

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALASTSIZ ÜSTYAPIDA ASFALT VE BETON TAŞIYICI TABAKALARIN
TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin KÖSE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALASTSIZ ÜSTYAPIDA ASFALT VE BETON TAŞIYICI TABAKALARIN
TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hüseyin KÖSE
(501131404)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ulaştırma Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501131404 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hüseyin KÖSE**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BALASTSIZ ÜSTYAPIDA ASFALT VE BETON TAŞIYICI TABAKALARIN TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail ŞAHİN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **3 Haziran 2015**

ÖNSÖZ

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de demiryolu popülaritesini hızla arttırmaktadır. Bu durum, demiryolundaki trafiğin hızla artmasına sebep olmakta ve bilim insanlarını bu alanda daha çok ve daha ciddi çalışmalar yapmaya sevk etmektedir. Bu sebeptendir ki, demiryolunda bu yoğunluğu azaltabilmek, yolculuk konforunu arttırabilmek ve daha ekonomik projeler üretebilmek için alternatif çözümlere gidilmiştir.

Modern demiryollarında geliştirilen bu alternatif çözümlerden en önemlisi balastlı üstyapı yerine balastsız üstyapının geliştirilmesidir. Bu sayede hatlarda bakım ihtiyacı azalmış, dolayısıyla da demiryollarında bakım için ayrılan süre azaltılmıştır. Balastsız üstyapı ile ilgili araştırmalar hızla devam etmekte, yenilikçi çözümler birbirini izlemektedir.

Bu çalışmada ise, balastsız üstyapıda henüz yeni sayılan ve beton taşıyıcı tabakanın alternatifi olan asfalt taşıyıcı tabaka, teknik ve ekonomik yönden irdelenmiştir.

Çalışmanın başından sonuna kadar karşılaştığım her sorunda yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarında 2210-A Burs Programı kapsamında, desteğini esirgemeyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na (BİDEB) da teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Mayıs 2015

Hüseyin KÖSE
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. BALASTSIZ ÜSTYAPI	3
2.1 Balastlı ve Balastsız Üstyapının Karşılaştırılması	4
2.2 Balastsız Üstyapı Elemanları	6
2.2.1 Ray	6
2.2.2 Travers.....	8
2.2.3 Ray bağlantı elemanları.....	10
2.2.4 Elastik pedler (Seletler).....	11
2.2.5 Beton taşıyıcı tabaka	13
2.2.6 Asfalt taşıyıcı tabaka	14
2.2.7 Hidrolik bağlayıcı tabaka	15
2.2.8 Don koruma tabakası.....	15
2.2.9 Zemin	16
3. BALASTSIZ ÜSTYAPI TİPLERİ.....	19
3.1 Ayrık Mesnetlenmiş Ray Uygulamaları	20
3.1.1 Travers veya blokların betona gömülü olduğu üstyapılar	20
3.1.2 Traverslerin asfalt-beton tabakanın üzerinde olduğu üstyapılar	32
3.1.3 Prefabrik beton üstyapılar	40
3.1.4 Monolitik tasarımlar	45
3.2 Sürekli Mesnetlenmiş Ray Uygulamaları	48
3.2.1 Gömülü ray uygulamaları.....	48
3.2.2 Kenetlenerek sürekli mesnetlenmiş ray uygulamaları	53
4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISINDA ASFALT TAŞIYICI TABAKANIN KULLANIMI	59
4.1 Asfalt Malzemesi.....	59
4.2 Asfalt Malzemesinin Demiryolu İnşaatlarında Uygulanışı	61
4.2.1 Asfaltın balast altı tabaka olarak kullanımı	63
4.2.2 Balast altı asfalt tabakanın dünya genelindeki uygulamaları	64
4.2.3 Asfaltın balastsız üstyapıda taşıyıcı tabaka olarak kullanımı.....	67
4.3 Demiryolunda ve Karayolunda Kullanılan Asfalt Tabakanın Karşılaştırılması	76
5. BALASTSIZ ÜSTYAPIDA ASFALT TAŞIYICI TABAKA ve BETON TAŞIYICI TABAKANIN TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ.....	77

5.1 Balastsız Üstyapıda Asfalt ve Beton Taşıyıcı Tabakanın Teknik Açısından İncelenmesi.....	77
5.1.1 Burulma rijitliği.....	77
5.1.2 Üstyapı yüksekliği.....	78
5.1.3 Bakım ihtiyacı	79
5.1.4 Günlük inşa performansı	81
5.1.5 Gürültü ve titreşim.....	82
5.1.6 İşletme hızları	82
5.1.7 Dingil yükleri	83
5.2 Balastsız Üstyapıda Asfalt ve Beton Taşıyıcı Tabakanın Maliyet Açısından İncelenmesi.....	83
5.2.1 Beton taşıyıcı tabakalı Yenibosna-Havalimanı Hattı'nın üstyapı maliyet analizi	86
5.2.2 Asfalt taşıyıcı tabakalı Yenibosna-Havalimanı Hattı'nın üstyapı maliyet analizi	91
5.2.3 Beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıların toplam maliyetlerinin ve eşdeğer yıllık maliyetlerinin karşılaştırılması	94
6. SONUÇLAR.....	97
KAYNAKLAR.....	101
EKLER.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	111

KISALTMALAR

AB	: Asfalt Betonu
ABL	: Asphalt Bearing Layer - Asfalt Taşıyıcı Tabaka
ATT	: Asfalt Taşıyıcı Tabaka
ATD	: AsphalTragschicht mit Direktauf Lagerung - Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Demiryolu Ağı
ATS	: AsphalTragschicht – Asfalt Taşıyıcı Tabaka
BBERS	: Balfour Beatty Embedded Rail System - Balfour Beatty Gömülü Raylı Sistemi
BTD	: BetonTragschicht mit Direktauf Lagerung- Beton Taşıyıcı Tabakalı Demiryolu Ağı
BTT	: Beton Taşıyıcı Tabaka
CBL	: Concrete Bearing Layer - Beton Taşıyıcı Tabaka
DKT	: Don Koruma Tabakası
FFBS	: Feste Fahrbahn Beton Tragschicht- Beton Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı
FFC	: Feste Fahrbahn Crailsheim- Crailsheim Balastsız Üstyapı Sistemi
FFYS	: Feste Fahrbahn Y Schlafwagen - Y Çelik Traversli Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Demiryolu Hat Yatağı
GETRAC	: German Track Corporation Asphalt - Alman Asfalt Tabakalı Demiryolu Şirketi
GmbH	: Gesellschaft mit beschränkter Haftung-Limited Şirketi
GPS	: Global Positioning System- Küresel Konumlama Sistemi
HBT	: Hidrolik Bağlayıcı Tabaka
KKA	: Kauçuk Katkılı Asfalt
LRT	: Light Rail Transit – Hafif Raylı Sistem
LVT	: Low Vibration Track-Düşük Titreşimli Hat
MEB	: Milli Eğitim Bakanlığı
ÖBB Porr	: Österreichischen Bundesbahnen – Avusturya Demiryolu Şirketi
PACT	: Paved Concrete Track-Beton Kaplamalı Hat
QS	: Soil Quality Class – Zemin Kalite Sınıfı
SA	: Standart Asfalt
SATO	: Studiengesellschaft AsphalT Oberbau-Beton ya da Y çelik Traversli Uygulama
SBS	: Strien Bütadien Strien
SBV	: Schwellen mit BitumenVerguss - Bitüm Yalıtımlı Tabaka
SFF	: Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn - Titreşim Sönümleyicili Üstyapı
SNCF	: Société Nationale des Chemins de fer Français - Fransa Ulusal Demiryolu Şirketi
TMA	: Taş Mastik Asfalt
TGV	: Train à Grande Vitesse - Yüksek Hızlı Tren
UIC	: Union Internationale des Chemins de fer – Uluslararası Demiryolları Birliği

VSB : Voie Sans Ballast – Balastsız Üstyapı
Zwp : Zwischenplatte - Bağlantı plakası

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Rayların mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).	7
Çizelge 2.2 : Günlük trafik yükü ile ray tipi arasındaki ilişki (Öztürk, 2014).....	8
Çizelge 2.3 : Bazı ray elastik tabakalarının statik ve dinamik yay katsayıları (Öztürk ve Arlı, 2009).	12
Çizelge 2.4 : Bazı zemin türlerine ait elastisite modülleri (Kimençe, 2010).....	16
Çizelge 2.5 : UIC 719.R'ye göre zemin sınıflandırması (Öztürk ve Arlı, 2009).	17
Çizelge 3.1 : Yapı tipi ve döşenme şekline göre üstyapı tipleri (Michas, 2012).	19
Çizelge 3.2 : Avrupa'da Getrac sisteminin kullanıldığı hatlar (WON, 2012).	39
Çizelge 3.3 : Bögl üstyapı sisteminin kullanıldığı projeler (www.max-boegl.com).	43
Çizelge 3.4 : ÖBB Porr üstyapı sisteminin kullanıldığı projeler (www.mabatrack.com).....	44
Çizelge 4.1 : Tekrarlı yük kalıcı deformasyon testi sonuçları (Güngör ve diğ, 2007).	70
Çizelge 4.2 : Farklı üstyapı tabakaları için farklı noktalardaki ortalama ve maksimum ivme değerleri (Zeng, 2005).	71
Çizelge 4.3 : SBS katkılı bitümlerin çeşitli özelliklerinin değişim değerleri (Namlı, 2011).	74
Çizelge 4.4 : SBS katkılı bitümlerin fraass kırılma noktası değerleri (Namlı, 2011).	75
Çizelge 5.1 : Balastsız üstyapı tiplerinin burulma rijitlikleri (Öztürk ve Öztürk, 2005).	78
Çizelge 5.2 : Farklı üstyapı tiplerinin üstyapı yüksekliklerinin karşılaştırılması (Lichtberger, 2005).	79
Çizelge 5.3 : Farklı üstyapı tiplerinin Q değerlerinin karşılaştırılması ve derecelendirilmesi (Michas, 2012).	80
Çizelge 5.4 : Farklı üstyapı sistemlerine ait günlük inşa performansları ve derecelendirilmesi (Michas, 2012).	81
Çizelge 5.5 : Çeşitli balastsız üstyapı tiplerinin inşa yılları ve hatların işletme hızları (Michas, 2012).	82
Çizelge 5.6 : Farklı üstyapı tiplerinin inşa maliyetlerinin karşılaştırılması (Lichtberger, 2005).	84
Çizelge 5.7 : Beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin yapım ve bakım maliyetleri.	91
Çizelge 5.8 : Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin yapım ve bakım maliyetleri.	93
Çizelge 5.9 : Beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemlerinin toplam maliyetleri.	94
Çizelge 5.10 : Asfalt taşıyıcı tabakanın analiz edileceği farklı sıcaklık ve araç hız değerleri (Huurman ve diğ, 2003).	96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Balastsız üstyapıda tabakaların sıralanması (Moderen, 2010).	4
Şekil 2.2 : a) Vinyol (patenli) ray, b) Oluklu ray kesiti (MEB, 2008).....	7
Şekil 2.3 : Ahşap, betonarme, çelik ve plastik travers uygulamaları (Moderen, 2010)	8
Şekil 2.4 : Travers yerleşimleri (Özalp, 2008).	9
Şekil 2.5 : Rijit endirekt bağlantı elemanı (soldaki), Elastik endirekt bağlantı elemanı (sağdaki) (Ministry of Education of the Czech Republic, 2012).	10
Şekil 2.6 : Rijit direkt bağlantı elemanı (soldaki), b) Elastik direkt bağlantı elemanı (sağdaki) (Ministry of Education of the Czech Republic, 2012).	10
Şekil 2.7 : Elastik direkt ray bağlantı elemanları (soldaki Vossloh, ortadaki Nabla, sondaki Pandrol bağlantı sistemi) (Moderen, 2010).	11
Şekil 2.8 : Elastomer ray altlığı (Selet) (Moderen, 2010).	11
Şekil 3.1 : Alman Demiryolları Berlin Şehir İçi Raylı Sistem Hattı iyileştirme projesi (Freudenstein, 2006).	21
Şekil 3.2 : Geçmişten bugüne Rheda üstyapı tasarımları (Freudenstein, 2006).....	21
Şekil 3.3 : Rheda üstyapı bileşenleri (Freudenstein, 2006).	23
Şekil 3.4 : Xian ve Zengzhou Yüksek Hızlı Tren Hattı Züblin tipi üstyapısı (Enoekl ve Nübel, 2006).	24
Şekil 3.5 : Züblin sistemi enkesiti (Enoekl ve Nübel, 2006).....	24
Şekil 3.6 : Züblin sistemi tasarım ve bileşenleri (Enoekl ve Nübel, 2006).	25
Şekil 3.7 : Züblin üstyapı sisteminde traverslerin döşenmesi (Enoekl ve Nübel, 2006).	26
Şekil 3.8 : Heitkamp üstyapı sisteminin enkesiti (Michas, 2012).	26
Şekil 3.9 : Heitkamp sisteminin test edildiği hattan bir görüntü (crash.lo9.de).	27
Şekil 3.10 : a) Sonneville ve LVT sistemlerindeki travers uygulaması b) Sistemin içeriği yerinde dökülen beton tabaka ve üzerinde yüksek elastik özelliğe sahip kauçuk kılıflı betonarme travers/blok (Rhomborg, 2009; Michas, 2012).....	28
Şekil 3.11 : Klasik ve Sabeta 312 Stedef üstyapı sistemi (Dieleman ve diğ. 2008)..	29
Şekil 3.12 : Stedef sistemi beton tabakanın hazırlanışı (Dieleman ve diğ. 2008).	29
Şekil 3.13 : Stedef üstyapı sisteminin montajı (Dieleman ve diğ. 2008).	30
Şekil 3.14 : Stedef sisteminin tamamlanmış hali (Dieleman ve diğ. 2008).....	30
Şekil 3.15 : Manş tüneline Sonneville üstyapı sistemi (www.eurotunnelgroup.com).	31
Şekil 3.16 : Standart, düşük ve yüksek sönümleme özelliğine sahip Sonneville versiyonları (www.vigier-rail.ch).....	31
Şekil 3.17 : Tünel kesitinde Walo sistemi örneği (Michas, 2012).	32
Şekil 3.18 : ATD sistemi (Michas, 2012).	33
Şekil 3.19 : ATD sistemi traversleri a) monoblok, b) İkiz blok (Mörscher, 1999). ..	33
Şekil 3.20 : Berlin Tramvay Hattı ATD sistemi (EAPA, 2014).....	34
Şekil 3.21 : Hannover-Berlin Yüksek Hızlı Tren Hattı ATD sistemi (Lechner, 2011).	34

Şekil 3.22 : BTD sistemi 1.ve 2. versiyonları (Michas, 2012).	34
Şekil 3.23 : Hannover-Berlin yüksek hızlı tren hattı 2.versiyon BTd sistemi (Lechner, 2011).	35
Şekil 3.24 : Walter balastsız üstyapı sistemi (Michas, 2012).	35
Şekil 3.25 : Nelson ankrajlı Sato üstyapı sistemi (Michas G., 2012).	36
Şekil 3.26 : FFYS üstyapı tasarımı (Quante, 2001).	37
Şekil 3.27 : Y travers plan görünümü (Quante, 2001).	37
Şekil 3.28 : Y şekilli traversin yandan ve üstten görünüşü (Quante, 2001).	37
Şekil 3.29 : FFBS-ATS-SATO üstyapı sistemi (UIC, 2011).	38
Şekil 3.30 : GETRAC A1 ve A3 tipi üstyapı sistemleri (WON, 2012).	39
Şekil 3.31 : Shinkansen üstyapı sistemi (Takai, 2007).	40
Şekil 3.32 : Shinkansen çerçeve tipi üstyapı sistemi (Takai, 2007).	41
Şekil 3.33 : Bögl üstyapı sistemi enkesiti (www.max-boegl.com).	42
Şekil 3.34 : Bögl üstyapı sisteminin inşası (www.max-boegl.com).	42
Şekil 3.35 : ÖBB-Porr üstyapı sisteminin enkesit ve tasarım bilgileri (www.mabatrack.com).	44
Şekil 3.36 : Doğrudan ray bağlantılı monolitik tasarımın bir örneği (Michas, 2012).	45
Şekil 3.37 : Çimle kaplı üstyapı sistemi (Michas, 2012).	45
Şekil 3.38 : Rasengleis tipi üstyapı (Popovic ve diğ, 2012).	46
Şekil 3.39 : FFC üstyapı sistemi (UIC, 2002).	46
Şekil 3.40 : Hochtief/SHRECK-MIEVES/LONGO üstyapı sistemi (UIC, 2002).	47
Şekil 3.41 : PACT üstyapı sistemi ($D_{üst}=150-200$ mm, çevresel koşullara bağlı olarak $D_{alt}=300$ mm) (Michas, 2012).	48
Şekil 3.42 : INFUNDO gömülü ray üstyapı sistemi (Esveld, 1999).	50
Şekil 3.43 : Gömülü ray üstyapı sisteminin detayı (Esveld, 1999).	50
Şekil 3.44 : Gürültü seviyesi düşük tasarım (Esveld, 1999).	51
Şekil 3.45 : BBERS sistemi MkI (solda) ve MkII(sağda) versiyonları (Innotrack, 2008).	51
Şekil 3.46 : BBERS MkII sistemi detayı (Michas, 2012).	52
Şekil 3.47 : BBERS tasarımı deraymandan koruma tabakası (Innotrack, 2008).	52
Şekil 3.48 : Deck-Track tasarımı (Michas, 2012).	53
Şekil 3.49 : a) Oluklu ray detayı, b) Cocon Track tasarımı (Michas, 2012)	54
Şekil 3.50 : Oluklu ray uygulaması (Michas, 2012).	54
Şekil 3.51 : a) Kauçuk elemanların yerleştirilmesi b) Montajı tamamlanmış hali (Michas, 2012).	55
Şekil 3.52 : Vanguard tasarımı (UIC, 2011).	55
Şekil 3.53 : Test aşamasındaki KES sistemi (Michas, 2012).	56
Şekil 3.54 : SFF üstyapı sistemi (Michas, 2012).	56
Şekil 4.1 : Sıcak karışım asfaltın üretim şeması (Tahta, 2013).	61
Şekil 4.2 : Asfaltın balast altı tabaka olarak (üstte) ve direk taşıyıcı tabaka olarak (altta) uygulanması (ROSE, 2013).	63
Şekil 4.3 : İtalya Yüksek Hızlı Demiryolları Üstyapı enkesit profili (Rose, 2013)...	65
Şekil 4.4 : Fransa'daki klasik ve asfalt tabakalı üstyapının karşılaştırılması (Rose, 2013).	66
Şekil 4.5 : Madrid-Vallodolid Hızlı Tren Hattı (solda) ve Barselona-Fransa sınırı karışık işletilen hızlı tren hattı (sağda) (Rose, 2013).	67
Şekil 4.6 : İspanya yüksek hızlı demiryollarında balast altı asfalt tabaka uygulamasının enkesiti (Rose, 2013).	67
Şekil 4.7 : Asfalt serme makinesi (www.this-magazin.de).	68

Şekil 4.8 : Tekrarlı yük sayısına bağlı toplam kalıcı deformasyon değerleri (Güngör ve diğ, 2007).	70
Şekil 4.9 : Karışımların esneklik modülleri (Güngör ve diğ, 2007).	70
Şekil 4.10 : Mesafeye bağlı olarak farklı tabakalarda oluşan maksimum ivme değerleri (Zeng, 2005).	72
Şekil 4.11 : SBS polimer katkılı bitüm ile standart bitümün 105°C ve 165°C sıcaklıklarda viskozite-kesme hızı ilişkisi (Burger ve diğ, 2001).	73
Şekil 4.12 : ATD sistemi hat geometrisi kontrolü (EAPA, 2014).	75
Şekil 5.2 : Farklı üstyapı tiplerinin Q değerlerinin karşılaştırılması (Michas, 2012).	80
Şekil 5.3 : Karayolunda ve demiryolunda asfalt taşıyıcı tabakaya gelen yükler (Lechner, 2011).	83
Şekil 5.4 : Yenibosna-Havalimanı arası balastsız üstyapı (Şahin, 2011).	85
Şekil 5.5 : Vosloh 336 bağlantı sistemi (Şahin, 2011).	85
Şekil 5.6 : Monoblok traversli ATD sistemi (Mörscher, 1999).	91
Şekil 5.7 : Gömülü raylı uygulamada asfalt taşıyıcı tabakanın enkesit modeli (Huurman ve diğ, 2003).	95

SEMBOL LİSTESİ

w	: Mukavemet momenti
I	: Atalet momenti
EI	: Eğilme rijitliği
γ	: Kesme faktörü
E	: Elastisite modülü
s⁻¹	: Kayma hızı

BALASTSIZ ÜSTYAPIDA BETON VE ASFALT TAŞIYICI TABAKANIN TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Demiryolu ulaşımı, insanlığın uzun zamandır kullandığı ve güvendiği bir ulaşım türüdür. Teknolojinin de gelişimiyle yüksek hız ve konfor imkanı veren bu ulaşım türü, hem toplumun hem de bilim dünyasının dikkatini çeken bir sektör olmayı başarmıştır. Özellikle Uzak Doğu ve Avrupa’da yapılan yatırımlar, demiryolunda köklü değişimleri beraberinde getirmiştir. Bu ülkelerde yüksek hız ve konfor imkanı sağlamak için mevcut balastlı hatlar iyileştirilmiş ve yeni hatlarda deformasyona uğramayan balastsız hatlar inşa edilmeye başlanmıştır. Böylece bakım ihtiyacı önemli miktarda azalmış ve bu sayede hat seferlerinde meydana gelen problemler en aza indirgenmiştir.

Günümüz demiryolunda balastsız üstyapının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bunda bakım ihtiyacının azalmasının yanı sıra hat üstyapı yüksekliklerinin azalması da bir o kadar önemli faktördür. Bu sayede özellikle tünel, köprü gibi yapılarda maliyet önemli derecede azalmıştır. Dünya genelinde kullanılan balastsız üstyapı tipleri ve bu üstyapı tiplerinin hat uzunlukları incelendiğinde, bilim insanlarının balastsız üstyapı sistemlerine ne derece önem verdiği ve bu sistemi daha da geliştirebilmek için ne kadar mesai harcadığı görülmektedir.

Standart bir balastsız üstyapı; ray ve ray sabitleme elemanları, traversler, beton taşıyıcı tabaka ya da asfalt taşıyıcı tabaka, suyun etkisinden koruyucu hidrolik olarak bağlanmış tabaka, dondan koruyucu tabaka ve temelden meydana gelmektedir. Bu bileşenler ikinci bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Balastsız üstyapı sistemleri çok farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu çalışmada, en yaygın sınıflandırma şekillerinden biri olan yapı tipi ve döşenme şekline göre sınıflandırma kullanılmıştır. Bu sınıflandırmada balastsız üstyapı tipleri, rayların taşıyıcı tabakaya ayırık mesnetlenmesi durumu ve sürekli mesnetlenmesi durumu olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. İlk ana grup olan rayların ayırık mesnetlendiği balastsız üstyapı tipi, kendi içerisinde dört alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar, traverslerin veya blokların betona gömülü olduğu üstyapılar, traverslerin asfalt/beton tabakanın üzerinde olduğu üstyapılar, prefabrik beton üstyapılar ve monolitik (tek döküm) üstyapılardır. İkinci ana grup ise gömülü raylı üstyapılar ve kenetlenerek sürekli mesnetlenmiş üstyapılar olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Dünyaca ünlü balastsız üstyapı sistemlerinden Rheda 2000 ve Stedef üstyapı sistemleri ayırık mesnetli, traversleri betona gömülü üstyapılara örnektir. En çok bilinen üstyapı sistemlerinden bir diğeri olan Shinkansen sistemi monolitik üstyapı tipine dahil iken, Infundo-Edilon üstyapı sistemi sürekli mesnetli gömülü raylı üstyapı grubuna dahildir. Bu konu üçüncü bölümde ayrıntılarıyla ele alınmıştır.

Balastsız üstyapıda bu detaylı sınıflandırmanın yanı sıra, bu sistemleri asfalt taşıyıcı tabakalı ve beton taşıyıcı tabakalı olarak da kabaca ayırmak mümkündür. Demiryolunda bilindiği üzere balastsız üstyapılarda en yaygın kullanılan taşıyıcı tabaka beton ile imal edilendir. Günümüzde asfalt malzemesi ile üretim de önem

kazanmaya başlamıştır. Asfaltın karayolunda olduğu gibi demiryolunda da taşıyıcı tabaka olarak tercih edilmesinde birçok neden gösterilebilir. En önemli nedenlerden biri, asfalt malzemesinin esnek olması, dolayısıyla da zorlu koşullara uyum sağlayabilmesidir. Bir diğer faktör ise, asfaltın sertleşme süresi gerektirmemesi, buna bağlı olarak da imalatın hızlı bir şekilde yapılabilmesidir (FFYS-Y çelik traversli asfalt taşıyıcı tabakalı demiryolu hat yatağı için günlük inşa performansı 350 m iken, beton taşıyıcı tabaka kullanılan Rheda Berlin üstyapısı için bu değer 170 m olmaktadır). Öte yandan yapılan araştırmalara göre karayolunda, dingil yükü 100 kN olan tipik bir ağır vasıttan asfalt tabakaya gelen standart gerilme $0,7 \text{ N/mm}^2$ iken, demiryolunda dingil yükü 200 kN olan bir trenden, traversli asfalt taşıyıcı tabakaya gelen gerilmeler $0,3 \text{ N/mm}^2$ mertebesinde dir. Dolayısıyla, asfaltın balastsız üstyapıda alternatif bir sistem olmasında bir sakınca görülmemektedir.

Asfalt malzemesi, aynı zamanda balastlı yapılarda balast altı tabaka olarak da tercih edilebilmektedir. Özellikle balast temininin ve naklinin zor olduğu bölgelerde asfaltın tercih edilmesi çok daha ekonomik olmaktadır. Nitekim İtalya Demiryolları, bu sebepten dolayı Roma-Floransa hızlı tren hattında balast altı asfalt tabaka kullanımına karar vermiştir. Bunun dışında, Fransa Demiryolları da bu sistemi TGV (Train à Grande Vitesse-Yüksek Hızlı Tren) Doğu (Paris'i Strasbourg'a bağlayan hat) hattında 3 km'lik bir test hattında denemiş ve 50 cm'lik kireçtaşından oluşan balast altı tabaka yerine, 14 cm'lik asfalt tabakanın kullanılabileceğine kanaat getirmiştir. Bu sayede üstyapı yüksekliğinde 36 cm'lik azalmaya gidilmiştir. Bu azalmanın km başına 5000 m³ balast malzemesi sarfiyatını önlediği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada, asfalt ve beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıların teknik ve ekonomik karşılaştırması yapılmıştır. Bu tabakaların, Yenibosna-Havalimanı hattı üzerinde yapım ve bakım maliyetleri hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, beton taşıyıcı tabakalı üstyapı tipinin, asfalt taşıyıcı tabakadan inşa maliyetleri açısından %25, toplam maliyetler açısından ise %18 daha ekonomik olduğu görülmüştür. Ancak, asfalt ile ilgili çalışmaların devamı halinde bu farkın kapanabileceği tahmin edilmektedir.

TECHNICAL AND ECONOMICAL COMPARISON OF CONCRETE BEARING LAYER AND ASPHALT BEARING LAYER IN BALASTLESS SUPERSTRUCTURE

SUMMARY

Railway transport has been one of the most reliable and commonly used means of transport for a long time. This transportation system offering the opportunity of high speed and comfort has managed to become a popular sector that draw the attention of both the society and science world. The investments especially made in the Far East and Europe has led to radical change in railways. In these countries, existing balasted tracks has been rehabilitated and balastless tracks that are not become deformed began to be built to offer the oppootunity of high speed and comfort. Thus, both the need for maintenance has reduced considerably and problems that occur in the lines has been minimized.

Nowadays, the use of ballastless railway superstructure has been becoming increasingly widespread. The reduction of the height of the superstructure, as well as decrease in the need for maintenance is also important factor for this. Thus, construction costs are considerably reduced especially in constructions such as tunnels and bridges. Considering the ballastless superstructure types and the superstructure types of line lengths used worldwide, it is clear that scientists pay attention and spend time to improve this system.

A Standard ballastless superstructure consists of rails and rail fastening elements, sleepers, concrete or asphalt bearing layer, water-proof hydraulically-bonded layer, frost-proof layer and substructure. These components will be discussed in depth in Section 2.

Ballastless superstructure systems can be classified in many different ways. In this study, one of the most common classification types, structure type and form of track laying is used. These slab track systems are divided into two main categories, discrete rail support systems and continuous rail support systems. The first main group which is the ballastless superstructure type, discrete rail support systems is divided into four subcategories respectively. These four subcategories are superstructures with sleepers or blocks encased in concrete, superstructures with sleepers on asphalt/concrete, prefabricated concrete slabs and monolithic designs. On the other hand, embedded rail structures and clamped and continuously supported rail are components of two subcategories. Rheda 2000 and Stedef balastless systems that are one of most famous systems wordwide are an example of with sleepers or blocks encased in concrete systems. While Shinkansen system is an example of monolithic designs, the type of Infundo-Edilon systems is embedded rail structures system. These subject will be discussed in Section 3.

In addition to the detailed classification of balastless superstructure systems, these systems can be classified roughly as concrete bearing layer (CBL) and asphalt bearing layer (ABL). As is known, the most commonly used layer in the balastless

tracks is the one made of concrete. Nowadays, asphalt bearing has began to gain importance too. Many reasons for using asphalt material in railway as well as highway as bearing layer can be suggested. One of the most important reasons is that asphalt is a more flexible material, thus it adapts to compelling circumstances. Another factor is not to require cure times of the asphalt, thus the production can be performed quickly (While daily performance for FFYS-Solid railway track bed with Y-steel sleeper is 350 m, this value is 170 m for Rheda Berlin slab track with use of concrete bearing layer). On the other hand, according to research, using sleepers with a large contact area towards the pavement the pressure between sleeper and pavement by rail seat loading will be reduced to about 0.3 N/mm², which is much lower than the contact pressure of conventional truck-wheels of about 0.7 N/mm². For this reason, asphalt can be seen as an alternative system in balastless superstructure.

The asphalt material can be also preferred as sub balast layer in balasted tracks. Due to its highly low transportation costs, the use of asphalt is a much more economical solution especially in some areas where it is difficult to supply and transport balast material. Hence, Italian Railway preferred bituminous mix as sub balast layer instead of cementtrated gravel in Rome-Florence High SpeedLine. Otherwise, French National Railway (SNCF) has built a 3 km long test section in the high speed TGV (Train à Grande Vitesse – High Speed Train) East line (connecting Paris to Strasbourg) with an asphalt sub-ballast layer. In the alternative with the asphalt sub-ballas tlayer, the 50 cm lime stone layer is replaces by 14 cm asphalt sub-ballast layer. In this way the total thickness was reduced by 36 cm, which reduces the amount of material used by approximately 5,000 m³ per km track.

In this study, balastless systems with asphalt bearing layer and concrete bearing layer are compared in terms of technical and economical aspects.

Technical comparison highlights important differences between ballastless systems with ABL and CBL in terms of seven criteria. These are flexural stiffness, superstructure height, maintenance need, daily construction performance, noise and vibration and operating speeds. Tehnical comparison results have been explained in detail.

When flexural stiffness is examined, it seems that slab track systems with ABL has low flexural stiffness and can scarcely resist bending forces. However, slab track systems with CBL like embedded rail applications has high flexural stiffness and provides extra strength especially in weak soils.

Slab track system has different superstructure height (from the upper edge of the rail to the bottom of the hydraulically bonded layer) which is decisive for its use. Systems with low overall height are often used in tunnels where the free space is limited. A low height slab track system often results in lower tunnel construction costs. When superstructure height of slab track systems are compared, it is possible to generalize that balastless systems with CBL has low superstructure height. Especially embedded rail systems have the lowest superstructure height (650 mm) of the all slab track types. Nevertheless, slab track systems with ABL have important disadvantages if superstructure height is between 900-1000 mm.

Another criterion is maintenance need which is crucial for slab track systems as it directly affects costs. Different slab track systems and their performance could be observed for many years with regard to maintenance. Results show that slab track systems with CBL like Rheda system performed at least 2.5-3 times better than slab

track systems with ABL such as ATD (AsphaltTragschicht mit Direktauf Lagerung-Asphalt base course with a rail web) and SATO (Studiengesellschaft AsphaltT Oberbau - Concrete sleeper or Y-steel sleeper with double base). In other words, slab track systems with CBL can be used approximately 50 years without any need for maintenance while it is maximum 25 years for slab track systems with ABL.

Slab track systems with ABL is the best option when daily construction performance is taken into account. SATO, FFYS systems which are example of slab track systems with ABL have the best daily performance with 350 m. On the other hand, Rheda system with CBL was constructed 170 m/day. So, CBL is two times worse than ABL in terms of daily construction performance. This difference between ABL and CBL results from material features. While hardening of the concrete takes some time during construction, there is no hardening process for asphalt material. As soon as it is laid, the track can be operated easily.

Noise and vibration which are two of major problems in railway is other criteria to compare slab track systems. Many research have been carried out about this issue for years. Among them, is high speed rail IDEA project from Cleveland, Ohio, USA which investigated asphalt concrete noise emission performance and compared to other materials such as concrete, balast for high speed railway road beds. In this project, peak acceleration and root-mean-square acceleration values were evaluated on every track bed material. According to the results, asphalt concrete which is modified rubber has the best effect on vibration attenuation reducing the peak acceleration at the track by 35.7% and root-mean-square acceleration by 18.7%. This means with the ratios of 9.3% and 3.6% , it is better than the concrete underlayment material. Therefore, slab track systems with ABL is more noiseless than the ones with CBL.

There is no considerable difference between slab track systems with ABL and CBL. Both of them can be used in a wide range from light rail transits to high speed railways.

In economical comparison, the construction and maintenance costs of the systems were calculated on Yenibosna-Airport metroline and compared with each other. According to comparison results, concrete bearing layer is 25% more economical than asphalt bearing layer in terms of construction costs and 18% more economical than asphalt bearing layer in terms of total costs. However, this difference is expected to be made up with further work on asphalt.

1. GİRİŞ

Karayolunda olduğu gibi demiryolunda da trafik yükü gn geçtikçe artmaktadır. Bu artışta şphesiz yüksek hızlı tren teknolojisinin de büyük payı vardır. Trafikteki bu artış, üstyapı tasarımında yeni yöntemler uygulamayı gerekli hale getirmiştir.

Günümüz demiryollarında balastsız üstyapının önemi gittikçe artmakta, hatta çoğu yerde balastlı üstyapının yerini almış bulunmaktadır. Balastsız üstyapının tercih edilmesinin başlıca sebepleri; üstyapı yüksekliğinin daha az olması, az bakım maliyeti gerektirmesi, kullanım ömrünün fazla olması, karayolu araçları ile aynı altyapıyı kullanabilmeleridir.

Trafik yükünün artması, ekonomik çözümler elde edebilme adına üstyapıda çeşitli alternatif arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Bu sebeptendir ki, birçok bilim insanı asfalt taşıyıcı tabaka ve beton taşıyıcı tabaka ile ilgili çeşitli araştırmalar yapmış, bunların sonucunda her iki tabakanın da kendine göre avantaj ve dezavantajları olduğunu tespit etmişlerdir.

Balastsız styapı sistemlerinde asfalt ve beton taşıyıcı tabakalı sistemlerin birbirlerine alternatif olmaları durumu göz önünde bulundurularak, çalışmanın izleyen bölümlerinde bu iki üstyapı tipi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, asfalt malzemesinin balast altı tabaka olarak kullanımının da üzerinde durularak, asfaltın balastlı yapılarda da kullanılabilirliğine dikkat çekilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; balastsız styapılarda asfalt ve beton taşıyıcı tabakaların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması ve asfalt taşıyıcı tabakanın demiryolunda hem ekonomik hem de teknik yönden iyi bir alternatif olup olmadığının belirlenmesidir.

Bu çalışmada öncelikle balastsız demiryolu üstyapısı tanıtılmıştır. Bu bölümde, balastsız üstyapının balastlı üstyapı ile karşılaştırması yapılarak, balastlı üstyapıya göre avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir. Bunun yanı sıra balastsız üstyapının bileşenleri ayrıntılı şekilde anlatılmış olup, hangi tip malzemelerin kullanıldığı belirtilmiştir. Dünya genelinde uygulanan balastsız üstyapı tiplerine yer verilmiştir. Demiryolunda asfalt tabakanın uygulanışı ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Asfaltın demiryolunda balast altı tabaka ve taşıyıcı tabaka olarak kullanımı, yapım esasları, asfalt malzemesinin kendine has özellikleri açıklanmıştır.

Asfalt ve beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemlerinin ekonomik ve teknik karşılaştırması yapılmıştır. Uygulanmış olan balastsız üstyapı tipleri bazı teknik kriterler dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Bunlar; burulma rijitliği, üstyapı yüksekliği, bakım ihtiyacı, günlük inşa performansı, gürültü ve titreşim, işletme hızı ve dingil yükleridir.

Bu bölümün devamında balastsız üstyapılarda asfalt taşıyıcı tabaka ile beton taşıyıcı tabakanın ekonomik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bağlamda örnek bir projenin yapım ve bakım maliyet analizleri yapılmıştır. Bu amaçla, İstanbul'da Yenibosna-Havalimanı hafif metro hattı seçilmiştir. Hattın bu kısmı beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı olarak üretilmiştir. Bu üstyapı tipinin maliyet analizleri yapılmış olup, bunun yanı sıra hattın alternatif olarak asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin de yapım ve bakım maliyet analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, bu iki üstyapı tipi, seçilen bu hat kesiminde ekonomik olarak karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapının, beton taşıyıcı tabakalı üstyapıdan daha maliyetli olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, bu yeni uygulama gelişmeye çok açık bir konumda olup, üzerinde yapılan çalışmaların devam etmesi halinde, bu sistemin daha ekonomik hale gelebileceği görülmüştür.

2. BALASTSIZ ÜSTYAPI

Balastsız (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 (Ekim, 2007).

