

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLUNDA BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN HESABI VE LVT İÇİN
ÖRNEK HATTA FARKLI ARAÇ İŞLETİMLERİ İÇİN PARAMETRİK
İRDELEMELER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mevlüt MERT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Mayıs 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLUNDA BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN HESABI VE LVT İÇİN
ÖRNEK HATTA FARKLI ARAÇ İŞLETİMLERİ İÇİN PARAMETRİK
İRDELEMELER**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mevlüt MERT
(501111438)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

Mayıs 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111438 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mevlüt MERT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DEMİRYOLUNDA BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN HESABI VE LVT İÇİN ÖRNEK HATTA FARKLI ARAÇ İŞLETİMLERİ İÇİN PARAMETRİK İRDELEMELER”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde basarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Pelin ALPKÖKİN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgisi ile çok değerli katkı sağlayan kıymetli hocam Sn. Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e, yüksek lisansa başlamamda bana destek olan lisans hocalarım Sn. Prof. Dr. Serap KAHRAMAN'a, Sn. Prof. Dr. Arif Ş. KAYALAR'a ve Sn. Doç. Dr. Serhan TANYEL'e, eğitim süresince yardımlarını esirgemeyen Marmaray Bölge Müdürü Sn. Dr. Haluk İbrahim ÖZMEN'e, Bölge Müd. Yrd. Sn. Ümit ÇELİK'e, tezin yazımı sırasında bana yardımcı olan kardeşlerime ve her türlü desteği sağlayan anne ve babama, ayrıca emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Mevlüt MERT
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. BALASTSIZ ÜSTYAPILAR	3
2.1 Demiryolu.....	3
2.2 Demiryolunu Oluşturan Tabakalar	4
2.2.1 Formasyon tabakası.....	5
2.2.2 Dona karşı koruyucu tabaka.....	7
2.2.2.1 Homojen zeminde donmada etkili derinliğin belirlenmesi	7
2.2.3 Geotekstil tabakası	8
2.3 Balastsız Üstyapı	9
2.4 Balastsız Üstyapı Sistemleri	11
2.4.1 Traversli sistemler	11
2.4.1.1 Betona gömülü traversli sistemler.....	11
2.4.1.2 Asfalt-beton yatak üstüne tespitli traversli sistemler	19
2.4.2 Traverssiz sistemler.....	26
2.4.2.1 Prefabrik beton plaklı üstyapı sistemleri.....	26
2.4.2.2 Tek parça yerinde döküm betonarme üstyapılar	31
2.4.3 Sürekli desteklenmiş raylı sistemler	35
2.4.3.1 Gömülü raylı sistemler	35
2.4.3.2 Bağlantı elemanlı raylı sistemler.....	37
2.4.4 Balastsız üstyapıların avantajları	39
3. YERİNDE DÖKME BETON ÜSTYAPI ELEMANLARI.....	41
3.1 Raylar	41
3.1.1 Ray tipleri.....	43
3.1.1.1 Oluklu raylar	43
3.1.1.2 Çift mantarlı raylar	43
3.1.1.3 Tek mantarlı raylar (Vinyol tipi).....	44
3.1.2 Raylarda bulunması gereken özellikler	45
3.2 Bağlantı Elemanları	45
3.2.1 Rijit bağlantı sistemi	46
3.2.2 Elastik bağlantı.....	47
3.3 Traversler	49
3.3.1 Ahşap travers.....	50
3.3.2 Çelik traversler	52
3.3.3 Beton traversler	54
3.3.3.1 Beton traverslerin özellikleri.....	54

3.3.3.2 Monoblok beton traversler	55
3.3.3.3 Çift bloklu (ikiz blok) beton traversler	57
3.4 Betonarme Kiriş (Plinth)	57
4. LVT ÜSTYAPI TİPİ VE KULLANILDIĞI HAT	59
4.1 LVT Üstyapısı Bileşenleri	59
4.1.1 Kauçuk bot (çizme)	59
4.1.2 Blok pedi (elastik selet)	59
4.1.3 Betonarme blok	60
4.2 LVT Üstyapısı Özellikleri	61
4.3 LVT Üstyapısının Kullanıldığı Örnek Hat	62
5. LVT İÇİN DEMİRYOLU ÜSTYAPISI HESABI VE ÖRNEK HATTA PARAMETRİK İRDELEMESİ.....	67
5.1 Üstyapı Tasarımı	67
5.1.1 Üstyapıya etkiyen kuvvetler	68
5.1.1.1 Düşey kuvvetler	68
5.1.1.2 Yatay kuvvetler	69
5.1.1.3 Diğer kuvvetler	70
5.1.1.4 Sıcaklık gerilmeleri	71
5.1.2 Yatak katsayısı	71
5.1.3 Dinamik etki katsayısı	74
5.2 Parametrik İrdeleme	75
5.2.1 Yük treni işletmesi durumu için yapısal analiz	76
5.2.1.1 Yükleme durumu	76
5.2.1.2 Modelleme ve statik analiz	77
5.2.1.3 Betonarme hesap	80
5.2.2 Yolcu treni işletmesi durumu için yapısal analiz	83
5.2.2.1 Modelleme ve statik analiz	84
5.2.2.2 Betonarme hesap	84
5.2.3 Hızlı tren işletmesi durumu için yapısal analiz	86
5.2.3.1 Modelleme ve statik analiz	87
5.2.3.2 Betonarme hesap	88
6. SONUÇLAR	91
KAYNAKÇA	93
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

ABL	: Asfalt Taşıma Tabakası
APTA	: Amerikan Toplu Ulaşım Kurumu
AREMA	: Amerika Demiryolu Mühendisliği ve Bakımı Kurumu
ATD	: Doğrudan Tespitli Asfalt Demiryolu Üstyapı (Asphalt Tragschicht mit Direktauflagerung)
AYGM	: Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (eski DLH)
BBERS	: Balfour Beatty Gömülü Raylı Sistemi
BES	: Tekil Mesnetli Beton Taşıma Tabakası (Betontragschicht mit Einzelstützpunkten)
BS	: İngiliz standartları
BTD	: Direk Mesnetli Beton Taşıma Tabakası Betontragschicht Mit Direktauflagerung)
BTE	: Tekil Mesnet Noktalı Beton Taşıma Tabakası (Betontragschicht Mit Einzelstützpunkten)
CBL	: Beton Taşıma Tabakası
EN	: Avrupa Standartları
FFC	: Crailshein Rijit Döşeme Üstyapı (Feste Fahrbahn Crailshein
FPL	: Donmaya Karşı Koruma Tabakası
FST	: Yüzer Döşemeli Hat
FTA	: Birleşik Ulaştırma Dairesi (Federal Transit Administration)
HBL	: Hidrolik Bağlayıcı Katman
LVT	: Düşük Titreşimli Hat (Low Vibration Track)
LVT HA	: Yüksek Sönümlü Düşük Titreşimli Hat (LVT High Attenuation)
PACT	: Yükseltilmiş Beton Hat (Paved Concrete Track)
RF	: Döndürme Kuvveti (Rolling Force)
SATO	: Asfalt Üstyapı Çalışma Grubu (Studiengesellschaft Asphalt Oberbrau)
SBV	: Bitüm Karışıklı Dökülen Travers (Schwellen Mit Bitumenverguss)
SFF	: Vibrasyonu Sönümlenmiş Rijit Üstyapı (Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn)
TCDD	: T.C. Devlet Demiryolları
UIC	: Uluslararası Demiryolları Birliği
UKR	: Uzun Kaynaklı Ray

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Zemin kalite sınıfları (UIC Code 719R).....	6
Tablo 2.2: Formasyon tabakasının zemin kalitesine göre kalınlığı (UIC)	7
Tablo 2.3: Balastsız üstyapı sistemleri sınıflandırması.....	11
Tablo 3.1: Rayların mekanik özellikleri.....	42
Tablo 4.1: FTA kriterlerine göre özel binalar için gürültü ve titreşim seviyeleri.	64
Tablo 4.2: APTA kriterlerine göre özel binalar için gürültü ve titreşim seviyeleri... ..	65
Tablo 5.1: “S” katsayısı değeri.....	75
Tablo 5.2: Betonarme hesap için karakteristik değerler.....	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Geleneksel demiryolu planı	3
Şekil 2.2: Demiryolu boy kesiti	3
Şekil 2.3: Demiryolu enkesiti.....	4
Şekil 2.4: Demiryolu tabakaları sınıflandırması	4
Şekil 2.5: Don indeksi grafiği	8
Şekil 2.6: Klasik Rheda üstyapı kesiti	12
Şekil 2.7: 1972 yılında Rheda istasyonunda uygulanan üstyapı.....	12
Şekil 2.8:Rheda-2000 inşaat aşamaları (beton öncesi).	13
Şekil 2.9: Rheda-2000 inşaat aşamaları (beton sonrası).	14
Şekil 2.10: Rheda sistem gelişim aşamaları.....	15
Şekil 2.11: İkiz blok travesli Züblin üstyapı sistemi	16
Şekil 2.12: Monoblok travesli Züblin üstyapı sistemi.	16
Şekil 2.13: Heitkamp üstyapı sistemi tipik kesiti.....	17
Şekil 2.14: LVT üstyapı sistemi bileşenleri	18
Şekil 2.15:Stedef üstyapı enkesiti	19
Şekil 2.16: Walo üstyapı enkesiti.....	19
Şekil 2.17: Sonneville LVT üstyapı enkesiti.....	19
Şekil 2.18: BTD V2 üstyapı görüntüsü	20
Şekil 2.19: BTD V2 tipi hat travers dübelleri	21
Şekil 2.20: BTD-V1 üstyapı kesiti	21
Şekil 2.21: BTD-V2 üstyapı kesiti	21
Şekil 2.22: ATD üstyapı enkesiti	22
Şekil 2.23: SATO sistem enkesiti	22
Şekil 2.24: FFYS üstyapı enkesiti.....	23
Şekil 2.25: FFBS-ATS-SATO üstyapı enkesiti	23
Şekil 2.26: Getrac A1 üstyapı enkesiti.....	24
Şekil 2.27: Getrac A3 üstyapı enkesiti.....	25
Şekil 2.28: Getrac sistem beton ankraj elemanı	25
Şekil 2.29: Walter üstyapı enkesiti	26
Şekil 2.30: Shinkansen üstyapı	27
Şekil 2.31: Shinkansen betnarme plak	27
Şekil 2.32: Bögl üstyapı betonarme plak	28
Şekil 2.33: ÖBB-Porr üstyapı enkesit ve plak görüntüsü	29
Şekil 2.34: IPA üstyapı plan ve enkesiti	30
Şekil 2.35: BES üstyapısı sistemi enkesiti	31
Şekil 2.36: BES üstyapı sistemi uygulama ve enkesit	32
Şekil 2.37: Lawn track/RASENGLEIS üstyapı enkesiti.....	33
Şekil 2.38: BTE üstyapı enkesiti	33
Şekil 2.39: FCC üstyapı enkesiti.....	34
Şekil 2.40: Hochtief/SHRECK-MIEVES/LONGO üstyapı enkesiti	34

Şekil 2.41: PACT üstyapı sistemi	35
Şekil 2.42: INFUNDO-Edilon üstyapı enkesiti.....	35
Şekil 2.43: BBERS üstyapı enkesiti	36
Şekil 2.44: Deck Track üstyapı sistemi	36
Şekil 2.45: Cocon üstyapı.....	37
Şekil 2.46: ERL üstyapı sistemi.....	37
Şekil 2.47: SFF üstyapı kesiti.....	38
Şekil 2.48: Saargummi üstyapı kesiti	38
Şekil 2.49: KES üstyapı	38
Şekil 3.1: Rayın kısımları.....	42
Şekil 3.2: Ray tipleri, a) Oluklu ray b) Çift mantarlı ray c) Vinyol tipi ray.....	43
Şekil 3.3: Vinyol tipi UIC60 (60E1) ray kesiti.	44
Şekil 3.4: Oluklu ray kesiti.....	45
Şekil 3.5: N tipi rijit bağlantı a) Kesit b) Plan görünüşü.....	46
Şekil 3.6: Seletli rijit bağlantı.....	47
Şekil 3.7: Seletsiz rijit bağlantılar	47
Şekil 3.8: Nabla bağlantı elemanı (civatalı elastik bağlantı elemanı)	47
Şekil 3.9: Pandrol bağlantı elemanı (yaylı bağlantı)	48
Şekil 3.10: Vossloh bağlantı elemanı (yaylı bağlantı)	49
Şekil 3.11: Ahşap travers ölçüleri	50
Şekil 3.12: Ahşap travers koruma yöntemi a) S demiri b) Delikli plaka	51
Şekil 3.13: Çelik travers (a) enkesiti (b) uygulaması	52
Şekil 3.14: Y tipi çelik travers.....	53
Şekil 3.15: B70 tipi monoblok beton travers.....	55
Şekil 3.16: B70 tipi bir monoblok beton travers ölçüleri.....	55
Şekil 3.17: Artgermeli travers üretimi.....	56
Şekil 3.18: B440 (U31) ikiz blok travers	57
Şekil 3.19: Tünel içinde plinth betonlu üstyapı.....	58
Şekil 3.20: Plinth betonlu üstyapı uygulaması	58
Şekil 4.1: LVT Standart ve LVT HA blok kesitleri	60
Şekil 4.2: Makas bölgesinde LVT bloklar	60
Şekil 4.3: LVT Trafik sistemi	61
Şekil 4.4: İstanbul'da türlere göre ulaşım oranları	62
Şekil 4.5: Sultan Abdulmecid tarafından hazırlatılan tüp geçit projesi (1860).....	63
Şekil 4.6: Sultan 2. Abdulhamid tarafından hazırlatılan proje (1902)	63
Şekil 4.7: Tünel içinde LVT üstyapı inşaatı (beton döküm öncesi).....	64
Şekil 5.1: Üstyapı yük aktarma prensibi	67
Şekil 5.2: Üstyapı dinamik modelleme	68
Şekil 5.3: Eşdeğer tabaka teorisi şeması	73
Şekil 5.4: Yük trenleri için yükleme modeli (LM 71).....	77
Şekil 5.5: LVT üstyapı analiz programı için modelleme şeması.	79
Şekil 5.6: LVT sistem SAP2000 model görüntüsü.	79
Şekil 5.7: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).....	79
Şekil 5.8: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).	80
Şekil 5.9: Normal bir hatta LVT sistem tipik betonarme kesiti	81
Şekil 5.10: Yolcu treni yükleme modeli örneği.	83
Şekil 5.11: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).....	84
Şekil 5.12: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).	84
Şekil 5.13: Hızlı tren için yükleme durumu örneği.....	87
Şekil 5.14: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).....	88

Şekil 5.15: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).....	88
Şekil 5.16: Farklı zemin durumu için boyuna doğrultu moment diyagramı.	90

DEMİRYOLUNDA BALASTSIZ ÜSTYAPILARIN HESABI VE LVT İÇİN ÖRNEK HATTA FARKLI ARAÇ İŞLETİMLERİ İÇİN PARAMETRİK İRDELEMELER

ÖZET

Raylı sistemlerin çıkış noktası oldukça eskiye dayanmaktadır. Çok eski tarihlerde insanların ağır yüklerin taşınmasında bugünkü raylı sistemlere benzer şekilde taşımacılık yaptığı bilinmektedir. Günümüze gelinceye kadar raylı sistemde önemli gelişme sağlanmıştır. Motorlu araçların ortaya çıkışı ile birlikte sanayileşme ve hızlı nüfus artışı raylı sistemlere olan ihtiyacı gün geçtikçe artırmış ve modern demiryolları kurulmuştur. Bugün maglev trenlerle 500 km/h hızın üstüne çıkılmış, ancak maglev trenler henüz yaygınlaşmamıştır. Bilinen en yüksek hızda (max. 430 km/sa) işletme yapan tek maglev tren hattı Çin’de yolcu taşımada kullanılmaktadır. Klasik demiryolu araçlarının hızı ise bugün 300 km/h’in üstüne çıkmış ve yolcu taşımacılığında önemli bir paya sahip olmuştur. Bütün bu gelişmeler demiryollarının insan hayatındaki yerini ve önemini artırmaktadır. Artan talebin karşılanmasına yönelik birçok çalışma yapılmış ve bunun sonucunda çeşitli rijit üstyapı tipleri ortaya çıkmıştır. Bunların neticesinde hem insan hayatının güvenliği hem de uzun süre bozulmadan stabilitesini koruması ve uygun maliyetli olabilmesi açısından demiryolu üstyapı hesaplamaları önem kazanmıştır.

