ve zararı arttırmayacak noktalarda olmalıdır.

Uzun viyadüklerde olabildiğince az derz boşlukları bırakılılarak rijitliğin değişimi minimize edilmelidir.

Köprülerin tasarımı, yüksek hızda oluşacak dinamik etki ile balastın stabilizasyonunun bozulmasına ve rezonans oluşumuna neden olmayacak şekilde yapılmalıdır.

Aynı şekilde toprak işleri ile sanat yapıları arasındaki geçiş noktalarında rijitliğin değişmesi söz konusu olmaktadır. Rijitlik, hız artışından direkt olarak etkilenir ve yolda bozulmalara neden olarak konforun azalmasına sebep olur. Geçiş yerlerine maksimum özen gösterilerek rijitliğin devamlılığı sağlanmalıdır.

Karışık işletimde, 2 yönlü tünellerde yük trenleri ile yüksek hızlı yolcu trenlerinin yan yana geçmesi durumunda güvenlik ve aerodinamik etkiler öngörülecek şekilde çalışmalar yapılmalıdır.

Aynı zamanda tüneller için, çift yönlü tünellerde maksimum uzunluk, iki yön arasında ara bağlantılar ve acil durumlar düşünülerek izin verilecek maksimum uzunluk belirlenmelidir.

Demiryollarında geosentetikler kullanılarak taşıma kapasitesinin arttırılması ve oturmaların kabul edilebilir limitler içinde kalmasının sağlanması inşaat ve bakım maliyetini olumlu yönde etkileyen bir çözümdür.

Balastın altında kum ve çakıl gibi granül tabakalar yerine bitüm katkılı alt balast tabakası kullanarak oturmaları ve dolayısıyla bakım maliyetlerini azaltmak mümkün olmaktadır.

Tasarım aşamasında yapılacak yolun gürültü ve titreşim hesapları ayrıca yapılmalı ve irdelenmelidir. UIC'nin bu konuda belirlemiş olduğu standartlardan olabildiğince çok yararlanılmalıdır.

YHD için yolun geometrisi bir defa yapıldıktan sonra değiştirmek mümkün olamadığından veya çok maliyetli olacağından tasarım aşamasında mevcut YHD tecrübelerinden olabildiğince çok yararlanılmalıdır.

YHD'nin başarılı olması sadece yüksek hız ile sağlanamaz. Dakikliği ve aynı zamanda yolcuya sunduğu yüksek kaliteli hizmet ile hızın sağladığı avantaj pekiştirilmelidir.

Bu çalışmaya ilave olarak yatar gövdeli trenler ile limitlerin nereye çıkabileceği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Bilow, D. N., Lotfi H. R., (2003), "Concrete Slab Track for Freight and High Speed Service Design and Construction" Portland Cement Association, Illinois.
- Bilow D. N., Randich G. M., "SLAB TRACK FOR THE NEXT 100 YEARS", Portland Cement Association, Skokie, IL
- California High-Speed Rail Authority, (2000), "Building A High Speed System For California".
- Dahlberg, T., (2003), "Railway track settlements - a literature review", Division of Solid Mechanics, IKP, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden
- EARl (2002), European Association for Railway Interoperability "Trans-European High-Speed Rail System, Technical Specification for Interoperability (TSI) "Infrastructure" Subsystem VERSION A 2002".
- Erel, A., (2002) "Ankara Metrosu 3. Aşama İşleri İçin Rijit Üstyapı Seçeneklerinin Araştırılması", Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erel, A. (2006), "Trakya Demiryolu Hattı ve İyileştirilmesi İçin Standartlar", İstanbul.
- El-Sibaie M., Jamieson D., Tyrell D. C., Dorsey J. C., Mee B. & Whitten B. (1997), "Engineering Studies in Support of the Development of High-Speed Track Geometry Specifications", Boston, Massachusetts.
- Esveld, C. (2001), "Modern Railway Track", Seceond Edition, TU Delft Universty, Netherlands.
- Esveld, C. (2005), "Developments in High-speed Track Design".
- Esveld, C., "INNOVATIONS IN RAILWAY TRACK", TU Delft.
- Goicolea J.M., Domínguez J., Gabaldón F. & Navarro J.A. "Resonant effects in short span high speed railway bridges: modelling and design issues", Madrid.
- Evren, G. (1998), "Demiryolu", İstanbul.
- Health & Safety Executive HM Railway Inspectorate (1996), , "RAILWAY SAFETY PRINCIPLES and GUIDANCE, Part 2, Section A, Guidance on the infrastructure".
- Jenks, C. W., (2006), "Design of Track Transitions", Transit Cooperative Research Program Research Results Digest 79.
- Lei X., Mao L., (2003), "Dynamic analyses of vehicles and track coupled system on track transition of conventional high speed railway", Nanchang, China.
- Levinson, D., Gillen, D., Kanafani, A., Mathie, J., (1996), "The Full Cost of Intercity Transportation –A Comparison of High Speed Rail, Air and Highway Transportation in California" Research Report.
- Levinson, D. (1993), "The Full Cost of Intercity Travel: A Comparison of Air, Highway, and High-Speed Rail".
- Lindahl, M. (2001), "Track Geometry for High-Speed Railways", Department of Vehicle Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm.

Kargarnovin M.K, Younesian D., Thompson D. & Jones J. (2005), “Ride Comfort of High-Speed Trains Travelling over Railway Bridges”, UK.

Papageorgiou M., (1991) “Concise encyclopedia of traffic&transportation systems”

Parsons-Clough Harbour, (2004) “High speed rail prefeasibility study: New York City to Montreal”, New York.

Pita A. L., Teixeira P. F. & Robuste F. “High Speed and Track Deterioration: The Role of Vertical Stiffness of the Track”, Center for Innovation in Transport (CENIT), Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain.

Pita A. L., Teixeira P. F., C. Casas-Esplugas, A. Bachiller (2005) “Optimization of high-speed ballasted tracks: the interest of using a bituminous sub-ballast layer”, Center for Innovation in Transport, Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain

RTR Special, (2006), “Slab Track, Track System Development Engineering Construction Experiences”, Issue September.

UIC High Speed Mission/South East Group, (2001), “High Performance Railway Lines In South East Europe First Stage of A High Speed Network”.

UIC (2001), “Design of New Lines for Speeds of 300-350 km/h State of The Art, First Report”.

UIC, (2005) “High Speed (Cd Rom)”, Paris.

Yalçın, S. N., (2006), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.

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

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 08.12.1979

Doğum yeri İstanbul

Lise 1990-1997 Kartal Anadolu Lisesi

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Programı

Çalıştığı kurumlar

2002-2003 Öz-Or Press Sanayi

2003-2004 Yapı Natura Mimarlık Mühendislik, Proje Yöneticisi

2005-Devam ediyor Alarko Taahhüt Grubu, Satınalma Mühendisi