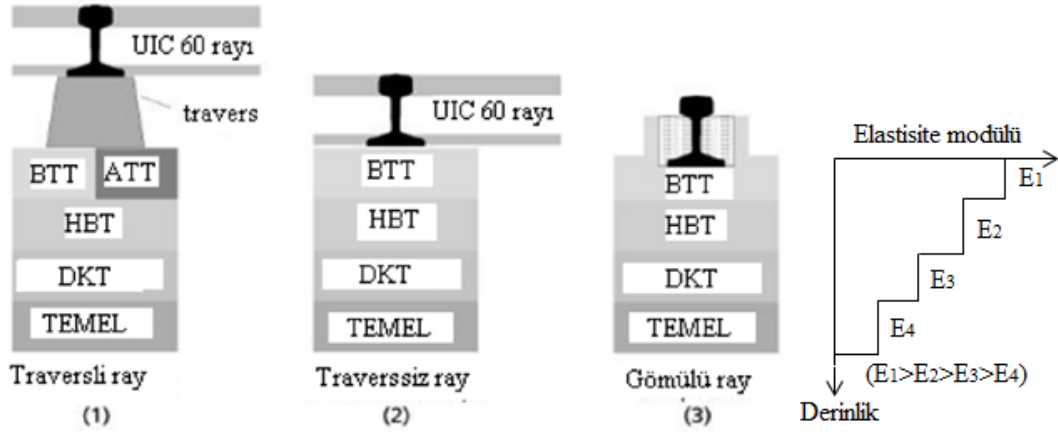
Balastsız üstyapı Almanya’da ‘Feste Fahrbahn’, İngiltere ve ABD’de ‘Slab Track’, ‘Ballastless Track’ ya da ‘Direct Fixation Track’ adlarıyla tanınmaktadır.

Balastsız üstyapının en önemli nitelikleri;

- Yük iletimi, gevşek bağlantılı balasttan daha rijit bir tabaka ile sağlanmaktadır.
- Balastlı üstyapıdaki elastik davranış, yol boyunca ray tabanının altına ya da travers tabanı altına konulan elastik elemanlarla sağlanmaktadır. (Ekim, 2007).

Balastsız üstyapıdaki inşa prensibi, farklı taşıyıcı tabakaların rijitlik derecelerine göre üstten alta doğru sıralanmasıdır. Bu sıralama sırasıyla;

1. Ray ve ray sabitleme elemanları
2. Beton taşıyıcı tabaka (BTT) ya da asfalt taşıyıcı tabaka (ATT)
3. Suyun etkisinden koruyucu hidrolik olarak bağlanmış tabaka (HBT)
4. Don Koruma Tabakası (DKT)
5. Temel şeklinde olmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Balastsız üstyapıda tabakaların sıralanması (Moderen, 2010).

2.1 Balastlı ve Balastsız Üstyapının Karşılaştırılması

Günümüzde demiryollarının çoğu klasik balastlı üstyapı tipi şeklindedir, ancak son zamanlarda balastsız üstyapı uygulamalarında da ciddi artış gözlenmiştir. Balastsız hattın en önemli avantajları bakım ihtiyacının, üstyapı yüksekliğinin ve ağırlığının çok az olmasıdır.

Balastlı üstyapıda karşılaşılan başlıca sorunlardan bazıları şunlardır: Balast taneleri trafik yükleri altında aşınarak köşeli formlarını kaybetmeleri sonucunda, balast tanelerinin dolayısıyla da hattın taşıma gücü zayıflar. Bunun yanı sıra hatta geometrik bozulmalar meydana gelir. Hattın drenaj kalitesi azalır. Bütün bunlar bakım maliyetlerini arttıran faktörlerdir. Bahsi geçen bu üstyapı problemleri, hem enine hem de boyuna doğrultuda yüksek rijitliğe sahip olan balastsız üstyapılarda görülmemektedir. Bu da yolcu konforunun daha yüksek olmasını ve bakım masraflarının daha az olmasını sağlamaktadır (Öztürk ve Arlı, 2009).

Balastsız hatların avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Bakım maliyeti, balastın sıkıştırılması ve temizlenmesi gibi işler olmayacağından, balastlı hatlara göre daha az olup, balastlı hat bakım maliyetinin yaklaşık %20-30'u kadardır.
- Hizmet ömrü daha uzundur ve hizmet ömrü bitince hattın tamamının yenilenmesine imkan sağlar.
- Koşulsuz olarak elektro-manyetik fren kullanabilme imkanı sağlar.
- Basit düzeltmeler yapılarak (Düşeyde 26 mm ve yatayda 5 mm'ye varan) hatta oluşan küçük deformasyonları gidermek mümkündür.

- Yapı yüksekliği ve ağırlığı balastlı hatlarla karşılaştırıldığında daha azdır.
- Balast temininin zorluğu, bu sistemi avantajlı kılan faktörlerden biridir.
- Karayolu araçları ile ortak kullanım imkanı sağlar.
- 250 km/sa veya daha yüksek hızlarda daha konforlu seyir sağlanabilir.
- Yanal kuvvetlere karşı direncinin yüksek olması, daha büyük dever (160-180 mm) ve daha küçük kurp yarıçapı uygulanmasına imkan verir.
- Tamir ve yenileme işlemleri daha hızlı bir şekilde yapılabilir.
- Gerekli önlemler alındığı takdirde, araç geçişlerinde meydana gelen titreşimler daha az olmaktadır.
- Tünellerde taban kaplamaları yeterli dayanıma sahip olduğundan, üstyapının taşıyıcı tabaka kalınlığı 15 cm'ye kadar indirilebilmektedir,
- Yapı yüksekliğinin az olması tünel gabari yüksekliğini, dolayısıyla da tünelin inşa maliyetini azaltmaktadır.
- Tünel içinde katenerli sisteme göre elektrikleştirilecek eski hatlar için, üstyapı tipi olarak balastsız üsyapı tercih edilerek gerekli ek gabari yüksekliği sağlanılabilir.
- Bakım sırasında tünel içinde toz ve kirlenme oluşmaz.
- Tünellerde gerekli olan drenaj, yan yollar, sinyalizasyon, elektrik ve elektronik tesisleri bir bütün olarak birlikte yapılabilir.
- Düşük üstyapı yüksekliği, tünellerde daha büyük boşluk oluşmasına imkan verir. Bu da trenlerin tünelden geçerken daha az hava direnimi ile karşılaşmalarını sağlar.
- Yüksek hızlı hatlarda, araç altında oluşan girdap etkisiyle balast tanelerinin savrulma ve taşıta çarpma tehlikesi ortadan kalkmaktadır.
- Tünellerde kaza, yangın gibi acil müdahale edilmesi gereken durumlar olması halinde, kurtarma araçlarının tünele girmeleri daha kolay olmaktadır.
- Viyadük ve köprülerde balasttan gelen yükün azalmasıyla daha estetik ve ekonomik tasarımlar yapılabilir.

Bu avantajlarının yanı sıra balastsız hatların bazı dezavantajları da bulunmaktadır;

- Yapım maliyeti daha fazladır.
- Gürültü daha fazladır.

- Üstyapıda büyük çaplı değişiklik ya da büyük deyer uygulaması yapılacaksa, kapsamlı ve titiz bir çalışma yürütmek gerekir.
- Rijit bir yapı olmasından dolayı dolgularda büyük deplasmanlara uyum sağlama yeteneği daha azdır.
- Aracın raydan çıkması durumunda tamir işleri kısa sürelerde tamamlanamayabilir.
- Balastlı hatlara geçiş yerleri özel dikkat gerektirir.
- Alt tabakalar homojen olmalı ve oturma olmadan gelen yükleri taşıyabilmelidir (Öztürk ve Öztürk, 2005).

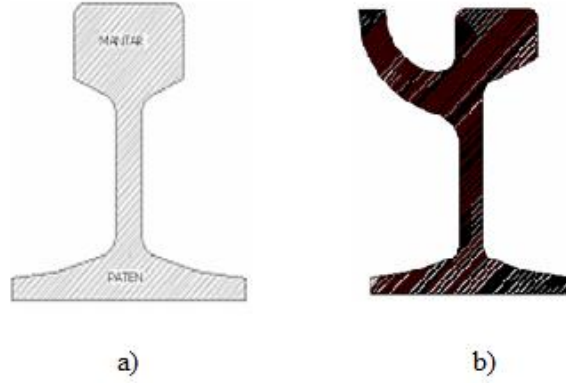
Balastlı üstyapının sakıncalarını ise aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- Zamanla trafik yükleri sonucunda boyuna ve yanal doğrultularda hattın geometrisinde bozulmalar oluşabilir.
- Yüksek hızlı hatlarda balast tanelerinin savrularak taşıta çarpma tehlikesi vardır.
- Balastlı üstyapının enkesit yüksekliği fazla olduğundan, tünel geçişlerinde daha büyük gabariye ihtiyaç vardır.
- Balast yatağında yanal kaymalara karşı direnç yeterli olmazsa dengelenemeyen yanal kuvvetler ortaya çıkabilir.
- Balastlı üstyapılarda yapının ağırlığı fazla olduğuna için köprü, viyadük gibi sanat yapılarında taşıyıcı eleman kesitleri daha büyüktür.
- Zamanla balastın aşınması, ufalanması sebebiyle hatta kirlilik oluşur, bu da hattın drenaj kalitesini azaltır (Öztürk ve Arlı, 2009).

2.2 Balastsız Üstyapı Elemanları

2.2.1 Ray

Balastsız üstyapı sistemlerinde çoğunlukla 2 tip ray kullanılır. Bunlar Şekil 2.2’de de görüleceği üzere vinyol (patenli) ray ve daha çok gömülü ray uygulamalarında kullanılan oluklu tipte raylardır.



Şekil 2.2 : a) Vinyol (patenli) ray, b) Oluklu ray kesiti (MEB, 2008).

Demiryollarında raylar metrik ağırlığı başta olmak üzere çeşitli mekanik özellikleri dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Rayların mekanik özellikleri (Öztürk ve Arlı, 2009).

Ray Tipi	Kesit Alanı A_k m^2	Birim Uzunluk Ağırlığı m (kg/m)	Mukavemet Momenti W (cm^3)	Atalet Momenti $I(x10^{-8} m^4)$	Eğilme Rijitliği ($x10^6 Nm^2$)	Kesme Faktörü γ
S49	6297	49,43	248	1819	3,82	1,33
S54	6948	54,54	276	2073	4,35	1,29
UIC54	6934	54,43	313	2127	4,93	1,44
UIC60	7687	60,34	377	3055	6,42	0,97
BS113A	7183	56,39	278	2349	4,90	1,18

Üstyapı tasarımında kullanılacak ray, hatta geçerli olacak trafik koşulları doğrultusunda demiryolu araçlarından gelecek statik ve dinamik yükleri taşıyabilecek yeterlilikte kesit ve malzeme özelliklerine sahip olmalıdır. Standart bir demiryolu hattında hafif trafik yükleri söz konusu ise genellikle metrik ağırlığı 50 kg olan ray yeterli olurken orta ve ağır trafik yükleri söz konusu ise 60 kg/m’lik raylar kullanılmaktadır. Çizelge 2.2’de günlük trafik yükü ile ray tipi arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Günlük trafik yükü ile ray tipi arasındaki ilişki (Öztürk, 2014).

Günlük Trafik Yüğü (ton)	Ray Tipi
<25000	50 kg/m'lik ray
25000-35000	50 kg/m'lik ray*, 60 kg/m'lik ray
>35000	60 kg/m'lik ray

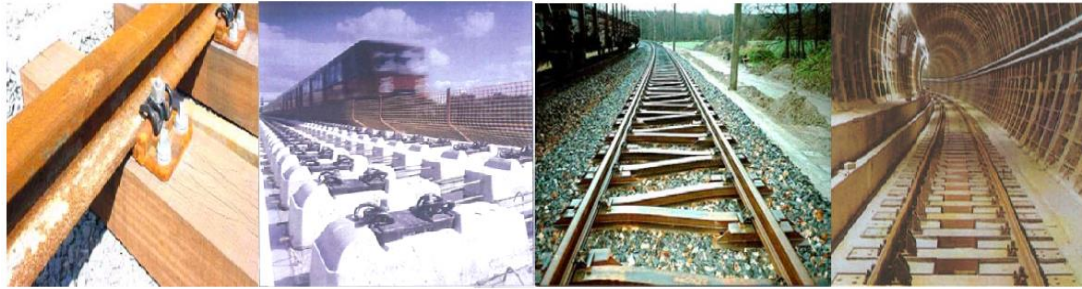
*Ahşap travers kullanılıyor ise 50 kg/m'lik ray kullanılabilir.

Balastsız üstyapılarda en çok kullanılan ray tipi UIC 60'tır (UIC-Uluslararası Demiryolları Birliği). S54 gibi başka ray çeşitleri de daha az dingil yükleri altında ya da daha düşük hızlarda ya da daha alçak üstyapı gerekli olduğunda kullanılabilir. Türkiye'de ise yüksek hızlı demiryollarında UIC 60, konvansiyonel ve kentiçi hatlarda S49 rayı kullanılmaktadır.

2.2.2 Travers

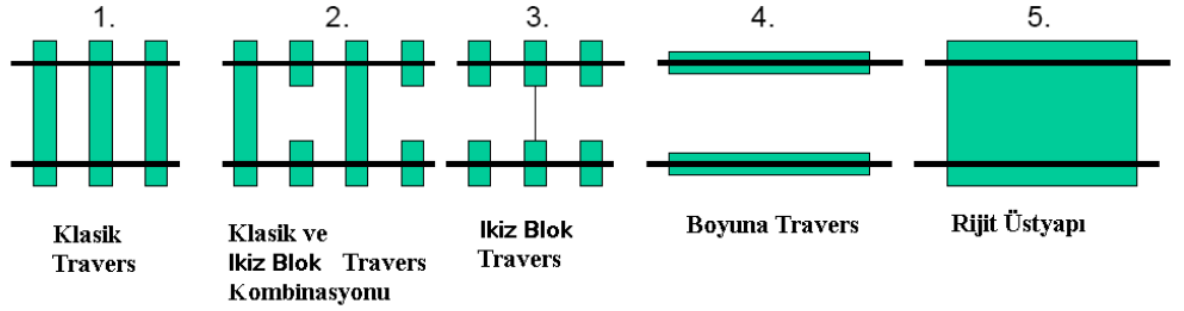
Günümüz demiryollarında:

- Ahşap travers
- Betonarme travers
- Çelik travers
- Plastik travers olmak üzere 4 çeşit travers kullanılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Ahşap, betonarme, çelik ve plastik travers uygulamaları (Moderen, 2010)

Balastsız üstyapı uygulamalarında en yaygın kullanılan travers tipi betonarme traverstir. SATO (Studiengesellschaft Asphalt Oberbau-Beton ya da Y çelik traversli uygulama), FFYS gibi bazı balastsız üstyapı sistemlerinde çelik travers uygulamaları da mevcuttur. Traversler taşıyıcı tabakanın içine gömülü ya da üstüne monte edilecek şekilde yerleştirilmektedir. Bunun yanı sıra traversler, plandaki görünümü açısından da farklı şekillerde yerleştirilebilmektedir. Şekil 2.4'te bu yerleşim şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Travers yerleşimleri (Özalp, 2008).

Şekilde görüldüğü üzere monoblok travers, ikiz blok travers ya da her ikisinin de kullanılabileceği uygulamalar mevcuttur.

- Monoblok Betonarme Traversler:

Dünyada, demiryollarında en çok kullanılan betonarme travers tipi, tek bir parçadan oluşan “monoblok” traverslerdir. Bu traversler, ağır olmaları sebebiyle hattın stabilitesini iyi bir şekilde sağlamakta ve hattın ekartmanını da korumaktadır. Ağır tonajlı ve yüksek hızlı hatlara uygun bir travers tipidir. En önemli dezavantajı esnek olmayışıdır. Bu sorunu azaltmak için traverslerin ortasındaki kesit alanlarında azalmaya gidilmiştir. Sonradan gerdirmeli ve ön gerdirmeli olmak üzere iki şekilde üretilirler.

Monoblok traversler, birçok balastsız üstyapı sisteminde kullanılmaktadır. ATD (AsphaltTragschicht mit Direktauf Lagerung-Asfalt taşıyıcı tabakalı demiryolu ağı), BTD (BetonTragschicht mit Direktauf Lagerung- Beton taşıyıcı tabakalı demiryolu ağı) ve GETRAC (German Track Corporation Asphalt-Alman asfalt tabakalı demiryolu şirketi) balastsız üstyapı uygulamaları, monoblok traversin kullanıldığı sistemlerden bazılarıdır.

- Ortası Bağlı İkiz Blok Betonarme Traversler:

Betonarme ikiz bloklar birbirlerine Y veya L kesitli demir çubuklarla bağlanmışlardır. Bu sistemde traversler ve raylar dökülmüş beton tabaka üzerine yerleştirilmekte, dolayısıyla da hatta kot, eksen, yol açıklığı gibi geometrik ayarlamaların yapılması kolaylaşmaktadır. Dünya’da kullanıldığı hat uzunluğu 400 km olup, ülkemizde de Taksim- 4. Levent arası metro hattında Stedef VSB (Voie Sans Ballast- Balastsız hat) üstyapı tipinde kullanılmıştır. Ülkemiz dışında, Fransa’da ve İsviçre’deki tünellerde, Seul ve San Diego’da da uygulanmaktadır.

- Ortası Bağırsız İkiz Blok Betonarme Traversler:

Bu sistemde betonarme traversler birbirine herhangi bir çubukla bağlanmamıştır. Hattaki yanal kayma problemi ise beton taşıyıcı tabakaya ‘U’ şeklinde donatılar yerleştirilerek çözülmüştür. Bu donatılar traversler ile taşıyıcı tabaka arasında bir bağ oluşturarak yanal hareketi engellemektedir. Fransa ile İngiltere’yi birbirine bağlayan Manş Tüneli’nde, Madrid Metrosu’nda ve İsviçre’de başarıyla uygulanmıştır. Eğer bu sistem tünel, köprü, viyadük gibi yapılarda kullanılacaksa, betonarme kirişler üzerine konulmaları gerekmektedir (Öztürk ve Öztürk, 2005).

2.2.3 Ray bağlantı elemanları

Ray travers bağlantısını sağlayan elemanlar 4 grupta incelenebilir:

- Endirekt Bağlantılar
 - Elastik
 - Rijit
- Direkt Bağlantılar
 - Elastik
 - Rijit

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da bu bağlantı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5 : Rijit endirekt bağlantı elemanı (soldaki), Elastik endirekt bağlantı elemanı (sağdaki) (Ministry of Education of the Czech Republic, 2012).



Şekil 2.6 : Rijit direkt bağlantı elemanı (soldaki), b) Elastik direkt bağlantı elemanı (sağdaki) (Ministry of Education of the Czech Republic, 2012).

Günümüzde bu bağlantı tipleri arasından en çok tercih edilen ray bağlantı elemanı elastik direkt bağlantılı olandır. Balastsız üstyapı uygulamalarında da genellikle bu tip bağlantı elemanı tercih edilmektedir. Elastik direkt ray bağlantı elemanlarının vida tipi ve yay tipi olmak üzere iki farklı uygulaması mevcuttur. Vida tipi bağlantılara Vossloh ve Nabla bağlantı elemanları, yay tipi olana ise Pandrol, Lineloc ve Hambo örnek verilebilir (Şekil 2.7) .



Şekil 2.7 : Elastik direkt ray bağlantı elemanları (soldaki Vossloh, ortadaki Nabla, sondaki Pandrol bağlantı sistemi) (Moderen, 2010).

Elastik bağlantı elemanlarının hizmet özellikleri;

- Elemanların rezonans frekansları, rayın rezonans frekansından daha yüksek olmalıdır.
- Yıllar içerisinde rayları sabitleyen kuvvette azalma olmamalıdır.
- Elemanların sıklıkları kolaylıkla üstyapı üzerinde kontrol edilebilmelidir.
- Bağlantı elemanı uzun süre boyunca esnekliğini koruyabilmelidir.

2.2.4 Elastik pedler (Seletler)

Elastik pedler, rayla travers arasında veya rayla beton arasında kullanılır (Şekil 2.8).

Pedlerin üç farklı malzeme sınıfı vardır. Bunlar:

- kauçuk (doğal veya sentetik)
- plastik
- kauçuk bazlı mantardır.

Yük altında dinamik yükleri ve vibrasyonları karşılaması için pedlere hava kabarcıkları, oluklar veya boşluklar verilir.



Şekil 2.8 : Elastomer ray altlığı (Selet) (Moderen, 2010).

Pedlerin sahip olması gereken özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Yük dağılımı: Pedler ray tabanı ile travers arasındaki yük dağılımını sağlar. Ray ile travers arasındaki pürüzleri en aza indiren elastik bir tabaka oluşturur.
- Titreşimleri azaltması: Araç geçişi esnasında hattaki bozulmalardan ve tekerlek apletlerinden (ezilme) kaynaklanan titreşimleri azaltarak iletmek.
- Esneklik: Pedler, üstyapının toplam elastik ray bağlantı malzemeleri ile optimum deplasman sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bağlantılar boyuna ve yanal yönde yüklerde gerekli direnci sağlamalıdır. İşletme esnasında yük altındaki asıl rijitlik yeterli olacak şekilde pedlerin elastikiyet dönüşümü olmalıdır.
- Şöminmana dirençli olma: Bağlantı elemanları ile birlikte yeterli şöminman (rayların boyuna doğrultudaki hareketi) ve burkulma direncine sahip olmalı, zaman ve trafik tonajına bağlı olarak değişmemelidir.
- Elektrik yalıtımı: Hat devresindeki akımın raydan traverse ulaşmasını engellemek için iyi bir yalıtım özelliğine sahip olmalıdır.
- Durabilite (Dayanıklılık): Pedlerin ömrü en az rayın ömrü kadar olmalıdır. Bunun yanında pedler su, kimyasal maddeler, yağ ve tozdan oluşan kirlenmeye karşı esnekliğini kaybetmemeli ve bağlı sıcaklık ve hava şartlarından etkilenmemelidir.

Çizelge 2.3'te bazı ray pedlerinin sıcaklık ve frekansa bağlı olarak statik ve dinamik rijitlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Bazı ray elastik tabakalarının statik ve dinamik yay katsayıları (Öztürk ve Arlı, 2009).

	Statik Rijitlik (MN/m)			Dinamik Rijitlik (MN/m)	
	-30°C	25°C	70°C	25°C, 5-30 Hz	25°C, 100-2000 Hz
Zwp104NT*	22	23	25	28-29	-
Zwp104	26	27	29	40-42	-
Zw1000NT	42	42	41	57-61	-
Zw700a	51	53	64	71-77	80-275
Zw900a	53	56	68	75-83	-

*Zwp: Zwischenplatte (Bağlantı plakası)

2.2.5 Beton taşıyıcı tabaka

Beton taşıyıcı tabakanın; donatılı-derzsiz, zayıf donatılı-yüzeysel derzli ve donatısız-derzli olmak üzere 3 farklı uygulanma şekli vardır. Tipik bir beton taşıyıcı tabakanın kalınlığı 20 cm olmakla birlikte, bu değer kullanılacağı yere göre değişmektedir. Beton tabakanın uygulanma esaslarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Beton taşıyıcı tabakada, betonun prizi sırasında sıcaklık artışı nedeniyle oluşan deformasyonların önlenmesi için beton kesitinin % 0,8-0,9'u oranında donatı kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra tabaka ortasında, boyuna donatılara bağlı enine donatılar yerleştirilerek tabaka üst yüzeyinde oluşacak çatlaklar sınırlandırılabilir (İzin verilen maksimum çatlak genişliği 0,5 mm). Bu sayede donatı korozyonu da önlenmektedir.
- Rayların doğrudan taşıyıcı tabakaya mesnetlendiği üstyapı tiplerinde, tabakada oluşan çatlakların ray bağlantı için açılan deliklere ulaşmaması, hattın stabilitesi için son derece önem arz etmektedir. Bu muhtemel tehlikeyi önlemek için, beton son sertliğine ulaşmadan önce, üst yüzeyinde yaklaşık her üç mesnette bir, mesnetlerden sonra yaklaşık 5 cm derinliğinde ve 2-3 cm genişliğinde yarıklar oluşturulur.
- Betonun dayanım sınıfı, yapı zarar görmeden trafik yükünün karşılanabilmesi için en az C20 olmalıdır.
- Beton taşıyıcı tabakada 350 dozlu beton kullanımı önerilmektedir. Betonun dozajı, doğrudan taşıyıcı tabakanın emniyet gerilmesi ile ilişkili olduğundan çok önemlidir. 350 dozlu betonun eğilme-çekme mukavemeti 55 kg/cm² olarak ölçülmektedir. Kış aylarında ise taşıyıcı tabakanın, bu değer %40'ını sağlaması beklenir.
- Donmaya karşı dayanıklı olarak inşa edilen bazı balastsız üstyapılarda strafor agregalı beton taşıyıcı tabakanın emniyet gerilmesinin 5 kg/cm² olması beklenmektedir. Ölçülen değer ise 10 kg/cm² değerini bulmaktadır.
- Beton taşıyıcı tabakalar, standart yerinde döküm üretim dışında prefabrik plak ya da çerçeve şeklinde de üretilebilirler. Ancak böyle üretildiklerinde, yeterli yanal direncin sağlanabilmesi için elemanların birbirine bağlanması gerekmektedir.
- Balastsız üstyapıda, üstyapı yüksekliği son derece önemli bir konudur. Dolayısıyla taşıyıcı tabakanın kalınlığının doğru saptanması gerekir. Bunun

için tabakalara gelen gerilmeler iyi belirlenip ona göre boyut tahkikleri yapılmalıdır.

- Hattın trafik yükü ve bölgenin iklim Şartları, boyutlandırmaya birincil düzeyde etki eden faktörlerdir.
- Balastsız üstyapının ana elemanı olan taşıyıcı tabakanın kalınlığı sabit tutulmalı, diğer tabakaların kalınlıkları trafik yüküne bağlı olarak belirlenmelidir. Taşıyıcı tabakanın kalınlığını arttırmak, aynı zamanda içindeki donatı miktarını arttırmak demek olacağından ekonomik bir çözüme gidilmiŐ olunmayacaktır. Bunu yanı sıra taşıyıcı beton plağın kalınlığının arttırılması, özellikle sıcaklık farkı yüksek olan bölgelerde oluşacak çekme gerilmelerinin artmasına, böylece beton plağın taşıma gücünün azalmasına neden olacaktır. (ztrk ve ztrk, 2005).

2.2.6 Asfalt taşıyıcı tabaka

Asfalt taşıyıcı tabaka, balastsız üstyapı uygulamalarında beton taşıyıcı tabakaya alternatif olarak kullanılmaktadır. Asfalt taşıyıcı tabakanın özelliklerini Şöyle sıralayabiliriz (Michas, 2012):

- Ortalama tabaka kalınlığı 25-30 cm arasında değişmektedir.
- Tabakanın yüzeyindeki inşa toleransı ± 2 mm'dir.
- Asfalt tabaka inŐaatının sürdürülebilmesi için yüzey sıcaklığının 50°C'nin altında olması gerekmektedir.
- Özel karıŐımlarla geliştirilerek ekstrem hava koŐullarında minimum 50-60 yıl kullanım ömrü sağlanır.
- Ses ve titreşim asfaltın yapısından dolayı betona göre oldukça azdır.
- Yol yapımında önemli olan asfaltın geçirimsizliği, donma dayanımı gibi özellikler demiryolunda yerini, asfalt stabilitesinin arttırılması ve deformasyona karşı dayanıklı olması gibi özelliklere bırakır.
- Asfalt, yüklemeden ve sıcaklık farkından oluşan gerilmelere uyum sağlayabilir. Bu yüzden asfalt sürekli bir yol yatağı olarak uygulanabilir.
- Asfalt geri dönüşümü daha çok olan bir malzemedir.
- Asfalt sertleşme süresi gerektirmez, sadece soğuması yeterli olduğu için imalat hızı yüksektir.

- Dünya genelinde asfalt taşıyıcı tabaka kullanılan balastsız üstyapı sistemlerine örnek olarak ATD, Walter, SATO, FFYS sistemleri verilebilir.

2.2.7 Hidrolik bağlayıcı tabaka

Bu tabaka, agrega karışımı ile bağlayıcı özellikte madde karışımından oluşan bir tabaka olup beton ya da asfalt taşıyıcı tabaka altına serilmektedir ve tüm sistemin toplam taşıma gücüne önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Don koruma tabakası üzerine serilen bu tabakanın 28 günlük basınç dayanımının ortalama 15 N/mm² olması istenir (Lichtberger, 2005).

Hidrolik bağlayıcı taşıyıcı tabakanın yapımı için özel bağlayıcı madde büyük bir frezeyle birçok freze geçişi üzerinden dış yüzeyin doğal sabitlenmemiş yapısı içerisine 40 cm derinlikte freze edilmekte ve silindir çekmek suretiyle sıkıştırılmaktadır. Bu sayede, yüksek bir taşıma gücüne sahip, dona karşı güvenli, hidrolik olarak bağlanmış bir taşıyıcı tabaka oluşmaktadır (Schrodi, 2010).

Hidrolik bağlayıcı tabakanın özelliklerini şöyle sıralayabiliriz (Michas, 2012):

- Tabakanın kalınlığı 30 cm civarındadır.
- Bağlayıcı madde olarak Portland Çimentosu kullanılmakta olup dozajı 110 kg/m³'tür.
- Agrega karışımı olarak kum taşı, kırma taş, mıcır tercih edilebilir. Maksimum dane çapı 32 mm'yi geçmemelidir.
- Hidrolik bağlayıcı tabaka, eğimi en az %4 olacak şekilde serilmelidir. Böylece suyun drenajı rahatlıkla sağlanmış olur.
- Bu tabakanın elastisite modülü en az 120 MPa olmalıdır.

2.2.8 Don koruma tabakası

Don kabarmasına karşı altyapıyı korumak için hidrolik bağlayıcı tabakanın altına, yoksa beton ya da asfalt taşıyıcı tabaka altına bir koruma tabakası serilir. Bu tabaka *don koruma tabakası* olarak adlandırılır. Don koruma tabakasının yapıyı dona karşı koruması dışında başka bir görevi de farklı tabakalar sebebiyle oluşan rijitlik farkını dengelemesidir. Don koruma tabakası için çakıl, cüruf gibi değişik malzemeler kullanılabilir. Donma olayı sonunda zemin katmanının kalınlığı %10'dan %30'a kadar artarak, hacim artışı sonucu üstyapı tabakalarında bozulmalara neden olur. Bu olaya

don kabarması adı verilir. Bu olumsuzlukları önlemek için aşağıdaki önlemler alınabilir:

- Drenaj ve yer altı su seviyesini azaltmak,
- Drenajla yüzeysel suların kaplama altına sızmasını önlemek,
- Mümkünse dona duyarlı zemini dona duyarsız zeminle değiştirmek,
- Zemini çimento, bitüm veya kireçle stabilize etmek gibi uygulamalar yapılabilir.

Dona duyarlılık konusunda zeminler 3 sınıfa ayrılmaktadır:

- Dona duyarsız olanlar – Kum ve çakıl
- Dona duyarlı olanlar - Kil
- Dona çok duyarlı olanlar – Silt.

Yüksek hızlı ve balastsız hatlar için tam don koruması mevcuttur. Diğer tüm hatlar için kısmi don koruması kabul edilebilir durumdadır. Bu iki koruma şekli arasında bir fark mevcuttur. Kısmi don koruması, şiddetli kış mevsimlerinde sınırlı bir don olayının dona duyarlı bir zemini etkilemesinin kabul edilebilir olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla tam don korumasında balastsız hatlarda zeminin don olayından etkilenmesi beklenmez (Öztürk ve Arlı, 2009).

2.2.9 Zemin

Demiryolu altyapısı için en önemli unsurlardan biri zemindir. Tüm üstyapı elemanları zeminin üzerine inşa edileceği için, zeminin yeterli dayanım ve elastikiyete sahip olması gerekir. Çizelge 2.4'te zemin cinsine bağlı olarak elastisite modülündeki değişim gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Bazı zemin türlerine ait elastisite modülleri (Kimençe, 2010).

Zemin Cinsi	Elastisite Modülü (kPa)
Yumuşak Kil	1400-4200
Orta Katı Kil	4200-8400
Katı Kil	8400-20000
Gevşek Kum	7000-20000
Orta Katı Kum	20000-40000
Sıkı Kum	40000-84000

Zeminin geoteknik karakteristikleri ve hidrojeolojik şartlarını dikkate alan UIC sınıflandırması Çizelge 2.5'te gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre zeminler şu şekilde tanımlanabilir (Öztürk ve Arlı, 2009):

- S3 kalite zemin – Tren yükünü çok iyi taşır, oturmalar düşüktür.
- S2 kalite zemin – Tren yükünü iyi taşır, oturmalar orta miktardadır.
- S1 kalite zemin – Daha az yük taşır, oturmalar büyük miktardadır.
- S0 kalite zemin – Çok az yük taşır, oturmalar aşırı miktardadır. Demiryolu altyapısında kullanılmazlar.

Çizelge 2.5 : UIC 719.R'ye göre zemin sınıflandırması (Öztürk ve Arlı, 2009).

Zeminler	Kalite
a) Organik zeminler	
b) Yüksek nem oranlı ve %15'den fazla ince malzeme içeren zeminler	
c) Çözülebilir zeminler (kaya tuzu veya alçı taşı)	QS0
d) Endüstriyel atıklar	
e) Karma mineral-organik zeminler**	
a) %40'dan fazla ince malzeme içeren zeminler	QS1
b) Hava şartlarından etkilenen kayalar (kuru birim hacmi 1,7'den az, kırılğan tebeşir)	
a) %15-%40 arası ince malzeme içeren zeminler*	QS1*
b) Hava şartlarından daha az etkilenen kayalar (kuru birim hacmi 1,7'den az, kırılğan olmayan tebeşir)	**
a) %5-%15 arası ince malzeme içeren zeminler*	
b) %5'den az ince malzeme içeren üniform zeminler	QS2
c) Orta sert kayalar	
a) İyi derecelendirilmiş %5'den az ince malzeme içeren zeminler*	QS3
b) Sert kayalar	

* 60 µ'dan küçük malzemeler ince malzeme kabul edilir.

** QSI olarak da kabul görmektedir.

*** Hidrolik şartlar sağlanırsa QS2 olarak kabul edilir.

QS: Zemin kalite sınıflandırmasında (Soil Quality Class) kullanılan simge olup 0'dan 3'e doğru kalitenin arttığını ifade etmektedir.

3. BALASTSIZ ÜSTYAPI TİPLERİ

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

- Demiryolu türüne göre,
- Uygulama yerine göre,
- Yapı tipi ve döşenme şekline göre,
- Ülkeye özgün gelişmelere göre,
- Kronolojik gelişime göre sınıflandırmalardır.

Demiryolu türüne göre sınıflandırmada, kentler arası demiryollarında ve kentiçi raylı sistemleri olan metro, hafif raylı sistem (LRT-Light Rail Transit) ve tramvay yollarında uygulanan balastsız üstyapı tipleri yer alır.

Uygulama yerine göre sınıflandırmada ise, tünel, viyadük, toprak gövde üzerine yapılan hatlar yer almaktadır.

Ancak balastsız üstyapı tipleri için bu sınıflandırmalar arasında en yaygın olanı yapı tipi ve döşenme şekline göre olandır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Yapı tipi ve döşenme şekline göre üstyapı tipleri (Michas, 2012).

Ayrık Mesnetlenmiş Ray				Sürekli Mesnetlenmiş Ray	
Traversler veya Bloklar Betona Gömülü	Traversler Asfalt/Beton Tabakanın Üzerinde	Prefabrik Beton Üstyapılar	Monolitik (Tek Döküm) Üstyapılar	Gömülü Raylı Üstyapılar	Kenetlenerek Sürekli Mesnetlenmiş Üstyapılar
Rheda	ATD	Shinkansen	Rasengleis	Deck-Track	Cocon Track
Züblin	BTD	Bögl	FFC	Infundo-Edilon	ERL
Stedef	SATO	ÖBB-Porr	Hochtief	BBERS	Vanguard
Sonneville-LVT	FFYS	IPA	BES		KES
Heitkamp	GETRAC		BTE-BWG/HILTI		SFF
SBV	WALTER		PACT		Saargummi
Walo					

3.1 Ayırık Mesnetlenmiş Ray Uygulamaları

Ayrık mesnetli döşeme, ray tabanının 0,50 m ile 0,80 m arasında (en çok 0,65 m) değişen sabit aralıklı mesnetlere, yaylı elemanları ile ayarlanabilen bağlantılar yardımıyla, alttaki taşıma tabakası üzerine bağlanmasından oluşur. Taşıma tabakası içine bağlantı, değişik türdeki ankraj elemanları yardımıyla olabilir. Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere ayırık mesnetli döşeme 4 grupta incelenecektir.

3.1.1 Travers veya blokların betona gömülü olduğu üstyapılar

Bu grupta traversler beton tabakaya kısmen gömülüdür. Bu sayede hattın yanall direnci de yeterli düzeyde sağlanmıştır. Rheda, Züblin, Stedef sistemleri, bu sistemle inşa edilen dünyaca ünlü üstyapı tiplerinden birkaçıdır. Bu sistemler bu kısımda ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.1.1.1 Rheda üstyapı sistemi

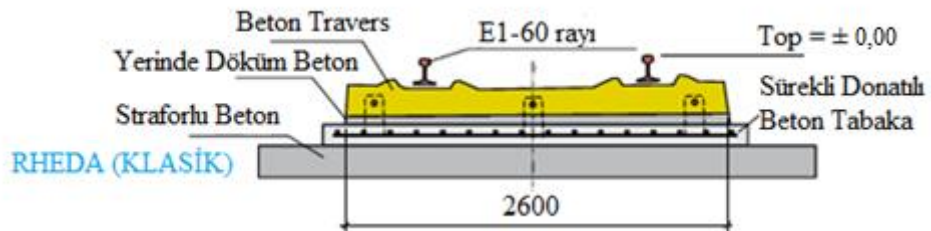
Alman Rheda sistemi dünyada en yaygın kullanılan üstyapı sistemlerinden biridir. 2000 km’nin üzerinde hatta bu sistem kullanılmıştır. Bu üstyapı tipi, ilk defa 1972 yılında Almanya’da 850 m uzunluğundaki Rheda istasyonunda kullanılmasından dolayı bu isimle anılmaktadır. Münih Teknik Üniversitesi Ulaşım Yolları Yapım Test Dairesi tarafından gerçekleştirilen Rheda üstyapısı bugüne kadar taşıma işlemi dışında başka hiçbir bakıma ihtiyaç duymamıştır. Yürütülen ölçümler 250 km/saat’e çıkan hızlarda deformasyon davranışının hiç değişmediğini göstermiştir.

Rheda üstyapı sisteminde ilk başta tek blok betonarme traversler kullanılırken, daha sonralarda bu tasarım iki bloklu traversler kullanılarak daha da geliştirilmiştir. Bu uygulama ile traverslerin taşınması kolaylaşmış, bunun yanı sıra beton tabaka ile travers arasında daha güçlü ve güvenli bir bağ da kurulmuştur. Berlin’de şehir içinde bir raylı sistem hattı bu sistemle iyileştirilmiştir. Böyle sistemler yapısal mühendisliğe farklı bir bakış kazandırmışlardır (Şekil 3.1). Bu çalışma, daha sonra geliştirilen B355 TS-M tipi iki bloklu traversin tasarımına ön ayak olmuştur.