Bu çalışmamızda 2. bölümde balastsız üstyapının avantajları anlatılmış ve dünyada kullanılan rijit üstyapı tipleri tanıtılmış ve üstyapı enkesitleri şekillerle açılanmıştır. 3. bölümde yerinde dökme üstyapıyı oluşturan raylar, bağlantı elemanları, traversler ve betonarme plaklar incelenmiş ve bu elemanlara ait dünyada kullanılan türler sınıflandırılarak anlatılmış ve teknik özellikleri, olumlu ve olumsuz yönleri hakkında bilgiler verilmiştir. 4. bölümde ise LVT üstyapısı ve bileşenleri daha detaylı bir şekilde açıklanarak kullanıldığı hat kısaca tanıtılmış, LVT sistemin seçilmesinde öne çıkan titreşim ve gürültü önlemlerine değinilmiştir. 5. bölümde; üstyapı boyutlandırılmasında kullanılan parametreler ve hesaplamaları anlatılmış, rijit üstyapı hesaplamasına örnek olarak LVT tipi üstyapının farklı araç işletim durumları için statik analizi yapılmış ve boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda üstyapıya etki eden parametrelerin değişmesi durumunda analiz ve hesaplamalara dair görüşler son bölümde belirtilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu üstyapısı, LVT, rijit üstyapı sistemleri, balastsız üstyapı statik analizi.

BALLASTLESS RAILWAY TRACK SYSTEMS DESIGN AND PARAMETRICAL STUDY FOR DIFFERENT TYPES OF VEHICLE OPERATION ON A SAMPLE LINE FOR LVT SYSTEM

SUMMARY

The origin of the railway systems is considerably old. In very old times, it is known that people were carrying heavy freights by the similar way in concept to railway transportation. From history to present day, there have been significant improvements in the rail system. With the industrial revolution and the appearance of motor vehicles together with the rapid population growth, the need of railway transportation gradually increased and that demands resulted in modern railway establishment. Today, maglev trains have been exceeded 500 km/h speed but this type of railway transportation is not in public use yet. Only one line of maglev train in China known in service carrying passengers with high-speed (maximum velocity is 430 km/h).

On the other hand, conventional rapid trains recently have reached over 300 km/h velocity. These rapid trains nowadays have significant share of transportation in the world. Thanks to all these developments, the railway transportation has been taking more important place in human life. To fulfill the increased demands, many types of railway systems have been implementing and more passengers have been benefiting from railway transportation day by day. Therefore, to provide a secure and comfortable transportation system concurrently with favorable cost, railway track design becomes more prominent.

In this study, 2nd chapter explains conventional railway and the layers of the railway track by giving technical properties. The layers that form the track superstructure are the formation, sub-ballast, ballast, geotextile, frost protection layer. Since the topic of this study is a ballastless track design, sub-ballast and ballast layers are not explained here. Add to this, brief information about sub-base soil condition is given. Besides, according to UIC Code, formation layer thickness has been shown by table depending on the different types of soil quality class.

Types of slab track systems used worldwide and their cross-section properties are also briefly shown together with figures of cross section properties. Some of these ballastless tracks have been examined more detailed and their advantages are introduced in general. Lots of different ballastless track systems have been classified in a table and the advantages of ballastless track systems are given in general.

In the 3rd chapter, the components of the cast in-situ slab track system which are rail, fasteners, sleepers and concrete plate or plinth beams are examined and the components of these in worldwide use are classified and introduced. Rail types are described as flange rail, double headed rail and Vignol rail. Technical properties of the rail types briefly given and the specification, features that they should have and information about pros and cons of these elements explained.

Rail fasteners systems are described as two types, rigid system fasteners and elastic system fasteners. The features of these types of fasteners are shown together with figures. After that sleepers defined under the titles of wooden, steel, concrete and plastic sleepers. Some types of the sleepers that tried and currently being used in the world explained. In concrete sleeper title, post-stressed and pre-stressed concrete sleepers have been described. In this chapter we also give some information about plinth concrete beam and explain the measures must be taken during its construction stage briefly.

In the 4th chapter, a type of slab track systems LVT has been chosen and explained in more detail. Here we also mentioned about ground born noise and vibration mitigation which has an inspiration to choosing LVT slab track. Some measures that should be taken for special buildings such as hospital and theater are given. Besides this, LVT systems features and advantages are explained.

In 5th chapter, design of railway superstructure with an example of LVT system has been explained. At first, we explain how the wheel loads are transferred from top (rail) to sub-base showing modeling of railway superstructure in figure. Slab track modeling has springs between the layers that form the superstructure. From bottom to top, first springs take place under the rigid concrete slab which represents the soil elasticity. Since we examined LVT system here, second spring is between rigid slab and LVT concrete block so called block pad as explained in chapter 4 and the third spring for modeling takes place under the rail representing rail pad stiffness. This type of modeling can also be seen in figure.

In chapter 5, we also introduce the forces, which effect railway superstructure. Forces studied under the titles of vertical forces, horizontal forces, temperature stresses and other forces and technical information about these forces are given. Vertical forces investigated under two titles, static and dynamic vertical forces. As for the horizontal forces, they are shown under two titles as either the forces acting parallel to longitudinally direction of railway superstructure and forces acting perpendicular direction to the railway. In temperature stresses section, the calculation of forces emanating from temperature has been given by equation depending on unit length change and temperature change.

Railway roadway design is performed assuming that railway is a beam laid on elastic platform, and therefore, determination of soil type and coefficient of soil stiffness or soil spring value is important. Here in chapter 5, we give information about calculation of coefficient of soil stiffness in light of Winkler and Zimmermann's equations. For obtain one soil coefficient of stiffness when multi-layer case is subject, Eisenmann's equivalent layers theory has been used and introduced by the help of a figure and the calculation of this method has been explained.

Another coefficient used for superstructure static analyses is dynamic impact factor. Today many types of calculation method developed for taking into consideration of the impact of dynamic forces acting on railway. In this study, we used Eisenmann's equations for the speed until 200 km/h.

5th chapter also explain the analyses and concrete slab design calculation for LVT system under different vehicle loads. The loads chosen here have been taken from UIC and EN1991 standards. For freight train maximum speed taken as 100 km/h. As for the passenger train and high-speed train maximum speed taken as 120 km/h and 250 km/h respectively. Load Model 71 from UIC is used for freight train. For

passenger and high speed train, type-2 and type-3 load model from EN 1991 has been used. It should be kept in mind that there is much more different type of load models depending on vehicle style.

For analysis, FEA base computer program SAP2000 has been preferred. This program allows engineers to model almost every type of structure realistically. To model LVT system in the program, modeling technique of which illustration is given by figure in chapter 5 has been used. Rail pad that take place under the rails at joints and rubber boot and LVT block pad represented by springs. Here LVT concrete block pad and the rubber boot that contains the block thought together and their stiffness combined calculating an equivalent spring coefficient.

Soil condition considered as good and class of the subbase soil taken as QS3 according to soil classification of UIC Code. In the model, soil represented with springs either. Slab area that considered here a bearing beam laid on elastic platform divided into small finite elements for analysis. The analysis results are shown in figures as contours diagram and concrete design has been performed using the longitudinally and transverse moment values. There might be lots of soil types and geometrical properties on the route of railway track. Thus, quite a lot different conditions may be needed to take into account. In this study, the chosen part is regarded as an alignment and calculation is performed accordingly.

In final section, we explained our assessments and thoughts about the results of the study.

Key words: Railway superstructure, LVT, slab track systems, superstructure static analyses.

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere demiryolu üstyapısı sisteminde başlangıçtan günümüze kadar önemli değişiklikler olmuştur. İlk çıktığı zamanlarda ahşap malzemeden yapılmış bir kılavuz yol üzerinde hareket eden tekerlekli bir sistem kullanıldığı bilinmektedir. Daha sonra ray yerine kullanılan ahşap kılavuzlar yerine çelik raylar kullanılmaya başlandı ve zamanla gelişerek bugünkü modern halini almıştır. Günümüzde demiryolu üstyapı sistemi mm mertebesinde toleranslarla inşa edilmektedir. Bu da diğer inşaat yapılarıyla kıyaslandığında çok hassas olduğunu göstermektedir. Basit gibi görünen bir hata bile deray sebebi olabilir ve ağır sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle üstyapı dizaynı ve inşaatı önem kazanmaktadır.

Önceleri demiryolu ağırlıklı olarak yük taşımacılığında kullanılmaktaydı. Daha sonra yolcu taşımacılığında kullanılması yaygınlaştı ve ulaşım ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yer kazandı. Bu durum günümüzde de artarak devam etmektedir. Araçların hızları artıkça ulaşım sektöründeki payı da artmaktadır. Balastlı üstyapılar rijit üstyapılara oranla daha ekonomik olmasına rağmen demiryolu idareleri birçok projede, yolcuların güvenli ve konforlu bir şekilde seyahat etmesini sağlamak için uzun süre stabilitesini koruyan ve bakım gerektirmeyen balastsız (rijit) üstyapı tiplerini tercih etmeye başlamıştır. Yüksek hızlarda yolcuların güvenli bir şekilde taşınabilmesi demiryolu üstyapısının uzun süre stabilitesini koruyabilmesine bağlıdır ve bu nedenle bu konudaki hesaplamalarının önemi bir kat daha artmaktadır.

Demiryolu ulaşımına ihtiyacı artıran sebepler arasında şehir içi trafik yoğunluğundan kaynaklanan zaman kaybı ve stres başta gelmektedir. Özellikle metropollerde insanlar zamanla yarışır bir halde yaşamlarını sürdürmektedir. İstanbul'da yakın mesafelerde bile trafikte geçirilen süre 2-3 saati bulabilmektedir. Bunun yanında şehirlerarasında karayolu ile yapılan yolculuklarda da oldukça büyük bir zaman kaybı yaşanmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yolculuklarda havayolu tercihi artmıştır. Yaklaşık 800 km'ye kadar olan mesafelerde ise hızlı tren havayolu ulaşımından zaman ve ekonomik açıdan daha avantajlı olabilmektedir. Ülkemizde de şehirlerarası hızlı tren hatlarında yatırımlar artmıştır ve birçok proje yürürlüğe

konmuştur. Türkiye’de İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyükşehirler arası mesafeler 800 km’nin altında olduğundan ileride açılacak hızlı tren hatları ile birlikte demiryolu taşımacılığının karayolu ve havayolu taşımacılığını geride bırakacağı açıktır.

Bütün bu gelişmeler göz önüne alındığında, demiryolu araçlarındaki gelişmeler ve hızların artması demiryolu üstyapısını da doğrudan etkilemektedir. Yola etkiyen dinamik kuvvetlerin de artmasıyla birlikte Üstyapı deformasyonları artmasına yol açacaktır ve bunun sonucunda yol güvenliğinin azalmasıyla birlikte gürültü, titreşim vb. sebeplerden konfor da büyük ölçüde azalacaktır. Bu durum ekonomik bir işletme açısından da olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bunların önüne geçmek için üstyapının iyi seçilmesi, yapım ve bakım maliyetlerini en aza indirecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

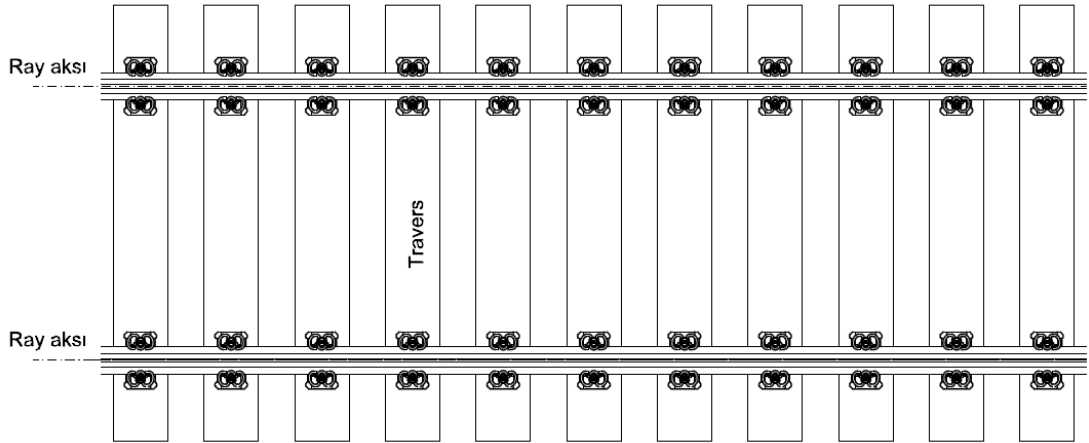
Bu çalışmamızda esas olarak yerinde dökme rijit demiryolu üstyapı hesaplamaları ele alınmıştır. Dünyada kullanılmakta olan rijit üstyapı tipleri tanıtılmış, bununla birlikte bir demiryolu üstyapısını meydana getiren elemanlar incelenmiş ve detaylı bilgiler verilmiştir. Ülkemizde demiryolu ulaşımına yapılan en büyük yatırımlardan biri olan Marmaray Projesi’nde kullanılan üstyapı tanıtılarak bu üstyapının tasarımı anlatılmış ve parametrik olarak irdelenmiştir

2. BALASTSIZ ÜSTYAPILAR

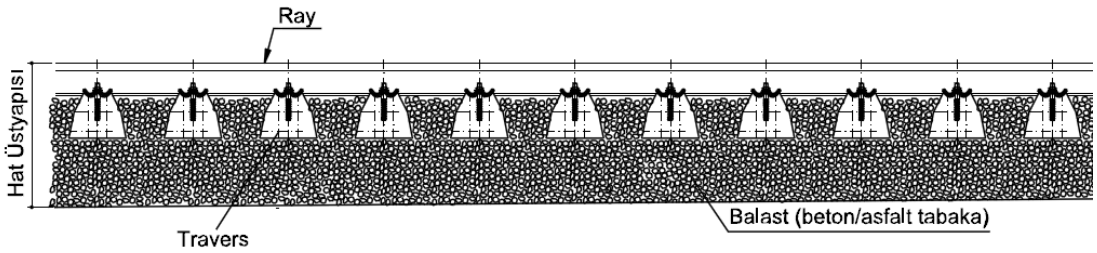
2.1 Demiryolu

Öncelikle bir demiryolunu meydana getiren kısımların tanıtılması faydalı olacaktır. Demiryolu kendi içinde altyapı ve üstyapı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Burada altyapı, üzerine demiryolunu inşa edebilmek için zeminde yapılması gerekli her türlü yapı ve toprak işlerini kapsamaktadır. Üstyapı ise altyapı platformu üzerine inşa edilen, taşıtların yol üzerindeki hareketi sonucu oluşacak tüm statik ve dinamik kuvvetleri güvenli bir şekilde altyapıya ileten; raylar, traversler, bağlantı elemanları, elastomer mesnetler (elastik elemanlar), balast tabakası veya asfalt ve beton taşıma tabakasından oluşan yapı kısmıdır.