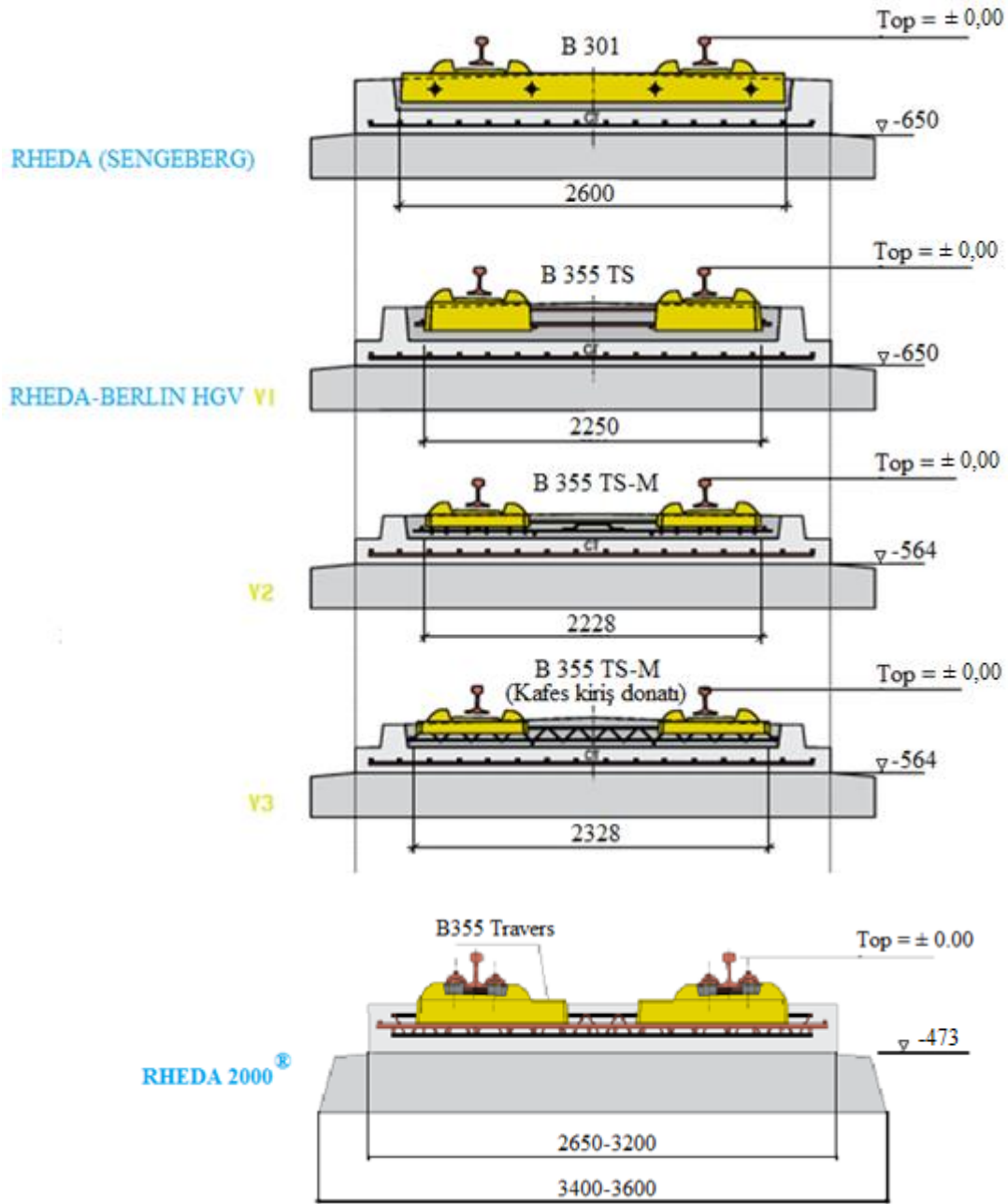


Şekil 3.1 : Alman Demiryolları Berlin Şehir İçi Raylı Sistem Hattı iyileştirme projesi (Freudenstein, 2006).

Bu travers (B355 TS-M), toplam yapısal ağırlığın azalması olarak karakterize edilmiştir. Mühendisler bu model için, hattın geometrisinde ya da hat açıklığında herhangi bir bozulma olmayacağını garanti etmişlerdir. Aynı zamanda bu modelde, betonarme tabaka ile beton travers arasındaki bağ önceki modellere göre daha güçlüdür. Önceki Rheda tasarımlarında, hattın oluklu kısmı ile dolgu betonu arasında hattın hizmet ömrünü etkileyen boyuna çatlaklar meydana gelmiştir. Bu da mühendisleri oluksuz bir Rheda üstyapı sistemi yapmaya zorlamıştır. Bu sorunu çözecek tek blok traversli bir sistem yapılmış ve Berlin-Hanover yüksek hızlı tren hattında başarıyla uygulanmıştır. RHEDA BERLİN ve oluksuz RHEDA sistemlerinde edinilen tecrübe ile B 355-M tipi kafes kirişli travers tasarımı yapılmıştır. Bu da RHEDA 2000 üstyapı sisteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Şekil 3.2’de Rheda üstyapı sisteminin tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Geçmişten bugüne Rheda üstyapı tasarımları (Freudenstein, 2006).



Şekil 3.2 (devam) : Geçmişten bugüne Rheda üstyapı tasarımları (Freudenstein, 2006).

Rheda 2000 üstyapı sistemi

Bu sistem Rheda serisinin en gelişmiş tasarımıdır. Bu modelin gelişiminde eski modellere göre iki önemli farklılık mevcuttur:

- Özel olarak ayarlanmış iki blokluk kafes kirişli betonarme traversin kullanımı,
- Traversler arasındaki donatılı kısma dökülen dolgu betonun iyice kaynaşması.

Öngermesiz betonarme travers onu saran beton yatakla homojen bir yapı teşkil etmektedir. Bu gömülü sistem üstyapı yüksekliğini azaltmakta ve bütün hat boyunca üniform olarak uygulanabilmektedir.

Rheda 2000 sistemi top-down yöntemi ile inşa edilmektedir. Traverslere ray montajı yapılır ve özel ekipmanlarla bulunacağı konum ve yükseklikleri ayarlanır. Ayarlamaların tamamlanmasının ardından alt tabakanın betonu dökülür. Hattın altyapısında herhangi bir noksanlık varsa beton dökümüyle bu sorun telafi edilir. Beton tabakanın altına elastik sönümleyici elemanlar konulmak suretiyle titreşimler azaltılabilmekte hatta tamamen sönümlenebilmektedir.

Sistemin yapısı ve bileşenleri:

Uygulamaların çoğunda B355 U60M iki bloklu betonarme travers ile betonarme balastsız üstyapıya esneklik sağlayan 300-1-U ray bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Traversler öngermesiz betonarme bloklardır. Kafes kiriş donatılar rijit bir form oluşturmaktadır ve betonarme traverslerle kısmen entegredir (Şekil 3.3). Bu model, betonarme travers ile beton tabaka arasındaki bağın etkinliğini artırır. Ray bağlantı elemanları beton bloklara montelenir. Rayların eğimi ve geometrik düzgünlük açısından ray bağlantı elemanlarının doğru üretimi, fabrika tarafından garanti edilir. Traverslerin birbirine bağlantısını sağlayan kafes kiriş donatılar sayesinde hat açıklığının bozulması engellenmiş olur.



Şekil 3.3 : Rheda üstyapı bileşenleri (Freudenstein, 2006).

İkiz blok traversler yerinde dökülen beton tabaka ile birlikte betonlanır. Bu tabakanın kalınlığı genellikle 240 mm olmaktadır. Betonarme tabakada oluşacak çatlakları kontrol altında tutabilmek için betonarme tabakaya boyuna doğrultuda donatı yerleştirilir. Dolgu üzerine yapılan hatlarda donatı yüzdesi betonarme tabaka enkesitinin %0,8-0,9'u kadar olmalıdır. Oluşacak çatlakların genişliğinin 2,5 mm'yi geçmesi istenmemektedir. Bu sayede sürekli donatılar da korozyondan korunmuş olacaktır.

3.1.1.2 Züblin üstyapı sistemi

Züblin sistemi gelişimine 1970'li yılların sonunda başlamıştır. 1990'ların başında ise mevcut olan Rheda sistemini geliştirmek üzere kurulan ilk şirket olmuştur. Bu yeni teknoloji, Almanya'da günümüz üstyapı standartlarının temelini oluşturmaktadır. İlk olarak da Almanya'da Münih-Nordring hattında kullanılmıştır. Dünya genelinde 600 km'nin üzerinde hat, bu sistemle inşa edilmiştir. Şekil 3.4'te ise bu sistemin en bilinen örneklerinden biri olarak, Çin'in Xian ve Zengzhou bölgelerini birbirine bağlayan 460 km'lik hızlı tren hattı gösterilmektedir (Enoekl ve Nübel, 2006).

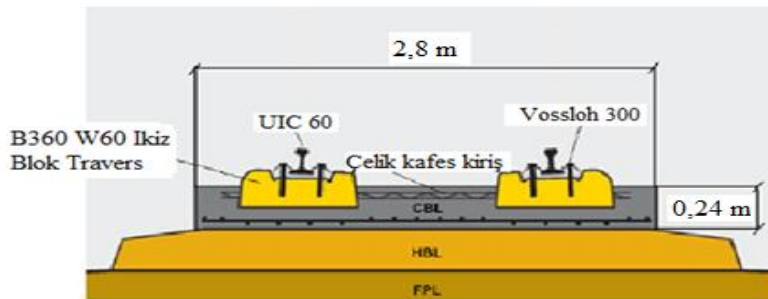


Şekil 3.4 : Xian ve Zengzhou Yüksek Hızlı Tren Hattı Züblin tipi üstyapısı (Enoekl ve Nübel, 2006).

Sistemin tasarımı

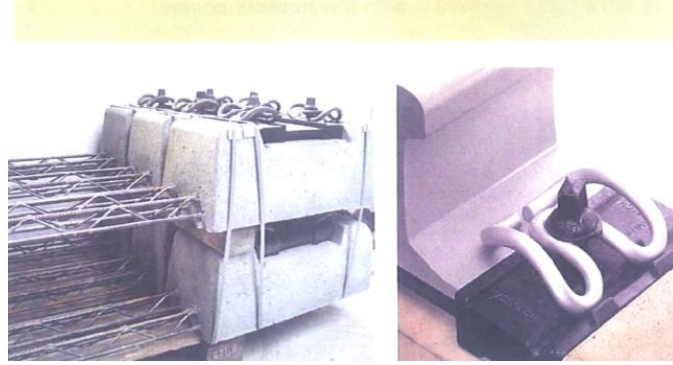
Züblin sisteminin tasarımında 24 cm kalınlığında ve 2,8 m genişliğinde derzsiz taşıyıcı beton tabaka ve bu tabakayla entegre ikiz blok beton travers yer almaktadır. Kalınlık ve genişlik hattın kategorisine ve altyapı tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 3.5'te Züblin üstyapı sisteminin enkesiti gösterilmiştir.

Betonarme traversler birbirine çelik kafes kirişler ile bağlanmaktadır. Bu çelik çubuklar sadece yük esnasında hattın geometrisini korumakla kalmamakta, aynı zamanda traverslerin betona iyice sabitlenmesi için ek bir destek sağlamaktadır.



Şekil 3.5 : Züblin sistemi enkesiti (Enoekl ve Nübel, 2006).

Traverslerin geometrisi Vosloh Ioarv 300/1 ray bağlantı elemanları monte edilecek şekilde imal edilmiştir, ancak başka bağlantı elemanları monte edilecek şekilde de imal edilebilirler (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Züblin sistemi tasarım ve bileşenleri (Enoekl ve Nübel, 2006).

Züblin Sistemi'nin üretimi

Balastsız bir üstyapı, seri üretime uygun olarak tasarlanmalı aynı zamanda değişen koşullar karşısında çeşitli ayarlama ve düzeltmeler yapılmasına izin verecek kadar da esnek olmalıdır.

Züblin üretim sisteminde temel düşünce, üretimin parçalara ayrılarak bu süreci optimize etmek, daha verimli hale getirmektir. Bu sistemde Rheda'dan farklı olarak aşağıdan yukarıya doğru bir inşa yöntemi uygulanmaktadır (Rheda sisteminde top-down inşa yöntemi kullanılmaktadır). Bu aşamalar şöyle sıralanabilir:

- Alt temel ve temel tabakasının hazırlığı ve inşaatı.
- Traversler yerleştirilmeden önce betonarme taşıyıcı tabakanın hazırlanması.
- Önceden bağlantı elemanları monte edilmiş traverslerin henüz katılaşmamış beton tabaka içine yerleştirilmesi.
- Son olarak ray montajının yapılmasıdır.

Bu sistemde donma seviyesinin hemen üzerinde 30 cm'lik hidrolik olarak tecrit edilmiş bir tabaka teşkil edilir. Bunun üzerinde 28 cm'lik, içerisine birbirlerine çelik donatılarla bağlanmış olan ikiz blok traverslerin gömüleceği bir beton tabaka dökülür. Beton tabakaya, uzunluğu boyunca % 0,8-0,9 oranında donatı konulur.

Traverslerin yerleştirilmesi için ise özel bir poz (döşeme) makinesine ihtiyaç vardır. Bu araçlar 10 adet traversi aynı anda 65 cm aralıkla yerleştirebilmektedir (Şekil 3.7). Betonarme tabakaya 7 cm kadar gömülü bulunan traverslerin eksen ve kot ayarları yine Rheda sistemine benzer biçimde, traverslerdeki bir takım deliklerden geçen

pimler aracılığıyla yapılır. Aks ve kot ayarlama işlemleri esnasında ortaya çıkan boşluklar ise çabuk sertleşen özel bir betonun püskürtülmesi ile giderilir.



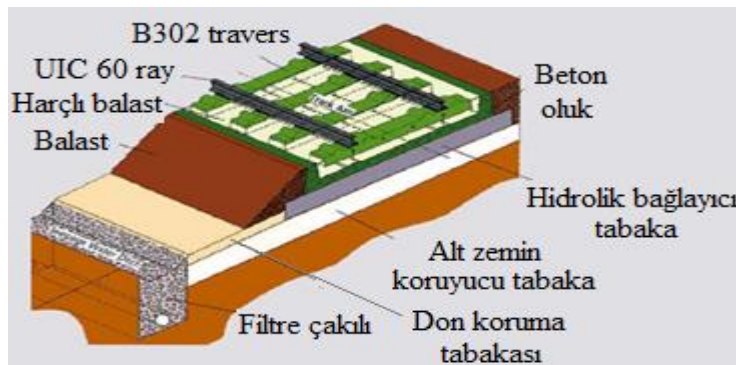
a) Poz makinası

b) Traverslerin yerleştirilmesi

Şekil 3.7 : Züblin üstyapı sisteminde traverslerin döşenmesi (Enoekl ve Nübel, 2006).

3.1.1.3 Heitkamp üstyapı sistemi

Bu sistem Heitkamp Rail GmbH (Gesellschaft mit beschränkter Haftung-Limited Şirketi) firması tarafından geliştirilmiş ve sisteme de firmanın ismi verilmiştir. Bu sistemin tasarımı beton oluklu klasik Rheda üstyapı sistemine çok benzemektedir. Rheda sisteminden farkı, olukların beton yerine demiryolu inşa araçlarının çalışmasını engellemeyecek şekilde çakıl ile doldurulmasıdır (Şekil 3.8). Bu işleminden ardından ray ve traversler yerleştirilir. Bu işlem esnasında hattın geometrisi hassas bir şekilde ayarlanır ve balast tabakası sıkıştırılır. Yerleştirme işleminin ardından balast yatağındaki boşluklar çimento enjeksiyonu ile kapatılır (Michas, 2012).



Şekil 3.8 : Heitkamp üstyapı sisteminin enkesiti (Michas, 2012).

Hattın geometrisinin kalitesi, Almanya'nın Waghäusel şehri yakınlarında test edilmiş ve yıllar boyunca herhangi bir geometrik bozulma olmayacağı teyit edilmiştir (Şekil 3.9).



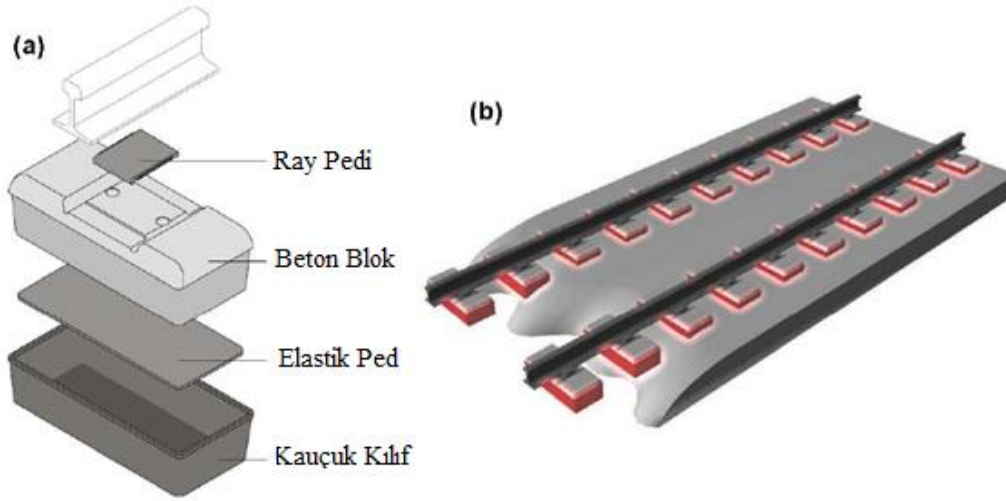
Şekil 3.9 : Heitkamp sisteminin test edildiği hattan bir görüntü (crash.lo9.de).

3.1.1.4 SBV üstyapı sistemi

SBV (Schwellen mit BitumenVerguss-Bitüm Yalıtımlı Tabaka) sistemi de Rheda sistemiyle benzer teknik özelliklere sahiptir. Bu sistemin farkı ise taşıyıcı tabakada beton yerine asfaltın kullanılmasıdır. Mastik asfalt betonarme traverslerin arasına ve altına nüfus ettirilir. Bu sistemin en büyük dezavantajı inşaat sırasında dökülen asfaltın yerleştirilmesinin ancak elle yapılabilmesidir. Dolayısıyla bu yöntem çok zorlu ve zaman alan bir süreçtir. Özellikle yaz aylarında asfaltın sıcaklığı arttığında, yanal stabilitenin bozulmaması için betonarme traverslerin alt kısımları buna uygun bir şekilde üretilmiştir. SBV sistemi, 2 mm hassasiyetle inşa edilebilen asfalt tabakalı diğer üstyapı sistemlerinin gelişimiyle etkisini yitirmiş, uzun süre kullanılamamıştır (Michas, 2012).

3.1.1.5 Stedef, Wallo, Sonneville-LVT (Low Vibration Track-Düşük Titreşimli Hat) üstyapı sistemleri

Stedef (Fransız), Wallo (İsviçre) ve Sonneville (İsviçre) üstyapı sistemleri aynı tasarım özelliklerine sahip sistemlerdir. Şekil 3.10'da görüldüğü üzere elastik ped, traversin altına yerleştirilmiş, onların altına ise sistemi içine alacak şekilde kauçuk kılıf konmuştur. Bu sistem, titreşim ve gürültüyü çok iyi bir şekilde sönümleme özelliğine sahiptir.



Şekil 3.10 : a) Sonneville ve LVT sistemlerindeki travers uygulaması b) Sistemin içeriği yerinde dökülen beton tabaka ve üzerinde yüksek elastik özelliğe sahip kauçuk kılıflı betonarme travers/blok (Rhombert, 2009; Michas, 2012).

Bu sistemde top-down adı verilen yukarıdan aşağıya doğru ilerleyen bir inşa metodu izlenmektedir. Raylar geniş bir mesnet alanına oturduğundan elastik malzemelerin üzerindeki gerilme azdır, buda malzemenin yıpranma sürecini yavaşlatır. Hattın geometrisi ayarlanıp, tavers ve ray montajı yapıldıktan sonra kauçuk kılıf ile altındaki tabakanın arasına beton dökülmektedir. Bu sistemin dezavantajı, yapının su tarafından aşındırılma riskidir. Kauçuk kılıftan su sızabildiğinden, kılıf ile travers arasındaki bağ zayıflamakta, bu durum da sistemin stabilitesini azaltmaktadır. Öte yandan en büyük avantajı ise travers ve bağlantı noktalarının kolaylıkla değiştirilebilmesidir. Basit inşa metodu ve çok esnek bir yapıya sahip olması bu üstyapı tipini, dünya piyasasında rekabetçi bir sistem haline getirmektedir (Rhombert, 2009 ve Mizchas, 2012).

Stedef üstyapı sistemi

Stedef sistemi SNCF (Société nationale des chemins de fer français - Fransa Ulusal Demiryolu Şirketi) mühendislerinden Roger Sonneville tarafından geliştirilmiştir. Titreşim ve gürültüyü çok iyi absorbe ettiği için yaygın olarak tünellerde kullanılmaktadır. Metro sistemleri en yaygın kullanım alanları olsa da yüksek hızlı hatlara da uyumlu bir üstyapı sistemidir. Stedef sistemi dünya genelinde uygulanan bir sistem olup sadece Avrupa'da tahmini olarak 200 km hat, bu sistemle inşa edilmiştir. Bu sistem ilk olarak 230 km/sa ve daha az hızlar için kullanılmakta idi. 1998 yılında bu hızı 350 km/saat'e çıkarmak için klasik Stedef sistemine göre

tasarım toleransı daha düşük, daha özel bir kılıf ve bu kılıfla üstündeki blok arasındaki bağlantıyı sağlayan esnek, su geçirmez bir malzeme kullanılmıştır. Şekil 3.11’de klasik Stedef sistemi ve daha gelişmiş bir sistem olan Sateba S312 Stedef modeli gösterilmiştir (Dieleman ve diğ. 2008).



Şekil 3.11 : Klasik ve Sabeta 312 Stedef üstyapı sistemi (Dieleman ve diğ. 2008).

Stedef üstyapı sisteminin inşaatı

Öncelikle işlem görmüş balast tabakası, hattın genişliğine ve derinliğine uygun şekilde serilir. Ardından donatılı beton tabaka yerinde dökülerek yerleştirilir. Yolun alıyman kısımları için kayar kalıp, kurplu kesimleri için ise parabolik biçimde kalıplar kullanılmaktadır (Şekil 3.12). Hattın geometrik düzgünlüğü yerel bir GPS (Global Positioning System- Küresel Konumlama Sistemi) cihazından alınan verilerle nümerik olarak kontrol edilir.



Şekil 3.12 : Stedef sistemi beton tabakanın hazırlanışı (Dieleman ve diğ. 2008).

Beton tabakanın prizini almasının ardından prefabrik olarak hazırlanmış olan çerçeve sistemin montajı, 6 m’lik parçalar halinde kolaylıkla yapılmaktadır. Şekil 3.13’te bu montajdan bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 3.13 : Stedef üstyapı sisteminin montajı (Dieleman ve diğ. 2008).

Stedef sisteminin üretiminde, çerçeve sisteminin oturacağı tabaka için ayrı, çerçeve sistemle bu tabaka arasını doldurmak için ayrı olmak üzere iki çeşit beton kullanılmıştır.

- Beton tabaka için B35 sınıfı, 350 dozlu beton kullanılmıştır.
- Dolgu betonu için B30 sınıfı, 350 dozlu beton kullanılmıştır. Kullanılan çimento ise CEM III/A ES'tir. Ayrıca betonun içine, donatının yokluğunu telafi etmek ve çatlakları dağıtıp azaltmak için polipropilen fiber kullanılmıştır.

Şekil 3.14'te ise hattın geometrik ayarlamaları sonucunda dolgu betonunun döküldükten sonraki hali gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Stedef sisteminin tamamlanmış hali (Dieleman ve diğ. 2008).

Soneville LVT üstyapı sistemi

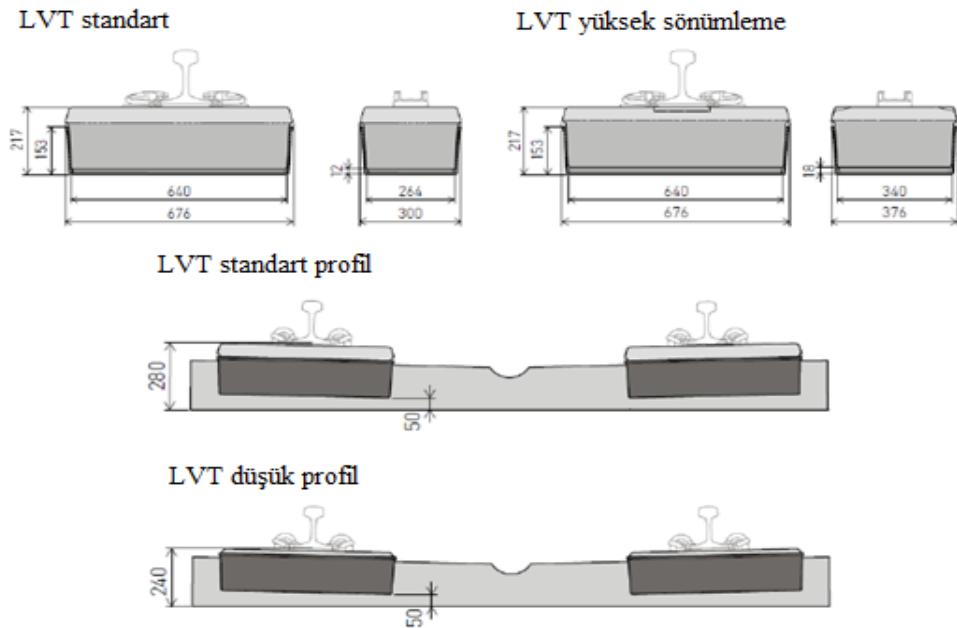
SNCF mühendisi Roger Sonnevile'in SNCF'den ayrıldıktan sonra tasarladığı bir üstyapı sistemidir. Stedef sistemi ile çok benzer bir yapıya sahiptir. Aralarındaki fark ise Sonnevile sistemindeki ikiz blok traverslerin arasının bağısız olmasıdır (Dieleman L.-SNCF).

Bu sistem kullanılan en eski üstyapı sistemlerinden biri olup, toplamda 1031 km hat uzunluğu bu sistemle inşa edilmiştir. Dünya genelinde Sonneville LVT'nin kullanıldığı en önemli hat ise Fransa ile İngiltere'yi birbirine bağlayan Manş Tüneli hattıdır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Manş tüneline Sonneville üstyapı sistemi (www.eurotunnelgroup.com).

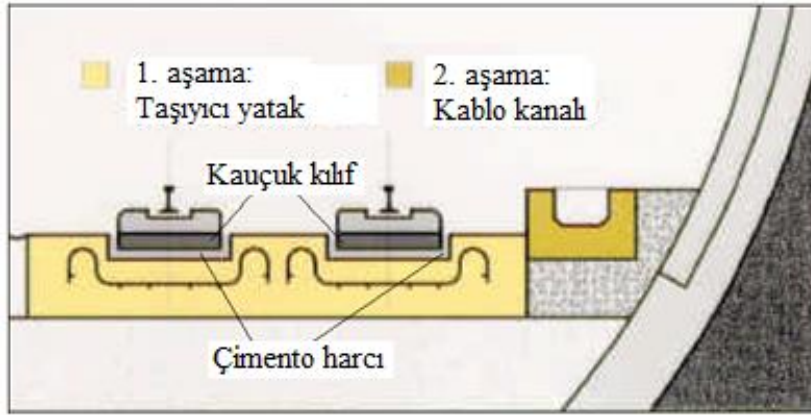
Bu sistemde Vosloh W14, Pandrol e-clip ve Sonneville.S75 olmak üzere 3 tipte bağlantı malzemesi kullanılmıştır. Hem Stedef hem de Sonneville sisteminin en önemli özelliği, titreşim ve gürültüyü azaltmasıdır. Bununla ilgili birçok çalışma yapılmış ve Sonneville üstyapı sistemi sürekli geliştirilmiştir. En son versiyonu ise Sonneville-LVT adıyla değil LVT High Attenuation (Yüksek sönümleme) ismiyle anılmakta olup adından da anlaşılacağı gibi diğer versiyonlarından daha fazla titreşimi sönümleme özelliğine sahiptir (Şekil 3.16). Bu versiyonda daha büyük beton blok ve daha yumuşak elastik ped kullanılmıştır.



Şekil 3.16 : Standart, düşük ve yüksek sönümleme özelliğine sahip Sonneville versiyonları (www.vigier-rail.ch).

Walo üstyapı sistemi

Bu sistem ikiz blok traverslerden oluşan bir İsviçre modelidir. Çoğunlukla tünellerde kullanılmakta olup Stedef ve Sonneville sistemine çok benzemektedir. Bu benzerliği Şekil 3.17’de gözlemlemek mümkündür. Stedef sisteminde olduğu gibi bu sistemde de özel bir kayar kalıp kullanılarak beton tabaka serilmiş, traversler kauçuk kılıflar ile beton tabakaya yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir (Onnori, 2007).



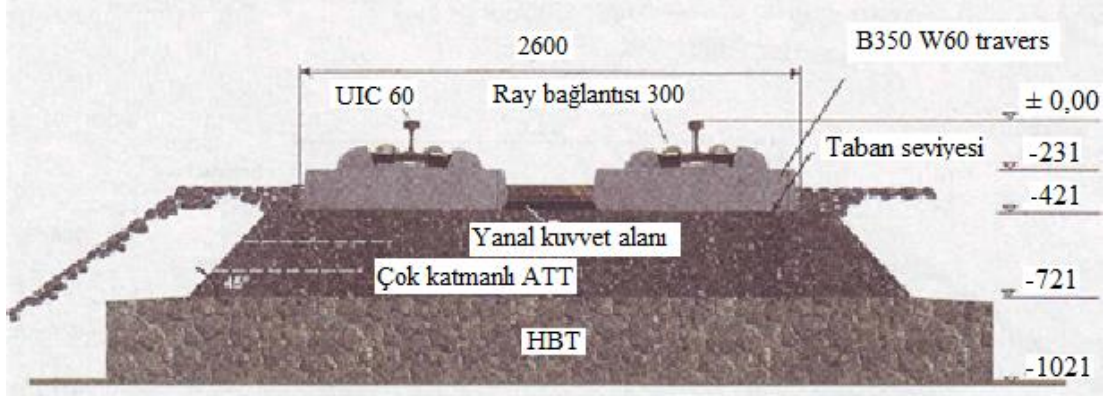
Şekil 3.17 : Tünel kesitinde Walo sistemi örneği (Michas, 2012).

3.1.2 Traverslerin asfalt-beton tabakanın üzerinde olduğu üstyapılar

Yapılan çalışmalarda, geleneksel balastlı tabaka yerine kullanılan asfalt taşıyıcı tabakanın stabilitesinin yeterli düzeyde olduğu görülmüştür. Asfalt taşıyıcı tabaka diğer sistemlere göre daha elastik bir yapıya sahip olması sebebiyle değişen koşullara karşı kolaylıkla uyum sağlayabilmektedir. Yapının zarar görmesi durumunda ise traversler kolayca değiştirilebilmekte ve rutin bakım da yine kolaylıkla yapılabilmektedir (Michas, 2012).

3.1.2.1 ATD üstyapı sistemi

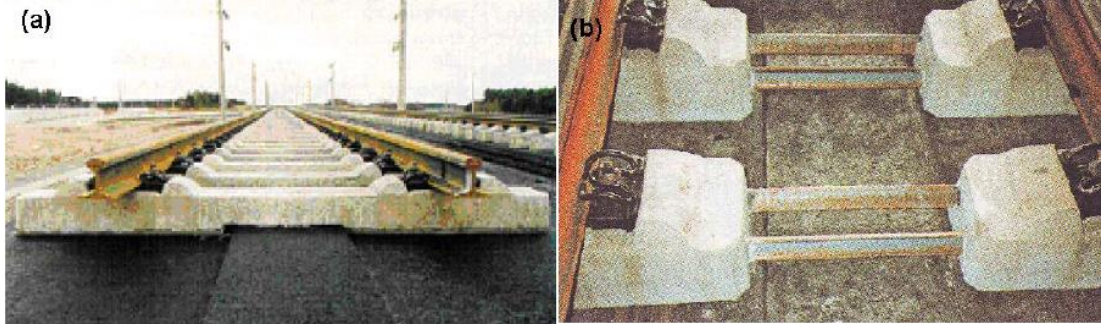
Bu sistem, çimento stabilizasyonu yapılan tabaka üzerine asfalt yatağın serilmesini kapsamaktadır (Şekil 3.18). Traversler asfalt tabakanın üzerine yerleştirilir, hattın ortasında bulunan yükselti ise hattın yanal direncini sağlamaktadır. Bu yükselti ile traversler arasındaki boşluk sentetik malzeme ile doldurulur. Şekil 3.19’da da görüleceği üzere bu uygulama alt kısmı oluklu monoblok taverslerde yapıldığı gibi, ikiz blok traverlerde de yapılmaktadır.



Şekil 3.18 : ATD sistemi (Michas, 2012).

Şekilde görülen ATD sistemi aşağıda açıklanan bileşenlerden oluşmaktadır:

- HBT – Hidrolik olarak bağlanmış taşıyıcı tabaka,
- ATT – Asfalt taşıyıcı tabaka,
- İkiz blok betonarme travers B350 W60 ya da monoblok travers B320 W54,
- Elastik ray bağlantı elemanları ve UIC 60 raydır.



Şekil 3.19 : ATD sistemi traversleri a) monoblok, b) İkiz blok (Mörscher, 1999).

ATD sistemi, traverslerin kayma direncini arttırarak ekstra bir destek sağlamaktadır. Sürekli kaynaklı raylarda ani frenleme esnasında bir sorunla karşılaşmamak için, traverslerin çevresi balastla sarılmalı ya da ağır traversler tercih edilmelidir. Esveld'e göre asfalt serilme çalışmaları 2 mm hassasiyetle yapılmalı, 3 hatta 4 tabaka halinde serilmelidir. Bu işlemlerin düzgünce uygulanması ve bakımının iyi yapılması halinde sistemin ömrü 50-60 yıl arasında değişmektedir.

Bu sistem değişik demiryolu türlerinde kullanılabilir. Şekil 3.20'deki örnek Berlin'de bir tramvay hattına aittir (EAPA, 2014). Şekil 3.21'deki ATD uygulaması ise, Hannover-Berlin yüksek hızlı tren hattından bir fotoğraftır (Lechner, 2011).



Şekil 3.20 : Berlin Tramvay Hattı ATD sistemi (EAPA, 2014).

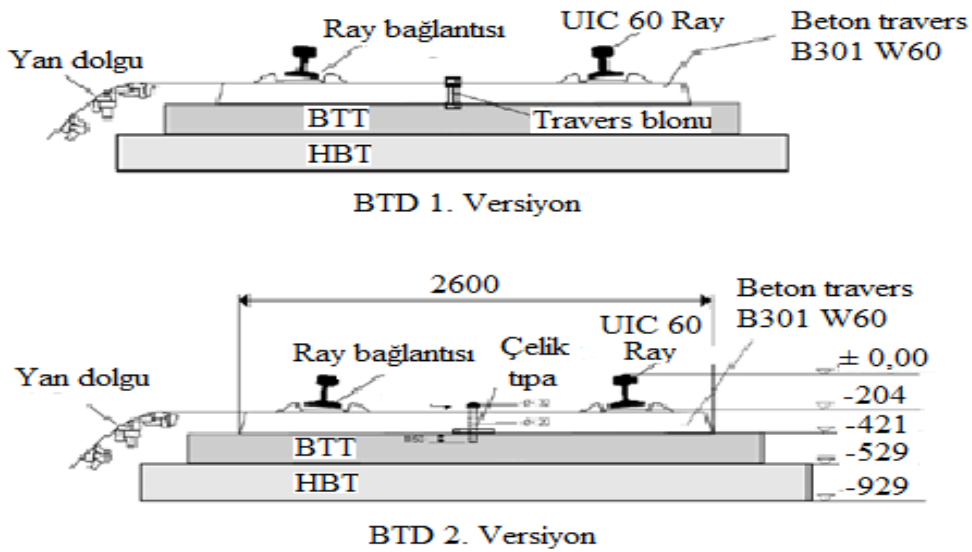


Şekil 3.21 : Hannover-Berlin Yüksek Hızlı Tren Hattı ATD sistemi (Lechner, 2011).

3.1.2.2 BTD üstyapı sistemi

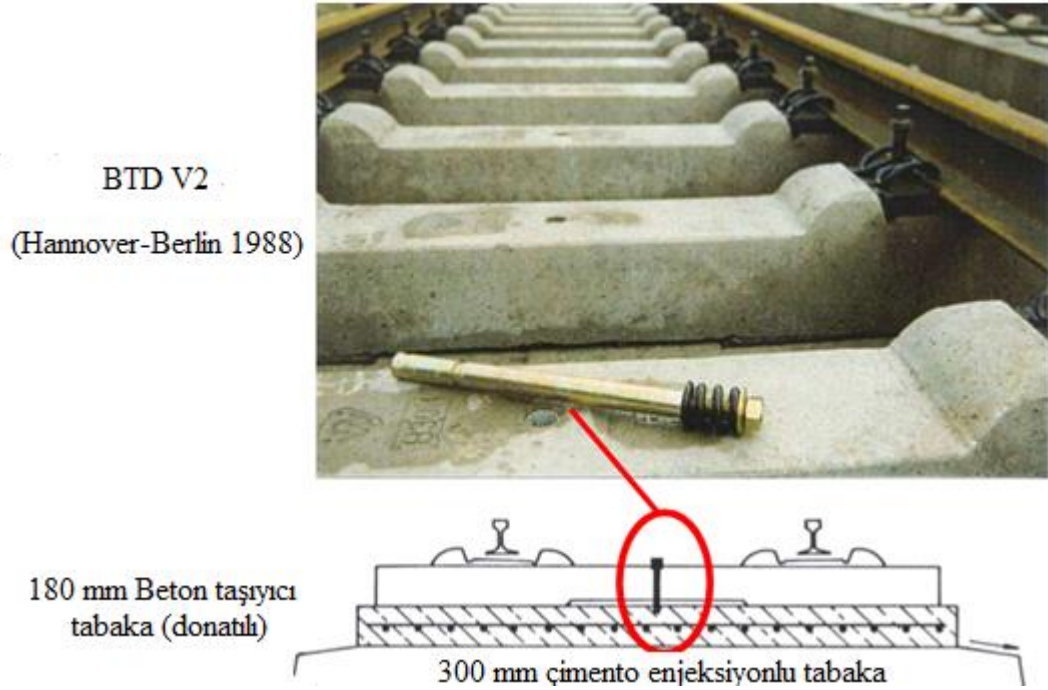
Bu sistem, beton taşıyıcı tabaka üzerine yerleştirilen monoblok traverslerden oluşmaktadır. Her ikinci travers beton taşıyıcı tabakaya çelik dübel ile bağlanır. Sistemin yanal direncini sağlamak üzere oluşturulmuş iki ayrı inşa metodu vardır:

- V1 sisteminde blonlar her ikinci traversin ortasından içeriye yerleştirilerek kenetlenir.
- V2 sisteminde ise yine her ikinci traversin ortasından delik açılarak çelik tıplar bu deliklere yerleştirilir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : BTD sistemi 1.ve 2. versiyonları (Michas, 2012).