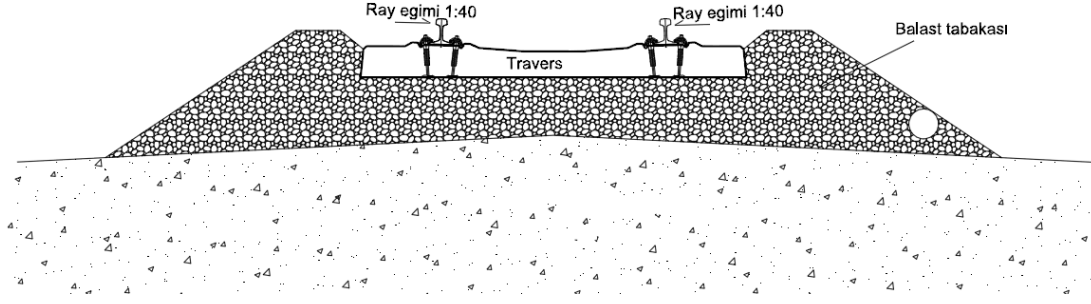
Tipik bir demiryolu hattı planı ve kesitleri Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Geleneksel demiryolu planı



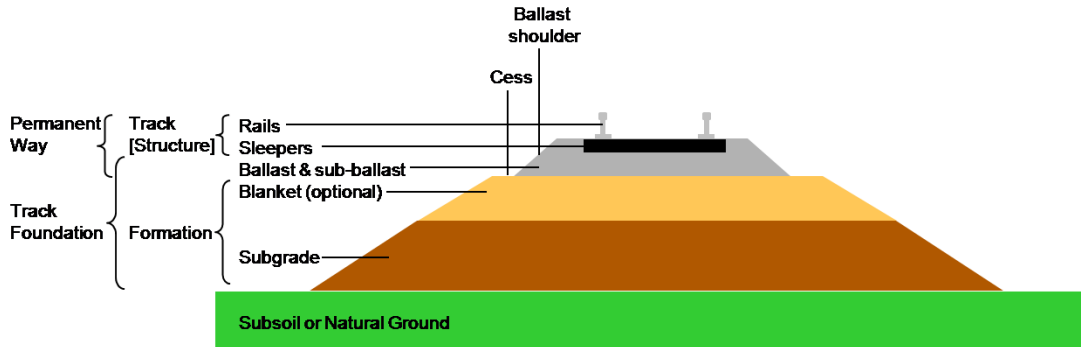
Şekil 2.2: Demiryolu boy kesiti



Şekil 2.3: Demiryolu enkesiti

2.2 Demiryolunu Oluşturan Tabakalar

Modern bir demiryolu hattını meydana getiren tabakalar sınıflandırılmış bir şekilde Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Burada ray, travers, balast (veya betonarme) taşıyıcı tabaka “üstyapı” (permanent way) olarak adlandırılmaktadır. Bunun altında formasyon tabakası (blanket, alt-temel) yer almakta ve bu da balast tabakası ile birlikte temel yapısını oluşturmaktadır. Bunlara ilaveten gerekli görüldüğü takdirde balast tabakası altında dona karşı koruyucu bir tabaka ile geotekstil tabakası da kullanılmaktadır. Balastsız üstyapılarda balast ve alt balast tabakası yerine rijit betonarme tabaka kullanıldığından burada diğer tabakalar hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 2.4: Demiryolu tabakaları sınıflandırması [1].

Bu tabakaların şu koşulları sağlaması gerekir [2]:

1. Elastisite modülünün minimum $4,5\text{kN/cm}^2$, optimum olarak da 12kN/cm^2 olması istenir.
2. Elastisite modülünün üst tabakadan alt tabakaya doğru düzgün şekilde azalması.
3. Tabakaların ısı yalıtımı sağlaması.
4. Tabakaların fazla suyu tutmaması ve drenaja imkân vermesi.
5. 20 yıldan daha fazla durabilite ve uygulama maliyetinin düşük olması.

6. Uygulama sırasında işletmeye mümkün olduğunca az engel olması ya da hiç olmaması.

2.2.1 Formasyon tabakası

Gerçekleştirilmesi gereken fonksiyonlar:

- Taşıyıcı tabaka olma özelliği: Zeminin taşıma gücü düşük ve dayanım kapasitesi az ise formasyon tabakası yükü daha geniş bir alana dağıtarak zemine gelen gerilmeleri azaltır.
- Dona karşı koruyuculuk: Dona karşı hassas olan zemini termal yalıtım etkisi ile dondan korur.
- Filtre ve ayırıcı tabaka olma: Balast tabakası ile zemin tabakasını ayırarak ince malzemenin balastın içine girmesini engeller.
- Düzeltici tabaka: Kaya olan zeminlerde yüzey düzensizdir, düzgün bir yüzey elde etmek için bu tabaka kullanılabilir.
- Düşük su geçirgenlik koruma tabakası olarak görev yapar.

Formasyon tabakasının sahip olması gereken özellikler:

1. Yağmur suyunun büyük bir kısmını zemine sızdırmayacak derecede su geçirmez özellikte olması gerekir.
2. Altyapı ve zemine karşı filtreleme özelliğinin iyi olması gerekir. İyi değilse geotekstil tabakası serilir veya formasyon tabakası kalınlığı 10 cm kadar arttırılır.
3. Formasyon tabakası, taban zeminine göre daha fazla sıkıştırılmış olmalıdır. Zeminde %95 proktor, formasyonda %100 proktor olmalı.
4. Formasyon tabakası kalınlığı en az 20 cm olmalıdır.
5. Balasttan zemine kadar elastisite modülünün kademeli olarak değişimine uygun olması gerekir.
6. Gerekli formasyon tabakası yüksekliği 30 cm'yi aşarsa iki aşamada serilmeli ve sıkıştırılmalıdır.
7. Eğer geotekstil kullanılacaksa bunun üzerinde en az 20 cm formasyon tabakası bulunmalıdır.
8. Tabakanın homojen olması gerekir.

Tablo 2.1’de UIC’ye göre zemin kalite sınıfları verilmiş olup bu sınıflara göre formasyon tabakasının minimum kalınlıkları metre olarak Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Zemin kalite sınıfları (UIC Code 719R)

Zemin Türü (Jeoteknik Sınıflama)	Zemin Kalite Sınıfı
- Organik zeminler - Yumuşak zeminler (I) (Yüksek nem oranına sahip olup %15 den fazla ince malzeme içerir. Bu nedenle kompaksiyon için uygun değildir). - Tiksotropik Zeminler (II) (örneğin akıcı kil) - Eriyebilir malzeme içeren zeminler (örneğin tuz ve jips) - Kirlenmiş zeminler (endüstriyel atıklar) - Karışık malzeme/organik zeminler (II)	QS0
%40’dan fazla ince malzeme içeren zeminler (I) (02 de tanımlanan zeminler hariç) - Ayrışmaya çok hassas kayalar Örnek: - Çok dağınık ve $V_d < 1.7 \text{ t/m}^3$ olan tebeşir - Marn - Ayrışmış şeyl	QS1
%15-40 arasında ince malzeme içeren zeminler (I) (02 de tanımlanan zeminler hariç) - Ayrışmaya orta derecede hassas kayalar Örnek: - Az dağınık ve $V_d < 1,7 \text{ t/m}^3$ olan tebeşir - Ayrışmamış şeyl Yumuşak kaya Örnek: Yaş mikrodeval (MDE)>40 ve Los Angeles (LA)>40	QS1 (III)
%5-15 arasında ince malzeme içeren zeminler (I) %5 den daha az ince malzeme içeren üniform zeminler ($C_u < 6$) - Orta sert kaya Örnek: (MDE)<25 ve Los Angeles (LA)<30	QS2 (IV)
%5 den daha az ince malzeme içeren iyi derecelenmiş zeminler (I) - Sert kaya Örnek: (MDE)<25 ve Los Angeles (LA)<30	QS3

Tablo 2.2: Formasyon tabakasının zemin kalitesine göre kalınlığı (UIC)

Taban Zemini	Taban zemini için İstenen taşıma gücü sınıfı	Hazırlanmış taban özelliği	
		Malzeme Sınıfı	Minimum Kalınlık
QS1	P1	QS1	-
	P2	QS2	0,50
	P2	QS3	0,35
	P3	QS3	0,50
QS2	P2	QS2	-
	P3	QS3	0,35
QS3	P3	QS3	-

2.2.2 Dona karşı koruyucu tabaka

Don kabarmasının meydana gelmesi için donma sıcaklığı, zeminde suyun varlığı ve dona duyarlı zemin gibi üç önemli faktörün aynı anda olması gerekir. Ayrıca yeraltı suyunun yetirince yüksek olması, zeminde kapiler boşlukların oluşması ve zemin permabilitesinin yüksek olması don kabarmasının artmasında etkilidir [2].

Yüksek hızlı ve balastsız hatlar için tam don korunması yapılması gerekir. Hızı düşük ya da diğer hatlar için kısmi don korunması yapılır. Don kabarmasına karşı alt yapıyı korumak için balast veya alt balast tabakası altına çakıl, cüruf vb. malzeme içeren bir tabaka eklemek en çok uygulanan yöntemdir. Bunun dışında farklı ısı yalıtım tabakaları da kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak;

- Strafor tanesi içeren düşük birim hacim ağırlıklı 16-20 cm kalınlığında özel beton (600kg/m³, İskandinav ülkelerinde uygulanır).
- Plastik köpük tabakaları (5-10 cm kalınlığında yüksek dirençli 30kg/m³, İskandinav ülkelerinde uygulanır).

2.2.2.1 Homojen zeminde donmada etkili derinliğin belirlenmesi

Donmada etkili derinlik (2.1)'de verilen Staten bağlantısına göre belirlenir:

$$Z = \sqrt{\frac{2 * \Lambda * I}{L}} \quad (\text{m}) \quad (2.1)$$

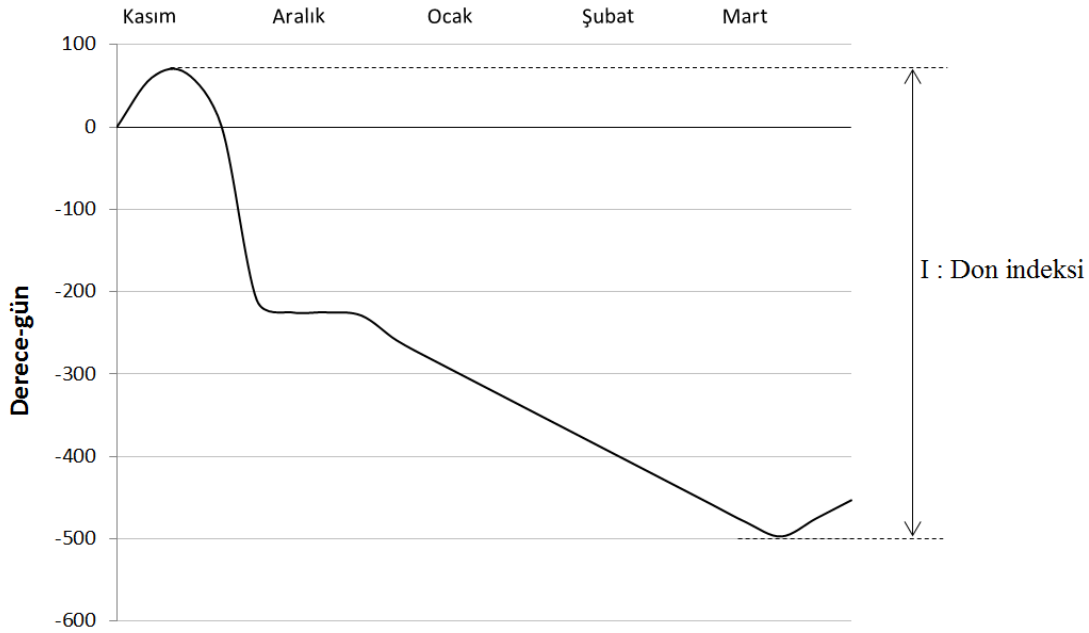
Z: Donmada etkili derinlik (m)

I: Don indeksi (d.°C)(derece-gün)

λ : Zemin ısı iletkenliği (watt/m°C) , balastta $\lambda=0,7$ w/m°C

L: Ergime ısısı (Balast yüksekliği 0,55 m için $L=9070$ wh/m³, balast yüksekliği 0,15 m için $L=14300$ wh/m³ alınır.)

Bu formüldeki don indeksi (I) Şekil 2.5'teki grafik yardımıyla belirlenir.



Şekil 2.5: Don indeksi grafiği [2].

Kasım - Mart aralığında 0 °C altındaki sıcaklıklar önemlidir. “Derece-gün”ün toplam değeri, bütün donma mevsimindeki 0 °C’nin altında ve üstündeki günlük derece-gün değeri­lerinin toplanması sonucunda elde edilerek Şekil 2.5’te görülen eğri oluşturulur. Bu eğrideki maksimum fark don indeksini verir [2].

2.2.3 Geotekstil tabakası

Geotekstil balast ya da alt-balast tabakası altında filtre uygulanması ihtiyacı olduğunda kullanılan bir katmandır. Uygulanmasına ihtiyaç duyulan durumlar aşağıda belirtilmiştir:

- Alt temel ve zeminde kumlu ve çakıllı zeminlerde filtre stabilitesi sağlanamazsa.
- Su drenajı yeterli değilse.
- Lokal olarak zeminde taşıma kapasitesi düşükse.

- Çok yoğun kullanılan hatlarda tabakaların ve tabakalı sistemin uzun dönemde davranışını iyileştirmek için.

Geotekstiller tekrarlı yükler altında hattın mekanik dayanımı arttırır ancak balast veya alt balast tabakasının yüksekliğinin azalmasını sağlamaz. Diğer bir katkısı da tabakalar arasında ayırıcı bir rol oynamasıdır. Geotekstillerin su geçirmesi istenir ancak ince daneler geçmemelidir. Drenaja destek olmalı ve su emen bir ara tabaka olmamalıdır. Çünkü böyle bir durum oluşması zeminin taşıma gücünü azaltır. Ayrıca dinamik yük ve gerilmelere dayanıklı olmalıdır.

Terzaghi'nin filtre kuralı (2.2) bağıntısına göre uygulanmaktadır. Bu bağıntı kohezyonsuz iri daneli zeminlerde kullanılmasına rağmen kohezyonlu zeminler için de geçerlidir.

$$D_{15} \leq 4.d_{85} \quad (2.2)$$

Buna göre filtre edici zeminin ağırlıkça %15'ini geçtiği dane çapı (D_{15}) ancak ince daneli zeminin %85'inin geçtiği dane çapı (d_{85})'in dört katına eşit veya küçük ise filtre sağlanabilir [2].

2.3 Balastsız Üstyapı

Balastsız üstyapı klasik üstyapı anlayışından farklı olarak balast tabakası yerine taşıyıcı beton plaklar kullanılarak elde edilen yeni bir üstyapı şeklidir. Üstyapıda taşıyıcı plak kullanma fikri aslında yeni değildir. 1910 yıllarında bu konu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Ancak maliyetlerin yüksek oluşu ve rayların beton plaklara bağlantısında ortaya çıkan zorluklar nedeniyle balastlı sistem kullanımına ve geliştirilmesi yoluna gidilmiştir [3].