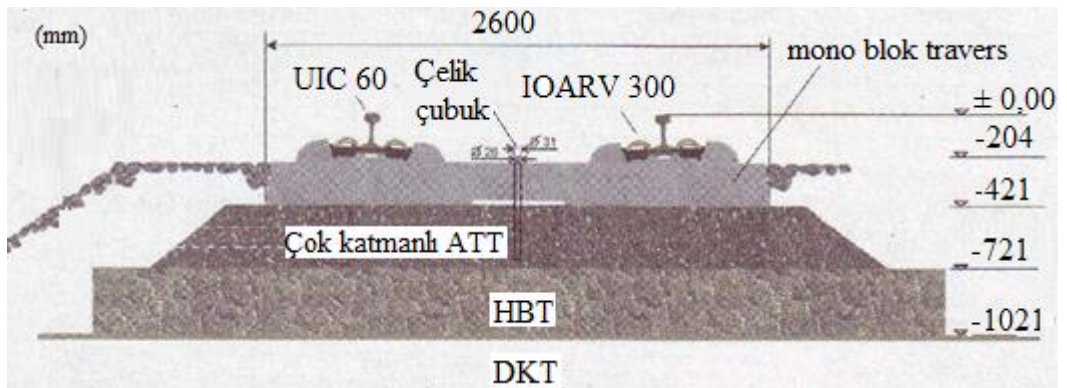
Şekil 3.23'te bu sistemin uygulandığı Hannover-Berlin yüksek hızlı tren hattından bir resim görülmektedir.



Şekil 3.23 : Hannover-Berlin yüksek hızlı tren hattı 2.versiyon BTD sistemi (Lechner, 2011).

3.1.2.3 Walter üstyapı sistemi

Bu sistem tasarım ve üretim açısından BTD sisteminin 2. Versiyonu ile benzerlik göstermektedir. Bu sistemin farkı, taşıyıcı tabaka olarak beton yerine asfaltın kullanılmasıdır (Şekil 3.24). Traversler, asfalt tabakaya çelik çubukların ankraj yapılmasıyla sıkı sıkıya tutturulurlar (Michas, 2012).



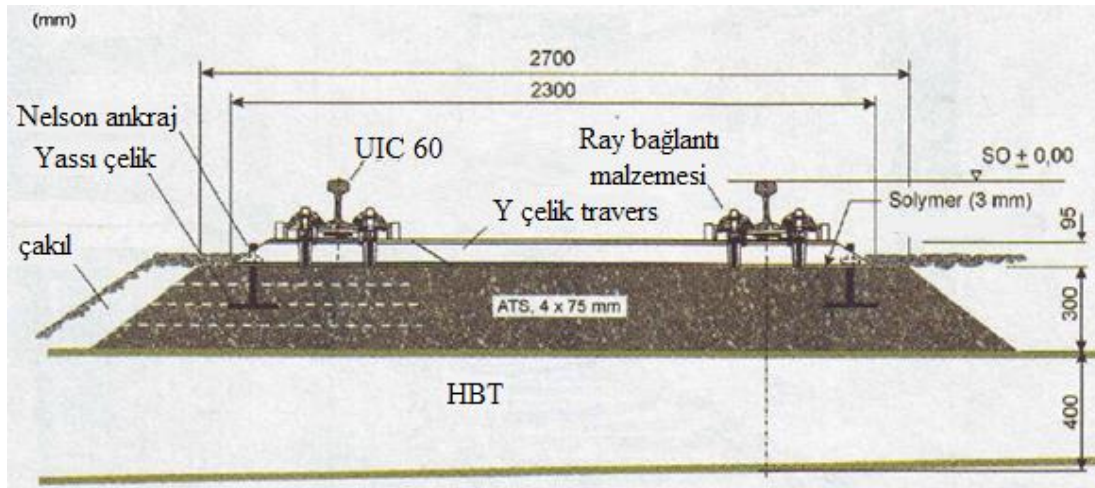
Şekil 3.24 : Walter balastsız üstyapı sistemi (Michas, 2012).

Bu sistemde monoblok traversler kullanılmaktadır. BTD V2 (2.Versiyon) sisteminde olduğu gibi ray doğrultu ve kot ayarlamasının yapılmasının ardından her iki traverste

bir delikler açılır. Daha sonrada travers ve asfalt taşıyıcı plak, bu deliklerin içinden geçen 28 mm çapındaki çelik pimlerin asfalt tabakaya 250 mm kadar gömülmesiyle birbirine bağlanır. Bağlantı işleminin sağlam olabilmesi için asfalt tabakaya plastik dübeller yerleştirilir (Quante, 2001).

3.1.2.4 SATO üstyapı sistemi

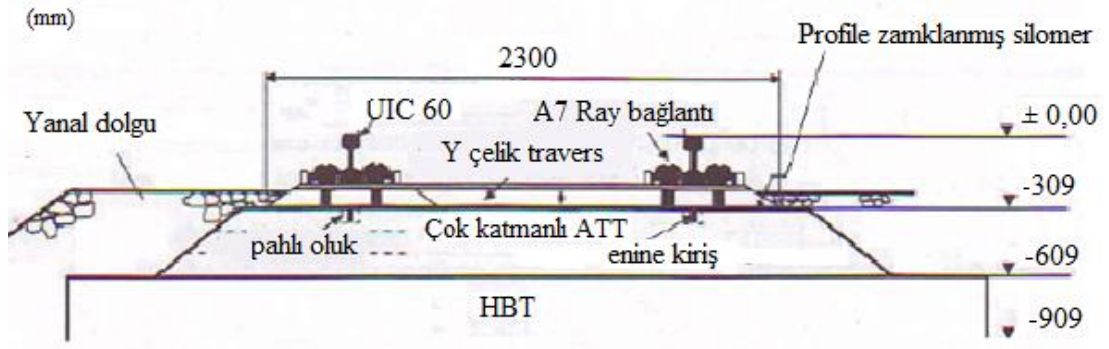
Bu sistemde çelik traversler, asfalt tabaka içinde bulunan düz çelik levhaya kaynaklanmak suretiyle asfalt tabakaya tutturulur. Bu yöntemde de *Nelson Ankraj Yöntemi* adı verilir. Bu şekilde hem yatay yönde hem de düşey yönde stabilite sağlanmış olur (Şekil 3.25). Ancak bu sistem, FFYS ve FFBS (Feste Fahrbahn Beton tragschicht)- ATS(AsphalTragschicht)- SATO(Studiengesellschaft Asphalt Oberbau) gibi bilinen diğer benzer sistemlere göre daha karmaşık ve pahalıdır (Quante, 2001).



Şekil 3.25 : Nelson ankrajlı Sato üstyapı sistemi (Michas G., 2012).

3.1.2.5 FFYS üstyapı sistemi

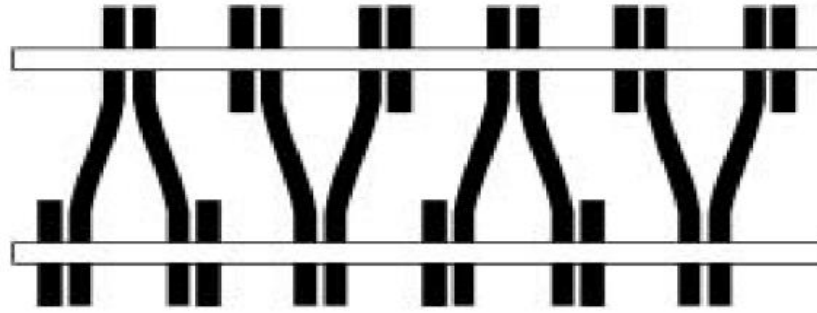
Bu sistemin tasarımının temel amaçları; çok iyi stabilite sağlamak, kolay ve hızlı montaj tekniğinden dolayı maliyetlerin ve kaynakların kullanımını azaltmak olarak sıralanabilir. Bu sistemde kullanılan Y biçimli çelik traversler yeni yapılan hatlar için iyi bir çözüm olduğu gibi, yenilenen, genişletilen hatlar için de yine etkili bir çözümdür. Aynı zamanda özel makas bölgelerinde de kullanılabilir. Şekil 3.26'da bu sistemin enkesiti gösterilmiştir.



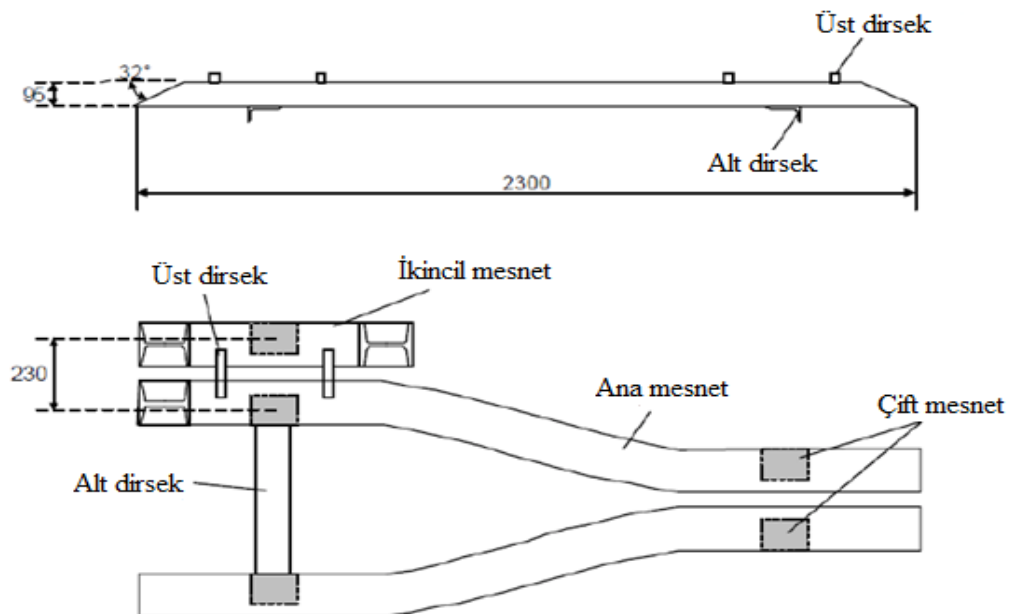
Şekil 3.26 : FFYS üstyapı tasarımı (Quante, 2001).

Y şeklinde çelik traversler ile geleneksel çelik traversler arasındaki farklar şunlardır:

- Raylara çift mesnetlik yapma,
- Her travers için 3 ray mesnet alanı ve toplamda 6 mesnet noktası olması (Şekil 3.27),
- Traversin dolu gövdeli çelik kirişten oluşmasıdır (Şekil 3.28).



Şekil 3.27 : Y travers plan görünümü (Quante, 2001).



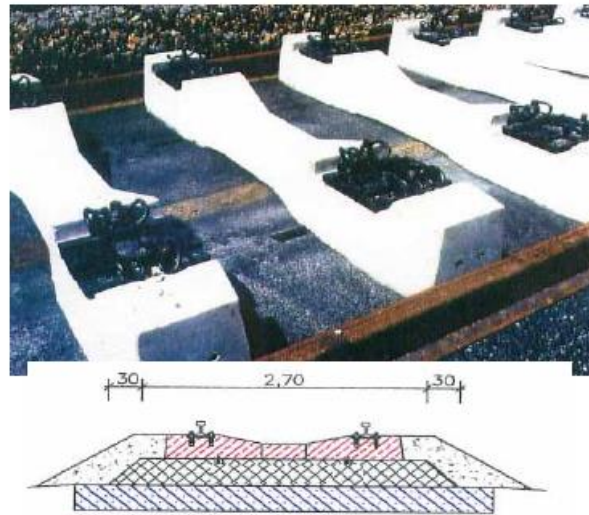
Şekil 3.28 : Y şekilli traversin yandan ve üstten görünüşü (Quante, 2001).

Y traversin avantajları şunlardır:

- Malzeme ömrü ortalamanın üzerindedir.
- Yüksek stabilite yeteneğine karşı düşük maliyete sahiptir.
- Balast ihtiyacı % 30 daha azdır.
- Normal şekilli olan traverslere göre travers talebi yarı yarıya daha azdır.
- Traverslerin neredeyse tamamı geri dönüştürülebilir olma özelliğine sahiptir.
- Rayların iki noktadan mesnetlenmesi sebebiyle daha sarsıntısız bir araç seyri mevcuttur ve sonucunda raylar daha az yıpranır.
- Daha geniş buraj açıklığı sebebiyle buraj işlemi daha kolaydır (Quante, 2001).

3.1.2.6 FFBS-ATS-SATO üstyapı sistemi

FFBS-ATS-SATO sistemi, Almanya’da 390 m’lik bir test hattında kullanılmıştır. Bu sistemde taşıyıcı tabaka asfalt, traversler ise monoblok betonarme traverstir (Şekil 3.29). Yanal direnç FFYS sistemiyle benzer şekilde, traverslerin altına gövde levhası yerleştirilerek sağlanmaktadır. Traversler asfalt tabakanın içinde oluşturulmuş özel oluklara yerleştirilmektedir (Michas, 2012).

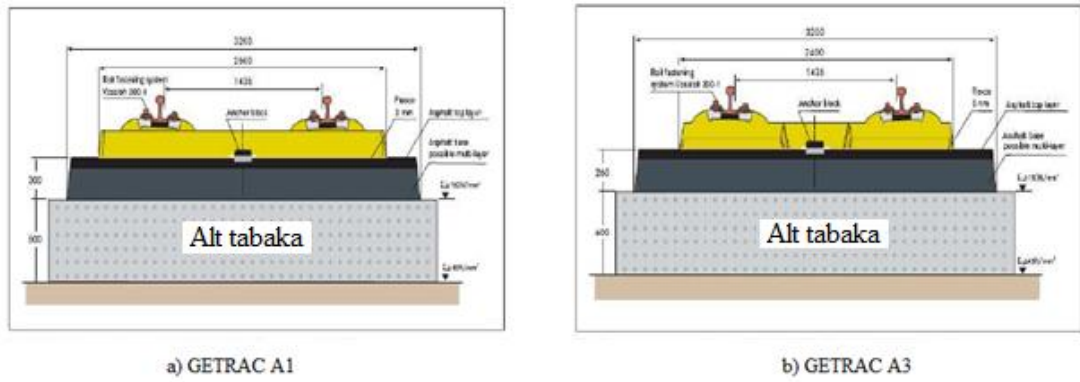


Şekil 3.29 : FFBS-ATS-SATO üstyapı sistemi (UIC, 2011).

3.1.2.7 GETRAC üstyapı sistemi

Bu üstyapı sistemi 2003 yılında Almanya’da geliştirilmiştir. Sistem asfalt taşıyıcı tabaka ve öngermeli beton traverslerden oluşmaktadır. Traversler asfalt tabakaya ankrajlanır. Böylece üstten gelen yanal ve düşey yükler asfalt tabakaya daha kolay

transfer edilir. Gelen düşey yüklerin alt tabakalara kolayca iletilebilmesi için, ayrıca B316 380 kg ağırlığında ağır travers kullanılmıştır. Bu sistemin A₁ ve A₃ tipinde 2 farklı uygulaması vardır (Şekil 3.30). A₁ tasarımında travers boyu 2,6 m olup alan kısıtı olmayan bölgelerde bu uygulama tercih edilmektedir. A₃ tasarımında ise travers boyu 2,4 m olup genişliği bir önceki tasarımdaki traversten biraz daha fazladır. Daha çok, alan kısıtı olan dar tünellerde tercih edilmektedir. Yüklerin daha geniş bir alana yayılmasından dolayı travers ile asfalt tabaka arasındaki gerilmeler azalır, bu durum da asfalt tabaka kalınlığında 5 cm azalma sağlar. Özellikle tüneller için bu şekilde oluşturulan ekstra alanlar oldukça kıymetlidir (Michas, 2012).



Şekil 3.30 : GETRAC A1 ve A3 tipi üstyapı sistemleri (WON, 2012).

Avrupa’da Getrac sistemi kullanılarak inşa edilen hatlar, Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Avrupa’da Getrac sisteminin kullanıldığı hatlar (WON, 2012).

Üstyapı Tipi	Üstyapı tipinin kullanıldığı hatlar	Tarih
Getrac A1	Hannover–Berlin Demiryolu Hattı / Berlin-Westkreuz-Ruhleben Bölümü (Almanya)	1994~95
	Las Palmas-Ourepesa arasındaki yeni hat (İspanya)	2002
	Lossetabahn / Kassel Hattı (Almanya)	2003
	Wengi-Frutigen Demiryolu Projesi (İsviçre)	2004
Getrac A3	Kehre Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2001
	Heiligenberg Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2001-02
	Esslingerberg Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2004
	Brandleite/ Treuchtlingen Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2005
	Frankfurt-Goettingen Hattı Schluechtern Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2008-2010
	Old Mainz Tüneli Demiryolu Projesi (Almanya)	2009

Sistemin avantajları şöyledir:

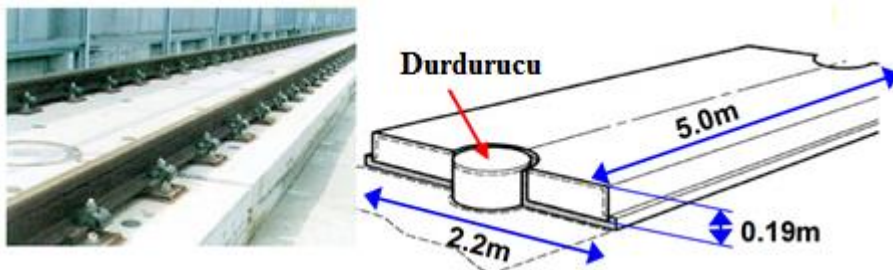
- İyi düzeyde geometrik düzgünlük,

- Hem yüksek hızlı trenler hem de yük trenleri için tasarım yapılabilme,
- Kolay ve hızlı montaj,
- Minimum bakımla uzun kullanım ömrü,
- Tren kazalarından sonra kolay ve hızlı yenileme,
- Enkesit kalınlığının uygun tasarımla azaltılabilmesi,
- Etkin maliyet şeklindedir.

3.1.3 Prefabrik beton üstyapılar

3.1.3.1 Shinkansen üstyapı sistemi

Bu sistem ilk olarak 1972 yılında Japonya’da geliştirildi. Taşıyıcı tabaka, çimento enjeksiyonu yapılarak stabilitesi arttırılmış başka bir tabakaya oturmaktadır. Takai (2007), Taşıyıcı tabakanın ölçüleri, 5 m x 2,2 x 0,19 m’dir (tünellerde kalınlık 0,16 m olmaktadır) (Şekil 3.31). Yaklaşık olarak 5 ton ağırlığa sahip olan bu tabaka, hidrolik bağlayıcı yüzey üzerine yerleştirilerek geometrik ayarlamaları yapılmaktadır. Çimento enjeksiyonlu asfalt harcın kalınlığı 4 cm’dir. Taşıyıcı tabakanın yatay ve düşey doğrultuda stabilitesini sağlayacak beton silindirler (Ø 40cm) bulunmaktadır. Bunlar taşıyıcı tabakaya rijit bir şekilde bağlanırlar (Arlı, 2002).



Şekil 3.31 : Shinkansen üstyapı sistemi (Takai, 2007).

Üretim esasları

Shinkansen tipi üstyapının inşaatında öncelikle prefabrik elemanlar inşaat alanına getirilerek beton yol yatağı üzerine yayılır. Pozisyonları ayarlandıktan sonra geçici plak destek elemanları ile desteklenirler. Daha sonra kalıplar prefabrik levhalar boyunca yerleştirilirler. Kalıplar yerleştirilirken sadece plak kenarlarına değil aynı zamanda plakların birbirlerine bakan yüzlerine de yerleştirilirler. Asfalt beton harcın sızmasının engellenmesi için işlem esnasında gerekli önlemler alınır. Ardından prefabrik plaklar ile yol yatağı arası asfalt-çimento harcı ile boşluk kalmayacak şekilde doldurulur. Böylece üstyapı plakları stabil hale getirilmiş olur. Bu işlemlerin

ardından raylar uygun altlıklarla birlikte serilerek konumları ayarlanır ve imalat tamamlanır (Sunaga ve diğ, 2001).

Sonraki yıllarda bu sistem biraz daha geliştirilmiştir. Özellikle tünel ve viyadüklerde kullanılan bu yeni sistemde taşıyıcı tabakanın ortasındaki kısım boşaltılarak ortası boş çerçeve bir sistem elde edilmiştir. Bunun yanı sıra taşıyıcı tabakanın altında kullanılan bitümlü harç optimize edilerek daha dayanıklı ve daha hafif bir yapı oluşturulmuştur. Bu yeni tasarımda kalınlık biraz daha artmıştır (22 cm). Ortadaki boşluğun boyutları ise 286 cm x 80 cm'dir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 : Shinkansen çerçeve tipi üstyapı sistemi (Takai, 2007).

Sistemin avantajları şu şekildedir:

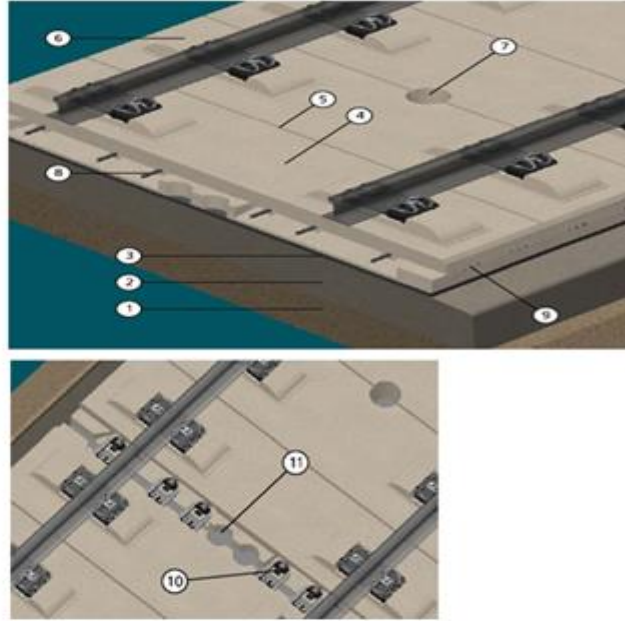
- Sistemin ağırlığı daha az,
- Maliyetler daha az,
- Termal gerilmeler daha düşük,
- Kontrolü (muayene) daha kolay olmasıdır.

3.1.3.2 Bögl üstyapı sistemi

Bögl üstyapı sistemi Almanya'da Max Bögl şirketi tarafından geliştirilmiş ve ilk defa 1977 yılında kullanılmıştır. Bu prefabrik sistem, 20 cm kalınlığında, 6,45 m uzunluğunda ve 2,55-2,80 m genişliğinde imal edilmiş olan betonarme bloklardan oluşmaktadır. Taşıyıcı tabaka yanal doğrultuda öngermeli olarak üretilmiştir. Boyuna doğrultuda ise, stabilizeyi sağlamak için GEWI adı verilen çelik donatılar kullanılmıştır. Bunu yanı sıra tabakada olacak çatlakları önlemek için kısmi derz oluşturulmuştur. Bögl tipi üstyapı Şekil 3.33'te ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu özel

tasarım sayesinde birçok travers bu şekilde uç uca eklenerek kullanılabilir. Özel makineli kriko yöntemiyle montaj kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir.

- 1-Don koruma Tabakası
- 2-Hidrolik bağlayıcı tabaka (30 cm)
- 3-Dolgu
- 4-Üstyapı
- 5-Kısmi Derz
- 6-Ray mesnet noktası
- 7-Dolgu için açıklık
- 8-GEWI donatısı
- 9-Öngerme donatısı
- 10-Gergi ve vidalar
- 11-Derz



Şekil 3.33 : Bögl üstyapı sistemi enkesiti (www.max-boegl.com).

Standart inşa prosedürü aşağıda belirtilmiştir:

- Don koruma tabakası serilir.
- Asfalt makinesi tarafından hidrolik bağlayıcı tabaka 5 mm toleransla serilir.
- Taşıyıcı tabakalar 5 cm aralıklı olarak yerleştirilir. Hata payı 1 cm'dir.
- Dış kenarlar harçla kapatılır.
- Taşıyıcı tabakada bulunan özel boşluklardan çimento enjeksiyonu yapılır.
- Taşıyıcı tabaka arasındaki ek yerleri harçla doldurulur.
- Raylar yerlerine yerleştirilir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34 : Bögl üstyapı sisteminin inşaatı (www.max-boegl.com).

Çizelge 3.3 : Bögl üstyapı sisteminin kullanıldığı projeler (www.max-boegl.com).

Projeler	Uzunluk (km)	Hız (km/sa)
Roitzsch–Hohenthurm Hattı yenileme çalışması	15	160
Katzenberg Tüneli Projesi	9,4	250
Bologna Merkez İstasyonu	0,44	-
Pekin-Tianjin Yüksek Hızlı Tren Hattı	115	350
Pekin-Şangay Yüksek Hızlı Tren Hattı	1318	300
Nuremberg-Ingolstadt Yüksek Hızlı Tren Hattı	35	300

Çizelge 3.3'te Bögl üstyapı sisteminin kullanıldığı projelerden bazıları gösterilmiştir.

Bu sistemin avantaj ve dezavantajlarını ise şöyle sıralayabiliriz:

Avantajları şöyledir:

- Prefabrik ürün olması sebebiyle fabrika garantilidir.
- Montaj işlemi kolay ve hızlıdır.
- Montaj tamamlanır tamamlanmaz trafiğe açılabilir olma özelliğine sahiptir.
- Parçalar zarar gördüğünde kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

Dezavantajı aşağıda belirtildiği gibidir:

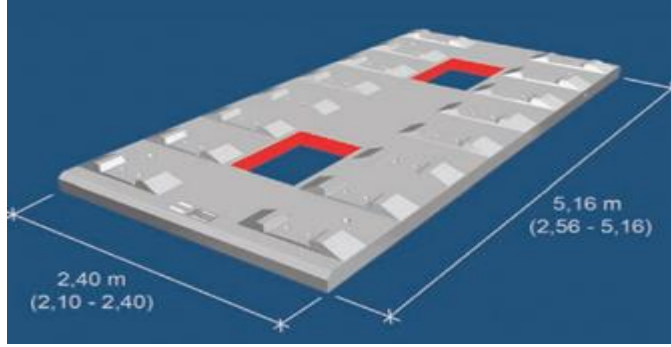
- Taşıma maliyeti sistemin en büyük dezavantajıdır. Parçaların ağırlığı yaklaşık 10 ton olduğu için bir seferde karayolu ile 3 tane parça taşınabilmektedir. Eğer fabrika ile inşa alanı uzak ise daha ekonomik üstyapı sistemleri tercih edilebilir.

3.1.3.3 ÖBB-PORR üstyapı sistemi

Bu sistem Avusturya Demiryolu Şirketi (ÖBB-Österreichischen Bundesbahnen) tarafından geliştirilmiş ve 1989 yılında 264 m'lik bir hatta test edilmiştir. Hem şehir içinde hem de şehirler arasında uygulanmaya müsait olan bu sistemle, yaklaşık 100 km civarında hat inşa edilmiştir. İnşa edilen en eski hat 17 yıldır herhangi bir bakım-onarım ihtiyacı olmadan kullanılmaya devam etmektedir (www.mabatrack.com).

Sistem bileşenleri (Şekil 3.35): 5,16 x 2,4 x 0,16-0,24 m boyutlarında betonarme taşıyıcı tabaka ve iki kat esnek ray bağlantı elemanıdır (IOARV 300). Beton tabaka hidrolik bağlayıcılı tabaka üzerine yerleştirilir. Bu tabakanın ortasında 0,91 x 0,64 m'lik 2 tane açıklık vardır. Bu açıklıklar harcın yerleştirilmesine yardımcı olduğu gibi, oluşacak bütün yan etkilere de absorbe etmektedir. Beton tabakanın su

sızdırmaması adına alt tabakayla temas halinde olan kısım poliüretan-çimento karışımı bir tabaka (kauçuk granüler karışım) ile kaplanır. Tabakanın yerinden ayrılmaması için tabakanın boşluk kısmına beton tıkaç uygulaması yapılır. Tabakanın ortalama ağırlığı 50 kN'dur. Yarıçapı 200 m ve üzeri olan kurplarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.35 : ÖBB-Porr üstyapı sisteminin enkesit ve tasarım bilgileri (www.mabatrack.com).

Çizelge 3.4'te ÖBB-PORR üstyapı sisteminin kullanıldığı projelerden bazıları gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : ÖBB Porr üstyapı sisteminin kullanıldığı projeler (www.mabatrack.com).

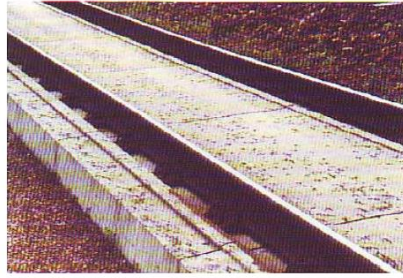
Projeler	Uzunluk (km)	Tarih
Langenlebern	0,26	1989
Tauern Tüneli	2,63	1992
Galgenberg Tüneli	11,04	1996/97
Kaponig Tüneli	11,17	1999
Sieberg Tüneli	12,9	2000/01
Arlberg Tüneli	20,81	2007/09

3.1.3.4 IPA üstyapı sistemi

Bu sistem ilk olarak 1984'te 60 m uzunluğunda bir istasyonda test edilmiştir. 1992 yılında ise Roma-Floransa Yüksek Hızlı Tren Hattı'nda kullanılmıştır. Bu sistemin toplam uzunluğu 100 km civarındadır. Japonya Ulusal Demiryolları'nın işbirliği ve teknolojisi ile bu sistem geliştirilmiştir. Dolayısıyla Shinkansen sistemine çok benzemektedir. Sistemin bileşenleri: Öngermeli prefabrik beton tabaka, altında çimento/asfalt harcı, en altta ise başka bir beton taşıyıcı tabaka bulunmaktadır. Shinkansen sistemi ile bu sistem arasındaki farklılık, yanal ve düşey yönde kaymayı önleyen betonarme silindirin konumundan kaynaklanmaktadır (Esveld, 1999).

3.1.4 Monolitik tasarımlar

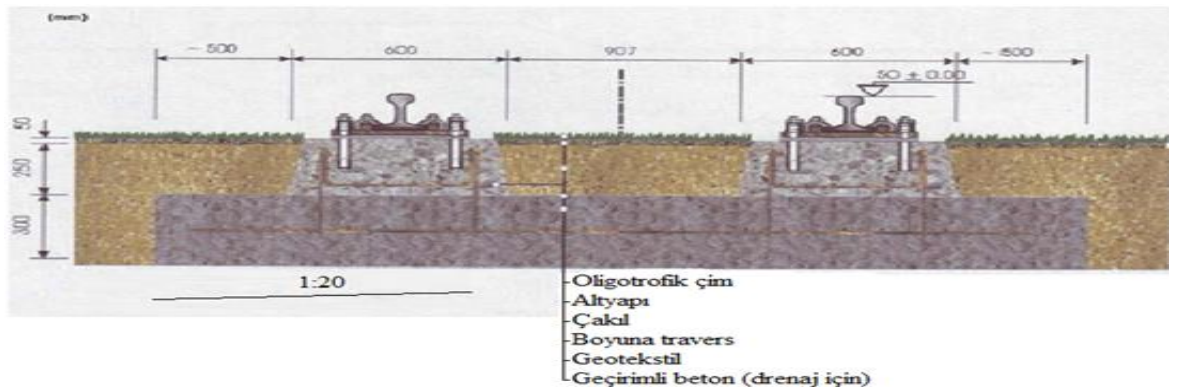
Bu tasarımlar, monolitik bir beton tabakayı ve onlara doğrudan montajlanan rayları içermektedir (Şekil 3.36). Traverssiz olanlar yerinde döküleceği gibi prefabrik olarak da üretilebilirler. Direkt ray bağlantı elemanları, traverssiz sistemler için oldukça etkili elemanlar olup özellikle köprülerde, hem sistemin yükünü hafifletme (travers olmadığından), hem de traverslerden dolayı oluşan problemleri ortadan kaldırmaktadır. Monolitik tasarımlar yeterince sert ve rijit yapılardır. Ayrıca trafik yükleri altında sürekli mesnetli elastik kiriş gibi davranış gösterirler. Sistem yeterince rijit olduğu için gerektiğinde yumuşak zeminlerde de kullanılabilir. Bu sistemde trafik yükleri daha geniş bir alana yayılmaktadır. Monolitik tasarımlarda beton taşıyıcı tabakada çatlak oluşumuna dikkat edilmeli ve özellikle ray bağlantı yerlerinde bu problemin önüne geçilmesi için önlemler alınmalıdır (Michas, 2012).



Şekil 3.36 : Doğrudan ray bağlantılı monolitik tasarımın bir örneği (Michas, 2012).

3.1.4.1 Çimle kaplı (Rasengleis) üstyapı sistemi

Çim kaplı üstyapı sistemi, su geçirimli 30 cm kalınlığında beton tabaka ve 2 tane boyuna doğrultuda trapez şekilli betonarme kirişten oluşmaktadır (Şekil 3.37). Bu kirişler beton taşıyıcı tabakaya donatılar vasıtasıyla sabitlenmiş ve hattın stabilitesi de bu şekilde sağlanmıştır. Kirişlerin arası ve kirişlerin dışında kalan kısımlar ise oligotrofik (besin değeri düşük) çimle doldurulmuştur (Michas, 2012).



Şekil 3.37 : Çimle kaplı üstyapı sistemi (Michas, 2012).

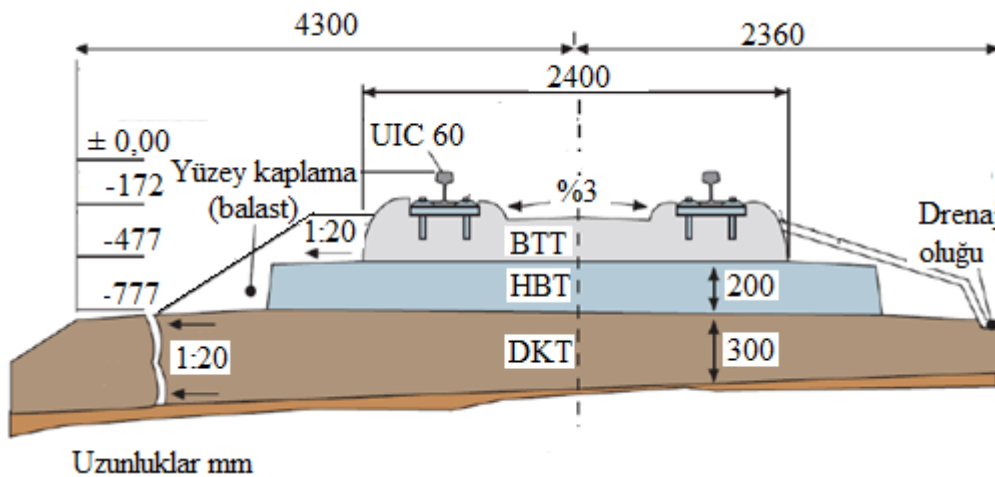
Şekil 3.38’de ise bu sistemin uygulandığı ile ilgili resimler görülmektedir.



Şekil 3.38 : Rasengleis tipi üstyapı (Popovic ve diğ, 2012).

3.1.4.2 FFC üstyapı sistemi

FFC (Feste Fahrbahn Crailsheim-Crailsheim Balastsız Üstyapı Sistemi) sisteminde, hem üretim hem de montaj aşaması büyük bir titizlikle yürütülür. Ray bağlantı elemanları için yerleştirilecek dübeller ya taze betonun içine daldırılır ya da beton katılaştıktan sonra delikler açılarak içine konur. Ray bağlantı elemanları travers boyunda bir profille konumlandırılır. Beton taşıyıcı tabaka beton serme makinesiyle betonlanır, ardından özel makineler yardımıyla ray bağlantı elemanları ayarlanır. Beton tabakanın genişliği 2,4 m ve uzunluğu ise en fazla 3,2 m olmaktadır. Tabakaya her 3 mesnette bir çentik atılarak çatlak kontrolü yapılmaktadır. Şekil 3.39’da bu üstyapı sistemi gösterilmiştir (UIC, 2002).

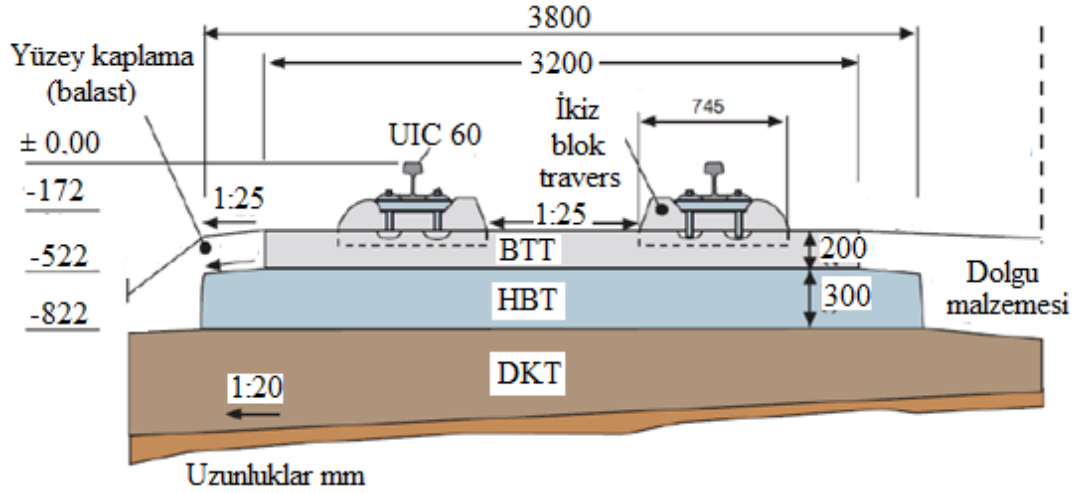


Şekil 3.39 : FFC üstyapı sistemi (UIC, 2002).