Döşemeli hatlar genellikle sürekli donatılı bir elemandır. Basit olarak yol kaplamasına veya havaalanı beton kaplamasına benzetilebilir. Tasarım için elastik kiriş modeli kullanılmaktadır. Yük taşıma sisteminin eğilme gerilmeleri Eisenmann metodu kullanılarak da hesap edilebilmektedir.

Balastsız hatlar günümüzde yüksek hızlı demiryolu trafiğinin ekonomik ve teknik açıdan önemli bir parçasıdır. Henüz 1968 yıllarındayken, prekast çerçeve veya döşeme tipi yapı olarak tasarlanan ilk hat Hirscaid İstasyonunda uygulandı. Bilimsel

olarak döşeme hat kavramı konusundaki ilk gelişme Münih Teknik Üniversitesi (Prof. Eisenmann) tarafından yapılmış olup geleneksel hattın en zayıf bileşeni olan balast, betonarme döşeme ile yer değiştirmiştir. Traversler bir yük dağıtma ve hat birleştirme elemanı olarak kullanılmıştır. Elastiklik ve sönümleme özelliği de plastik ya da kauçuk ara bir katman ya da tabaka ile sağlanmıştır [4].

Özelikle büyükşehirlerdeki metro hatlarında, balast tabakasının elimine edilmesiyle tünel kesitlerinin düşürülmesi nedeniyle, balastsız üstyapı tercih edilmektedir. Günümüzde 250 km/h ve üzerindeki yüksek hızlı hatlarda balastlı üstyapının yeterli olmayacağı bilinmekte, balastsız üstyapı tekniklerinin de son yıllarda önemli derecede geliştirilmiş ve yapılan araştırmalar sonucunda demir donatılı beton taşıyıcı plakların demiryolu üstyapısında kullanılmasının uygun olacağını göstermiş olduğundan bu tür hatlarda da balastsız üstyapı uygulaması tercih edilmektedir [3].

Betonarme plak yerine asfalt tabaka kullanılarak balastsız üstyapı teşkil edilmesi yönünde de araştırmalar ve uygulamalar yapılmıştır. Bu tip bir üstyapıda asfalt tabaka sayesinde üstyapıda iyi bir elastikiyet sağlanmakta ancak sıcak havalarda asfalt tabakasında meydana gelebilecek deformasyonlar nedeniyle üstyapı rijitliğinin bozulması gibi olumsuz durumlar ortaya çıkabileceği göz önünde bulundurulmalıdır [3].

Yapılan iyileştirmeler ve yeni gelişmeler uzun yıllar boyunca elde edilen tecrübelerle dayanmaktadır. Şimdiye kadar balastsız üstyapı uygulamalarından elde edilen bilgilerle birlikte uzun yıllar karayolu inşaatlarında kullanılan ve test edilmiş yapım yöntemlerinden de edinilen bilgiler ışığında balastsız hatların artan ihtiyaçları karşılayabilmesi için daha da geliştirilmesi için önemli çalışmalar yapılmış, bunun sonucunda da birçok balastsız üstyapı tipi ortaya çıkmıştır. Buna ilaveten, döşeme hattı meydana getiren münferit bileşenlere yönelik buluşlar da (örneğin ray tespit yöntemleri) sistemin daha da gelişmesini sağlamaktadır. Temel olarak bu gibi gelişmelerin amacı döşeme tipi hattın daha uygun maliyetli bir şekilde inşa edilebilmesine imkân sağlayabilmektir. Servis ömrü içinde, örneğin tasman veya herhangi bir kazadan sonra sistemin kolayca tamir edilebilir olması gerekir [4].

İlk bakışta çok çeşitli sayıda sistemin mevcut olması kafa karıştırıcı gelebilir. Aralarında birkaç temel farklılık bulunmakla birlikte yakından incelendiğinde iyi bir rekabet ve gelişme ortamı sağladığı görülmektedir. Çok çeşitli alternatiflerin mevcut

olması aynı zamanda teknik ve ekonomik adaptasyon olanağı ile birlikte, yapılacak demiryolu hattının içinde bulunduğu çevre koşullarına karşı sistem seçimi konusunda birçok avantaj sağlamaktadır [4].

2.4 Balastsız Üstyapı Sistemleri

Genel olarak balastsız hatlar traversli ve traverssiz olarak ayırt etmek mümkündür. Traversli sistemler, betona gömülü veya monolitik ile ayrı olarak yerleştirilmiş traversli sistem olarak gruplandırılabilir. Traverssiz sistemler ise inşa şekline göre monolitik yerinde dökme ve prekast panel sistem, betona gömülü sürekli desteklenmiş raylı sistemler şeklinde gruplandırılabilir. Balastsız hat türleri Tablo 2.3’de özetlenmiştir.

Tablo 2.3: Balastsız üstyapı sistemleri sınıflandırması [5, 6].

Traversli		Traverssiz		Sürekli Desteklenmiş Ray	
Travers veya bloklar betona gömülü	Traversler asfalt-beton yatağın üstünde	Prefabrik beton plak	Tek parça betonarme yerinde döküm	Gömülü ray	Bağlantı elemanlı sürekli desteklenmiş ray
Rheda – Rheda 2000 Züblin Stedef LVT (Sonneville) Heitkamp SBV WALO	ATD BTD SATO FFYS GETRAC WALTER	Shinkansen Bögl ÖBB-Porr IPA	Lawn Track (Rasengleis) FFC Hochtief BES BTE-BWG/HILTI PACT	Deck Track INFUNDO-Edilon BBERS	Cocon Track ERL Vanguard KES SFF Saargummi

2.4.1 Traversli sistemler

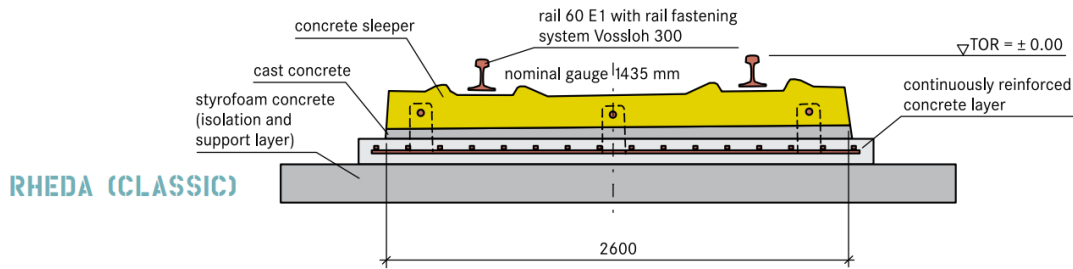
2.4.1.1 Betona gömülü traversli sistemler

Prekast traversler döşeme kalıbı içine yerleştirilerek beton dökülmesi suretiyle traversler beton içinde kalmaktadır. Bu tür üstyapıda traverslerin dökülmüş beton içine vibrasyonla gömülmesi şeklinde yapılan türleri de bulunmaktadır. Bu üstyapıya örnek olarak bazı özel üstyapı sistemleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Rheda üstyapı sistemi

Birçok Rheda tipi döşemeli hat üstyapısı mevcuttur. Bu üstyapı zamanla geliştirilmiş, edinilen tecrübelerle göre uygulamada bir takım değişiklikler yapılmıştır. Tüm Rheda sistemler esas olarak traversli beton hat panellerinin donatılı bir taban (beton temel gibi) üzerine veya donatısız bir temel (örneğin çimento ile iyileştirilmiş bir taban veya grobeton tabakası) üzerine yerleştirilmesi ve ardından beton dökülerek kuşatılması şeklindeki inşa prensibine dayanmaktadır.

Bu üstyapı ilk defa 1972 yılında Rheda-Wiedenbruck İstasyonunda uygulanmıştır. Şekil 2.6’da görüldüğü üzere boyuna ve enine donatılı bir beton döşeme çimento ile iyileştirilmiş bir zemin üzerine yerleştirilmiş, betonarme traversler eksenine ve kotuna getirilerek dökülen grobetonla kuşatılmıştır. O zamanlar kullanılan monoblok traversler, içlerinde bırakılmış deliklerden geçirilen boyuna donatılarla birlikte dökülen betonun içine gömülmüştür. Şekil 2.7’de Rheda istasyonundaki uygulama görülmektedir [4].



Şekil 2.6: Klasik Rheda üstyapı kesiti [7].



Şekil 2.7: 1972 yılında Rheda istasyonunda uygulanan üstyapı [4].

Bugün, bu üstyapıda değişik tipte traversler de kullanılmaktadır. Klasik Rheda’dan farklı olarak Rheda-Sengeberg de alttaki betonarme yatak monoblok traversleri

kuşatan grobetona kalıp görevi görecek şekilde U şeklinde bir kesite dönüştürülmüştür.

Daha sonra Rheda-Berlin sisteminde betonarme yatak yine hemen hemen aynı şekilde grobetona kalıp görevi görürken monoblok travers yerine öngermeli ikiz blok kullanılmıştır. Sonra bu öngermeli traversler kafes sistemli bir ikiz blok şeklini almıştır. Rheda-2000 sisteminde, öncekilerden farklı olarak betonarme yatak ve traversleri kuşatan grobeton birlikte dökülerek tek parça haline getirilmiştir. Betonarme tabakanın enine ve boyuna donatıları travers kafes sistemleri arasından geçirilebilmektedir. Böylece ikiz bloklar betonarme yatağa daha sağlam tutunması ve üstyapının durabilitesinin artırılması sağlanmaktadır. Bu şekilde imalatın daha hızlı bir şekilde tamamlanacağı ve daha az iş kalemi olduğundan hata payının azalacağı açıktır ancak traverslerin değiştirilmesi gibi bir iş söz konusu olduğunda betonarme yatağın kırılması gibi bir sorunun ortaya çıkacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Öncekilerde böyle bir durumda sadece grobetonun kırılması gerekeceğinden bu açıdan bakıldığında bunun bir dez avantaj olduğu düşünülebilir [4].

Şekil 2.8ve Şekil 2.9’da Rheda üstyapısı beton döküm öncesi ve sonrası gösterilmektedir.



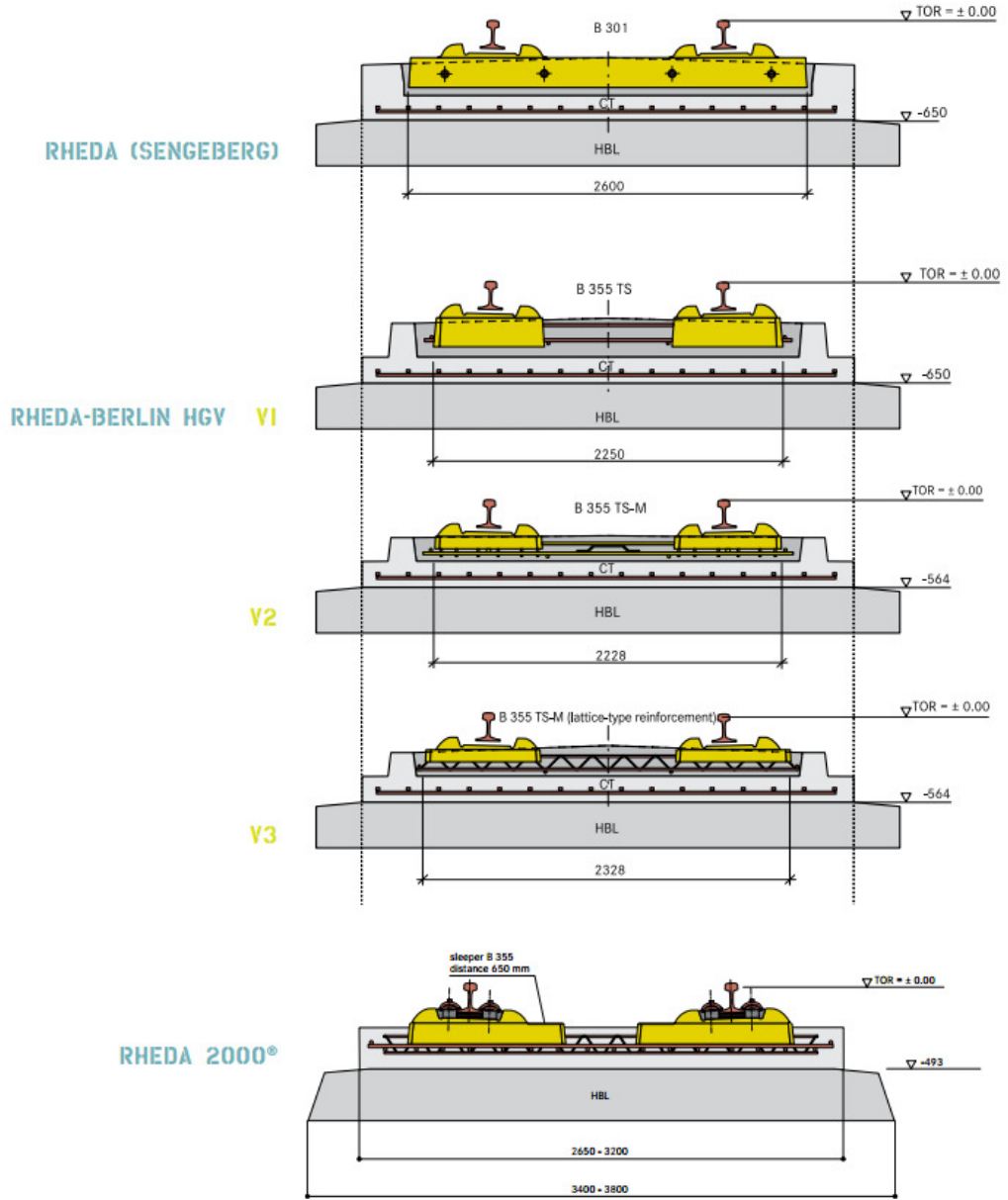
Şekil 2.8:Rheda-2000 inşaat aşamaları (beton öncesi) [4].



Şekil 2.9: Rheda-2000 inşaat aşamaları (beton sonrası) [4].

Rheda-Sengeberg ve Rheda-Berlin sistemlerde grobeton ile yatak betonu arasında veya grobetonla travers betonu arasında betonda arayüz çatlağı meydana gelmesi durumunda bu çatlaklardan beton yatağa su sızabilir ve üstyapının durabilitesini düşürebilir. Rheda-2000’de beton yatak elimine edilmiş olup başlangıçtaki sisteme benzer bir üstyapı ortaya çıkmıştır.

Şekil 2.10’da Rheda sistemin kesit özellikleri ve gelişimi başlangıçtan Rheda2000 sistemine kadar gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Rheda sistem gelişim aşamaları [7].