3.1.4.3 Hochtief/SHRECK-MIEVES/LONGO üstyapı sistemi

Hochtief sisteminde hidrolik bağlayıcı tabaka üzerine beton taşıma tabakası yerleştirilir. Mesnet levhası betona gömülü olacak şekilde monte edilir. Bu sistemde

beton henüz tazeysen 4 tane tirfon betona yerleştirilir, daha sonra tirfonlanmış levhanın konum ve yükseklik ayarlaması yapılır. Betonarme tabakada gözle görülemeyen fissür adı verilen çatlaklar oluşabilmektedir. Bunun dışında betonarme tabakanın yüzeyi yağmur sularının drenajı için eğimli yapılmaktadır. Sistemin boyutları ve tasarım özellikleri Şekil 3.40’da gösterilmiştir (Mörscher, 1999).



Şekil 3.40 : Hochtief/SHRECK-MIEVES/LONGO üstyapı sistemi (UIC, 2002).

3.1.4.4 PACT üstyapı sistemi

PACT (Paved Concrete Track-Beton Kaplamalı Hat) üstyapı sistemi İngiltere’de geliştirilmiş ve ilk defa 1969 yılında deneme amacıyla Radcliffe’te kullanılmıştır. Sistem iki parçadan oluşmaktadır. Üstteki parça donatılı beton (betonarme) tabaka iken alttaki parça donatısız beton tabakadır. Üstteki parçanın donatı yüzdesi beton kesit alanının % 0,7’si kadardır. Bu iki parça birbirine, Şekil 3.41’de görüldüğü üzere üstteki donatıların alt tabakaya uzatılması ile bağlanmaktadır. Betonarme tabakanın kalınlığı 23 cm olup, genişliği de 2,43 m’dir. Bu sistemde, sürekli uzun kaynaklı raylar kullanılmıştır. (Betonlama işleminin ardından rayların mesnetleceği yerlerde delikler açılarak sürekli uzun kaynaklı raylar yerlerine yerleştirilir). Rayların altında 10 mm kalınlığında kauçuk pedler kullanılmıştır. Ray bağlantı malzemesi olarak doğrudan bağlantılı Pandrol e-clips tercih edilmiştir (Bilow ve Paradise, 2008).

Sistem hızlı tren hatları için tasarlandıysa da hiçbir zaman kullanılmamıştır. Hattın yüksekliğinin düşük olması ve bakım gereksiniminin az olması gibi sebeplerden dolayı genellikle tünellerde kullanılmıştır. Günümüzde bu sistemin kullanıldığı hatlarda yapılan en fazla hız 150 km/sa’i geçmemektedir. Bu sistem birçok üstyapı sistemine önderlik etmesine rağmen İngiltere’de bu alandaki teknolojinin yetersiz

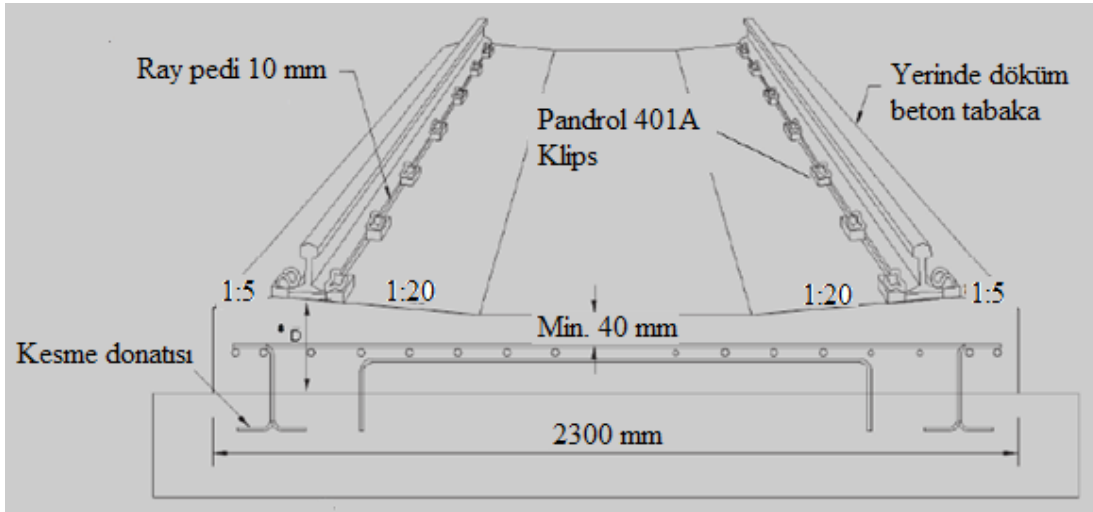
olması sebebiyle gelişimine devam edememiştir. Şu anda zaten yüksek hızlı demiryolu standartlarına sahip değildir. Bu sistemin en önemli uygulaması Kanada’da bulunan 78 km’lik Roger Geçit Tüneli’dir (Bilow ve Paradise, 2008).

Avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- İnşa maliyetlerinin düşük olması,
- Hat geometri kalitesinin yüksek olmasıdır.

Dezavantajları ise şöyledir:

- Ray ve bağlantı elemanları için özel yerleştirme ekipmanı gerektirmesi,
- Eski bir yöntem olan aşağıdan yukarı inşa metodu kullanılmasının geometri kalitesinin düzgün olmasını zorlaştırması,
- Hatta atıkların birikmesi sonucu drenaj engellendiği için ray bağlantı elemanlarının korozyona uğramasıdır.



Şekil 3.41 : PACT üstyapı sistemi ($D_{üst}=150-200$ mm, çevresel koşullara bağlı olarak $D_{alt}=300$ mm) (Michas, 2012).

3.2 Sürekli Mesnetlenmiş Ray Uygulamaları

Bir sürekli ray, beton tabaka içerisine ya gömülerek ya da kenetlenerek sürekli mesnetlenmiş olur.

3.2.1 Gömülü ray uygulamaları

Esveld’e göre gömülü ray uygulaması, rayların mantar ya da poliüretan bir malzeme içerisine sürekli ve elastik olarak mesnetlendirilmesi demektir. Bu sistemde, üst kısmı dışında rayın tamamı elastik malzeme ile kapatılacak şekilde mesnetlendirme işlemi yapılmaktadır. Bu sistem, hafif raylı sistemlerden yüksek hızlı hatlara kadar

geniş bir kategoride kullanılabilir. Bu konseptin karakteristik özelliği hat geometrisini korumak için başka herhangi bir malzemeye, tertibata gereksinim duymamasıdır. Rayların sabitlenmesi işlemi ile ilgili detaylar aşağıda belirtilmiştir:

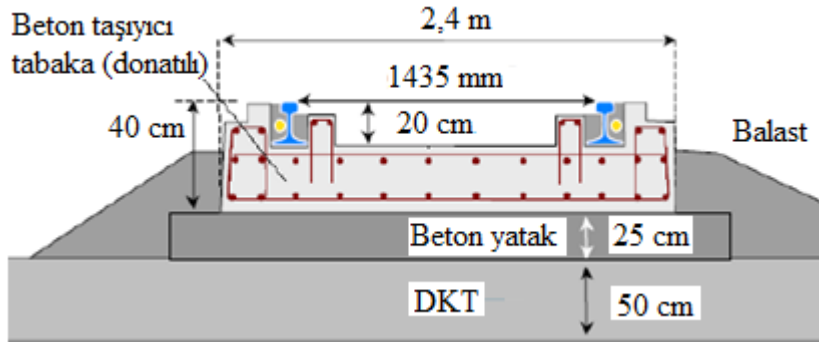
- Mantar ya da poliüretan malzemelerin oluşturduğu elastik şerit, ray altında sürekli bir mesnet tabaka sağlamaktadır.
- Ray, klavuzlanmış bir oyuk içinde elastik olarak sabitlenmiştir.
- Bu uygulamada yukarıdan aşağı (top-down) inşa yöntemi kullanılmıştır.
- Özel elastik bir ortam sağlamak için rayın oturduğu oluğun boyutlarının belirlenmesi ve elastik malzemelerin optimizasyonu titizlikle yapılmıştır.

Sistemin avantajları:

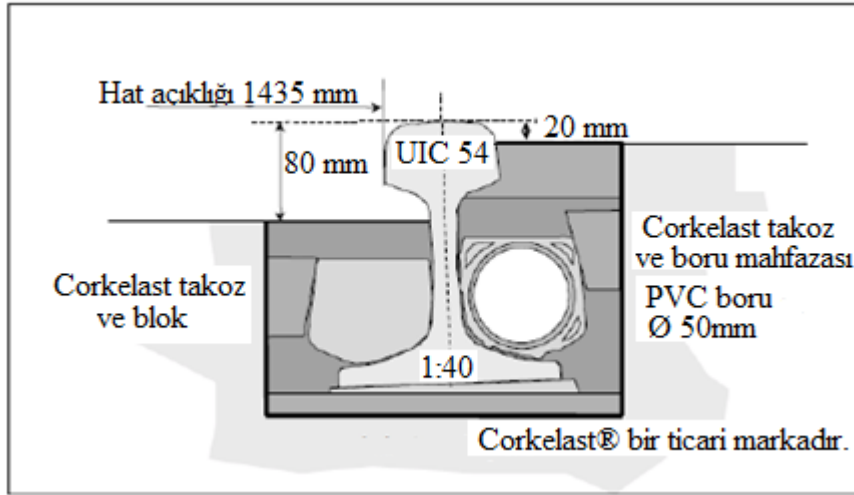
- Mesnetler arasında rayda ikincil bir eğilme olmadığından sistemde dinamik kuvvetler meydana gelmez.
- Gürültü emisyonu daha azdır.
- Rayın kullanım ömrü daha uzundur.
- Bakım maliyetleri azdır.
- Kot farkı olmaması gereken kesişim noktalarında hattın yüksekliği düşürülebilmektedir (Michas, 2012; Esveld 1999) .

3.2.1.1 INFUNDO-EDILON üstyapı sistemi

INFUNDO ve EDILON sistemleri aynı tasarım karakteristik ve prensiplerine sahiptir. INFUNDO sistemi EDILON tasarımının biraz daha gelişmiş bir versiyonudur (Quante, 2001). Bu sistem 1970 yılında Hollanda’da geliştirilmiştir (1976 yılında ise Deurne yakınlarında 160 km/sa hızın uygulandığı bir hatta testi yapılmıştır). Günümüzde bu sistemle ilgili gelişmeler hala devam etmektedir. Bu sistemde sürekli raylar, elastik malzemeler tarafından sürekli mesnetlendirilmiş bir oyuk içine yerleştirilirler. Beton taşıyıcı tabakanın serilme işlemi beton serme makineleri tarafından yapılır. Bu tabakanın kalınlığı 40 cm olup, genişliği de 2,4 m ‘dir. Bu tabakanın altında kalan tabakalar da benzer şekilde inşa edilir. Yatay ve düşey kuvvetler, mantar yatak pedi ve rayları saran 2 adet elastik kütle tarafından absorbe edilir. INFUNDO sistemi daha çok kent içi yolcu taşımacılığı (metro, tramvay) için tasarlanmıştır. Şekil 3.42’de bu tasarımın enkesiti, Şekil 3.43’te ise ray ve elastik bileşenlerin detayı görülmektedir.



Şekil 3.42 : INFUNDO gömülü ray üstyapı sistemi (Esveld, 1999).

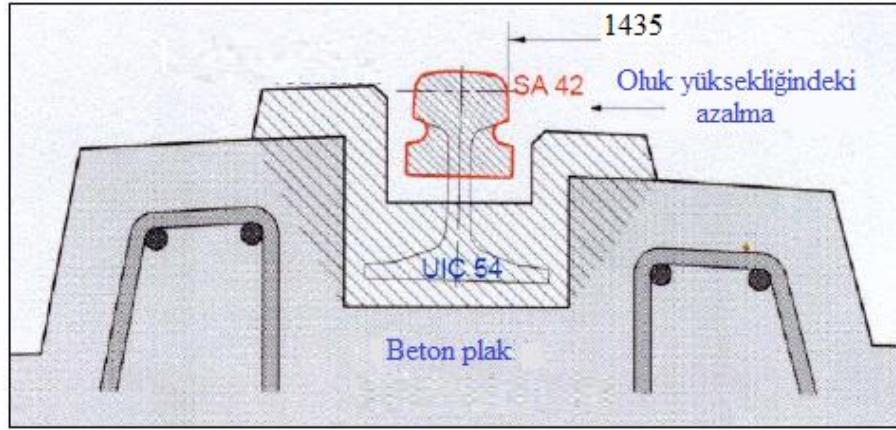


Şekil 3.43 : Gömülü ray üstyapı sisteminin detayı (Esveld, 1999).

Sistemin avantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Rayların aşınma ve yıpranması az olduğundan daha zayıf ray profillerinin kullanımına izin vermektedir.
- Düşük gürültü emisyonuna sahiptir.
- Malzeme kullanımı minimum düzeydedir.
- İmalatı hızlıdır.
- Yol kesişim noktaları için iyi bir çözüm olmaktadır.

Bu sistemin daha gelişmiş hali Şekil 3.44'te görülmektedir. Bu yeni sistemde, UIC 54 rayı yerine 225 kN aks yükü taşıyabilen SA42 rayı tercih edilmiş, bu sayede gürültü seviyesi 5 db daha azaltılmıştır. Sistemin başka bir avantajı ise kullanılan yeni rayların kesiti daha küçük olduğundan elastik malzeme gereksinimi daha azdır.

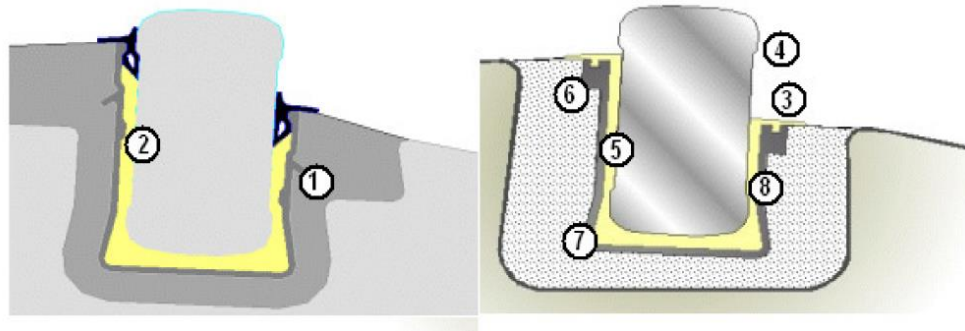


Şekil 3.44 : Gürültü seviyesi düşük tasarım (Esveld, 1999).

3.2.1.2 BBERS üstyapı sistemi

INFUNDO sisteminden farkı daha küçük ve dikdörtgene yakın bir ray modeli (BB14072) kullanılmasıdır. Bunun sonucu olarak da daha küçük ray oluşu ve farklı elastik malzemeler kullanılmıştır. Bu sistemde mikro gözenekli poliüretan U biçimli bir ray pedi ve yine U biçiminde elastik bir malzeme kullanılmıştır. Bu elastik malzemenin ve rayın boyutları 139,7 x 69,85 mm'dir. Rayın metrik ağırlığı ise 74 kg'dır (Michas G., 2012).

BBERS (Balfour Beatty Embedded Rail System-Balfour Beatty Gömülü Raylı Sistemi) sisteminin MkI (1.versiyon) ve MkII (2.versiyon) adında iki çeşidi vardır. MkI versiyonu 2000 yılından önce geliştirilmiş ve İspanya'da Medina El Campo'da başarıyla uygulanmıştır. INFUNDO sistemine benzer özelliklere sahiptir. Bu sistem üretim, montaj ve bakım gibi unsurlar göz önüne alınarak geliştirilmiş ve MkII BBERS sistemi ortaya çıkmıştır. Şekil 3.45'te bu iki sistem görülmektedir (Innotrack, 2008).

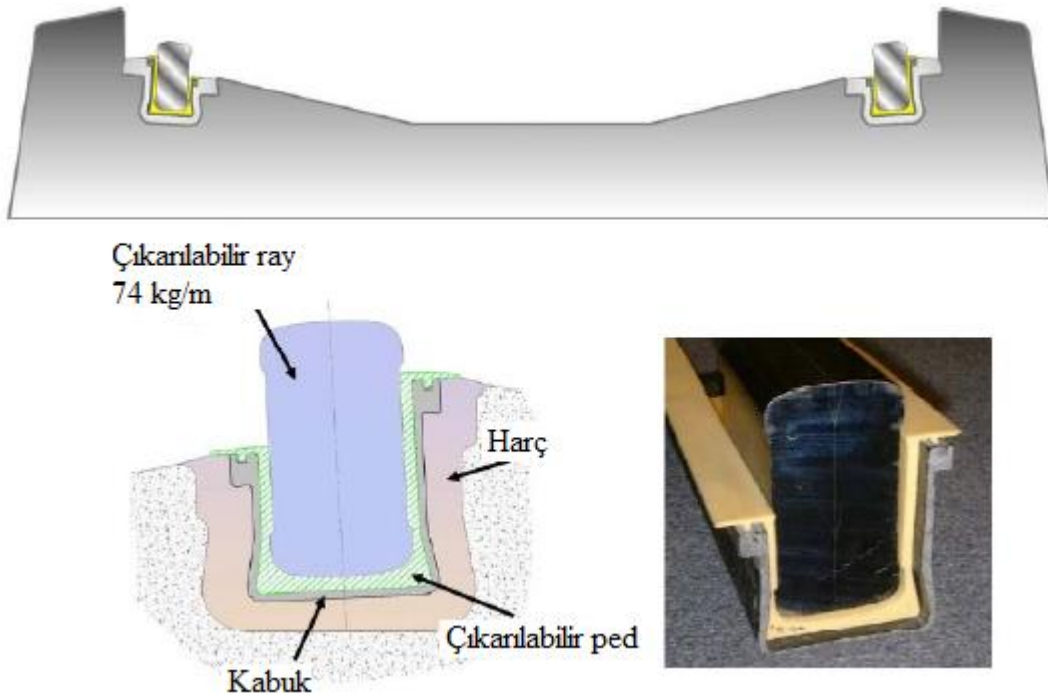


Şekil 3.45 : BBERS sistemi MkI (solda) ve MkII(sağda) versiyonları (Innotrack, 2008).

Bu iki sistem arasındaki farkları şöyle sıralamak mümkündür:

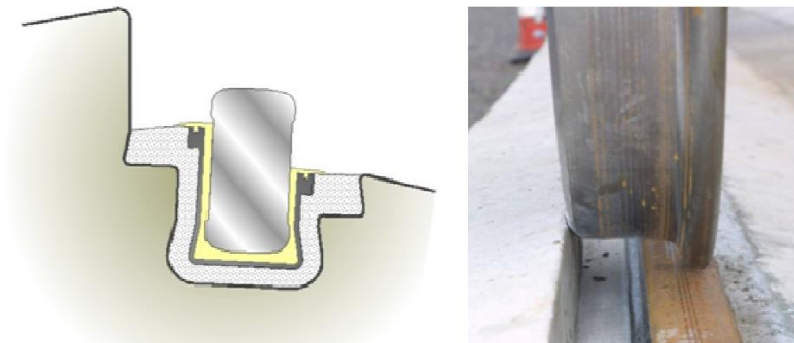
- Şekilde de görüldüğü üzere rayın oturduğu oluğun yüksekliği azaltılmıştır.
- MkI'de kullanılan pedler yumuşak ve düz iken MkII'de pürüzlü ray pedi tercih edilmiştir.
- Bunun yanı sıra ped kalınlıkları 6 mm'den 7 mm'ye çıkarılmıştır (Innotrack, 2008).

Şekil 3.46'da BBERS MkII detayı gösterilmiştir.



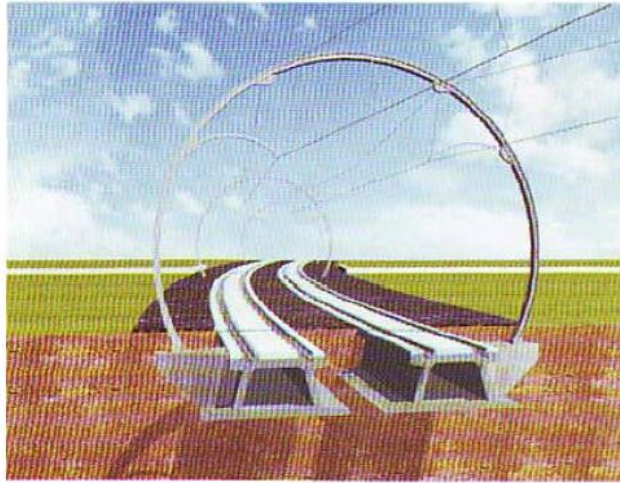
Şekil 3.46 : BBERS MkII sistemi detayı (Michas, 2012).

Bu sistemde olası bir derayman tehlikesini önlemek için Şekil 3.47'de de görüleceği üzere beton tabakanın, hattın iç kesiminde kalan kısmı daha yüksek imal edilmiştir.



3.2.1.3 DECK-TRACK üstyapı sistemi

Deck-Track sistemi eğilmeye karşı çok dayanıklı bir sistem olup yumuşak zeminlerde kullanılmak için ideal bir üstyapı sistemidir. Hollanda’da geliştirilmiştir. Bu sistem için Rotterdam’da 200 m uzunluğunda test hattı inşa edilmiştir. Bu üstyapı tipinde kullanılan beton taşıyıcı tabaka prefabrik ya da yerinde döküm olabilmektedir. Raylar (düşük gürültü düzeyli SA42 rayı) beton tabakaya gömülerek ya da beton yüzeye direkt olarak sabitlenerek monte edilir. Deck-Track sistemi içi boş beton bir tüptür ve o bölgeden boşaltılan zeminle aynı ağırlığa sahiptir (Şekil 3.48). Sistemin yüksek eğilme ve burulma rijitliği, titreşimleri önlemektedir. Bunun yanı sıra zeminde farklı oturmaların da önüne geçebilen bu tasarım, yumuşak zeminlerde bile stabil bir üstyapı oluşturabilmektedir. Deck-Track sistemi zemindeki zayıf noktalardan kaynaklı problemleri aşmak için bir köprü gibi davranmaktadır.



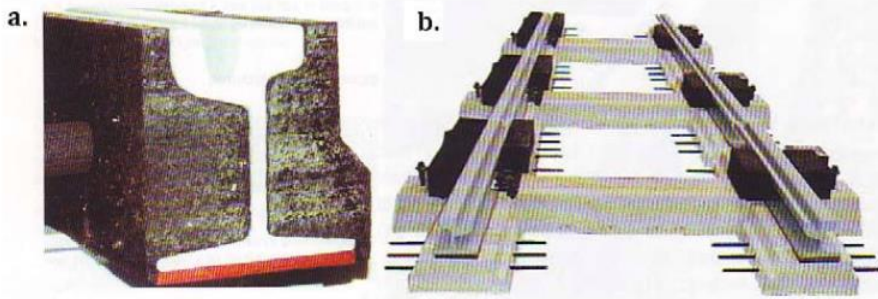
Şekil 3.48 : Deck-Track tasarımı (Michas, 2012).

3.2.2 Kenetlenerek sürekli mesnetlenmiş ray uygulamaları

3.2.2.1 COCON-TRACK üstyapı sistemi

Bu sistem özellikle tramvaylar için tasarlanmıştır. Sistem hem yanal hem de boyuna doğrultuda traverslerden ve geleneksel ray bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Ray bağlantı elemanları boyuna ve enine doğrultudaki traverslerin kesiştiği noktada bulunmaktadır ve aralarındaki mesafe de 1200 mm’dir. Bu sistem yarıçapı 20m’den daha büyük olan kurplar için tasarlanmıştır. Raylar iki tabakalı bir şeritin üstüne oturmaktadır. İlk tabaka yumuşak bir tabaka olup ray bağlantısı yapıldığında bu tabaka sıkışır ve kalınlığının % 40’ını kaybeder (ray uyumu). İkinci tabaka ise daha sert bir tabaka olup gelen yükleri karşılamaktadır. Kauçuk/mantar elastik malzeme,

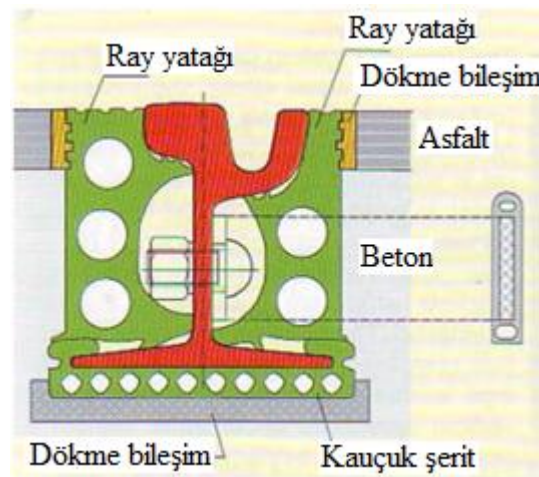
rayı sararak ray bağlantı yayları ile rayın birbirine doğrudan temas kurmasını engeller (Şekil 3.49). Rayların alt kısmı da kauçuk bir malzeme ile kapatılarak alt tabaka ile temas etmesi engellenir (Michas, 2012).



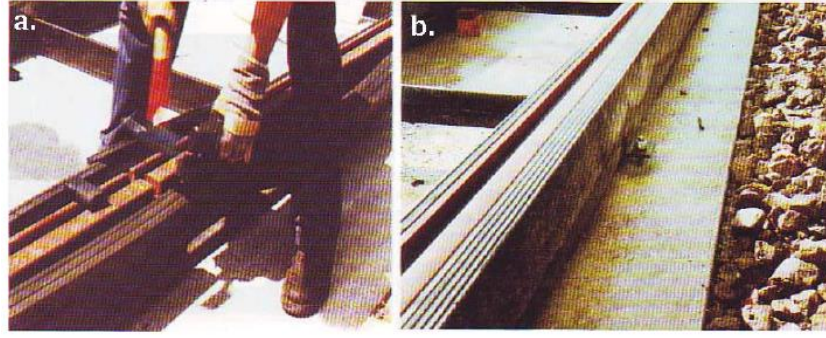
Şekil 3.49 : a) Oluklu ray detayı, b) Cocon Track tasarımı (Michas, 2012)

3.2.2.2 Oluklu ray sistemi

Bu sistem, çoğunlukla tramvay hatlarında kullanılmak üzere Phonex tarafından geliştirilen sürekli mesnetli bir üstyapı sistemidir. Ray bağlantı elemanı olsun ya da olmasın elastik olarak mesnetlenmiştir. Rayın altında bulunan elastik mesnet, hava boşluklu kauçuk bir malzemedir (Şekil 3.50). Raylar özel bir kauçuk haznenin içine alınarak gürültü emisyonu azaltılmıştır (Şekil 3.51). Bu yapı aynı zamanda asfalt yol ile ray arasında geçiş elemanı olarak da çalışmaktadır. Betonarme tabaka ise hat geometrisini koruma adına hem raya hem de rayları birbirine bağlayan çelik çubuklara destek sağlamaktadır (Michas G., 2012).



Şekil 3.50 : Oluklu ray uygulaması (Michas, 2012).



Şekil 3.51 : a) Kauçuk elemanların yerleştirilmesi b) Montajı tamamlanmış hali (Michas, 2012).

3.2.2.3 VANGUARD & KES üstyapı sistemi

Bu sistem, Pandrol ve Phonex'ten daha yeni bir sistemdir. Geleneksel beton taşıyıcı tabaka kullanılmaktadır. Şekil 3.52'de de görüldüğü gibi Vanguard tasarımında, beton tabakaya bağlanan dirsek mesnetler, elastik malzemeleri raya tutturmaktadır. Bu bağlantı tipi geleneksel olanlara göre daha büyük düşey deplasmana izin vermektedir. Bu özellik, ray/tekerlek etkileşiminden kaynaklı düşey kuvvetleri azaltarak ray çevresine daha az dinamik etki yansıtmaktadır. Vanguard sistemi daha çok, titreşimin ciddi bir problem olduğu kent içi yerleşim yerlerindeki tünellerde kullanılmaktadır (Michas, 2012).



Şekil 3.52 : Vanguard tasarımı (UIC, 2011).

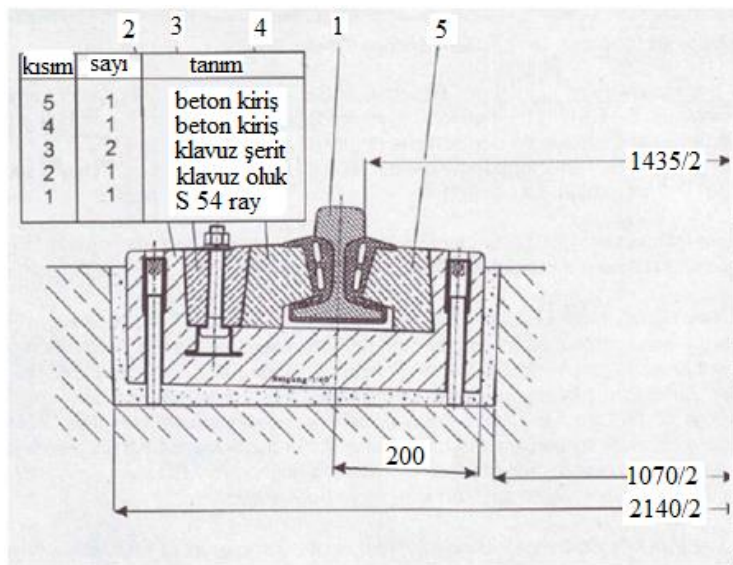
KES sistemleri ise 1990'lı yıllarda hafif raylı sistemler için Almanya'da tasarlanmış bir üstyapı sistemidir. VANGUARD sisteminin aksine bu sistemde rayların tüm yüzeyi elastik malzeme ile sürekli olarak desteklenmiştir. Oluklu ray sistemi ile benzer inşa yöntemine sahiptir. Ancak burada beton ya da çelik profiller, elastik tabakaya sürekli olarak basınç yapması için kullanılmaktadır (Şekil 3.53). Bu sistem, Vanguard sistemi ile karşılaştırıldığında daha fazla malzeme ve montaj ekipmanı gerektirmektedir.



Şekil 3.53 : Test aşamasındaki KES sistemi (Michas, 2012).

3.2.2.4 SFF üstyapı sistemi

SFF (Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn-Titreşim Sönümleyicili Üstyapı) sisteminde beton tabakaya gömülü vaziyette, boyuna doğrultuda oluklu traversler kullanılmaktadır. Sürekli mesnet, rayların etrafı kauçuk malzemeyle sarılarak oluşturulmaktadır (Şekil 3.54). Raylar oluk içerisine yerleştirilmiş ve beton tabakaya vidalı bağlantılarla kenetlenmiştir. Elastik malzemelerle sarılmıştır ve titreşimi sönümleyebilmek için düşey doğrultuda hareket edecek serbestlikte tutulmaktadır. Ray altında ise kauçuk malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme rayı saran elastik malzemelerden biraz daha sıkı bir şekilde ray altına serilmiştir. Sisteme su girdiğinde rayın altından geçen kanallara su iletilip, burada bulunan yanıl deliklerden tahliye edilmektedir. Bu sistemin kullanımı tüneller ve kent içi raylı sistem hatları ile sınırlıdır (Michas, 2012).



Şekil 3.54 : SFF üstyapı sistemi (Michas, 2012).

3.2.2.5 SAARGUMMI üstyapı sistemi

Bu tasarımda boyuna traversler kullanılmakta ve betonarme tabakaya açılmış bir oluk içine serilerek veya içine gömülerek yerleştirilmektedir. Raylar elastik malzemeye sarılmış ve çevresine civatalarla ayarlanabilir bir kenetleme aparatı yerleştirilmiştir. Rayın eğimi, sistemin yüksekliği ve konumu, hattın genişliği bu sistemle boyuna traversin içinde ayarlanabilmektedir (Michas, 2012).

4. DEMİRYOLU ÜSTYAPISINDA ASFALT TAŞIYICI TABAKANIN KULLANIMI

Karayolunda olduğu gibi demiryolunda da trafik yükü ve hacmi gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışta şüphesiz yüksek hızlı tren teknolojisinin de büyük payı vardır. Trafikteki bu artış, üstyapı tasarımında yeni yöntemler uygulamayı ihtiyaç haline getirmiştir. Bütün bunlara ek olarak, çevresel etkileri de düşünerek sürdürülebilir nitelikte projeler yapılması önemli hususlardan bir diğeridir.

Asfalt karışimli taşıyıcı tabaka, hem balastlı hem de balastsız üstyapı uygulamalarında iyi bir alternatif olabilmektedir. Asfalt taşıyıcı tabakalı uygulamalardan edinilen tecrübelerle göre, bu alternatif sistemin hem üstyapı elemanı olarak (taşıyıcı tabaka), hem de balast altı tabakası olarak modern demiryolu üstyapısının ihtiyaçlarını yeterli ölçüde karşıladığı belirlenmiştir.

Bunlara ek olarak, asfalt taşıyıcı tabakalı demiryolunun dünya genelindeki uygulamaları da bu sistemin ne kadar iyi bir alternatif olduğunu kanıtlar niteliktedir. Asfalt malzemesi, kendine özgü özellikleri sayesinde farklı ihtiyaç ve koşullara cevap verebilmektedir (EAPA, 2014).

4.1 Asfalt Malzemesi

Sıcak karışım asfalt, mineral agrega ve bitümün bir karışımıdır. Kullanılan mineral agreganın maksimum tane çapı 40 mm, minimum tane çapı ise çok küçük toz parçacıkları boyutunda olabilmektedir (EAPA, 2014).

Modern asfalt ham petrolün bir bileşenidir. Ham petrolün büyük bir kısmı asfalt içereceği gibi tamamı da asfalttan oluşabilmektedir. Öte yandan içinde asfalt bulunmayan ham petroller de mevcuttur. Asfalt ham petrolün ağır bir bileşenidir. Dolayısıyla damıtıldığında kaynamaz ve buharlaşmaz. Kalıntı veya geriye kalan bir bileşen olarak elde edilir. Mühendislik ve mimaride çok çeşitli kullanım alanına sahiptir (Mazlum, 2014).

Bitüm, karbon disülfür (CS₂) içinde çözülebilen bir malzeme olup aynı zamanda asfaltın da bir bileşenidir. Taş kömürünün damıtılmasından elde edilen katran da bitüm içermektedir. Ancak petrol asfaltı ile karıştırılmamalıdır. Petrol asfaltının hemen hemen tamamı bitümden oluşurken, kömür katranındaki bitüm oranı daha azdır.

Petrol asfaltı, çatı yalıtımı ve endüstriyel uygulama gibi farklı alanlarda da kullanılması sebebiyle yol kaplamasında kullanılan asfalt, *kaplama asfaltı* veya *asfalt çimentosu* ismiyle anılmaktadır.

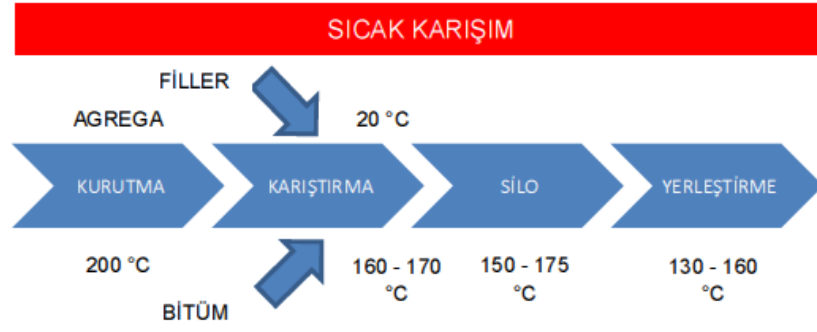
Asfalt malzemesinin özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Güçlü bir bağlayıcı, yapışkan, su geçirmez ve dayanıklı malzemedir.
- Bazı karışımları su geçirme özelliğine sahiptir. Bu tip asfaltlara *poroz (geçirimli) asfalt* adı verilir.
- Karışımın kompozisyonu farklı bileşen ve boyutta olduğundan çok özel koşullara kolaylıkla uyum sağlayabilmektedir.
- Bitüm ve agrega bileşiminin kalitesi ve karışım oranlarına bağlı olarak asfalt malzemesi, hem dayanıklı hem de oldukça esnek olabilmektedir.
- Özel katkı malzemeleri veya modifiye edilmiş polimer bitümler kullanılarak asfalt malzemesi, sınır şartlarda (ağır yük, çok düşük sıcaklık vb.) kullanılabilir.
- Birçok asit, alkali ve tuzların etkimelerine karşı yüksek derecede dirençli özelliktedir.
- Normal atmosferik sıcaklıklarda katı ya da yarı-katı olmasına rağmen, ısı etkisi ile, petrol çözücülerinin içinde çözülmesi yoluyla ya da emülsiyon haline getirilmesi yoluyla sıvılaştırılabilir.

Asfalt karışımının üretimi tesislerde yapılabileceği gibi mobil mikserler kullanılarak da yapılabilir. Asfalt üretim süreci devamlı da olabilir gruplar halinde de olabilir. Üretim aşaması kısaca şöyle özetlenebilir (EAPA, 2014):

- Mineral agregalar kurutulur ve ısıtılır.
- Ardından sıcak bitümle karıştırılarak istenilen kompozisyon elde edilir.
- Üretim 130-190°C sıcaklıkta gerçekleştirilir.

Şekil 4.1’de bu süreç şematize edilmiştir.



Şekil 4.1 : Sıcak karışım asfaltın üretim şeması (Tahta, 2013).