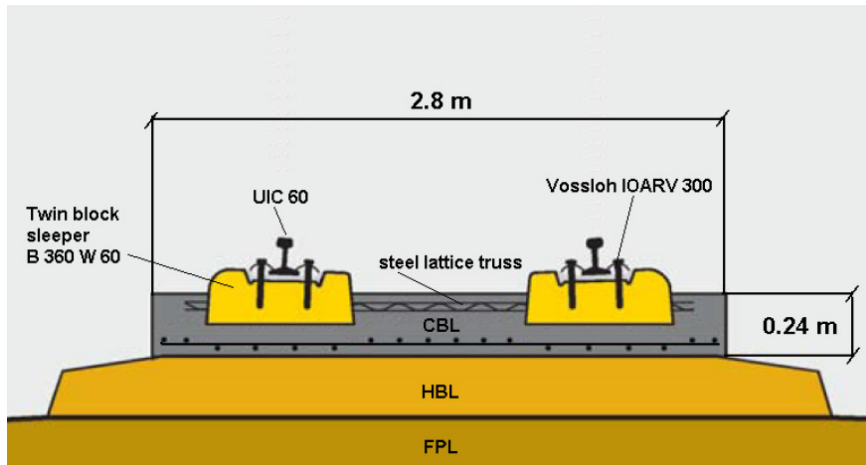
Rheda Üstyapısının Özellikleri

- Bu üstyapı Alman demiryollarının pek çok tüneline ve Singapur Metrosu'nda başarıyla kullanılmaktadır.
- Bugüne kadar ray taşlaması dışında bir bakım gerektirmemiştir.
- Yapılan ölçümler 250 km/saate kadar çıkan hızlarda deformasyon davranışının bugüne kadar değişmediğini göstermiştir.
- Ayrıca kurbalarda ve rampalarda tasman ve ondülasyona maruz kalmamaktadır.

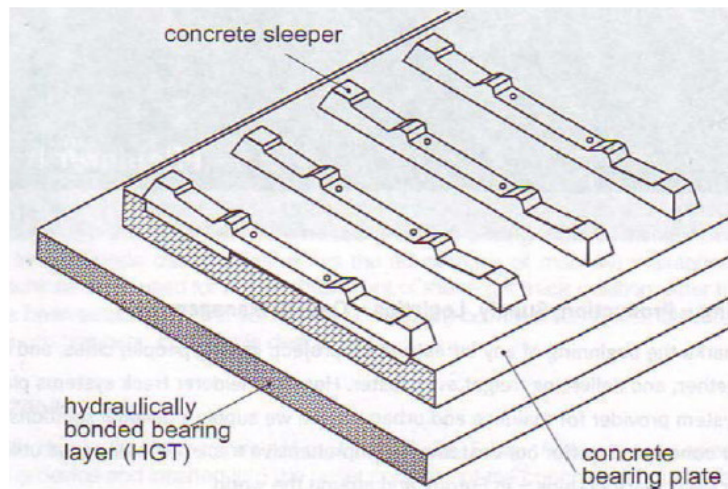
- Bu tabakada alt kısımda boyuna direnci sağlayacak demir donatı bulunmaktadır.
- Bu sistemin ömrü 50-60 yıl arasında tahmin edilmektedir.
- Bu sistemlerde UIC 60 rayı ve Vossloh 300 bağlantı sistemi kullanılmaktadır.
- Servis ömrünü sağlamak için, çok iyi bir ölçüm yapmak ve kullanılan inşaat malzemesine uygun bir yapım yöntemi uygulamak, sıkı bir zemin üzerinde dona karşı korunaklı bir temel ile iyi çalışan bir su drenajı gerçekleştirmek gerekmektedir [6].

Züblin

Rheda sistemden farklı olarak bu üstyapıda ikiz blok ya da monoblok traversler taze beton içine vibrasyon yöntemiyle sonradan yerleştirilir. Bu sisteme ait özellikler Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de görülmektedir.

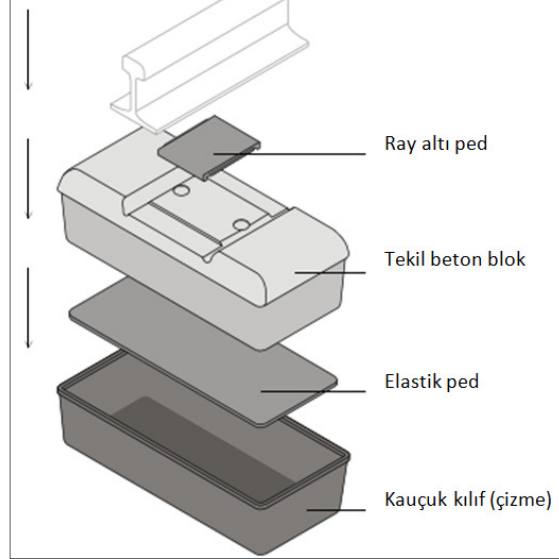


Şekil 2.11: İkiz blok traversli Züblin üstyapı sistemi [5].



Şekil 2.12: Monoblok traversli Züblin üstyapı sistemi [5].

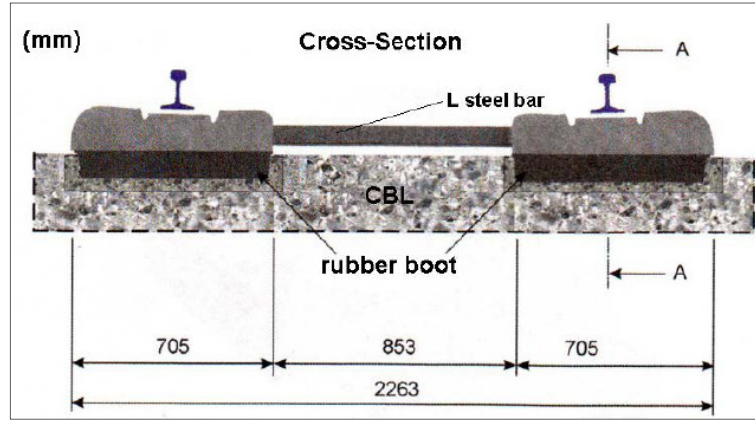
önlemek için ilaveten elastik bir ped daha kullanılmaktadır. Bu sistemin LVT olarak adlandırılmasının sebebi ray altı pedlerine ilaveten kauçuk kılıfla ve içindeki ilave pedle birlikte yüksek seviyede titreşim ve gürültü sönümlenmesi sağlanmasıdır.



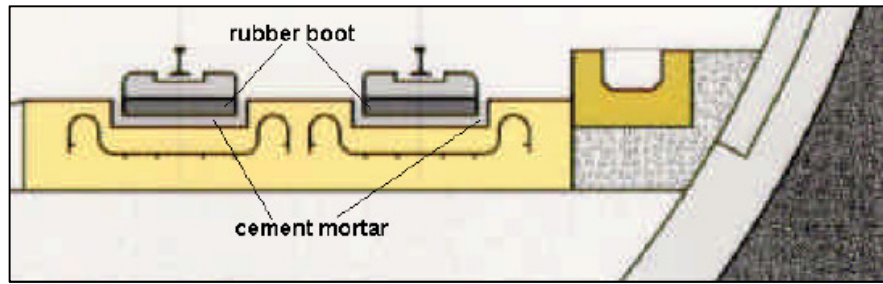
Şekil 2.14: LVT üstyapı sistemi bileşenleri [10].

Walo ve Sonneville sisteminde traversler mono blok kullanılmaktadır. Stedef'te ise Şekil 2.15'te görüldüğü gibi ortasından çelik çubukla bağlanmış ikiz blok traversler kullanılmaktadır. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de ise sırasıyla Walo ve Sonneville enkesitleri görülmektedir. Bu sistemler uygulama kolaylığı ve üstyapının tüm parçalarının kolaylıkla değiştirilebilmesine imkân sağlaması açısından da tercih edilmektedir.

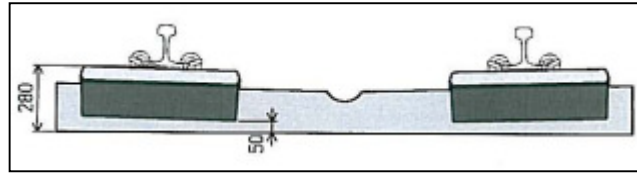
LVT sistem üstyapı ülkemizde İstanbul Taksim-Hacıosman metro hattında ve Marmaray Projesi'nde de kullanılmış olup Marmaray'da kullanılan Sonneville LVT üstyapısı dördüncü bölümde daha detaylı incelenecektir.



Şekil 2.15: Stedef üstyapı enkesiti [5].



Şekil 2.16: Walo üstyapı enkesiti [5].



Şekil 2.17: Sonneville LVT üstyapı enkesiti [10].

2.4.1.2 Asfalt-beton yatak üstüne tespitli traversli sistemler

Genellikle prefabrik traversler ya elastik olarak ya da sıkı bir şekilde beton taşıyıcı plağa bağlanırlar. Elastik bağlantıda lastik sömeller kullanılmaktadır. Elastikiyet (yay katsayısı 20-30 kN/mm) sağlamak için travers blokları altına lastik sömeller, rayla travers arasına ise elastikiyeti daha düşük olan seletler konulmaktadır. Balastsız üstyapının çeşitli inşa tipleri arasında kullanılan traverslerin taşıyıcı tabaka üstüne serbest yerleştirilmeleri veya gömülecek şekilde konulmaları çerçevenin kolayca monte edilmesini sağlar. Travers kullanılması ray açıklığı ve ray eğiminin verilmesinde kolaylık sağlar. Bu iki geometrik standardın hassas bir şekilde uygulanabilmesi yüksek hızlı demiryollarında çok önemlidir [6].

BTD

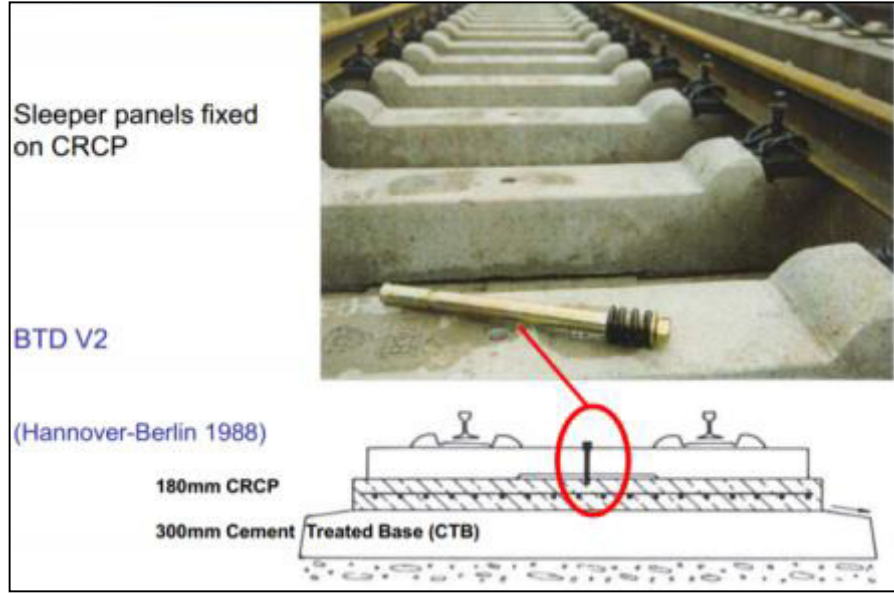
Traversler betona gömülmeden yük dağıtım ve hat birleştirme elemanı olarak düşünülmüştür. “Beton temele doğrudan mesnetli hat paneli” (BTD V2) şeklindeki traversler sadece kimyasal yapıştırıcılı dübellerle alttaki betona bağlanır. Enine ve boyuna donatılı beton temel, 3.90 m aralıklarla iz (derz) yapılmış olan çimento ile iyileştirilmiş bir zemin üzerinde dökülür. Boyuna donatı sürekli ve Rheda tipi üstyapılardakiyle aynı görevi üstlenmektedir. Traversleri betona bağlayan dübel noktalarında çatlak oluşumunu engellemek için, çimentolu zemindeki 3.90 m (6x0,65 m, travers aralığının altı katı) aralıklı izlerin üzerinde temel tabakasında bırakılan derzler yaklaşık olarak kalınlığın %25’i kadar derine incek şekilde kesilebilir. Şekil 2.18’de sistemin tamamlanmış hali görülmektedir. [4].



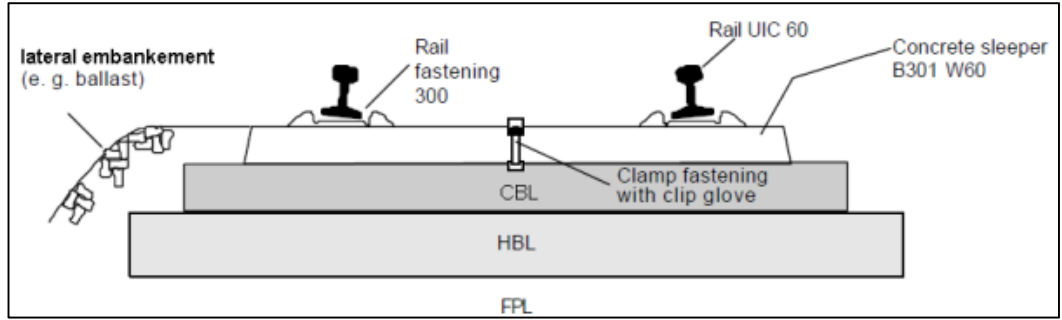
Şekil 2.18: BTD V2 üstyapı görüntüsü [4].

BTD tip hatlarda beton temel ile hat panellerinin ayrık olması nedeniyle yoğun işçilik gerektiren ve zaman alan grobeton dökümü ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Rheda sisteminden farklı olarak burada traversler (beton bileşenler) betona gömülmediğinden arayüz çatlakları problemi de ortadan kaldırılmıştır ve inşaatında daha az farklı iş kalemi bulunmaktadır. Bunun yanında BTD üstyapısının inşaatı sırasında yandaki hattın kullanılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Böylece diğer hat işletme altındayken BTD üstyapısının inşası daha kolay olabilmektedir. Ayrıca beton temelle hat panelinin kolayca ayrılabilmesi sayesinde beton temeldeki tamir işleri de Rheda üstyapısına göre çok daha kolay ve hızlı yapılmaktadır.

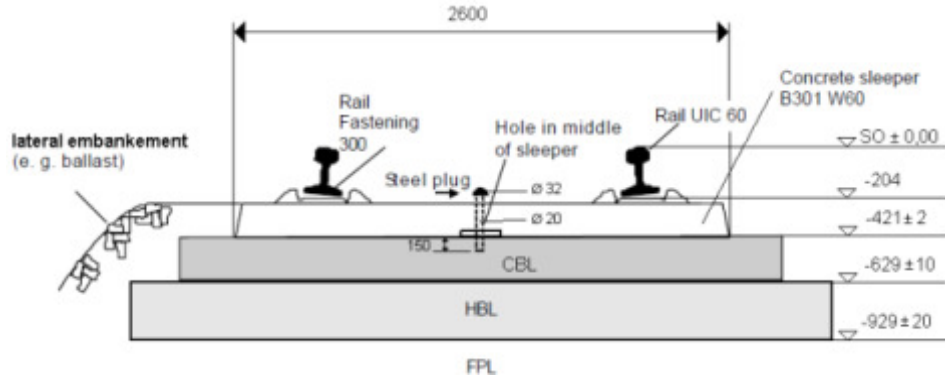
Bu sistemle ilgili kesit özellikleri Şekil 2.19, Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2.19: BTĐ V2 tipi hat travers dübelleri [4].



Şekil 2.20: BTĐ-V1 üstyapı kesiti [5].