4.2 Asfalt Malzemesinin Demiryolu İnşaatlarında Uygulanışı

Bitüm ve asfalt malzemesinin kendine has özellikleri, bu tipte bir taşıyıcı tabakanın demiryolu inşaatlarında kullanılmasına imkan vermektedir. Hem ağır yük trafiğinde hem de yüksek hızlı hatlarda bu sistem, çeşitli uygulamalarla kullanılabilir. Bu tabakanın demiryolu hattına sağladığı başlıca faydaları şu şekilde sıralayabiliriz (EAPA, 2014):

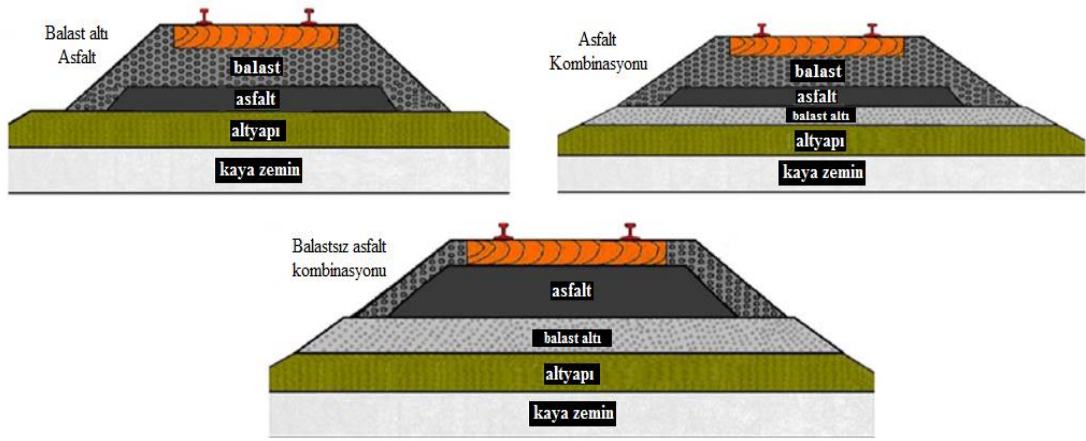
- Geri dönüştürebilir özelliğe sahiptir. Sadece karışımdaki agregalar değil aynı zamanda asfalt betonu da geri dönüştürülerek yeni karışımda kullanılabilir.
- Yapının taşıma kapasitesine katkı sağlar.
- Yapının hem stabilitesini hem de dayanıklılığını artırır. Bu durumun en önemli sebepleri; asfalt karışımında boşluk oranının %1-3 oranında olması ve asfalt tabakanın gömülmesidir. Bu sayede bu tabaka, hava şartlarından, oksidasyondan minimum düzeyde etkilenir. Bütün bunlar hattın bakım ihtiyacının azalmasını sağlar.
- Gürültü ve titreşimi azaltır.
- Üstyapının toplam yüksekliğini azaltır. Bu durum özellikle tünel ve köprülerde son derece önemlidir.
- Asfalt, visko-elastik özelliği sebebiyle ek yeri olmadan serilebilmektedir. Ayrıca üzerine gelen yükten ve sıcaklık değişiminden dolayı oluşan gerilmeleri azaltmaktadır.
- Büyük deyerler, herhangi bir ayrışma sorunu olmayacağı için asfalt tabakada rahatlıkla uygulanabilir.
- Malzeme özelliği sayesinde 2 mm gibi bir hassasiyette serilebilmektedir.

- Zeminde oturma vb. bir sebepten dolayı hat geometrisinde düzeltme gerektiğinde bu işlem kolay ve hızlıca yapılabilir.
- Asfalt tabakanın yerine yerleştirilmesinden kısa bir süre sonra tabakaya yükleme yapılabilir. Bu durum da inşa süresini kısaltmaktadır.

Asfalt tabakanın avantajlarının yanı sıra yine malzeme özelliğinden kaynaklı dezavantajları da mevcuttur:

- Malzemenin serilmesi, sıkıştırılması gibi işlemler çok hassas bir şekilde yapılmalıdır.
- Eğer asfalt tabaka zayıf bir altyapı üzerine seriliyorsa daha çok malzemeye ihtiyaç duyulabilir.
- Asfalt tabakanın kenarları kolaylıkla çatlayıp kırılabilmektedir. Serim işlemi düzgünce yapılmalı ve asfalt karışımının da yine istenilen oranlarda olmasına dikkat edilmelidir.
- Bakım ihtiyacı fazladır. Bu da uzun vadede bakım maliyetlerini artırır.
- Aşırı sıcak havalarda yumuşayıp hattın stabilitesini bozabilmektedir.
- Asfalt yüksek sıcaklıklarda üretilmektedir. Bu sıcaklıklarda asfalt akışkan bir malzeme olup inşa alanına dökülür dökülmez üzeri agrega ve kumla kaplanmalıdır. Buna dikkat edilmezse asfalt düzgünce yapışmayabilmektedir. Buda yine hattın stabilitesini olumsuz etkilemektedir.
- Petrol ürünü olmaları sebebiyle üretimi esnasında çevreyi kirleten hidrokarbon açığa çıkmaktadır.
- Hangi tip asfalt kullanılırsa kullanılsın yerleşimi için ağır iş makinelerine ihtiyaç vardır. Özellikle büyük ölçekli projelerde bu makinelerin maliyeti azımsanmayacak düzeydedir.

Asfalt tabaka, balast altı tabakası olarak kullanıldığı gibi balastsız üstyapı sistemlerinde doğrudan taşıyıcı tabaka olarak da kullanılabilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 : Asfaltın balast altı tabaka olarak (üstte) ve direk taşıyıcı tabaka olarak (altta) uygulanması (ROSE, 2013).

4.2.1 Asfaltın balast altı tabaka olarak kullanımı

Klasik demiryolunda kullanılan balastlar, tren yükünü absorbe eder ve raydan altyapıya kadar düzgün bir şekilde dağıtır. Bu durum hatta oluşacak deformasyonları engeller. Dolayısıyla da hattın geometrik düzgünlüğü korunmuş olur. Ancak balasttaki yorulma davranışı sebebiyle geometrik kalite hızlı bir şekilde düşer, bunu önlemek için hattın bakımı düzenli bir şekilde yapılmalıdır. Hattın bakım çalışmalarını azaltmak için üstyapı elemanların rijitlik düzeyinin yüksek olması gerekmektedir. Daha rijit bir üstyapı demek, üstyapıya gelen yükleri daha iyi karşılamak demektir. Bu da malzemenin yorulma sürecini uzatacaktır (EAPA, 2014).

Asfaltın balast altı tabaka olarak kullanılmasının getirdiği faydaları şöyle sıralayabiliriz:

- *Taşıma kapasitesi:* Asfaltın 10-20 cm yüksekliğinde tek döküm balast altı tabaka olarak kullanılması hattın rijitliğini arttırmaktadır. Aynı zamanda hatta oluşacak çekme gerilmelerine de karşı koyma anlamında destek sağlamaktadır.
- *Düşey deformasyona karşı direnç:* Taneli (granüler) malzemelerle karşılaştırıldığında asfalt tabaka, tren yükleri karşısında daha düşük düşey deplasmana izin vermektedir. Asfalt tabakada düşey yüklenme koşulları ve süresi göreceli olarak daha kısadır. Bu durum da üstyapıda kalıcı bir deformasyon oluşmasını engellemektedir.
- *Drenaj:* Yoğun bir asfalt betonu kullanılması tabakayı geçirimsiz hale getirir. Bu durumda çamur ve ince taneli malzemelerin alt tabakalara geçip yapıya

zarar vermesi ve kirlenmesi engellenmiş olur. Bunun yanı sıra asfalt tabaka geçirimli (poroz asfalt) olarak da kullanılabilir. Bu tercih, yapılan projenin gereksinimlerine göre değişmektedir.

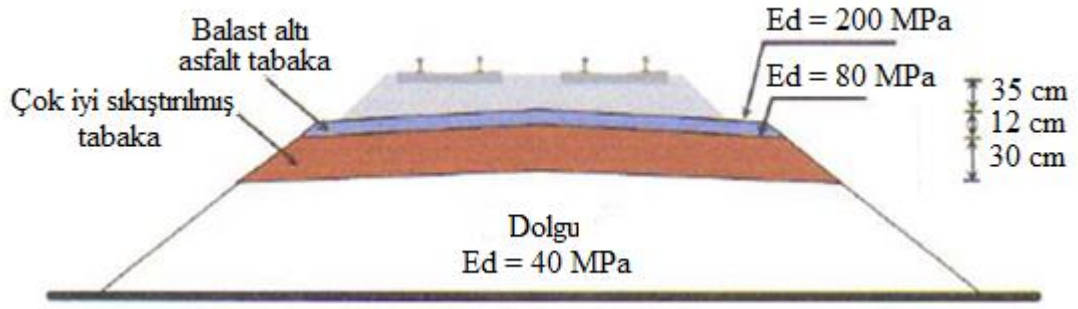
- *Dayanıklılık*: Asfalt tabakadaki boşluk oranının az olması (%1-3) ve bu tabakanın balastın altına gömülmesi gibi sebeplerden dolayı asfalt tabaka dış etkilerden (sıcaklık değişimi, oksijen, ultra viole radyasyon vb.) kolayca etkilenmez.
- *Gürültü ve titreşim*: Asfalt tabakanın mekanik özellikleri tren geçişi esnasında oluşan titreşim ve gürültüyü azaltır. Bunun yanı sıra modifiye asfalt (polimer modifiye bitüm, ufalanmış kauçuk) kullanılarak gürültü daha da azaltılabilmektedir.

4.2.2 Balast altı asfalt tabakanın dünya genelindeki uygulamaları

4.2.2.1 İtalya'daki uygulamaları

Asfalt malzemesi, İtalya'da 1970'li yıllarda Roma-Floransa hızlı tren hattında (Diretissima) balast altı tabaka olarak kullanılmıştır. İtalya Demiryolları (Ferrovie dello stato) bu hat için minimum elastisite modülünü 180 MPa olarak belirlemiş, altyapısı için çimento enjeksiyonlu balast tabaka yerine bitüm karışımlı bir malzeme kullanmaya karar vermiştir. Asfalt karışım seçilmesinin en önemli sebebi olarak uzun mesafeli nakliye maliyeti gösterilmiştir. Balast malzemesinin temini ve taşıma maliyetinin bitümlü karışımdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Rose, 2013).

Bu hat için kullanılan üstyapının enkesiti Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sistemin bileşenleri: Dolgu tabakası, çok iyi sıkıştırılmış alt tabaka (supercompattato), balast altı asfalt tabakası, balast, traversler ve raydır. En alttaki tabaka susuz dolgu tabakası olup kalınlığı 50 cm'dir ve minimum elastisite modülü ise 40 MPa'dır. Dolgunun üzerindeki çok iyi sıkıştırılmış tabakanın kalınlığı 30 cm, elastisite modülü ise 80 MPa'dır. Bu tabaka aynı zamanda geçirimsiz bir tabaka olup, su ve hava geçişini engeller. Bu tabakanın üzerinde yer alan asfalt tabakanın kalınlığı 12 cm olup, uygulama genişliği ise 14 m'dir. Bu tabaka için istenen minimum elastisite modülü 200 MPa'dır. Üstteki balast yüksekliği ise 35 cm'dir (Rose, 2013).



Şekil 4.3 : İtalya Yüksek Hızlı Demiryolları Üstyapı enkesit profili (Rose, 2013).

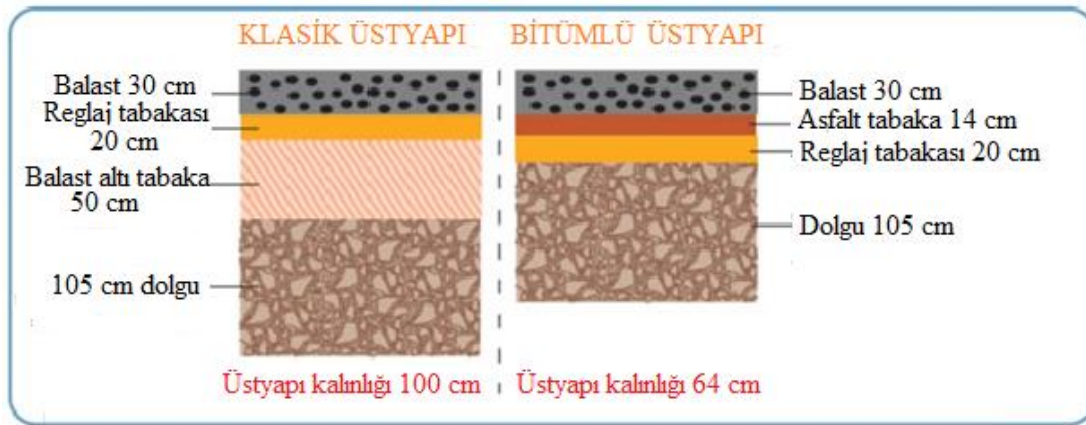
4.2.2.2 Japonya'daki uygulamaları

Asfalt tabaka, hattaki düzensizlikleri ve alt tabakalara gelen yükleri azaltmak için Japonya'da sıklıkla kullanılan bir sistemdir. Hem konvansiyonel hem de hızlı tren hatlarında yıllardır kullanılmaktadır. Japonya'da standart üstyapı tasarımları, performanslarına göre 3 farklı kategoride ele alınmaktadır (Momoya, 2007):

- Performans derecesi 1: Beton ya da asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı. En kaliteli üstyapı türüdür. Bu sistem hattın oturması, yorulma hasarı, betonarme tabakanın kırılması, çatlama, büzülme gibi faktörler dikkate alınarak test edilmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sistemin tasarım detayları:
 - Taşıyıcı tabakanın genişliği: 2220 mm
 - Beton taşıyıcı tabakanın kalınlığı: 190 mm
 - Asfalt taşıyıcı tabakanın kalınlığı: 150 mm
- Performans derecesi 2: Asfalt taşıyıcı tabakalı balastlı üstyapı. Bu sistemin kalite düzeyi balastsız üstyapıdan daha kötüdür. Burada 50 mm kalınlığında asfalt tabaka kullanılmaktadır. Japonya'da 30 yıldan fazla süredir bu sistem kullanılmaktadır. Sistemin tasarım detayları:
 - Travers altındaki balastın kalınlığı: 250-300 mm
 - Asfalt tabakanın kalınlığı: 50 mm
 - Kırma taş tabakasının kalınlığı: 150-600 mm.
- Performans derecesi 3: Kırma taş tabakalı balastlı üstyapı klasik bir üstyapı tasarım şeklidir. Performans derecesi diğer üstyapı sistemlerinden daha düşüktür.

4.2.2.3 Fransa'daki uygulamaları

Fransa Demiryolları, asfalt taşıyıcı tabakayı test etmek için 3 km uzunluğunda bir hat yapmıştır. Bu hatta klasik balastlı hat ile balast altı asfalt taşıyıcı tabaka karşılaştırılmıştır. Fransa'da geleneksel hatlarda 30 cm balast ve 20 cm balast altı tabaka olmak üzere 50 cm'lik bir altyapı kullanılmaktadır. Buna karşın asfalt kullanılan tabakada sadece 14 cm asfalt tabaka yeterli olmaktadır. Şekil 4.4, bu karşılaştırmayı net bir şekilde göstermektedir. Bu 36 cm'lik azalma km başına 5000 m³ malzeme kullanımını önlemiştir (Rose, 2013).



Şekil 4.4 : Fransa'daki klasik ve asfalt tabakalı üstyapının karşılaştırılması (Rose, 2013).

Şekil 4.4'te de görüldüğü üzere hem klasik hem de asfalt karışımli uygulamada 20 cm kalınlığında reglaj (ayarlama) tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın yüzeyi ince taneli agrega ve 1,5 kg/m² oranında bitümle örtülür. Bu tabakanın genişliği 14,5 m'dir. Asfalt tabakalı uygulamada reglaj tabakasının üstünde 14 cm kalınlığında ve 2 adet 5,35 m genişliğinde asfalt tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka % 96 oranında sıkıştırılmıştır. Bu tabakanın bitüm oranı ise 0,8 kg/m²'dir.

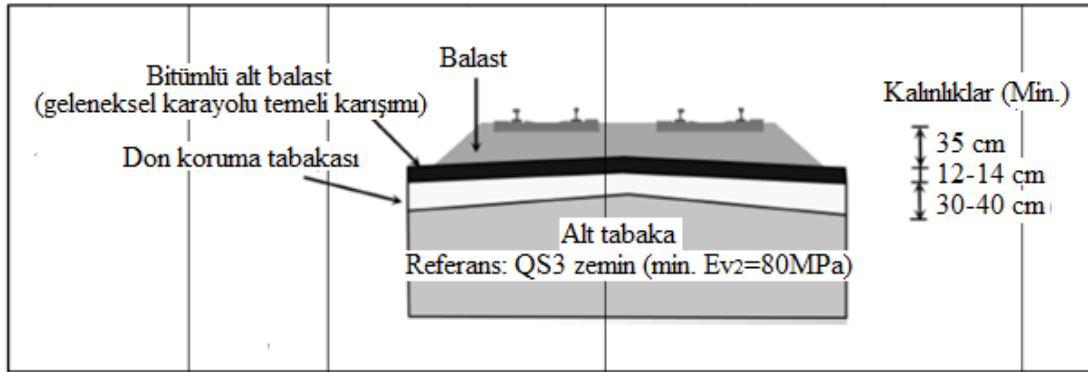
4.2.2.4 İspanya'daki uygulamaları

İspanya'da Madrid-Vallodolid Hızlı Tren Hattı'nda ve Barselona-Fransa sınırı karışık işletilen hızlı tren hattında ve yaklaşık 70 km'lik yük treni işletilen bir hatta asfalt, balast altı tabaka olarak kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : Madrid-Vallodolid Hızlı Tren Hattı (solda) ve Barselona-Fransa sınırı karışık işletilen hızlı tren hattı (sağda) (Rose, 2013).

Tasarım detayları: Bu sistemde kullanılan balast altı asfalt tabakanın kalınlığı 12-14 cm aralığındadır. Onun altında bulunan altyapının kalınlığı ise 30 cm olup elastisite modülü 80 MPa'dır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : İspanya yüksek hızlı demiryollarında balast altı asfalt tabaka uygulamasının enkesiti (Rose, 2013).

4.2.3 Asfaltın balastsız üstyapıda taşıyıcı tabaka olarak kullanımı

Bu inşa yönteminde Şekil 4.7'de de görüleceği üzere balastın yerini daha rijit, monolitik bir yapı olan asfalt tabaka almıştır. Bu yöntemde amaç daha elastik ve temel tabakasının rijitliğinden bağımsız bir tabaka oluşturmaktır.

Bu sistemde asfalt taşıyıcı tabaka üzerine ray ve traversler doğrudan oturmaktadır. En çok dikkat edilmesi gereken husus, asfaltın en üst kotunun mümkün olduğunca düzgün olmasıdır (hata payı ± 2 mm). Bu seviyede bir hassasiyette çalışabilmek için Şekil 4.3'te de görüldüğü üzere çok özel ekipmanlara sahip modern asfalt serme makineleri kullanılmaktadır (EAPA, 2014).



Şekil 4.7 : Asfalt serme makinesi (www.this-magazin.de).

Bu sistemin en önemli avantajlarından biri esnek olmasıdır. Özellikle polimer modifiye asfalt kullanıldığında inşası ve bakımı oldukça kolay olmaktadır. Diğer önemli avantajı ise hattı bozmadan veya yeniden inşa etmeden küçük düzeltmeler yapılarak inşaata devam edilebilmektedir.

Asfalt taşıyıcı tabaka, ilk defa 1990'lı yıllarda Almanya'da başarıyla uygulanmıştır.

4.2.3.1 Almanya'da asfalt taşıyıcı tabakanın uygulanışı

Klasik demiryolunda (ray, travers, balast) özellikle yüksek hızlı hatlarda aşınma, çatlama, kırılma gibi problemlerin sık yaşanması sebebiyle özellikle Almanya'da hem beton hem de asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıya eğilim son derece fazladır.

Bu sebeptendir ki balastsız üstyapıda asfalt taşıyıcı tabaka, ilk olarak bundan yaklaşık 25 yıl önce Almanya'da SBV balastsız üstyapı sisteminde kullanılmıştır. Bu sistem, teknolojinin de yardımıyla günümüzde daha modern sistemlere önayak olmuştur. Almanya'da kullanılan asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemleri aşağıda verilmiştir:

- SBV (Sleepers with bituminous sealing): Bitüm yalıtımlı traversler
- ATD (Asphalt base course with a rail web): Asfalt taşıyıcı tabakalı demiryolu ağı
- SATO (Concrete sleeper or Y-steel sleeper with double base): Beton ya da çift bazlı Y çelik travers
- FFYS (Solid railway trackbed with Y-steel sleeper): Y çelik traversli rijt demiryolu hat yatağı

- Walter System Walterbau
- GETRAC (German Track Corporation Asphalt): Alman asfalt tabakalı demiryolu şirketi.

4.2.3.2 Asfalt taşıyıcı tabakanın özellikleri

Genellikle asfalt tabakanın özelliği, üzerine gelecek yük durumuna göre belirlenmektedir. Rijit üstyapılarda, asfalt kaplamalı karayoluna göre yük sıklığı daha azdır. Ancak bu durumun aksine demiryolundaki yük miktarı, karayolundan çok daha fazladır. Karayolunda, yola gelen tekerlek yükü 5,75 ton (kamyon için) ve yüzey alanına (710 cm²) gelen basınç 0,8 MPa iken, demiryolunda tekerlek yükü 11,25 tondur. Burada asfalt tabakaya gelen gerilmeler 0,25 MPa olup karayolundaki gerilmelerden çok daha düşüktür. Bunun en büyük sebebi yükün iyi bir şekilde dağılmasıdır. Bu durum, demiryolunda kullanılan taşıyıcı asfalt tabakasının kullanım ömrünü karayoluna göre daha da arttırmaktadır. Almanya’da bu sistemle yapılan balastsız üstyapı sistemleri için 60 yıl ömür biçilmektedir. Almanya’daki tecrübeler gösteriyor ki, düşük boşluk oranına ve yüksek binder içeriğine sahip asfalt kullanıldığında balastsız üstyapı sisteminde bakım-onarım ihtiyaçları son derece azalmakta ve yukarıda bahsedilen kullanım ömrü süresi sağlanabilmektedir (EAPA, 2014).

Bunların yanı sıra bazı uygulamalarda, katkı malzemeli asfalt taşıyıcı tabakalara da yer verilmektedir. Bu malzemeler sayesinde asfalt tabakanın taşıma gücü artmakta, gürültü ve titreşim azaltılabilmekte, sıcaklık değişimlerinin olumsuz etkileri giderilebilmektedir. Polimer katkılı bitümlü asfaltın faydaları ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır.

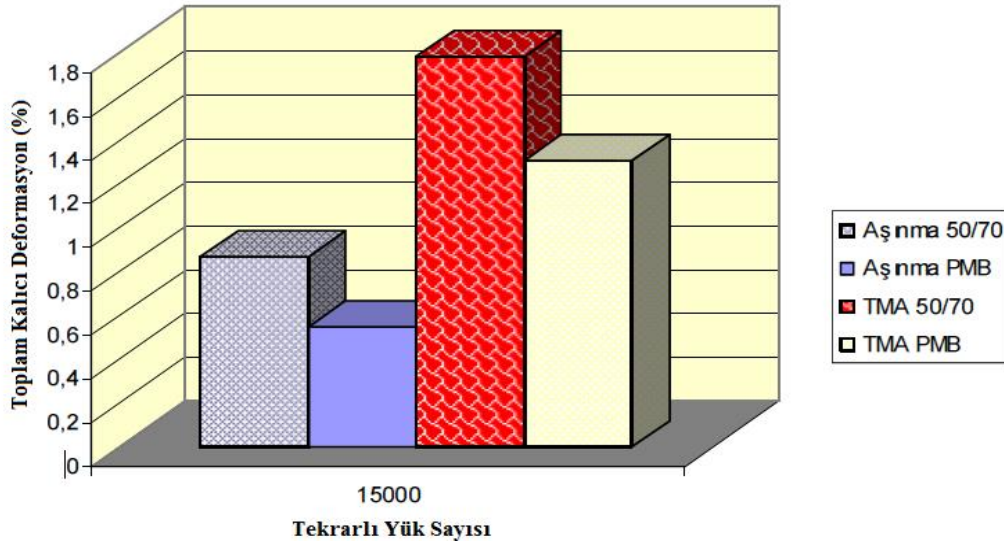
Deformasyon açısından değerlendirme

Karayolları Genel Müdürlüğü’nce yapılan bir çalışmada, Asfalt betonu (AB) ve taş mastik asfaltın (TMA) polimer modifiyeli katkılı ve katkısız örneklerinin tekrarlı yükler altındaki kalıcı deformasyon testleri yapılmıştır. Her farklı karışım için en az dört adet numunenin sonucu değerlendirilmiştir, deneyler sonucunda; yük tekrar sayısına karşılık, toplam kalıcı birim deformasyon (%) ve deformasyon (mm) değerleri hesaplanmış, Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tekrarlı yük kalıcı deformasyon testi sonuçları (Güngör ve diğ, 2007).

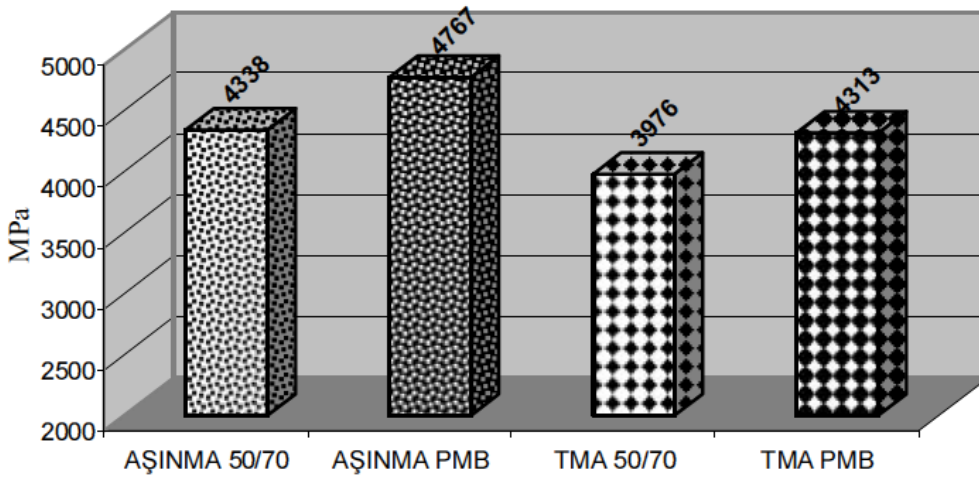
Karışım Tipi	Yük Tekrar Sayısı	Toplam Kalıcı Deformasyon (%)	Deformasyon (mm)
AB % 5,25 50/70	15.000	0,869	1,209
AB-PMB % 5,25	15.000	0,550	0,767
TMA % 6,50 50/70	15.000	1,7775	2,658
TMA-PMB % 6,50	15.000	1,309	1,937

Şekil 4.8’de ise çizelgedeki değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Tekrarlı yük sayısına bağlı toplam kalıcı deformasyon değerleri (Güngör ve diğ, 2007).

Şekil 4.9’da ise karışımların esneklik modülü gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Karışımların esneklik modülleri (Güngör ve diğ, 2007).

Çalışmada kalıcı deformasyonlara karşı en dayanıklı karışım tipinin modifiye bitümlü AB aşınma karışımı olduğu görülmüştür.

Gürültü ve titreşim açısından değerlendirme

Bazı demiryolu uygulamalarında, titreşim ve gürültüyü önlemek için standart asfalttan farklı özelliklere sahip modifiye asfalt (polimer modifiye bitüm, ufalanmış kauçuk) kullanılmaktadır. Bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Hızlı tren hatları için yapılan bir çalışmada kauçuk katkılı bir asfalt tabakanın hızlı tren hatlarında titreşim ve gürültüye karşı etkisi araştırılmış ve şu sonuçlara varılmıştır:

Yapılan bu çalışmada kauçuk katkılı asfalt tabaka (KKA), standart asfalt tabaka (SA), betonarme taşıyıcı tabaka ve balast tabakasının simülasyonu yapılmıştır. Tabakalarda oluşan ortalama ve maksimum ivme değerleri hattan belli uzaklıklarda (A noktası doğrudan hattın altında, B noktası hattan 20 m uzaklıkta, C noktası hattan 40 m uzaklıkta) tespit edilmiştir. Çizelge 4.2’de bu değerler görülmektedir. Burada ifade edilen maksimum ivme değeri, tren geçişi esnasında oluşan maksimum yükleme genliğini, ortalama ivme değeri ise ortalama yükleme genliğini ifade etmektedir.

Çizelge 4.2 : Farklı üstyapı tabakaları için farklı noktalardaki ortalama ve maksimum ivme değerleri (Zeng, 2005).

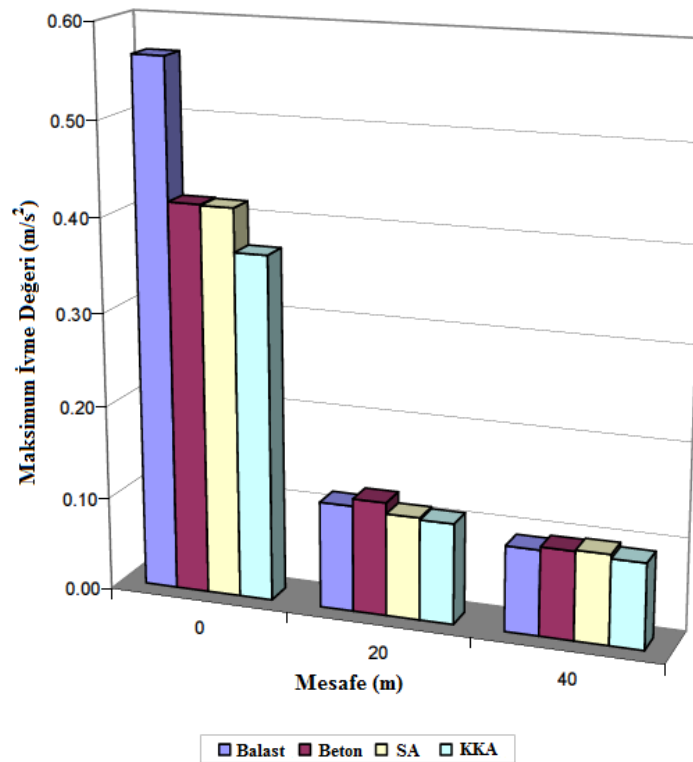
Ölçüm Noktası	Tabaka Tipi	Ortalama ivme (m/s ²)	Ortalama ivmedeki azalma (%)	Maksimum ivme (m/s ²)	Maksimum ivmedeki azalma (%)
A	Balast	0,198	-	0,565	-
	Beton	0,168	15,1	0,416	26,4
	SA	0,165	16,7	0,415	26,5
	KKA	0,161	18,7	0,369	35,7
B	Balast	0,0422	-	0,114	-
	Beton	0,0369	12,5	0,122	-7
	SA	0,0363	13,9	0,110	3,5
	KKA	0,0353	16,3	0,108	5,3

Çizelge 4.2 (devam) : Farklı üstyapı tabakaları için farklı noktalardaki ortalama ve maksimum ivme değerleri (Zeng, 2005).

	Balast	0,0304	-	0,0917	-
C	Beton	0,0292	3,9	0,0950	-3,6
	SA	0,0305	-3,3	0,0964	-5,1
	KKA	0,0299	1,6	0,0919	-0,2

Not: Pozitif değerler ivmede azalma olduğunu, negatif değerler ise artış olduğunu ifade etmektedir.

Şekil 4.10'da ise farklı tabakalardaki maksimum değerler grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Mesafeye bağlı olarak farklı tabakalarda oluşan maksimum ivme değerleri (Zeng, 2005).

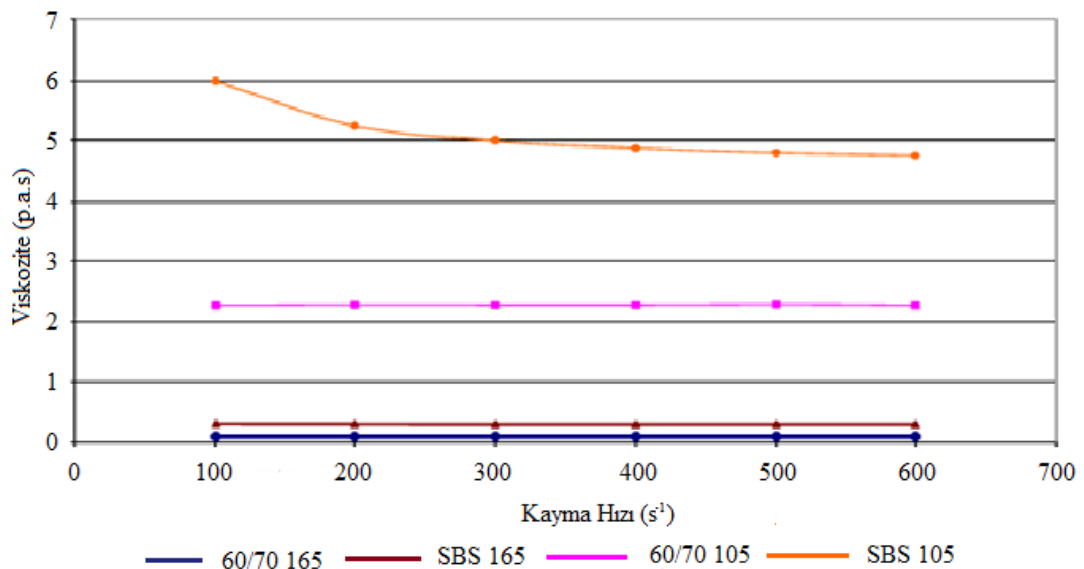
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.10'dan da görüleceği üzere kauçuk katkılı asfalt tabaka, gürültü ve titreşim açısından en başarılı tabakadır. İkinci sırada bulunan standart asfalt tabakadan maksimum ivme değeri % 9,2, ortalama ivme değeri ise % 2 daha azdır. Yani daha fazla titreşim ve gürültü sönümleme kapasitesine sahiptir. İfade edilen bu fark A noktası için geçerli olup B ve C noktaları için tabakalar arasında önemli bir farka rastlanmamıştır.

Sıcaklık değişimi açısından değerlendirme

Gürültü ve titreşimin yanı sıra asfalt tabakada en önemli sorunlardan biri de sıcaklık değişimidir. Asfalt farklı sıcaklıklarda değişik davranışlar gösteren bir malzemedir.

Yüksek sıcaklıklarda asfaltın davranışı: Asfalt çimentosu, sıcak havalarda, trafiğin yavaş aktığı durumlarda ya da park halindeki araçların etkisi (sürekli ve değişmeyen yükler) altında kıvamlı bir sıvı gibi davranır. Sıcak asfalt gibi viskoz sıvılar, akmaya başladıklarında, soğuma olsa bile eski durumlarına gelemedikleri için plastik olarak nitelendirilirler (Öztürk ve Çubuk, 2004).

Yüksek sıcaklıklardaki bu deformasyonları azaltmak için bitüme çeşitli katkı malzemeleri karıştırılarak karışımın viskozite değeri, yumuşama noktası gibi özellikleri artırılabilen, penetrasyon dereceleri azaltılabilmektedir. Bu konu üzerine yapılan bir çalışmada, SBS (Strien-Bütadien-Strien) polimer katkılı bitümlü asfalt ile 60-70 penetrasyon dereceli standart bitümlü asfalt arasında yüksek sıcaklıkta viskozite (akmazlık) açısından bir karşılaştırma yapılmıştır. Viskoziteyi belirlemek için numune iki plaka arasına yerleştirilerek belirli frekanslarda kayma (kesme) hızı verilir. Birimi s^{-1} 'dir. Malzemenin bu etkiye karşı gösterdiği direnç onun viskozite değeri olmaktadır. Birimi ise Pascalsaniye=Pas'dir. Bu çalışmanın sonucunda Şekil 4.11'de görülen grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.11 : SBS polimer katkılı bitüm ile standart bitümün 105°C ve 165°C sıcaklıklarda viskozite-kesme hızı ilişkisi (Burger ve diğ, 2001).

Grafikte görüldüğü üzere 105°C sıcaklıkta polimer modifiye bitümün viskozite değeri, standart bitümden daha yüksektir. 165°C sıcaklıkta ise iki tip arasında ciddi bir farka rastlanmamıştır.

Yapılan başka bir çalışmada ise farklı içeriklerde katkı malzemesi kullanılarak elde edilen bitümlerin yumuşama noktalarının arttığı, penetrasyon derecelerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada iki çeşit bitüm kaynağından elde edilen altı grup SBS katkılı bitüm, ağırlıkça üç farklı polimer muhteviyatında (%3-5-7 oranlarında) kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 4.3 : SBS katkılı bitümlerin çeşitli özelliklerinin değişim değerleri (Namlı, 2011).

Bitüm Tipi	25°C'de Penetrasyon derecesi (0.1 mm)	Yumuşama noktası (°C)
Bitüm A	73	47,0
PMB-AS3	63	52,4
PMB-AS5	57	78,0
PMB-AS7	50	95,0
Bitüm B	81	46,8
PMB-BS3	63	52,2
PMB-BS5	54	74,0
PMB-BS7	49	88,0

Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere polimer katkılı bitümün polimer yüzdesi arttıkça yumuşama noktası artmakta ve penetrasyon derecesi azalmaktadır. Bu da, polimer katkılı malzemenin sıcaklık artışı karşısında asfaltın akma sınırını yukarı çektiğini ve sertliğini arttırdığını göstermektedir.

Düşük sıcaklıklarda asfaltın davranışı: Asfalt çimentosu, soğuk havalarda ve trafiğin hızlı aktığı durumlarda elastik bir katı davranışı sergiler. Ancak aşırı yüklendiğinde kırılabilir veya çatlayabilir. Bu ısı çatlaklarını önlemek için viskozitesi düşük bitüm tercih edilmektedir (Öztürk ve Çubuk, 2004). Böylece asfaltın akışkanlığından faydalanılarak gevrek davranış göstermesi engellenmektedir. Bunun dışında bu sorunu çözmek için, bitümün fraass kırılma noktasını (Azalan sıcaklık altında malzemede ilk çatlağın ortaya çıktığı sıcaklık) azaltan katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Bu sayede asfaltta görülen gevrek davranış daha düşük sıcaklıklarda ortaya çıkmaktadır. Çizelge 4.4'te standart bitüm ve çeşitli tipte polimer katkılı bitümlerin fraass kırılma noktaları gösterilmiştir (Namlı, 2011).

Çizelge 4.4 : SBS katkılı bitümlerin fraass kırılma noktası değerleri (Namlı, 2011).

Bitüm Tipi	Fraass Kırılma Noktası (°C)
Standart Bitüm	-12
PMB-S3	-16
PMB-S5	-15
PMB-S7	-14

Çizelge 4.4'ten de anlaşılacağı üzere SBS katkı malzemesi ile fraass kırılma noktası değeri biraz daha aşağılara çekilmiştir.