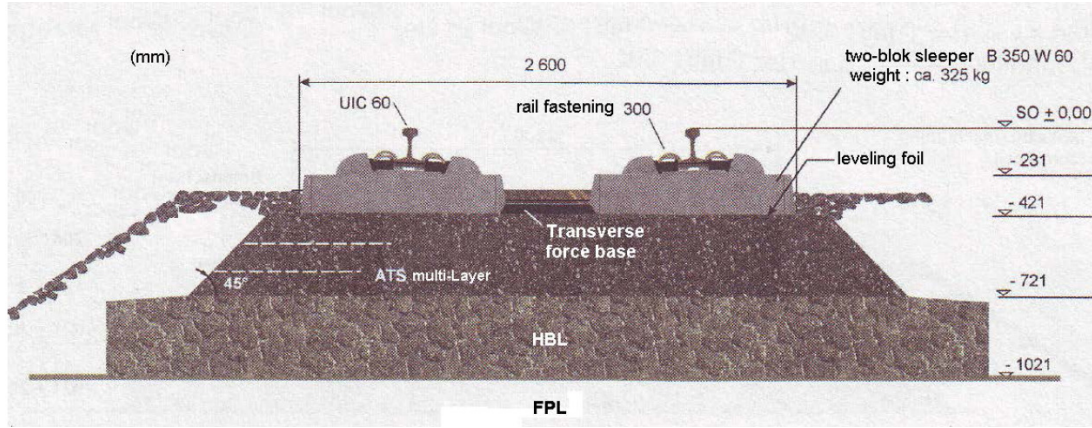


Şekil 2.21: BTĐ-V2 üstyapı kesiti [5].

ATD

ATD üstyapı çimento ile iyileştirilmiş (HBL) taban üstüne asfalt yatak yapılması ve bu asfalt tabaka üstüne de üstyapı çerçevesinin yerleştirilmesi ile oluşmaktadır. Monoblok ve ikiz blok traversler kullanılabilir. Traverslerin altında asfalt

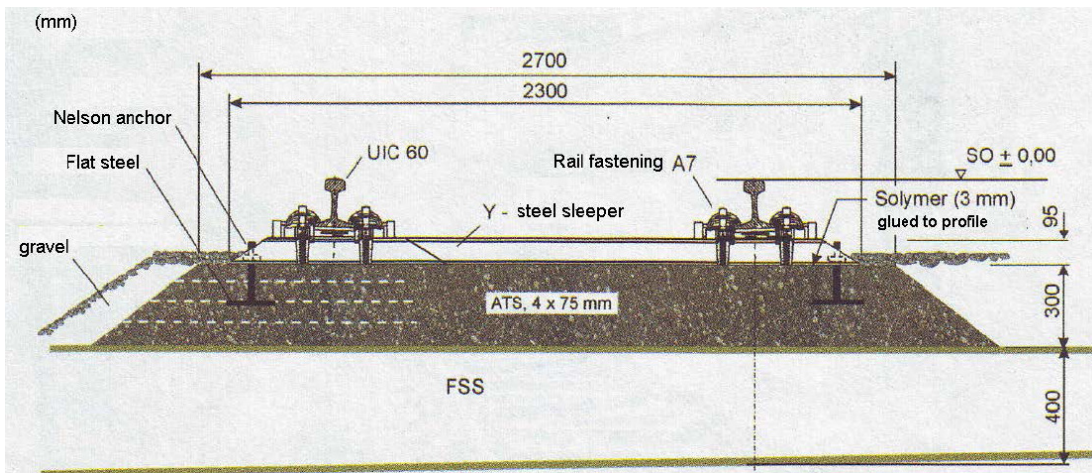
tabaka üzerinde yanal kuvvetlere karşı koymasını için bir diş (mahya) bırakılır. Traverslerin alt yüzeyinde de bu dişe uygun olarak kanal yapılmaktadır. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra kalan boşluklar sentetik bir malzeme ile doldurulmaktadır. Ani yüklere veya deray ihtimaline karşı hattın stabilitesini artırmak için kenar kısımlara balast doldurulmakta veya bunun yerine daha ağır travers kullanımı tercih edilebilmektedir. Sistem detayları Şekil 2.22’de görülmektedir [5].



Şekil 2.22: ATD üstyapı enkesiti [5].

SATO

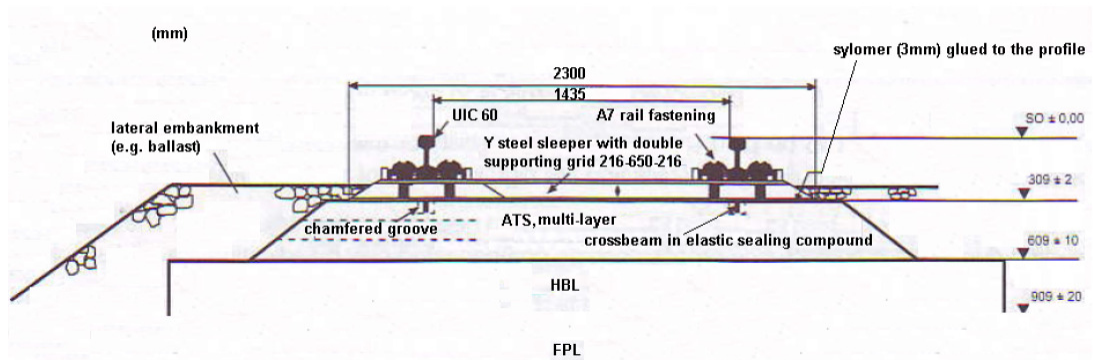
Bu üstyapı Şekil 2.23’te görüldüğü üzere asfalt tabaka içine Nelson ankrajlarıyla gömülmüş çelik elemanlara Y tipindeki çelik traverslerin kaynaklı birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Böylece Y tipi çelik traversler düşeyde ve yatayda sabitlenmiş olmaktadır.



Şekil 2.23: SATO sistem enkesiti [5].

FFYS

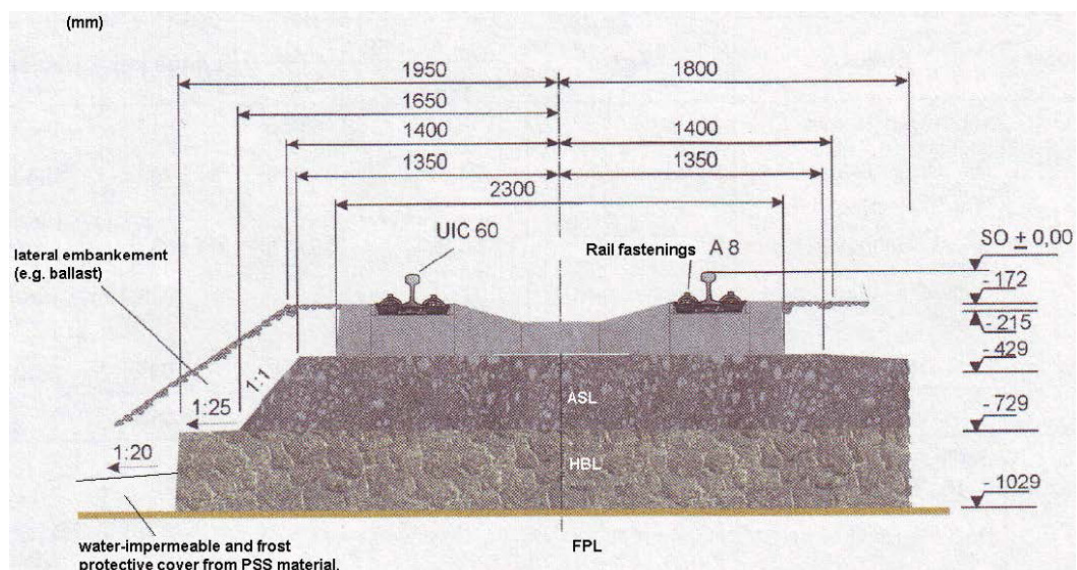
FFYS üstyapısı da SATO sistemde olduğu gibi asfalt tabaka üzerinde Y tipi çelik traversler ile teşkil edilmiştir. Bu sistemin tasarlanmasında, kolay ve hızlı bir montaj sağladığı için hattın maliyetini düşürmek ve kullanılan malzemelerin geri dönüşüm sağlaması ön planda tutulmuştur. Y tipi çelik travers kullanımı farklı ekartman genişliklerine uygun olması ve stabilite açısından kendine göre bazı avantajlar sağlamakla beraber bugün yaygın olarak kullanılmamaktadır. FFYS sistem yapısı Şekil 2.24'te görülmektedir.



Şekil 2.24: FFYS üstyapı enkesiti [5].

FFBS-ATS-SATO

Bu sistem Almanya’da test olarak üretilmiştir. Asfalt tabaka üzerinde betonarme monoblok travers kullanılarak yapılmıştır. Traversler asfalt tabaka içinde açılan özel bir yuvaya yerleştirilmektedir. Sistemin enkesiti Şekil 2.25’te görülmektedir.

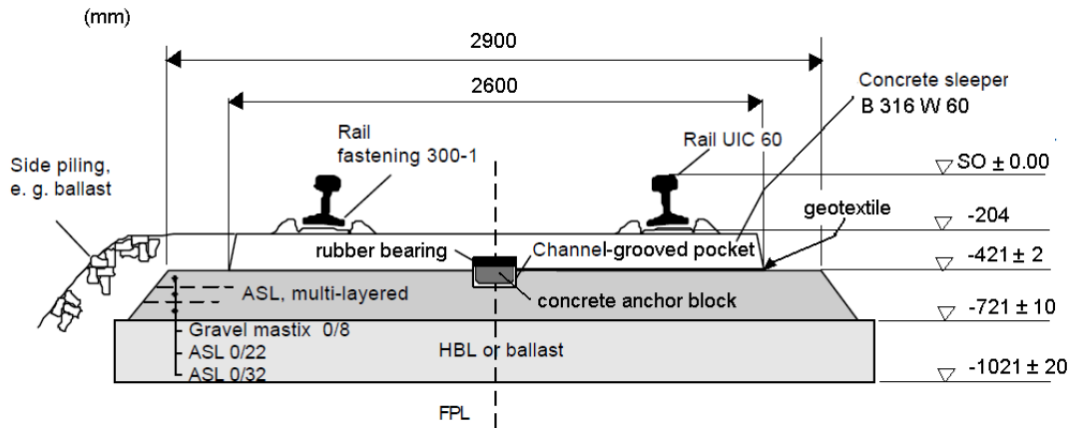


Şekil 2.25: FFBS-ATS-SATO üstyapı enkesiti [5].

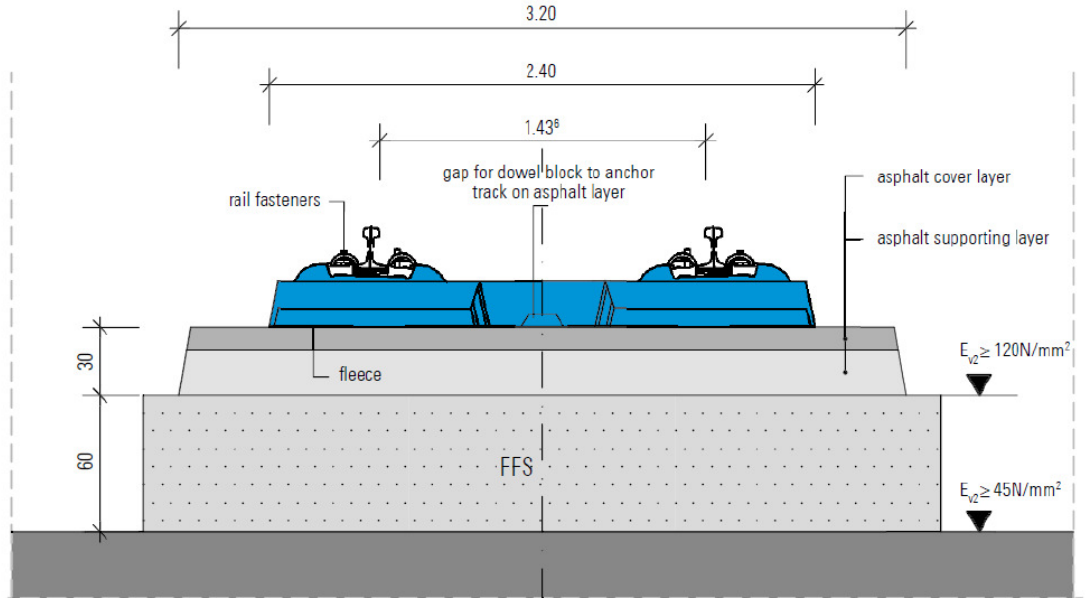
GETRAC

Asfalt tabaka üzerinde öngermeli betonarme monoblok travers kullanılarak ve traversler asfalt tabakaya beton silindir bir elemanla ankre edilerek teşkil edilmektedir. 2003 yılında Almanya’da geliştirilmiştir. Traversleri asfalt tabakaya bağlayan beton ankrajlar enine ve boyuna yatay kuvvetleri kolaylıkla asfalt tabakaya iletecek şekilde tasarlanmıştır. Getrac sistemi A1 ve A3 olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Bu farklılık travers boyutlarından gelmektedir. A3 tipindeki traversler A1’de kullanılanlardan daha kısa ancak daha geniştir. A3’teki traverslerin kısa olması hattın dar kesimlerden geçirilmesi açısından avantaj sağlamakta olup burada yükün yayılmasında meydana gelen kesit kaybı kısa olan traverslerin genişlikleri artırılarak giderilmektedir. Getrac sistem üstyapının; kolay ve hızlı montaj, düşük bakım maliyeti, uzun ömür ve uygulamada düşük maliyet gibi avantajlar sağladığı söylenebilir.

Sistemle ilgili bilgiler Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de gösterilmektedir.



Şekil 2.26: Getrac A1 üstyapı enkesiti [5].



Şekil 2.27: Getrac A3 üstyapı enkesiti [5].

Traversleri asfalt tabakaya bağlayan beton ankraj elemanı Şekil 2.28’de görülmektedir. Ankraj elemanının yarısı asfalt tabaka içinde kalacak şekilde tasarlanmıştır. Traverslerin monte edildiği üst kısmın etrafı darbelerin traverse zarar vermeden sönmülmesini sağlayacak şekilde kauçuk bir malzemeyle kaplanmıştır.

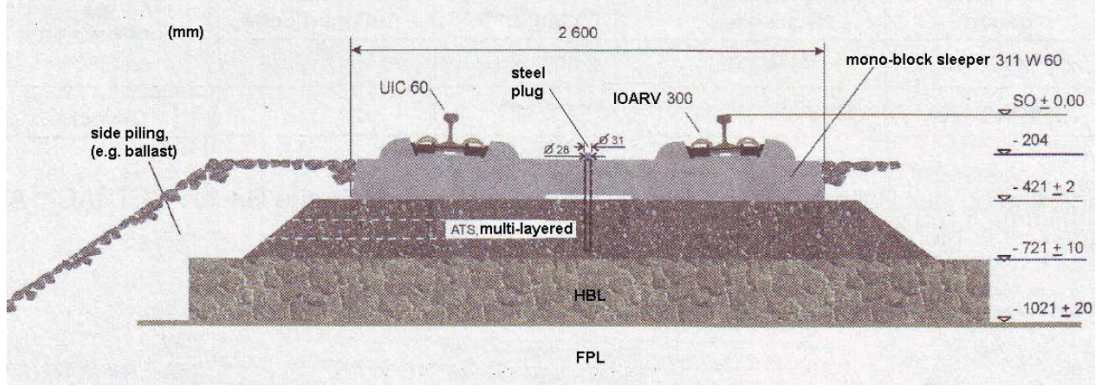


Şekil 2.28: Getrac sistem beton ankraj elemanı [5].

Getrac sistem üstyapının; kolay ve hızlı montaj, düşük bakım maliyeti, uzun ömür ve uygulamada düşük maliyet gibi avantajlar sağladığı söylenebilir [5].

WALTER

Bu üstyapı sistemi tasarım olarak BTD-V2 sistemi ile benzerlik göstermektedir. Ancak burada BTD sistemdeki taşıyıcı beton tabaka yerine asfalt tabaka kullanılmaktadır. Şekil 2.29’te görüldüğü üzere, monoblok betonarme traversler ortalarından bir ankraj vasıtasıyla alttaki asfalt tabakaya sabitlenmektedir.



Şekil 2.29: Walter üstyapı enkesiti [5].

2.4.2 Traverssiz sistemler

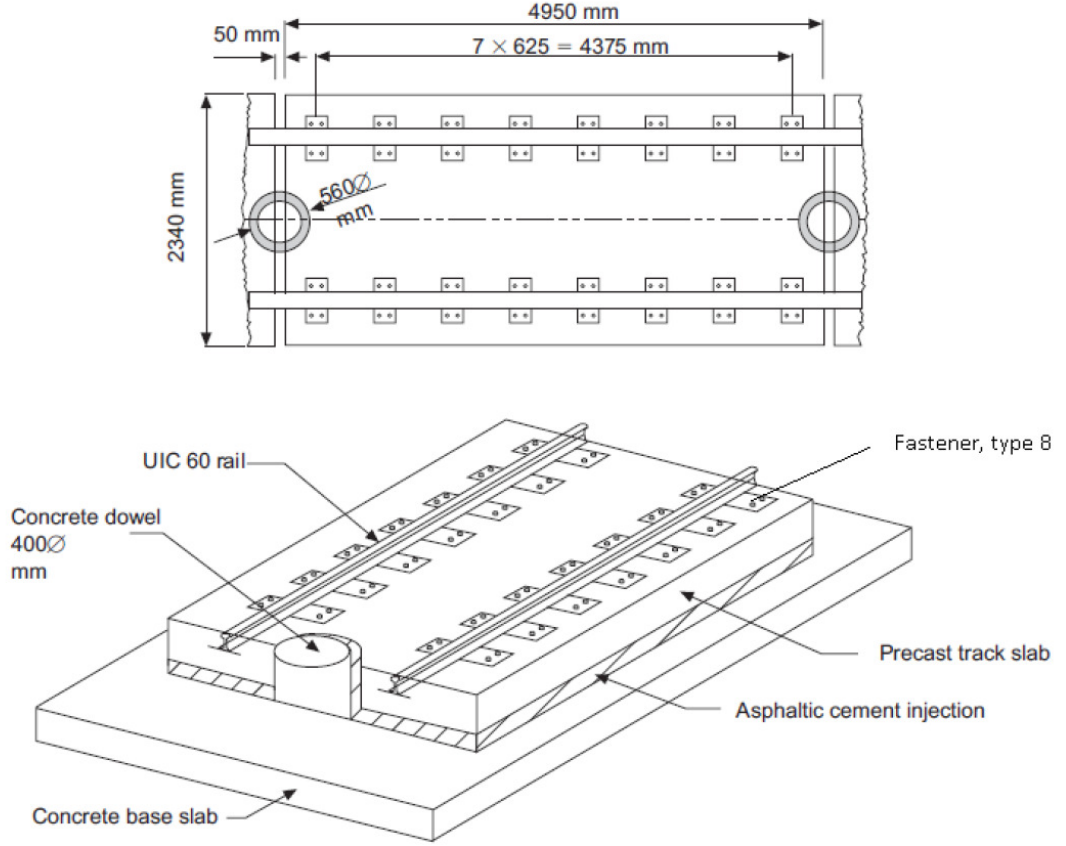
Traverssiz üstyapı sistemleri prefabrik betonarme plak ve yerinde dökme betonarme plak olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

2.4.2.1 Prefabrik beton plaklı üstyapı sistemleri

Prefabrik plak üstyapılarda gabari ölçüleri ve ray eğimleri fabrikada plak üzerinde bırakılan yuvalarla sağlanmaktadır. Böylece uygulamada kolaylık, hassas ve hızlı bir montaj imkânı sağlamaktadır. Sistemin diğer avantajları arasında işçilik hatalarının minimize edilmesi, işçilik maliyetlerinin düşürülmesi, hasar gören bileşenlerin değiştirilmesi imkânının kolay olması gösterilebilir. Ancak uygulama maliyetlerinin geleneksel üstyapılardan daha fazla olduğu bilinmektedir.

Shinkansen

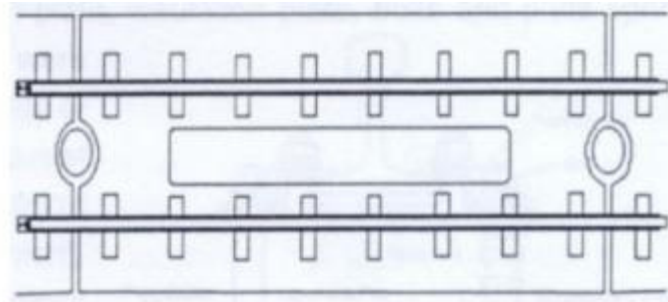
Japonya’da tasarlanmış ve 1972 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Bir plağın ölçüleri 5 x 2,2 m’dir ve kalınlığı 16 cm ve 19 cm olarak değişebilmektedir. Sisteme ait plan ve profil Şekil 2.30’da gösterilmiştir.



Şekil 2.30: Shinkansen üstyapı [5].

Plaklar, boyuna ve enine yönde silindirik kesitli (40 cm çaplı) stoper olarak adlandırılan beton elemanlarla tutulmaktadır. Beton stoperler alttaki beton taşıyıcı tabakaya bağlanmış durumdadır. Betonarme plakların altına 4 cm kalınlığında çimento-asfalt karışımlı harç doldurulur. Shinkansen hatlarında plak kalınlığı 19 cm ye çıkarıldığında enine ve boyuna yönlerdeki öngermeler azaltılmaktadır. Shinkansen plağın altına titreşim önlemek için 25 mm kalınlıkta bir elastik tabaka yerleştirilebilmektedir [3, 4].

Şekil 2.31’de geliştirilmiş Shinkansen üstyapısı görülmektedir.



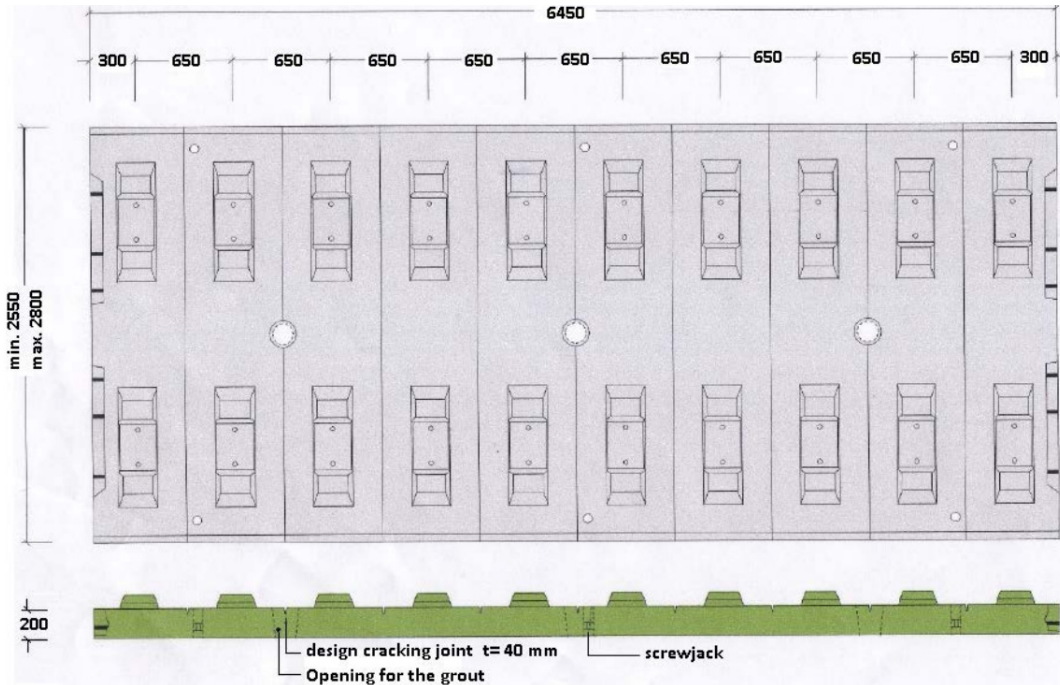
Şekil 2.31: Shinkansen betarme plak [5].

Dünyada kullanılan diğer betonarme plaklar tasarımıda Shinkansen plaklardan etkilenmiştir. Bu plaklarda sonradan geliştirilmiş ve Şekil 2.31’de görüldüğü gibi üretilmiştir. Burada plağın ortasında ağırlığı azaltmak için boşluk bırakılmıştır. Aynı zamanda bu boşluk yapılacak enjeksiyon çalışmaları için de kolaylık sağlayabilir.

Bögl

İlk defa Almanya’da geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. 20 cm kalınlığında betonarme plaktan oluşmaktadır. Plağın ebatları 6,45m x 2,55m veya 6,45m x 2,80m şeklindedir. Plak enine öngermeli donatılı yapılmaktadır ancak boyuna donatılar normal yerleştirilmektedir. Şekil 2.32’da Bögl betonarme plağı görülmektedir. Plağın uçlarında montajı kolaylaştırmak ve aynı zamanda hızlandırmak için birbirine geçmeli özel yuvalar bırakılmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere bağlantılar arasında plak üzerinde izler bırakılmıştır. Bu izler plağın kontrolsüz çatlamaması için derz görevi görmektedir.

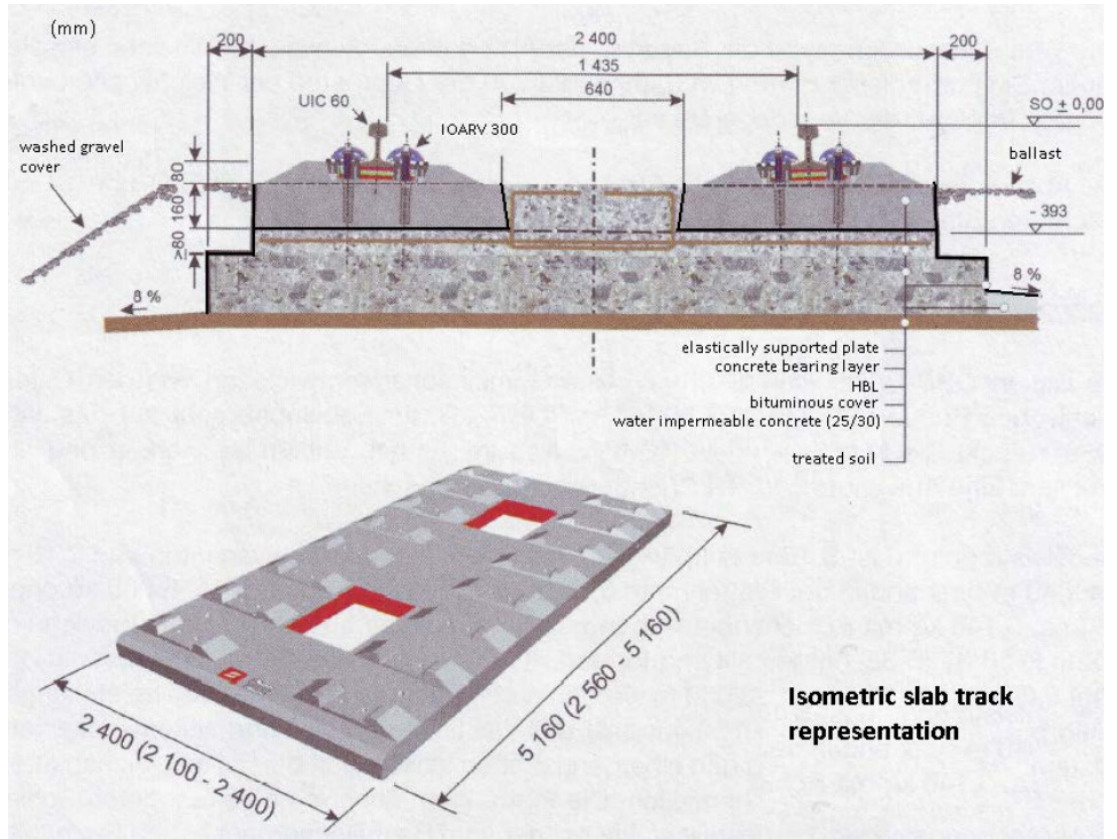
Bögl plak sistem de diğer plaklarda olduğu gibi kalite ve hızlı montaj ve bozulan parçaların değiştirilmesinin kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak maliyet açısından geleneksel sistemlere göre daha pahalı bir sistem olabilir.



Şekil 2.32: Bögl üstyapı betonarme plak [5].

ÖBB-Porr

Avusturya’da geliştirilmiş bir sistem olup ilk olarak test amaçlı üretilmiştir. Plak ölçüleri 5,16 x 2,4 m ebatında ve 16 cm ile 24 cm kalınlığında üretilmektedir. Plağın ortasında Şekil 2.33’te görülen iki tane boşluk bırakılmaktadır. Bu boşluklar uygulama sırasında harç, enjeksiyon gibi çalışmalarda kolaylık sağlamaktadır. Sistemi oluşturan katmanlar yukarıdan aşağıya doğru Şekil 2.33’de görüldüğü üzere; betonarme plak, plağın altında bitümlü kaplama tabakası, beton taşıma tabakası, çimento bağlayıcı tabaka ve iyileştirilmiş zeminden oluşmaktadır. Ayrıca üstyapıya su girişini engellemek için kenarlara zemin üzerinde eğimli beton yapılmaktadır. Burada tünel içinde kullanılması durumunda şekilde görülen HBL tabakası kullanılmamaktadır. Plağın ortasındaki dikdörtgen boşlukların kenarları içe doğru eğimli konik olarak yapılmıştır. Böylece bu kısımlara dökülen beton aynı zamanda kilit görevi görerek plağın yerinden kalkmasını engellemektedir.

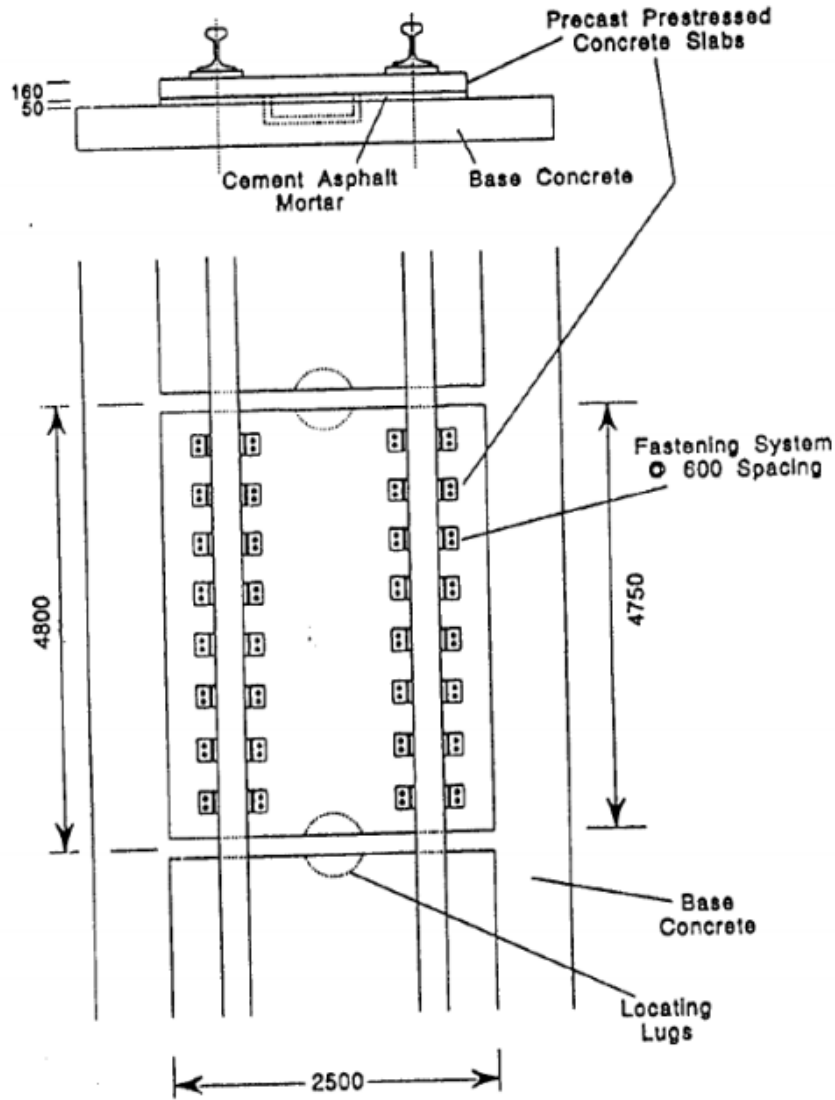


Şekil 2.33: ÖBB-Porr üstyapı enkesit ve plak görüntüsü [5].