4.2.3.3 Asfalt tabakanın serilmesi

Bu tabakanın serilmesi işlemi, normal tipte finişerler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak hattın geometrisinin hassas olması gerektiğinden, bu işlemin çok titiz bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bir kural olarak asfalt, gerekli düzgünlüğü sağlayabilmek için, 4 ya da 5 tabaka halinde serilmektedir. Bu tabakaların tamamının yüksekliği ATD sistemi için 30 cm'dir. Hattın geometrisinin kontrolünde kılavuz teli ve yardımcı ekipmanlar kullanılmaktadır. Tellerde sarkma olmaması için 5 m ya da daha kısa aralıklarla kontroller yapılmaktadır. Bu kontroller her tabaka seriminin ardından tekrarlanarak serime devam edilmektedir. Ayrıca serim işlemlerinin kontrolü için elektronik veri işleme programları geliştirilerek hattın mümkün olduğunca düzgün bir şekilde oluşturulması sağlanmaktadır. Şekil 4.12'de ATD sisteminde hattın düzgünlüğü kontrol edilmektedir (EAPA, 2014).



Şekil 4.12 : ATD sistemi hat geometrisi kontrolü (EAPA, 2014).

Bunların yanı sıra, asfalt karışımının üniform bir şekilde yerleştirilebilmesi de son derece önemlidir. Bunu sağlamak için, serim işleminin duraklamadan sürekli bir

şekilde, sabit bir serim hızında ve sıcaklığında yapılması gerekmektedir. Asfalt tabakanın serim işleminden sonra sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Bu işlemde düz, küçük silindirler kullanılmaktadır (EAPA, 2014).

4.3 Demiryolunda ve Karayolunda Kullanılan Asfalt Tabakanın Karşılaştırılması

Bu iki yol tipinde de kullanılan asfalt tabakanın benzer ve farklı yönlerine aşağıda değinilmiştir:

- Demiryolunda karışım tipi olarak sıcak karışım asfalt kullanılırken, karayolunda sıcak karışım asfaltın yanı sıra soğuk karışım, ılık karışım, köpük asfalt vb. uygulamalar bulunmaktadır.
- Demiryolunda asfaltın balast altı tabaka olarak kullanılması durumunda tabaka kalınlığı 10-20 cm aralığında iken doğrudan taşıyıcı tabaka olarak kullanıldığında 30 cm'nin altına düşmemektedir.
- Karayolunda ise genellikle aşınma ve binder tabakaları bitümlü karışımdır. Bu tabakaların kalınlıkları aşınma için 2,5-5 cm ve binder için 5-10 cm'dir. Ancak bazı durumlarda temel tabakası da bitümlü karışım olabilmektedir. Bu tabakanın kalınlığı ise 10-15 cm arasında değişmektedir.
- Asfalt tabaka bileşenleri ise hem karayolu hem de demiryolunda birbirine benzerdir. Karayolunda standart bir esnek üstyapıda kullanılan asfalt malzemesinde bitüm oranı % 3,5-7 arasında değişmektedir. Malzemedeki boşluk oranı, binder tabakada % 4-6, aşınma tabakasında % 3-5'tir. Karışımdaki agrega oranı ise % 93-97'dir.
- Demiryolundaki asfalt tabakada malzeme bileşenleri: Bitüm oranı, karayolunda kullanılan orandan en az % 0,5 daha fazladır. Bu sayede demiryolunda daha plastik bir tabaka elde edilmektedir. Bunun yanı sıra hava boşluğu oranı karayolunda kullanılan asfalttan daha düşüktür (%1-3). Karışımın kalan kısmı ise agrega ve fillerden (taş unu) oluşmaktadır.
- Karayolundan farklı olarak demiryolunda titreşim ve gürültüyü önlemek için modifiye asfalt (polimer modifiye bitüm, ufalanmış kauçuk) kullanılarak gürültü daha da azaltılabilmektedir.

5. BALASTSIZ ÜSTYAPIDA ASFALT TAŞIYICI TABAKA ve BETON TAŞIYICI TABAKANIN TEKNİK VE EKONOMİK YÖNDEN İNCELENMESİ

Günümüz demiryollarında balastsız üstyapının önemi gittikçe artmakta, hatta çoğu yerde balastlı üstyapının yerini almış bulunmaktadır. Balastsız üstyapı sisteminin bu denli gelişmesi, üstyapıda çeşitli alternatif arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Bu sebeptendir ki, birçok bilim insanı asfalt taşıyıcı tabaka ve beton taşıyıcı tabaka ile ilgili çeşitli araştırmalar yapmış, bunların sonucunda her iki tabakanın da kendine göre olumlu ve olumsuz yönleri olduğunu tespit etmişlerdir. Bu bölümde bu iki tabakanın hem teknik hem de ekonomik açıdan olumlu ve olumsuz yönleri ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

5.1 Balastsız Üstyapıda Asfalt ve Beton Taşıyıcı Tabakanın Teknik Açıdan İncelenmesi

Bölüm 3'te dünya genelinde kullanılan hem beton hem de asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı tipleri ayrıntılarıyla incelenmişti. Çalışmanın bu bölümünde beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı tipleri bazı teknik kriterler dikkate alınarak karşılaştırılacaktır.

5.1.1 Burulma rijitliği

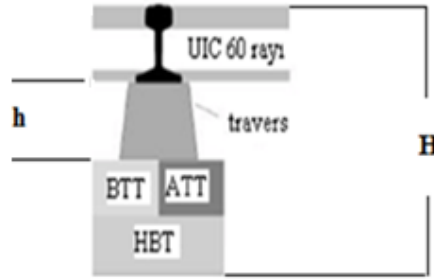
Her bir balastsız üstyapı tipi, farklı eğilme rijitliğine sahiptir. Bu üstyapı tipleri 6 kategoriye ayrılmış ve rijitlik seviyeleri Çizelge 5.1'de şematize edilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi en düşük burulma rijitliğine sahip balastsız üstyapı tipi, traverslerin asfalt/beton taşıyıcı tabakanın üzerinde olduğu sistemdir. Bu tip sistemler, yalnızca zeminin taşıma gücü ve rijitliğine dayanır. Prefabrik veya yerinde dökme beton üstyapılar burulma rijitliği açısından en yüksek seviyede olan sistemler olup, eğilme kuvvetine karşı yeterli direnç sağlayabilirler. Yumuşak ve yetersiz zeminlerde, öngermeli beton taşıyıcı tabaka kullanılarak ekstra bir burulma rijitliği sağlanabilmektedir (Öztürk ve Öztürk, 2005).

Çizelge 5.1 : Balastsız üstyapı tiplerinin burulma rijitlikleri
(Öztürk ve Öztürk, 2005).

Üstyapı tipi	Rijitlik	
	Düşük	Yüksek
Travers veya bloklar betona gömülü		
Traversler asfalt-beton yatağın üstünde		
Prefabrik beton plak		
Monolitik plak		
Gömülü ray		
Kenetlenmiş ve sürekli desteklenmiş ray		
Not: Oklar, üstyapı tiplerinin birbirleri arasındaki rijitlik farklarını, hem düşük kısımda hem de yüksek kısımda karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır.		

5.1.2 Üstyapı yüksekliği

Her bir üstyapı tipinin yapı yükseklikleri farklıdır. Düşük üstyapı yüksekliği, özellikle tünellerde maliyet açısından büyük kazanç sağlamaktadır. Bu yüzden tünellerde çok tercih edilmektedir. Çizelge 5.2’de bu kriter açısından üstyapı yüksekliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 5.1’de de bu üstyapı kesiti şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Balastsız üstyapı enkesiti (Michas, 2012).

Şekilde görülen kısaltmalar şöyle açıklanmaktadır:

(ATT): Asfalt taşıyıcı tabaka

(BTT): Beton taşıyıcı tabaka

(HBT): Hidrolik bağlayıcı tabaka

‘H’: Ray üst kotu ile HBT’nin alt kotu arası mesafe

‘h’: Ray alt kotu ile ATT/BTT’nin üst kotu arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

Çizelge 5.2 : Farklı üstyapı tiplerinin üstyapı yüksekliklerinin karşılaştırılması (Lichtberger, 2005).

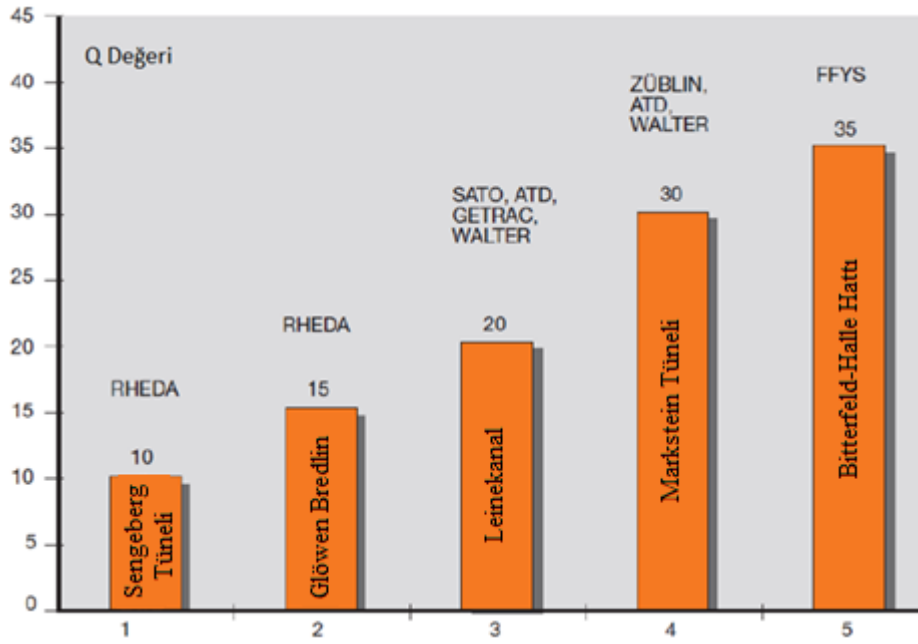
Üstyapı tipi	HBT (mm)	BTT (mm)	ATT (mm)	h (mm)	H (mm)
Rheda 2000	300	240	-	61-81	773-793
Züblin	300	240	-	63	775
Heitkamp	300	557	-	32	1061
LVT	300	216	-	117	805
ATD	300	-	300	249	1021
BTD	300	200	-	270	942
Walter	300	-	300	249	1021
SATO	300	-	300	148	920
FFYS	300	-	300	137	909
Getrac	300	-	300	236	1008
Shinkansen	300	190	-	53	715
Bögl	300	200	-	80	752
ÖBB-Porr	300	240	-	80	792
Infundo	250	400	-	-	650

Çizelgeden görüldüğü üzere asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemlerinin ortalama üstyapı yükseklikleri 900-1000 mm arasında değişmekte iken, beton taşıyıcı tabaka kullanılan sistemlerin yükseklikleri Infundo gömülü sistem uygulamasında görüldüğü gibi 650 mm değerine kadar inmektedir. Bu uygulamalardan anlaşılabacağı üzere beton taşıyıcı tabakalı sistemler, asfalt taşıyıcı tabakaya göre daha düşük üstyapı yüksekliğine sahiptir. Bu durumun en büyük sebebi beton taşıyıcı tabakalı sistemlerin traverssiz uygulaması mevcutken asfalt taşıyıcı tabakalı sistemlerin böyle bir uygulamasının şu an mevcut olmayışındır.

5.1.3 Bakım ihtiyacı

Alman Demiryolları'nın yaptığı bir çalışmada farklı üstyapı sistemlerinin bakım ihtiyaçları incelenmiştir. Bu çalışmada hat geometrisinin kalitesi; boyuna ve enine yükselti, doğrultu ve burulma gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmiş ve bu kaliteyi temsilen bir Q değeri saptanmıştır. Bu değer 0-100 arasında bir değer olup, 100'ü aştığında hattın bakıma ihtiyacı olduğunu ifade etmektedir. Şekil 5.2'de hem asfalt hem de beton taşıyıcı tabakalı üstyapı tiplerinden bazılarının bakım ihtiyaçları

gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.3'te ise daha geniş kapsamlı bir değerlendirme sonucuna yer verilmiştir.



Şekil 5.2 : Farklı üstyapı tiplerinin Q değerlerinin karşılaştırılması (Michas, 2012).

Çizelge 5.3 : Farklı üstyapı tiplerinin Q değerlerinin karşılaştırılması ve derecelendirilmesi (Michas, 2012).

Üstyapı tipi	Q değeri	Derecelendirme*
Rheda Berlin	6	1
Züblin	25	2
ATD	25	2
BTD	14	1
SATO	35	3
FFYS	35	3
Getrac	20	2
Lawn Track	28	3
Heitkamp	5	1

*Derecelendirme ölçütlerinden 1: en iyi performans (Önerilir),

2: Orta seviye performans (Memnun edici),

3: En kötü Performans (Geliştirilmesi Gerekli).

Çizelge 5.3 ve Şekil 5.2'den anlaşılabacağı üzere beton taşıyıcı tabakalı üstyapı sistemlerinin bakım ihtiyacı, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız hatlara göre daha azdır. Burada Rheda Berlin sistemi, Q bakım ihtiyacı değeri 6 ile en az bakıma ihtiyaç

duyan sistem olmuştur. FFYS ve SATO asfalt taşıyıcı tabakalı hatlar ise Q bakım ihtiyacı değeri 35 ile en çok bakıma ihtiyaç duyan sistemler olmuştur. Ancak gelişen teknoloji ve imalatın titiz bir şekilde yapılmasıyla bu değerler daha da aşağılara çekilebilmektedir. Buna en iyi örnek Getrac sistemidir. FFYS ve SATO sistemleri 1984 yılı üretimi iken Getrac sistemi 1995 yılında üretilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere Getrac sisteminin bakım ihtiyacı SATO ve FFYS'den hatta Züblin beton taşıyıcı tabakalı üstyapı sisteminden de daha iyi durumdadır.

5.1.4 Günlük inşa performansı

Çizelge 5.4'te farklı üstyapı sistemlerine ait günlük inşa performansları ve derecelendirilmesi gösterilmiştir. Hesaplamalarda, günlük çalışma süresi 8 saat olarak alınmıştır.

Çizelge 5.4 : Farklı üstyapı sistemlerine ait günlük inşa performansları ve derecelendirilmesi (Michas, 2012).

Üstyapı tipi	Günlük İnşa Performansı (m)	Derecelendirme
Rheda Klasik	172	3
Rheda Berlin	170	3
Züblin	200	2
ATD	200	2
BTD	350	1
SATO	350	1
FFYS	350	1
Getrac	270	2
Infundo	200	2
Heitkamp	200	2

Çizelge 5.4'ten görüleceği üzere SATO, FFYS asfalt taşıyıcı tabakalı sistemler günlük inşa performansı 350 m ile en iyi olan sistemlerdir. Bunun yanı sıra Rheda Klasik ve Rheda Berlin tipi balastsız üstyapılar ise 170 m ile günlük performansı en kötü olan sistemlerdir. Asfalt tabakalı sistemlerin inşa hızının yüksek olmasının en önemli sebebi, asfalt tabaka serildikten kısa bir süre sonra kullanılabilmesi, beton tabakadaki gibi sertleşme süreci geçirmemesidir.

5.1.5 Gürültü ve titreşim

Bölüm 4.2.3.2’de bu konu üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçlarına yer verilmişti. Bu çalışmanın sonucuna göre kauçuk katkılı asfalt tabaka, beton tabakaya göre gürültü ve titreşimi daha iyi sönümlemektedir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.10’dan da anlaşılacağı üzere kauçuk katkılı asfalt tabaka, beton tabakadan maksimum ivme değerini % 9,3, ortalama ivme değerini % 3,6 daha fazla azaltmaktadır. Standart asfalt tabakanın değerleri ise beton tabaka ile birbirine yakındır. Uygun katkı malzemeleri kullanıldığında asfalt tabakanın gürültü ve titreşim açısından beton tabakadan daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

5.1.6 İşletme hızları

Balastsız üstyapı sistemlerinde hem asfalt taşıyıcı tabakalı hem de beton taşıyıcı tabakalı uygulamalar hafif raylı sistemlerden yüksek hızlı hatlara kadar geniş bir kategoride kullanılabilir. Çizelge 5.5’te çeşitli balastsız üstyapı tiplerinin uygulandığı yıl ve hattın işletme hızları gösterilmiştir.

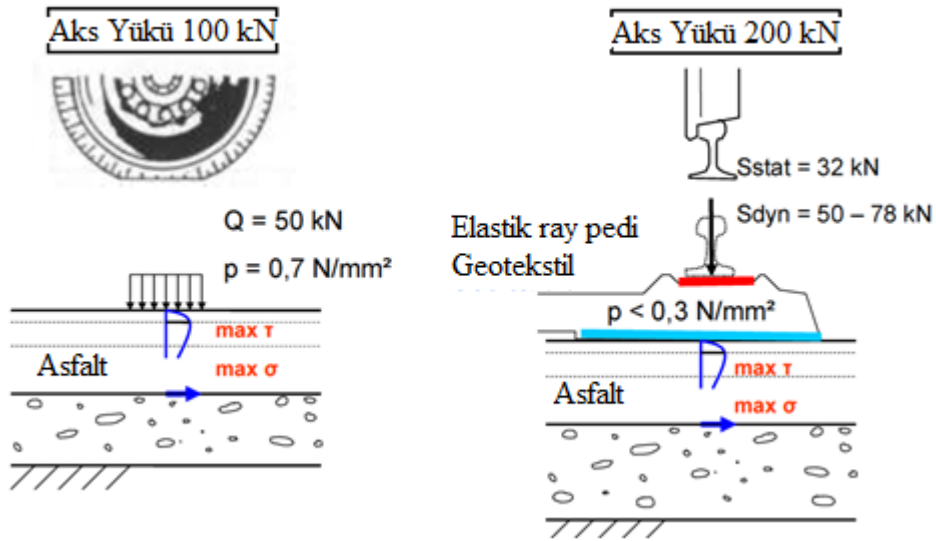
Çizelge 5.5 : Çeşitli balastsız üstyapı tiplerinin inşa yılları ve hatların işletme hızları (Michas, 2012).

Hattın Adı	Üstyapı tipi	İnşa Yılı	İşletme Hızları (km/sa)
Berlin Banliyö Hattı	Rheda Berlin	1994	160
Nuremberg-Ingolstadt Yüksek Hızlı Tren Hattı	Rheda 2000	1998-2006	300
Xian-Zhengzhou Yüksek Hızlı Tren Hattı	Züblin	2010	350
Hannover-Berlin Yüksek Hızlı Tren Hattı- Haemerten Kısım	ATD	1996-1997	300
Hannover-Berlin Yüksek Hızlı Tren Hattı	BTD	1998	300
Hannover-Berlin Yüksek Hızlı Tren Hattı- Berlin-Westkreuz-Ruhleben Kısım	Getrac	1994-1995	300
Deurne Test Hattı	Infundo	1995	160
Waghausel Test Hattı	Çimle Kaplı Üstyapı	1998	160

5.1.7 Dingil yükleri

Önceki bölümde hem beton hem de asfalt taşıyıcı tabakanın yüksek hızlı hatlara rahatlıkla uyum sağladığı belirtilmiş ve Çizelge 5.5'te örneklerine yer verilmişti. Dingil yükleri incelendiğinde ise bu iki tabakanın da yüksek hızlı hatlarda standart dingil yükü olan 22-22,5 ton gibi değerlere karşı koyabildiği görülmüştür.

Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemleri traversler ile birlikte kullanılmaktadır. Bu sayede tekerlekten asfalt tabakaya doğrudan yükün gelmesi engellenir. 2400 mm boyunda traverslerin kullanımı ile 200 kN'luk dingil yükünden asfalt taşıyıcı tabakaya gelen gerilmeler $0,3 \text{ N/mm}^2$ olmaktadır. Karayolunda, tipik bir ağır vasıttan asfalt tabakaya gelen standart gerilmenin $0,7 \text{ N/mm}^2$ olduğu düşünüldüğünde, asfalt taşıyıcı tabaka demiryolunda rahatlıkla 20-22 ton dingil yükleri altında kullanılabilir. Şekil 5.3'te karayolunda ve demiryolunda asfalt taşıyıcı tabakaya gelen yükler gösterilmiştir (Lechner, 2011).



Şekil 5.3 : Karayolunda ve demiryolunda asfalt taşıyıcı tabakaya gelen yükler (Lechner, 2011).

5.2 Balastsız Üstyapıda Asfalt ve Beton Taşıyıcı Tabakanın Maliyet Açısından İncelenmesi

Maliyeti genel olarak şöyle tanımlamak mümkündür. Bir ürünü ortaya çıkarmak için kullanılan mal ve harcanılan emeğin parasal tutarıdır. Üstyapının inşa maliyeti, her üstyapı tipi için farklı olmaktadır. Çizelge 5.6'da asfalt ve beton taşıyıcı tabakalı

farklı üstyapı tiplerinin inşa maliyetleri gösterilmiştir. Burada maliyetlere esas olan kısım, hidrolik bağlayıcı tabakanın hemen üzerinden itibaren olan kısımdır.

Çizelge 5.6 : Farklı üstyapı tiplerinin inşa maliyetlerinin karşılaştırılması (Lichtberger, 2005).

Üstyapı Tipi	Yapım Tarihi	İnşa Maliyeti (€/m)
Rheda Klasik	1972	1198
Rheda Berlin	1997	630
Züblin	1996	475
ATD	1993	600
SATO	1984	600
FFYS	1984	600
Getrac	1995	625
Infundo	1995	470

Çizelgeden görüleceği üzere inşa maliyeti olarak en düşük üstyapı, gömülü üstyapı tipi olan Infundo sistemidir. Onu, başka bir beton taşıyıcı tabakalı üstyapı tipi olan Züblin sistemi izlemektedir. Asfalt taşıyıcı tabakalı sistemler ise inşa maliyeti olarak orta ölçekli uygulamalar olarak gözükmektedir. Rheda Klasik sistemi ise balastsız üstyapı uygulamalarının en eskisi olması sebebiyle en fazla inşa maliyetine sahiptir.

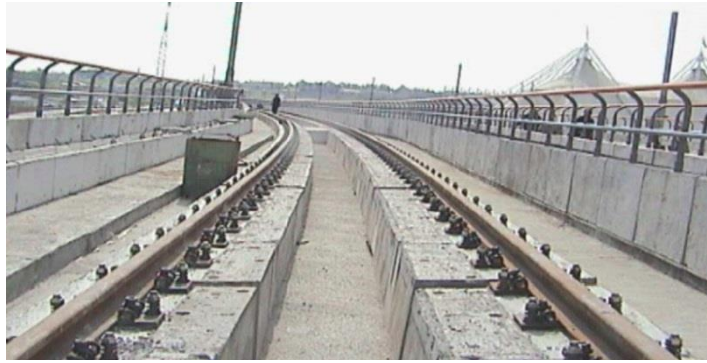
Yatırım maliyetleri bir projede en önemli karar verme parametrelerinden biridir. Ancak son zamanlarda bu maliyete, hizmet ömrü maliyeti de (life cycle cost) eklenmiştir (Hizmet ömrü, hattın işletmeye açılmasıyla ilk yenileme çalışması arasında geçen süredir). Bu parametrenin proje üzerinde son derece belirleyici bir rol oynadığı, yapılan analizler sonucunda anlaşılmıştır. Hizmet ömrü maliyetinde, projenin hizmet ömrü boyunca ortaya çıkabilecek maliyetler ele alınmaktadır. Bu maliyetler; bakım, ölçüm, kontrol ve tamirat işlemlerinin maliyetleridir (Arlı, 2002).

Çalışmanın bu kısmında, Yenikapı-Havalimanı hafif metro hattının bir uzantısı olan Yenibosna-Havalimanı hattı incelenecektir. Hattın uzunluğu 1792 m ve çift hatlı olup, % 92'si viyadükten ve tünelden oluşmaktadır. Hattın üstyapısında beton taşıyıcı tabaka kullanılmıştır. Sistemin bileşenlerini yukarıdan aşağıya doğru şöyle sıralamak mümkündür:

- **S49 ray:** Bu hatta metrik ağırlığı 49 kg olan S49 rayı kullanılmıştır. Bu ray tipi genellikle şehir içi raylı sistem hatlarında ve konvansiyonel, düşük hızlı hatlarda kullanılmaktadır. Dünya genelinde bahsedilen özelliklerdeki hatlarda da tercih edilen ray tipi budur. Bu çalışmada rayın hizmet ömrü 34 yıl olarak kabul edilip hesaplamalar ona göre yapılmıştır. Şekil 5.4'te Yenikapı-

Havalimanı hattından bir fotoğrafta bu ray tipi ve diğer üstyapı elemanları görülmektedir.

- *Ray pedi:* Ray ile selet arasına yerleştirilen, elastikliği ve yanal direnci sağlayan bir malzemedir. Yay katsayısı $500-600 \times 10^6$ N/m'dir. Elastikliği sağlayan bir diğer malzeme olan elastomerden daha sert bir malzemedir.
- *Vosloh 336 ray bağlantı malzeme seti:* İndirekt ve elastik bir bağlantı sistemidir. Alman ürünüdür. Görevi, rayı üstyapıya sabitlemek ve araç geçişi esnasında oluşan düşey titreşimleri sönmölemekdir. Bu tipin dışında dünya genelinde kullanılan direkt-elastik, direkt-rijit ve endirekt-rijit gibi bağlantı sistemleri de mevcuttur. Bu konu ile ilgili detaylı bilgilere Bölüm 2.4'te yer verilmiştir. Şekil 5.5'te Vosloh 336 sistemi gösterilmiştir.
- *Elastomer malzeme:* Beton taşıyıcı tabaka ve selet arasında bulunmaktadır. 10 mm kalınlığına sahip bir malzeme olup, üstyapıda elastikiyeti sağlamaktadır. Yay katsayısı 28×10^6 N/m'dir.
- *Beton kiriş:* Derzli ve boyuna doğrultuda inşa edilmiş, ikiz blok traverslerdir. Betonun dayanım sınıfı BS 25 (C 25)'tir. Yerinde dökölerek imal edilmiştir. 60 x 30 cm boyutlarındadır.



Şekil 5.4 : Yenibosna-Havalimanı arası balastsız üstyapı (Şahin, 2011).



Şekil 5.5 : Vosloh 336 bağlantı sistemi (Şahin, 2011).

Bu çalışmada bahsi geçen hattın hem beton taşıyıcı tabakalı hem de asfalt taşıyıcı tabakalı üstyapı yapım ve bakım maliyetleri hesaplanacak ve karşılaştırılacaktır. Yapılan hesaplamalar ve karşılaştırmalarda birim hat uzunluğu 1 km alınmıştır. Bunun yanı sıra hesaplamalarda dolar kuru, Mayıs 2015 tarihi itibarıyla 1\$ = 2,7 TL olarak alınmıştır. Çalışmada, Karayolları Genel Müdürlüğü, Demiryolları, Limanlar ve Hava Meydanları birim fiyat kitaplarından faydalanılmış, bu kaynaklardan elde edilemeyen pozlar için ise Konya Raylı Sistemler Müdürlüğü'nün önerdiği birim fiyatlar kullanılmıştır.

5.2.1 Beton taşıyıcı tabakalı Yenibosna-Havalimanı Hattı'nın üstyapı maliyet analizi

Çalışmada, Yenibosna-Havalimanı hattının yapım ve bakım çalışmaları maliyetlerinin net bugünkü değerleri hesaplanmıştır. Hattın hizmet ömrü belirlenirken hattın en önemli bileşeni olan ray ömrü esas alınır (Arlı, 2002).

Bununla ilgili yapılan çalışmalar sonucunda hattın hizmet ömrü boyunca geçen tonaj şu formülle hesaplanır:

$$L=K \times W \times D^{0,56} \quad (5.1)$$

D: Hattan bir yılda geçen trafik yükü, MGT

W: Rayın birim ağırlığı, lb/yard (kg/m= 2,01 lb/yard)

K: Sabit katsayı, Tamamen yenilenmiş bir hatta 0,9538 alınmaktadır.

Tamamen yenilenmiş S49 raylı bir hat için ömür hesabı yapılırsa:

(S49 rayın birim ağırlığı: 49,43 kg/m)

$$\begin{aligned} L &= 0,9538 \times (2,01 \times 49,43) \times D^{0,565} \\ L &= 94,76 \times D^{0,565} \end{aligned} \quad (5.2)$$

bağıntısı elde edilir.

Yenikapı - Havalimanı Hafif Metro Hattı için Ulaşım A.Ş'den alınan bilgilere göre hattın günlük sefer sayısı hafta içi (cumartesi de dahil) 167 sefer/tek-yön, hafta sonu ise 154 sefer/tek-yön'dür. Buradan hareketle hatta yapılan haftalık sefer sayısı 1156 sefer/tek-yön, aylık sefer sayısı ise 4624 sefer/tek-yön olmaktadır. Bir dizide genelde 4 araç kullanılmakta olup, bir aracın ağırlığı yaklaşık olarak 49 ton'dur. Bu bilgiler doğrultusunda D değeri şu şekilde hesaplanır:

$$D = \frac{4 \times 12 \times 4624 \times 49}{10^6} = 10,88 \text{ MGT / yıl} \quad (5.3)$$

MGT cinsinden hat ömrü (5.2) ve (5.3) bağıntıları kullanılarak şu şekilde hesaplanır:

$$L = 94,76 \times (10,88)^{0,565} = 365,02 \text{ MGT} \quad (5.4)$$

Elde edilen bu sonuç, hattın 1 yılda geçen trafik yüküne bölünürse, hat ömrünün yıl cinsinden değeri elde edilir:

$$\text{Hat ömrü} = \frac{365,02}{10,88} = 33,55 \approx 34 \text{ yıl} \quad (5.5)$$

5.2.1.1 Yapım maliyetleri

Bir demiryolu hattının yapım maliyeti proje yıllık trafik yüküne, dingil yüküne ve bunlara bağlı olarak projelendirmede seçilen ray, bağlantı ve travers tipine, travers aralığına, ray uzunluğuna, taşıyıcı tabaka cinsine bağlı olarak değişmektedir.

Beton taşıyıcı tabakalı üstyapı yapım maliyeti Ek A ve Ek B'den hesaplanacak olursa;

Malzeme maliyeti = 1.214.770,83 \$

İşçilik maliyeti = 257.697,97 \$

Toplam yapım maliyeti = 1.472.468,80 \$

1 km beton taşıyıcı tabakalı üstyapı yapım maliyeti = 1.472.468,80 / 3,584 = 410.845,09 \$/km 'dir.

5.2.1.2 Bakım maliyetleri

Beton taşıyıcı tabakalı üstyapılarda bakım çalışmaları rutin bakım (malzeme bakımı, makasların bakımı, hat kontrol ve ölçüm çalışması, hattın ve drenaj kanallarının temizliği) ve ray taşlamadır. Hat bakım maliyetleri sabit maliyetler olup, iki önemli özelliğe sahiptir. Bunlar;

- Hizmet ömrü boyunca yapılacak iş miktarları ve bakım periyotları bellidir.
- Yapılan her bakım için birim süre ve birim maliyet bellidir.

Bir bakım çalışması makine, malzeme ve işçilik olmak üzere üç ana kalem içerir. Bu nedenle bakım maliyetlerini hesaplamak için makine, malzeme ve işçilik maliyetlerinin belirlenmesi gereklidir.

a) Rutin bakım maliyeti

Balastsız üstyapılarda periyodik olarak yapılan rutin bakımlar için işçilik ve malzeme maliyeti olmak üzere iki maliyet kalemi vardır. Ülkemizde edinilen tecrübelerle göre bir yıl içinde 3 işçi 10 km'lik bir hattın rutin bakımını yapabilmektedir. İşçilik maliyeti; 1.800 TL/ay maaş, 600 TL/ay ikramiye (2 tam + 4 yarım maaş) ve işçinin 500 TL/ay sigorta ücreti olmak üzere 2900 TL/ay, 1.074,07 \$/ay olmaktadır. Yıllık maliyet değeri ise $12 \times 1.074,07 = 12.888,84$ \$/yıl olarak belirlenmiş olur.

1 km hattın rutin bakımının toplam işçilik maliyeti = $0,3 \times 34 \times 12.888,84$

1 km hattın rutin bakımının toplam işçilik maliyeti = 131.466,17 \$

Travers aralığı 60 cm olan 1 km hatta 1.666 adet travers vardır ve her traverste iki adet ray altı seleti olduğu için, toplam $2 \times 1.666 = 3.332$ adet ray altı plastik selet vardır. Bir plastik seletin maliyeti 0,67 \$ olduğuna göre, 1 km hattın ray altı plastik selet maliyeti $0,67 \times 3.332 = 2.232,44$ \$ olur. Hattın hizmet ömrü boyunca 9, 18 ve 27. yıllarda ray altı seleti değiştirilir. Buna göre toplam hizmet süresi boyunca toplam malzeme maliyeti şöyle bulunur:

1 km hattın toplam malzeme maliyeti = $3 \times 2.232,44 = 6.697,32$ \$

Toplam Rutin Bakım Maliyeti = Toplam İşçilik Maliyeti (\$/km) + Toplam Malzeme Maliyeti (\$/km)

Toplam Rutin Bakım Maliyeti = 131.466,17 + 6.697,32 = 138,163,49 \$/km

b) Ray taşıma maliyeti

i) Makine maliyeti

Makine maliyeti = $A + m + d$

A: Amortisman maliyeti

m: Malzeme maliyeti

d: Diğer maliyetler

Yapılan hesaplamalarda, Speno Internatioan SA firmasına ait taşıma makinesi ile ilgili bilgiler kullanılmıştır. Buna göre maliyetlere tek tek göz atacak olursak;

Amortisman maliyeti: Bir üründe zaman geçtikçe meydana gelen yıpranma ve eskimenin parasal karşılığıdır.

Demiryolu bakım makinelerinin hizmet ömrü 15 yıl kabul edilmektedir. Bakım makineleri 1 yılda hava şartları ve arızalardan dolayı ortalama 130 gün çalışabilir. Makinelerin ortalama hizmet ömrü $130 \times 15 \approx 2000$ gündür. Makine bedeli 2.120.000 \$'dır. Buna göre amortisman maliyeti $2.120.000 / 2000 = 1060$ \$/gün olmaktadır.

Malzeme maliyeti: Bakım makinelerinin malzeme maliyetini yakıt, yağ, üstüğü maliyetleri oluşturur. Bakım makinelerinin bir saat içinde harcadıkları mazot miktarı, motor gücünün 0,15 katı alınarak bulunur. 180 BB motor gücündeki ray taşlama makinesi içinde $180 \times 0,15 = 27$ lt mazot harcamaktadır. Makinenin periyodik bakımlarında kullanılan yağ, üstüğü, benzin gibi sarf malzemeleri yakıt miktarının % 20'si kadardır. Yağ ve benzin malzemelerinin birim maliyeti de yakıt ile aynı alınır. Bu giderlerle beraber yakıt maliyetleri % 20 artmaktadır. Yani bir saatlik çalışma için harcanan toplam malzeme miktarı motor gücünün $0,15 \times 1,2 = 0,18$ katı alınarak bulunur. Bu çalışmada bakım çalışmalarının 4 saatlik bir aralıkta yapıldığı kabul edilmiştir. Sonuç olarak ray taşlama makinesinin malzeme maliyeti;

$$\text{Malzeme miktarı (lt/sa)} = \text{Motor gücü (BB)} \times 0,18$$

$$\text{Malzeme miktarı (lt/sa)} = 180 \times 0,18 = 32,4 \text{ lt/sa}$$

$$(\text{Mazotun birim maliyeti} = 3,96 \text{ TL/lt}, 1,47 \text{ \$/lt})$$

$$\text{Malzeme maliyeti (\$/gün)} = \text{Malzeme miktarı (lt/sa)} \times \text{Birim Maliyet (\$/lt)} \times 4 \text{ (sa/gün)}$$

$$\text{Malzeme maliyeti} = 32,4 \times 1,47 \times 4 = 190,51 \text{ \$/gün}$$

Ray taşlama makinesinin mazot, yağ, üstüğü dışında taşlama taşları da malzeme maliyetine girmektedir. Sekiz taşlı taşlama makinesinin her günlük çalışması için taşları değiştirilir. Bir adet taşın maliyeti 15 \$ olduğuna göre, bir günlük çalışma için 8 taşın malzeme maliyeti 120 \$ olur.

$$\text{Toplam Malzeme Maliyeti (m)} = 190,51 + 120 = 310,51 \text{ \$/gün}$$

Diğer maliyetler: Makinelerin tamir ve bakımı ile ilgili yedek parça, işçilik, sigorta gibi giderler diğer giderleri oluşturur. Makinenin diğer giderleri bir saatlik çalışmaları için makine bedelleriyle belli bir katsayı çarpılarak bulunur. Bu katsayı

ağır iş makineleri için Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın genel fiyat analizinde 0,000179 olarak verilmiştir.

Diğer Maliyetler (\$/gün) = Makine Bedeli x 0,000179 x 4 (sa/gün).

Diğer Maliyetler (d) = 2.120.000 x 0,000179 x 4 = 1517,9 \$/gün

Buna göre ray taşılama makinesinin toplam maliyeti şu şekilde olmuştur:

Makine maliyeti (\$/gün) = A + m + d

Makine maliyeti = 1060 + 310,51 + 1517,9 = 2.788,41 \$/gün

ii) Operatör maliyeti

TCDD makine operatörleri işçi sınıfına girdikleri için aylık maaşlarının dışında ikramiye, çalışma tazminatı, sosyal hakları vardır ve bunlarla beraber aylık maliyetleri; 1.800 TL/ay maaş, 600 TL/ay ikramiye (2 tam + 4 yarım maaş) ve işçinin 500 TL/ay sigorta ücreti olmak üzere 2900 TL/ay, 1.074,07 \$/ay olmaktadır. Bir ay içinde hafta sonu tatilleri çıkarıldığı zaman 22 iş günü kalmaktadır.

Operatör maliyeti (\$/gün) = Operatör sayısı x Operatör aylık maliyeti/ 22 (gün/ay)

Operatör maliyeti = 2 x 1.074,07/ 22 = 97,64 \$/gün

iii) Makine çalışma maliyeti

Makine çalışma maliyeti (\$/gün) = Makine maliyeti + Operatör maliyeti

Makine çalışma maliyeti = 2.788,41 + 97,64 = 2.886,05 \$/gün

Toplam hizmet süresi boyunca 16 kez taşılama işlemi yapılacağından;

Toplam Ray Taşılama Maliyeti = 16 x 2.886,05 = 46.176,80 \$ /km

Çizelge 5.7'de beton taşıyıcı tabakalı üstyapının toplam yapım ve bakım maliyetleri birlikte gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : Beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin yapım ve bakım maliyetleri.

Yapım Maliyeti (\$/km)	Bakım Maliyeti (\$/km)	
	Rutin Bakım	Ray Taşlama
410.845,09	138,163,49	46.176,80
410.845,09	Toplam= 184.340,29	
Toplam Maliyet = 595.185,38 \$/km		

Çizelgeden de görüleceği üzere beton taşıyıcı tabakalı üstyapının, yapım ve hizmet ömrü boyunca ortaya çıkacak toplam maliyeti 595.185,38 \$/km'dir.

5.2.2 Asfalt taşıyıcı tabakalı Yenibosna-Havalimanı Hattı'nın üstyapı maliyet analizi

Hattın beton taşıyıcı tabakalı olarak inşa edildiği daha önceden belirtilmişti. Çalışmanın bu bölümünde, beton taşıyıcı tabakaya alternatif olarak asfalt taşıyıcı tabakalı üstyapı ekonomik olarak incelenmiştir.

Beton taşıyıcılı tabakadan farklı olarak bu çalışmada; 31 cm kalınlığında asfalt taşıyıcı tabaka, üzerinde de B320 W54 monoblok travers kullanıldığı düşünülmüştür. Sistemin, Şekil 5.6'daki ATD sistemine benzer bir şekilde üretileceği varsayılmıştır. Bunların dışında diğer masrafların, beton taşıyıcı tabakalı sistemle aynı olacağı kabul edilmiştir. Bu bilgiler ışığında beton taşıyıcı tabakalı sisteme alternatif olan bu sistemin yapım ve bakım maliyetleri şu şekilde oluşmuştur.



Şekil 5.6 : Monoblok traversli ATD sistemi (Mörscher, 1999)

5.2.2.1 Yapım maliyetleri

Demiryolu üstyapısında kullanılacak olan asfalt taşıyıcı tabaka, karayolunda olduğu gibi kaplama (5 cm), binder (8 cm) ve bitümlü temel tabakadan (9 + 9 = 18 cm) oluşmaktadır (AFTES, 2013). Toplam 4 tabaka olarak yerleştirildiği düşünülmüştür.

Bu sistemin inşaa maliyetleri hesaplanırken asfalt ile ilgili aşağıda belirtilen kalemler esas alınmıştır. Bunun dışındaki diğer maliyetler daha önce de belirtildiği gibi beton taşıyıcı tabakalı sistemin maliyetlerinin aynısıdır.

-İşçilik bedelleri: Demiryolu üstyapısında kullanılan üç tabakanın yapımı için işçilik maliyetleri; 5 cm asfalt betonu aşınma tabakası için 6,88 TL/m² (2,55 \$/m²), 8 cm asfalt betonu binder tabakası için 9,10 TL/m² (3,37 \$/m²) ve 9 cm kalınlığında bitümlü sıcak temel tabakası için ise (2 adet) 10,56 TL/m² (3,91 \$/m²)'dir. (Bu fiyatlara nakliye ve malzeme bedelleri dahil değildir).

-Nakliye bedeli: İstanbul'daki asfalt plantleri Mahmut Bey, Habibler, İkitelli, Ümraniye ve Tuzla'da bulunmaktadır (Öztürk ve Öztürk, 2010). Bu plantler İstanbul geneline yayıldığından plantten şantiye sahasına asfalt taşınması için ortalama 25 km taşıma mesafesi gerekli olmaktadır.

Bir taşıma aracının 50 km'lik gidiş dönüş mesafesi için yakıt gideri yaklaşık 60 TL'dir. (Ortalama bir taşıma aracının yakıt sarfiyatının km başına 0,3 lt olduğu ve güncel motorin fiyatının da 3,96 TL/lt olduğu düşünülmüştür). Bir aracın 16 ton asfalt taşıdığı ve asfaltın yoğunluğu 2,4ton/m³ olup, 31 cm kalınlıkta asfaltın nakliye bedeli (60 TL x 2,4ton/m³ x 0,31 m³/m²) / 16ton=2,79 TL/m² (1,03 \$/m²)'dir.

-Aracın amortisman ve sürücü giderleri: Aracın hizmet ömrü 10 yıl düşünülmüş olup bedeli de ortalama 100.000 TL kabul edilmiştir. Aylık olarak amortisman maliyeti ise 100000/(12x10)=833 TL olmaktadır. Sürücü gideri ise aylık 2000 TL maaş + 500 TL sigorta gideri olarak toplam 2500 TL'dir. Sonuç olarak bu kalemin maliyeti ise 3333 TL/ay olmaktadır. Bir taşıma aracının ayın 25 günü çalıştığı, her gün ortalama 2 sefer nakliyat yaptığı bilgisine göre hesaplanan bedel; (3333 TL x 2,4ton/m³ x 0,31 m³/m²) / 25gün x 2sefer x 16ton= 3,10 TL/m² (1,15 \$/m²) olmaktadır.

-Malzeme maliyeti: Karayolları Genel Müdürlüğü verilerine göre KGM/4300/PMB pozlu polimer modifiye bitümlü asfaltın malzeme maliyeti 87,95 TL/ton'dur. 31 cm kaplama için birim fiyat ise 87,95 TL/ton x 2,4 ton/ m³ x 0,31 m = 65,43 TL/m² (24,23 \$/m²) olarak hesaplanmaktadır.

-Toplam işçilik maliyeti: 6,88 + 9,10 + (10,56 x 2) + 2,79 + 3,10 = 42,99 TL/m² (15,92 \$/m²)

-Asfalt seriminin toplam maliyeti: 42,99 + 65,43 = 108,42 TL/m² (40,15 \$/m²) olmaktadır.

Asfalt ile ilgili maliyetlerin dışında beton taşıyıcı tabakalı sistemden farklı olarak bu sistemde bir de beton travers kullanılacağı daha önceden belirtilmişti. Bu sistemde 60 cm aralıklarla 5974 adet B320 W54 tipi monoblok travers tercih edilmiş ve 45\$ birim fiyatına göre hesaplamalar yapılmıştır. Bütün işçilik ve malzeme maliyet hesaplamaları Eklerde gösterilmiştir. Bu çizelgelere göre asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapının yapım maliyeti aşağıda belirtildiği gibi olmuştur:

Yenibosna-Havalimanı hattı için 31 cm kalınlığında, 5,2 m genişliğinde ve 1792 m uzunluğunda asfalt tabaka yapılacağı varsayılmış, bundan hareketle, $5,2 \times 1792 = 9318 \text{ m}^2$ alanında asfalt serileceği düşünülmüştür.

Buradan asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapının toplam maliyeti, Ek C ve Ek D'den faydalanarak şöyle hesaplanabilir:

Malzeme maliyeti = 1.552.355,66 \$

İşçilik maliyeti = 294.235,68 \$

Toplam yapım maliyeti = 1.846.591,34 \$

1 km asfalt taşıyıcı tabakalı üstyapı yapım maliyeti = $1.846.591,34 / 3,584 = 515.231,96 \text{ $/km}$ 'dir.

5.2.2.2 Bakım maliyeti

Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı, bakım çalışmalarından ve uygulanması pratik olarak mümkün olmayan çalışmalardan kaçınmak için kalıcı olarak tasarlanmakta olup hizmet ömrü 60 yıl olmaktadır (EAPA, 2014). Dolayısıyla, beton taşıyıcı tabaka ile aynı rutin bakım maliyetlerine sahiptir. Buna göre oluşan toplam maliyetler Çizelge 5.8'de gösterilmiştir:

Çizelge 5.8 : Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin yapım ve bakım maliyetleri.

Yapım Maliyeti (\$/km)	Bakım Maliyeti (\$/km)	
	Rutin Bakım	Ray Taşlama
515.231,96	138.163,49	46.176,80
515.231,96	Toplam= 184.340,29	
Toplam Maliyet = 699.572,25 \$/km		

Çizelgeden de görüleceği üzere asfalt taşıyıcı tabakalı üstyapının yapım ve hizmet ömrü boyunca ortaya çıkacak toplam maliyeti km başına 699.572,25 \$'dır.

5.2.3 Beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıların toplam maliyetlerinin ve eşdeğer yıllık maliyetlerinin karşılaştırılması

Eşdeğer yıllık maliyeti hesaplamak için aşağıda belirtilen bağıntı kullanılmaktadır:

$$\text{Toplam Maliyet} = cx [1/(1+r)+1/(1+r)^2+\dots+1/(1+r)^{34}] \quad (5.6)$$

Ülkemizde yıllık faiz oranını % 9 olarak alırsak,

Beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemi için eşdeğer yıllık maliyet;

595.185,38 = c x 10,52 eşitliğinden hareketle,

Beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemi için c= 56.576,56 \$/km'dir.

Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemi için eşdeğer yıllık maliyet;

699.572,25 = c x 10,52 eşitliğinden hareketle,

Asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemi için c = 66.499,26 \$/km'dir.

Buradan hareketle, beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemi, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemine göre her yıl 9.922,70 \$ tasarruf sağlamaktadır.

Çizelge 5.9'da beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıların maliyetleri birlikte gösterilmiştir.

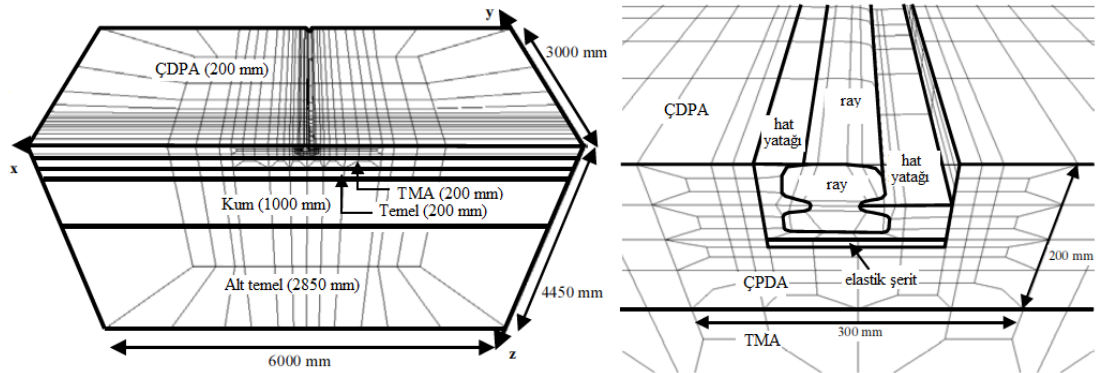
Çizelge 5.9 : Beton ve asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemlerinin toplam maliyetleri.

Üstyapı Tipi	Yapım Maliyeti (\$/km)	Bakım Maliyeti (\$/km)	Toplam Maliyet (\$/km)	Eşdeğer Yıllık Maliyet (\$/km)
Beton taşıyıcı tabakalı üstyapı	410.845,09	184.340,29	595.185,38	56.576,56
Asfalt taşıyıcı tabakalı üstyapı	515.231,96	184.340,29	699.572,25	66.499,26
Maliyet Farkı	104.386,87 (%25)	-	104.386,87 (%18)	-9.922,70

Çizelge 5.9'dan hareketle, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapının, beton taşıyıcı tabakalı üstyapıdan yapım maliyeti olarak %25 daha maliyetli olduğu, bakım maliyeti olarak bir farkın olmadığı, toplam maliyet açısından da %18 daha maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu maliyet farkının %72'sini travers bedeli

oluşturmaktadır. Buradan anlaşılıyor ki, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemleri traverssiz olarak uygulanabilirse, bu maliyet farkı da büyük ölçüde kapanacaktır.

Bu konu üzerine yapılan bir çalışmada tramvay hatlarında, beton taşıyıcı tabaka yerine travers kullanılmadan asfalt taşıyıcı tabakaya yer verilmiş ve farklı koşullarda çeşitli bilgisayar programları (ANSYS, CAPA 3D gibi) yardımıyla analizleri yapılmıştır. Asfalt taşıyıcı tabaka, hat yatağının hemen altında başlamakta olup bu tabaka, çimento dolgulı poroz asfalttan (ÇDPA) oluşmaktadır. Bu uygulamanın amacı, boşluk oranı fazla olan (%15-20) asfaltın bu boşluklarına yüksek dayanımlı çimento enjekte edilerek tabakanın dayanımını arttırmaktır. Bu çalışmada tabakanın kalınlığı 20 cm seçilmiştir. Altında ise 20 cm kalınlığında taş mastik asfalta (TMA) yer verilmiştir. Onun altında ise yine 20 cm kalınlığında bağlayıcısız taneli malzeme olan temel tabakası bulunmaktadır. Sistemin enkesiti detaylı bir şekilde Şekil 5.7’de gösterilmiştir (Huurman ve diğ, 2003).



Şekil 5.7 : Gömülü raylı uygulamada asfalt taşıyıcı tabakanın enkesit modeli (Huurman ve diğ, 2003).

Bu üstyapı tipi (ÇDPA), diğer üstyapı tipleriyle birlikte, 3 farklı koşulda (Sıcaklığın yüksek ve araç hızının düşük olduğu durum, sıcaklığın düşük ve araç hızının yüksek olduğu durum ve bu iki koşul arasındaki nominal durum) bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. Çizelge 5.10’da bu parametreler gösterilmiştir.

Çizelge 5.10 : Asfalt taşıyıcı tabakanın analiz edileceği farklı sıcaklık ve araç hız değerleri (Huurman ve diğ, 2003).

		Sıcak&Yavaş	Nominal	Soğuk&Hızlı
Üstyapı Tipi	Araç hızı (km/sa)	3,6	36	54
	Sıcaklık (°C)	50	17	-15
Hat yatağı	Yükleme zamanı (s)	0,5	0,1	0,05
	Frekans (Hz)	1	5	10
ÇDPA	Sıcaklık	40	20	-10
	Yükleme zamanı (s)	0,5	0,05	0,03
	Frekans (Hz)	1	10	15
TMA	Sıcaklık	30	20	0
	Yükleme zamanı (s)	0,9	0,09	0,06
	Frekans (Hz)	0,6	5,6	8,3

Yapılan analizlerin sonucunda, sıcaklığın yüksek ve araç hızının düşük olduğu koşullarda asfalt taşıyıcı tabakanın yeterli dayanıma ulaşamadığı belirlenmiştir. Burada istenen dayanım 1,5 MPa iken asfalt tabakanın dayanımının 0,1-1,4 MPa (deformasyon hızına bağlı olarak) arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ancak yeni malzemelerin asfaltta kullanılmasıyla bu sorunun aşılabileceği ifade edilmektedir. Bu konu üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir. Diğer koşullarda herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

6. SONUÇLAR

Çalışmada balastsız üstyapıda asfalt ve beton taşıyıcı tabakalar ayrıntılı olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra asfalt malzemesinin demiryolu üstyapısında balast altı tabaka olarak kullanımı da ele alınmıştır. Hem balastsız hem de balastlı üstyapı sistemleri üzerinde yapılan incelemelerden şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Asfalt tabakanın kullanım tiplerinden ilki balast altı asfalt tabakadır. Bu tabakanın iki önemli özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki, asfalt tabakanın bakım ihtiyaçlarının çok az olmasıdır. Çünkü bu tabaka, balast altına gömülmesi ve çok az boşluk oranına sahip olması (%1-3) sebebiyle dış etkilerden çok az etkilenmektedir. Diğer özelliği ise alt balast tabakası yerine kullanılmasıyla üstyapı yüksekliğini önemli ölçüde azaltmasıdır. Bu sayede özellikle tünel, köprü gibi yapılarda maliyet önemli derecede azalmıştır. Bunun yanı sıra üstyapıda kullanılan malzeme sarfiyatı önlenmiş ayrıca zamandan da kazanç sağlanmıştır.

Nitekim birçok ülke, demiryolunda maliyeti azaltıcı önlem olarak asfalt tabakayı tercih etmektedir. Bu ülkelere örnek olarak İtalya ve Fransa verilebilir.

İtalya Demiryolları (Ferrovie dello stato) demiryolu altyapısında, çimento enjeksiyonlu balast tabaka yerine bitüm karışımlı bir malzeme kullanmaya karar vermiştir. Asfalt karışım seçilmesinin en önemli sebebi olarak uzun mesafeli nakliye maliyeti gösterilmiştir. Balast malzemesinin temini ve taşıma maliyetinin bitümlü karışımdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Fransa Demiryolları'nda asfalt taşıyıcı tabakayı test etmek için 3 km uzunluğunda bir hat yapmıştır. Bu hatta 50 cm'lik balast tabakası yerine 14 cm'lik asfalt tabaka kullanılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Bu sayede 36 cm yüksekliğinde balast tabakasının kullanımı engellenmiştir. Bu sistemin diğer hatlarda da kullanılması halinde, km başına 5000 m³ malzeme kullanımının önüne geçilebileceği belirtilmiştir.

Balastsız üstyapıda kullanılan asfalt taşıyıcı tabaka, asfaltın demiryolundaki diğer kullanım şeklidir. Çalışmada asfalt taşıyıcı tabaka ile beton taşıyıcı tabakanın detaylı karşılaştırmalarına yer verilmiştir.

Bu iki üstyapı tipi, üstyapı yüksekliği, bakım ihtiyacı, günlük inşa performansı, gürültü ve titreşim, işletme hızı ve dingil yükleri gibi kriterler dikkate alınarak teknik açıdan ve maliyet analizleri yapılarak ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Buradan hareketle elde edilen çıkarımlar ise şu şekildedir:

- Üstyapı yüksekliği dikkate alındığında; asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemlerinin ortalama üstyapı yükseklikleri 900-1000 mm arasında değişmekte iken, beton taşıyıcı tabaka kullanılan sistemlerin yükseklikleri Infundo gömülü sistem uygulamasında görüldüğü gibi 650 mm değerine kadar inmektedir. Bu uygulamalardan anlaşılabileceği üzere beton taşıyıcı tabakalı sistemler, asfalt taşıyıcı tabakaya göre daha düşük üstyapı yüksekliğine sahiptir. Buda üstyapı inşa maliyetlerini önemli derecede azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, gerektiğinde daha küçük kesitli köprü, tünel gibi sanat yapıları inşa edilebileceğinden dolayı olarak altyapı maliyetlerini de azaltmaktadır.

- Bakım ihtiyacı incelendiğinde; beton taşıyıcı tabakalı üstyapı sistemlerinin bakım ihtiyacı, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız hatlara göre daha azdır. Üstyapı sistemlerinin 5 yıllık ölçümler sonucundaki geometrik kaliteleri baz alınarak Q bakım kalite değeri (0-100 arasında bir değer olup, hattın Q değeri 100'ü aştığında bakıma ihtiyaç duyacağı belirlenmiştir) tespit edilmiş ve bu değerlere göre, Rheda Berlin sistemi, Q bakım ihtiyacı değeri 6 ile en az bakıma ihtiyaç duyan sistem olmuştur. ATD, GETRAC gibi sistemler için bu değer 20 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. FFYS ve SATO asfalt taşıyıcı tabakalı hatlar ise Q bakım ihtiyacı değeri 35 ile en çok bakıma ihtiyaç duyan sistemler olmuştur. Buradan, beton taşıyıcı tabakalı üstyapı sistemlerinin bakıma ihtiyaç duymaksızın kullanım ömürlerinin, ortalama bir asfalt taşıyıcı tabakalı sistemden 2 kat daha fazla olduğu görülmüştür.

- Günlük inşa performansına göre bir karşılaştırma yapıldığında ise sonuç şöyledir. Asfalt taşıyıcı tabakalı sistemler (FFYS, SATO vb.) günlük inşa performansı 350 m ile en iyi olan sistemlerdir. Bunun yanı sıra Rheda Klasik ve Rheda Berlin tipi balastsız üstyapılar ise 170 m ile günlük performansı en kötü olan sistemlerdir. Asfalt tabakalı sistemlerin inşa hızının yüksek olmasının en önemli sebebi, asfalt tabakanın

serildikten kısa bir süre sonra kullanılabilmesi, beton tabakadaki gibi sertleşme süreci geçirmemesidir.

- Gürültü ve titreşim ele alındığında ise sonuç şöyledir. Asfalt taşıyıcı tabakalı sistemler, beton tabakaya göre gürültü ve titreşimi daha iyi sönümlemektedir. Bu konu üzerine yapılan çalışmaların sonucuna göre; içeriği kauçuk katkılarla zenginleştirilmiş asfalt tabaka, beton tabakaya göre tren geçişi esnasında üstyapıda oluşan maksimum ivme değerini % 9,3, ortalama ivme değerini ise % 3,6 daha fazla azaltmaktadır. Özellikle şehir içinde çok daha büyük bir sorun olan gürültü ve titreşim, asfalt taşıyıcı tabaka kullanımıyla, beton taşıyıcı tabakalı kullanıma göre daha iyi bir şekilde önlenabilmektedir.

- İşletme hızları açısından iki sistem arasında ciddi bir fark bulunmamaktadır. Balastsız üstyapı sistemlerinde hem asfalt taşıyıcı tabakalı hem de beton taşıyıcı tabakalı uygulamalar hafif raylı sistemlerden yüksek hızlı hatlara kadar geniş bir kategoride kullanılabilir.

- Öte yandan dingil yükleri açısından bir karşılaştırma yapıldığında; karayolunda dingil yükü 100 kN olan tipik bir ağır vasıttan asfalt tabakaya gelen standart gerilme $0,7 \text{ N/mm}^2$ iken, demiryolunda dingil yükü 200 kN olan bir trenden, traversli asfalt taşıyıcı tabakaya gelen gerilmeler $0,3 \text{ N/mm}^2$ mertebesinde. Dolayısıyla, asfaltın balastsız üstyapıda alternatif bir sistem olmasında bir sakınca görülmemektedir.

- Ekonomik karşılaştırmada ise asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapının inşaa maliyetleri açısından, beton taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapıdan yaklaşık olarak %25 daha maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu maliyet farkının %72'sini travers bedeli oluşturmaktadır. Buradan anlaşılıyor ki, asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sistemleri traverssiz olarak uygulanabilirse, bu maliyet farkının azaltılabileceği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla bu yeni uygulama, gelişmeye çok açık bir konumda olup, üzerinde yapılan çalışmaların devam etmesi halinde, bu sistemin daha ekonomik hale gelebileceği görülmüştür.

Son olarak bu çalışmanın devamı niteliğinde, traverssiz asfalt taşıyıcı tabakalı balastsız üstyapı sisteminin teknik ve ekonomik yönden incelenmesi ve diğer üstyapı tipleri ile karşılaştırılması konusu önerilebilir.

KAYNAKLAR

- AFTES** (2013). Rail tracks and trackbeds in tunnels, French Tunneling and Underground Space Association.
- Arlı, V.** (2002). Balastlı ve balastsız üstyapıların ekonomik yönden karşılaştırılması, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Burger, F.A., Van de Ven, M.F.C., Muller, J., Jenkins, K.J.** (2001). Rheology of polymer modified bitümen: A comparative study of three binders and three binder/filler systems, *20th South African Transport Conference*, Güney Afrika, 16-20 Temmuz.
- Bilow, D.N., Paradise, S.J.** (2008). Inspection, Maintenance, and Repair of PaCT Canadian Pacific Rogers Pass Tunnels, British Columbia, Kanada.
- Dieleman, L., Fumey, M., Robinet, A., Ramondenc, P., Martin, D.** (2008). Experimentation of a track section without ballast on the new line of East European TGV, *8th World Congress Railway Research*, Seul, Güney Kore, 18-22 Mayıs.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA).** (2014). Asphalt in railway tracks Version 2014, Brüksel, Belçika.
- Ekim, O.** (2007). Yüksek hızlı demiryolları için geometrik özellikler ve altyapı, (yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Enoekl, V., Nübel, K.** (2006). On the track with Zublin, *Rail Technical Review*, Vol. 46, ISSN 0079-9548, Hamburg, Almanya.
- Esveld, C.** (1999). Slab track: A competitive solution. Rail International, Schienen der Welt.
- Freudenstein, S.** (2006). Rheda 2000 the ballastless track system for highspeed rail traffic of Rail.One, *Rail Technical Review*, Vol. 46, ISSN 0079-9548, Hamburg, Almanya.
- Güngör, G., Orhan, F., Kaşak, S.** (2007). Bitümlü sıcak karışım aşınma tabakalarının performanslarının ileri deneyler ile belirlenmesi, *5.Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 18-19 Kasım.
- Huurman, M., Markine, V.L., Man, A.P.** (2003). Design calculations for embedded rail in asphalt, *Transportation Research Record*, ISSN: 0361-1981, Vol. 1825, sayfa 28-37.
- Innotrack.** (2008). Design and manufacture of embedded rail slab track components, Integrated Project, Project No: TIP5-CT-2006-031415, 12 Haziran.
- Kimençe, B.** (2010). Malzeme bilgisi ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye.
- Lechner, B.** (2011). Railway concrete pavements, *2nd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements*, Florianopolis, Brezilya, 2-4 Kasım.

- Lichtberger, B.** (2005). *Track compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*. Eurail Press, Hamburg, Almanya.
- Mazlum, M.S.** (2014). Ekonomik ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların kazınarak bitümlü sıcak karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması, (yüksek lisans tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Michas, G.** (2012). Slab track systems for high-Speed railways, Master Degree Project, Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç.
- Milli Eğitim Bakanlığı** (2008). Raylı sistemler teknolojisi: Raylar ve bağlantılar, Ankara, Türkiye.
- Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic** (2012). Railway structures 2: Rail traffic and environment, High Education Development Fund No. Project 1923/2012/F1/b, Prag, Çek Cumhuriyeti.
- Moderen, O.** (2010). Balastsız demiryolu üstyapısının yapısal modellenmesi ve analizi, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Momoya, Y.** (2007). New railway roadbed design, *Railway Technology Avalanche* No. 20, sayfa 118, Tokyo, Japonya, 26 Aralık.
- Mörscher, J.** (1999). Slab track roadbeds in Germany, Arema, DB Netz AG, Chicago, A.B.D, 13-15 Eylül.
- Namlı, R.** (2011). SBS türü polimerlerin sıcak asfalt karışımında katkı olarak kullanılması, *e-Journal of New World Sciences Academy 2011*, Cilt 6, No: 2, Makale Numarası: 1A0185, Elazığ, Türkiye.
- Onnori, C.** (2007). *Mechanical behaviour of traditional and antivibration railway tracks with recycled rubber materials*, (doktora tezi), University of Naples Federico II, Napoli, İtalya.
- Özalp, O.** (2008). Kentiçi raylı sistemlerin üstyapısı ve dinamik analizi (yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, E.A., Çubuk, M.K.** (2004). Karayolu esnek üstyapı tasarımında yeni bir yöntem: Yüksek performanslı asfalt kaplama, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 19, No 2, sayfa 175-184, Ankara, Türkiye.
- Öztürk, Z.** (2014). Demiryolu üstyapısında özel konular doktora ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, Z., Arlı, V.** (2009). *Demiryolu Mühendisliği*, Sembol Basım Baskı Sistemleri Matbaa ve Yayıncılık, ISBN 978-605-60958.
- Öztürk, Z., Öztürk T.** (2010). İstanbul için kara ulaşımı üstyapı maliyetlerine bir yaklaşım, *İMO Teknik Dergi*, 2010, sayfa 5059-5064, Yazı 330.
- Öztürk, Z., Öztürk, T.** (2005). Kentiçi demiryolunda üstyapı tasarımları ve uygulanma esasları, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, sayfa 372-383, Antalya, Türkiye, 22-24 Eylül.

- Popović, Z., Milosavljević, L., Lazarević, L.** (2012). Noise reduction in railway infrastructure, *3rd International Scientific and Professional Conference CORRIDOR 10*, Belgrad, Srbistan, 25 Ekim.
- Quante, F.** (2001). Innovative track systems: Criteria for their selection, *Innovations for a cost effective Railway Track*, sayfa 17-18, Karlsruhe, Almanya.
- Rhomberg, H.** (2009). Modern superstructures for railway high speed lines types, characteristics and installation technology, *High Speed Rail 2009*, Washington DC, A.B.D., 22-23 Ekim.
- Rose J.G.** (2013). Selected in track Application and performances of hot-mix asphalt trackbeds”, *Joint Rail Conference 2013*, Knoxville, Tennessee, A.B.D., 15-18 Nisan.
- Rose J.G., Teixeira P.F., Veit P.** (2011). Internatioanal design practices, aplications and performances of asphalt/bituminous railway trackbeds, *Railway Geotechnical Engineering International Symposium GeoRail 2011*.
- Schrodi, R.** (2010). Hidrolojik bağlı taşıyıcı tabakanın yapımı için uygunluk muayenesi raporu, Biberach University, Biberach, Almanya.
- Sunaga, M., Ando, K., Aoki, H., Haga, O.** (2001). Development of slab tracks for Hokoriku Shinkansen Line, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 42, No. 1.
- Şahin, O.** (2011). Demiryolunda hat rijitliğinin ve etkilerinin incelenmesi, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Tahta, M.** (2013). Ilık karışım asfalt, (yüksek lisans tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
- Takai, H.** (2007). 40 years experiences of the slab track on Japanese high speed lines, *1th ECS Slab Track Conference*, Bilbao, İspanya, 17-19 Ocak.
- UIC** (2011). State of the art review of mitigation measures on track, International Union Railway - Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project (RIVAS), Document Code. SCP0-GA-2010-265754, Paris, Fransa.
- UIC** (2002). Feasibility study: Balastless track, International Union Railway Infrastructure Comission – Civil Engineering Group Report, Paris, Fransa.
- Won, S.S., Lee, J.W., Lee S.H., Lyu T.J.** (2012). Overseas construction case review and research on benefit and disadvantages of asphalt track, Kore Demiryolları Derneği Bildiri Kitapçığı.
- Zeng, X.D.** (2005). Rubber-Modified asphalt concrete for high-speed railway roadbeds, Final Report for High-Speed Rail IDEA (Innovations Deserving Explatory Analysis Programs) Project 40, sayfa 12-13.
- Url-1** <<http://max-boegl.de/en/download/>>, alındığı tarih: 13.02.2015.
- Url-2** <http://www.mabatrack.com/cxdata/media/produkte/files/prospekt-oebb-porr-ff-system-ref317b_englisch_datei_12.pdf>, alındığı tarih: 13.02.2015.
- Url-3** <<http://www.eurotunnelgroup.com/uk/the-channel-tunnel/infrastructure/>>, alındığı tarih: 06.02.2015.

- Url-4** <http://www.vigier-rail.ch/fileadmin/media/vigier-rail/downloads/Dokumentationen/Low_Vibration_Track_LVT_English.pdf>, alındığı tarih: 06.02.2015.
- Url-5** <<http://crash.lo9.de/pdfs/mag/heitkamp.pdf>>, alındığı tarih: 04.02.2015.
- Url-6** <http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Modulares_Maschinenkonzept_spielt_seine_Vorteile_aus_1312110.html>, alındığı tarih: 03.03.2015.

EKLER

- Ek A:** Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Beton Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı Malzeme Keşif Özeti
- Ek B:** Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Beton Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti
- Ek C:** Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı Malzeme Keşif Özeti
- Ek D:** Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti

**Ek A Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Beton Taşıyıcı Tabakalı Balastsız
Üstyapı Malzeme Keşif Özeti**

No	Yapılacak işin cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	S.49.430. kg/m'lik 18.00 m boyda Ray normal 154 adet 2740.8 m	ton	137,02	550	75.361,000
2	S.49.430. kg/m'lik 18.00 m boyda Ray (Mantarı sertleştirilmiş) 248 adet 4427,64 m	ton	225,203	550	123.861,65
3	Cebire (804 adet)	ton	7767	1065	8271,86
4	Cebire bulonu (1608 adet)	ton	0,852	1160	988,32
5	Tek katlı rondela (1608 adet)	ton	0,106	3000	318,00
6	Basit makas 2 sağ, 2 sol, 1/9'luk R= 300 m 33,23 m boyunda	adet	4	34000	136.000,00
7	Ray kaynağı normal 160 / sert 250	adet	410	44	18.040,00
8	Ray kontray için (mevcut) 33,4 kg/m'lik 3740 m	ton	125	550	68.750,00
9	İzole cebire (kupon raylı) 4m'lik	adet	22	685	15.070,00
10	İşaretleme	ton	0,2	5400	1.080,00
11	Satın alınan ve beton pompasıyla basılan beton (C 25 betonu)	m ³	3000	46,30	138.900,00
12	Düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı	m ²	3500	5,18	18.130,00
13	Vossloh sistem 336 elastik bağlantı malzemesi seti	adet	12200	50	610.000,00
	Genel Toplam				1.214.770,83

Ek B Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Beton Taşıyıcı Tabakalı Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti

No	Yapılacak işin cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	Aplikasyon	m	3584	0,461	1.652,22
2	Yol malzemesinin depolara taşınması, boşaltılması, istifi ve muhafazası	ton	690	11,21	7.734,90
3	Depodaki yol malzemesinin poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	ton	690	5,825	4.019,25
4	Poz mahalline getirilen yol malzemesinin hat kenarına taşınması ve rayların markalanması	ton	3584	2,555	9.159,11
5	UIC S.49 kg/m'lik ray ile doğrudan tespitli yol döşenmesi	M	3584	16,96	60.784,64
6	UIC S.49 kg/m'lik raydan yapılması ahşap traversli makasın depoda indirilmesi istifi ve muhafazası	adet	4	194,443	777,77
7	Depodaki S.49 kg/m'lik raydan yapılmış makasın poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	adet	4	326,406	1.305,62
8	UIC S.49 kg/m'lik raydan yapılmış makasın doğrudan tespitli olarak montajı	adet	4	1078,283	4.313,3
9	Alimino termit ray ek kaynağı yapılması	adet	410	24,216	9.928,56
10	İzole kupon raylı cebire montajı	adet	22	9,436	207,592
11	Kontrayların bağlanması	m	1870	2,246	4.200,02
12	Rayların taşlanması	m	3584	4,6	16.486,40
13	İşaretlerin konması	m	3584	0,533	1.910,27
14	Yolun bir tarafa kaydırılması	m	375	8,06	3.022,50
15	Satın alınan ve beton pompası ile basılan C25 betonunun dökülmesi (Y.16.050/05)	m ³	2940	2,64	7.761,60
16	Düz yüzeyli beton ve betonarme kalıbı yapılması	m ²	3500	2,88	10.080,00
17	Çelik hasırın (nervürlü) yerine konulması	ton	29	681,49	19.763,21
18	Çapı 8-12 mm'lik ince beton çelik çubuğunun (nervürlü) projesine göre bükülmesi ve yerine konulması	ton	40	712,22	28.488,80

Ek B (devam) Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Beton Taşıyıcı Tabakalı
Balastsız Üstyapı İşçilik Keşif Özeti

19	Çapı 14-26 mm'lik kalın beton çelik çubuğunun (nervürlü) projesine göre ve bükülmesi yerine konulması (23.015)	ton	60	891,32	53.479,20
20	Çeşitli demir işleri yapılması	kg	7920	2,41	19.087,20
21	Poz bölgesinin inşaat atıklarından temizlenmesi	m	3584	0,362	1.297,41
	Genel Toplam				257.697,97

**Ek C Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Balastsız
Üstyapı Malzeme Keşif Özeti**

No	Yapılacak işin cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	S.49.430. kg/m'lik 18.00 m boyda Ray normal 154 adet 2740.8 m	ton	137,02	550	75.361,000
2	S.49.430. kg/m'lik 18.00 m boyda Ray (Mantarı sertleştirilmiş) 248 adet 4427,64 m	ton	225,203	550	123.861,65
3	Cebire (804 adet)	ton	7767	1065	8271,86
4	Cebire bulonu (1608 adet)	ton	0,852	1160	988,32
5	Tek katlı rondela (1608 adet)	ton	0,106	3000	318,00
6	Basit makas 2 sağ, 2 sol, 1/9'luk R= 300 m 33,23 m boyunda	adet	4	34000	136.000,00
7	Ray kaynağı normal 160 / sert 250	adet	410	44	18.040,00
8	Ray kontray için (mevcut) 33,4 kg/m'lik 3740 m	ton	125	550	68.750,00
9	İzole cebire (kupon raylı) 4m'lik	adet	22	685	15.070,00
10	İşaretleme	ton	0,2	5400	1.080,00
11	KGM/4300/PMB pozlu polimer modifiye bitümlü asfalt	m ²	9.318,4	24,23	225.784,83
12	B320 W54 tipi monoblok travers	adet	5974	45	268.830,00
13	Vossloh sistem 336 elastik bağlantı malzemesi seti	adet	12200	50	610.000,00
	Genel Toplam				1.552.355,66

**Ek D Yenibosna-Havaalanı Hafif Metro İnşaatı Asfalt Taşıyıcı Tabakalı Balastsız
Üstyapı İşçilik Keşif Özeti**

No	Yapılacak işin cinsi	Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (\$)	Tutarı (\$)
1	Aplikasyon	m	3584	0,461	1.652,22
2	Yol malzemesinin depolara taşınması, boşaltılması, istifi ve muhafazası	ton	690	11,21	7.734,90
3	Depodaki yol malzemesinin poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	ton	690	5,825	4.019,25
4	Poz mahalline getirilen yol malzemesinin hat kenarına taşınması ve rayların markalanması	ton	3584	2,555	9.159,11
5	UIC S.49 kg/m'lik ray ile doğrudan tespitli yol döşenmesi	M	3584	16,96	60.784,64
6	UIC S.49 kg/m'lik raydan yapılması ahşap traversli makasın depoda indirilmesi istifi ve muhafazası	adet	4	194,443	777,77
7	Depodaki S.49 kg/m'lik raydan yapılmış makasın poz mahalline nakli için yüklenmesi ve poz mahallinde boşaltılması	adet	4	326,406	1.305,62
8	UIC S.49 kg/m'lik raydan yapılmış makasın doğrudan tespitli olarak montajı	adet	4	1078,283	4.313,3
9	Alimino termit ray ek kaynağı yapılması	adet	410	24,216	9.928,56
10	İzole kupon raylı cebire montajı	adet	22	9,436	207,592
11	Kontrayların bağlanması	m	1870	2,246	4.200,02
12	Rayların taşlanması	m	3584	4,6	16.486,40
13	İşaretlerin konması	m	3584	0,533	1.910,27
14	Yolun bir tarafa kaydırılması	m	375	8,06	3.022,50
15	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m2 asfalt betonu aşınma tabakası yapılması	m ²	9.318,4	2,55	23.761,92
16	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m2 asfalt betonu binder tabakası yapılması	m ²	9.318,4	3,37	31.403,01
17	9 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (2 tabaka)	m ²	18.636,80	3,91	72.869,88
18	Asfalt malzemesinin nakliye bedeli	m ²	9.318,4	2,18	20.314,11
19	Çeşitli demir işleri yapılması	kg	7920	2,41	19.087,20
20	Poz bölgesinin inşaat atıklarından temizlenmesi	m	3584	0,362	1.297,41
	Genel Toplam				294.235,68

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Hüseyin KÖSE

E-posta: hsynkose42@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi- İnşaat Mühendisliği Bölümü (2013)

Mesleki Deneyim

Araştırma Görevlisi – Selçuk Üniversitesi (2015 - halen)