Plakla betonu ayıran bitümlü kaplama plağın altında sönümleyici bir eleman olarak davranmaktadır. Aynı zamanda bir hasar olması durumunda plağın yerinden kaldırılmasını da kolaylaştırıcı bir özellik gösterir [6].

IPA

Bu üstyapı sistemi Japon Shinkansen üstyapısından esinlenilerek Japon Demiryolları işbirliği ile İtalya’da geliştirilmiştir. Tasarım olarak Shinkansen sistemiyle aynıdır ancak enine ve boyuna yatay kuvvetleri alttaki beton tabakaya aktaran “stoper” olarak adlandırılan elemanların yeri değiştirilmiştir. Bu elemanlar Shinkansen’de beton tabakada iken IPA’da plaktır ve elemanlar için taşıyıcı beton tabakada yuvalar bırakılmaktadır. Şekil 2.34’te görüleceği üzere boyutları 4,75m x 2,5 m’dir. [6].

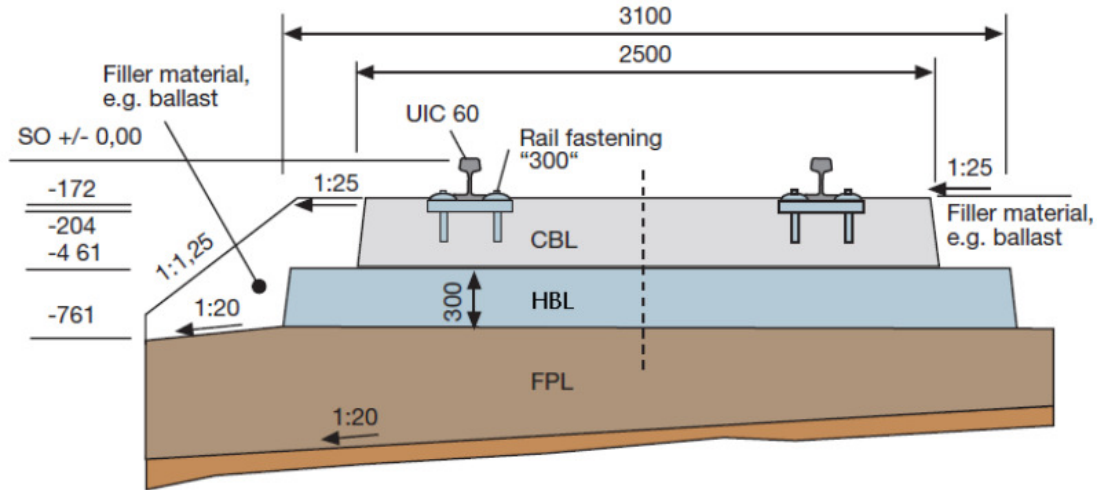


Şekil 2.34: IPA üstyapı plan ve enkesiti [5].

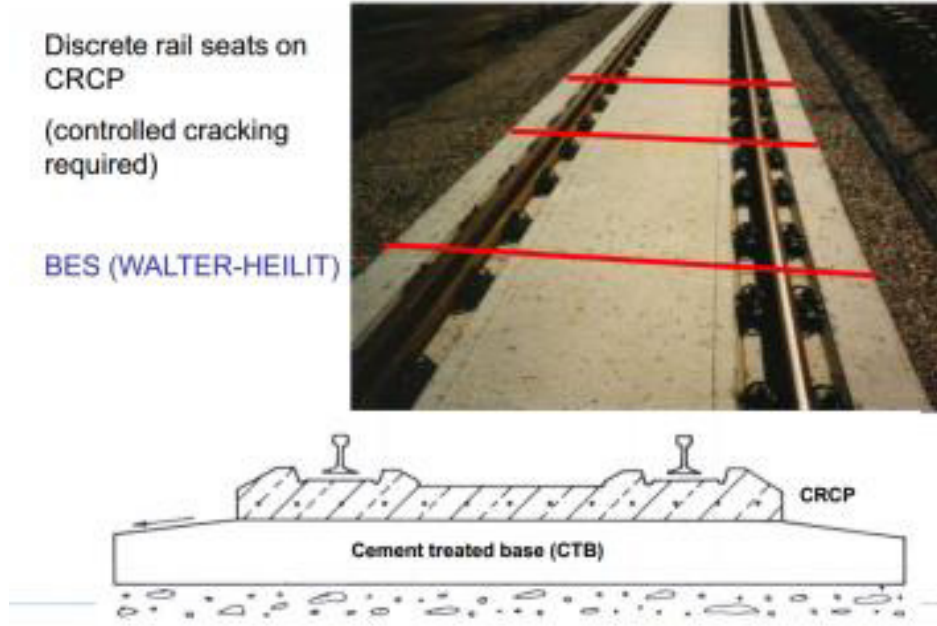
2.4.2.2 Tek parça yerinde döküm betonarme üstyapılar

Bu sistemler yerinde dökülen sürekli beton döşeme üzerine direk olarak tespit edilmiş raylardan oluşmaktadır. Dünyada bu tür sistemlerde çeşitli firmaların ürettiği farklı isimlerde üstyapılar kullanılmıştır. Bunlar başlıca Lawn Track/RASENGLEIS, FFC, Hochtief, BES, BTE-BWG/HILTI ve PACT olarak sıralanabilir.

Örneğin BES olarak adlandırılan üstyapı sisteminde düz beton döşemeyle başlayan ilk çalışmaların ardından kayar kalıp kullanarak bir travers kesitine benzeyen beton temel şeklinde bir yapı uygulanmıştır. Yüzeyi travers gibi şekillendirilmiş döşemenin yanında bağlantı elemanlarının üzerine monte edildiği (rayın oturacağı) bir bant oluşturacak şekilde yapılması da mümkündür. Şekil 2.35 ve Şekil 2.36'da BES üstyapısına ait enkesit ve uygulama görülmektedir. Şekil 2.36'da kırmızı ile gösterilen çizgiler çatlak oluşumunu engellemek için döşemde 3,90 m aralıklarda bırakılan derz yerlerini göstermektedir. Derzler alttaki çimentolu zeminde bırakılan izlerin üzerinde olacak şekilde bırakılır ve kalınlığın %25-30'u oranında kesilerek derinleştirilir. Bu izler serbest çatlak oluşumunun kontrol altına alınmasında önemli bir görev üstlenmektedir [4].



Şekil 2.35: BES üstyapısı sistemi enkesiti [5].

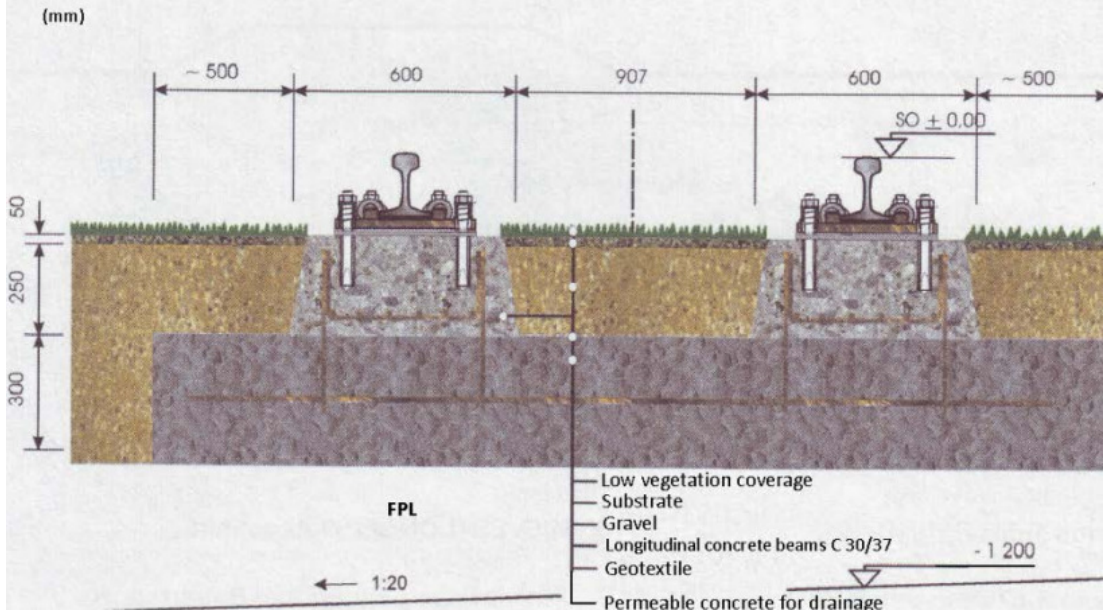


Şekil 2.36: BES üstyapı sistemi uygulama ve enkesit [4].

Şekil 2.35’den görüleceği üzere genel olarak BES, çimento ile iyileştirilmiş bir zemin üzerinde dökülmüş düz beton bir döşeme olarak teşkil edilmektedir. Aynı zamanda boyuna donatısı olmayan beton döşeme olarak da yapılabilir. Bu durumda döşeme derzlerle tekil parçalara bölünür ve birleşim yerlerinde (enine derz) saplama donatılar bırakılır.

BES sistemini inşa ederken yandaki hattın kullanılmasına gerek olmaması ve yandaki hat işletme altında iken BES üstyapısını inşasının diğerlerine nazaran daha kolay olması sistemin avantajı olarak söylenebilir. Ayrıca, sürekli betonarme döşeme, standart kurtarma trafiğine izin verir ve yol iş makineleri de bu döşeme üstüne ilave bir döşeme serilmesine gerek olmadan hattı kullanabilir [4].

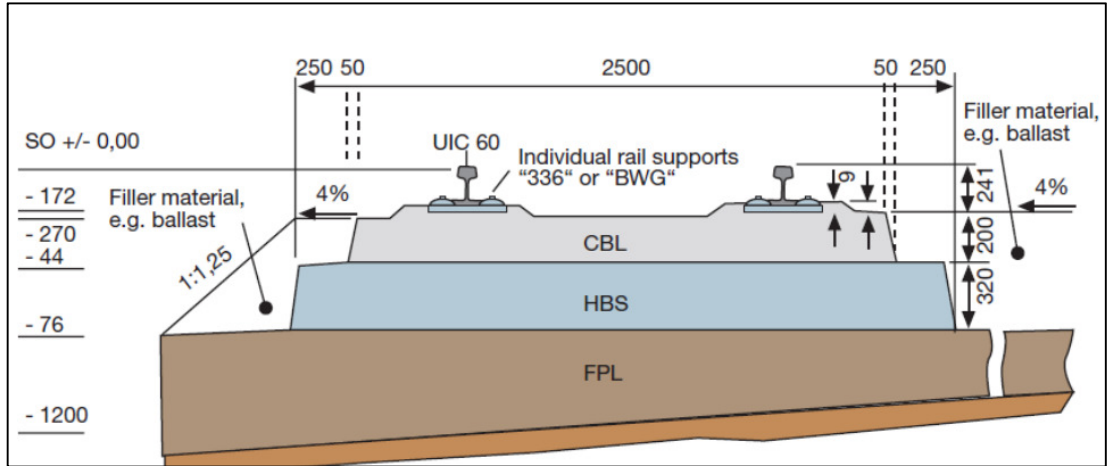
Bu türe giren bir diğer örnek Lawn track/RASENGLEIS üstyapısına ait enkesit Şekil 2.37’de görülmektedir.



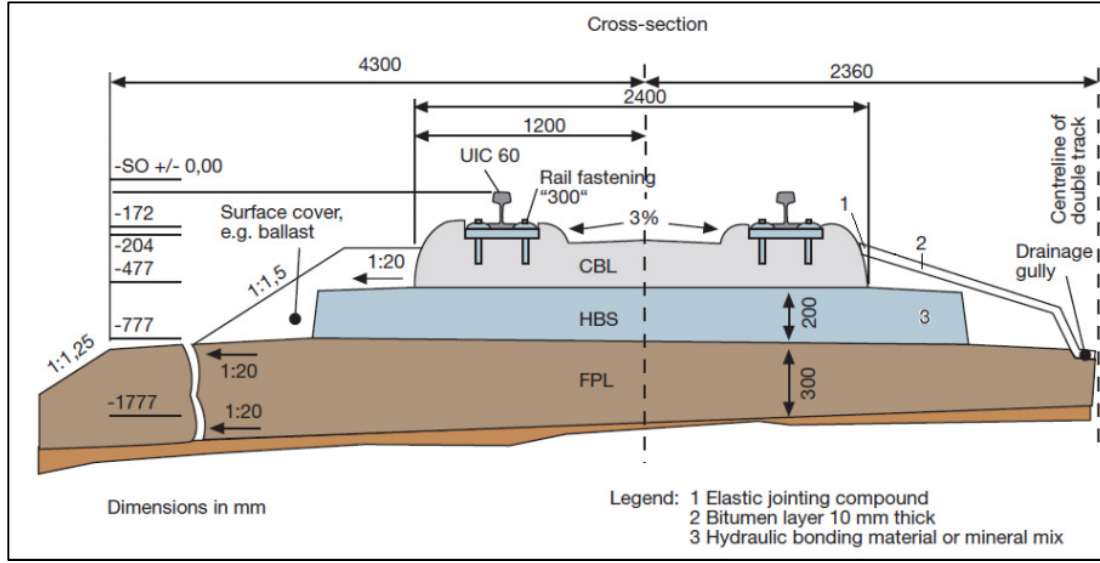
Şekil 2.37: Lawn track/RASENGLEIS üstyapı enkesiti [5].

Bu türde rayların altında döşeme yerine yerinde döküm sürekli kiriş yer almaktadır. Bu kirişler altında taşıyıcı beton tabaka ve bu tabaka altında da drenaja katkı sağlamak için geçirimli beton tabaka bulunmaktadır. Kirişler arasında kalan boşluk önce toprak dolgu ile doldurulur ve üstü çimlendirilerek yüzeyde güzel bir görünüm elde edilmektedir. Aynı zamanda çim iyi bir gürültü sönümlenmesine de yardımcı olur ve yüzeydeki suyun drenajına da engel olmaz. Buradaki ray altındaki kirişli yapı "plinth" betonu olarak da adlandırılmaktadır [4, 5].

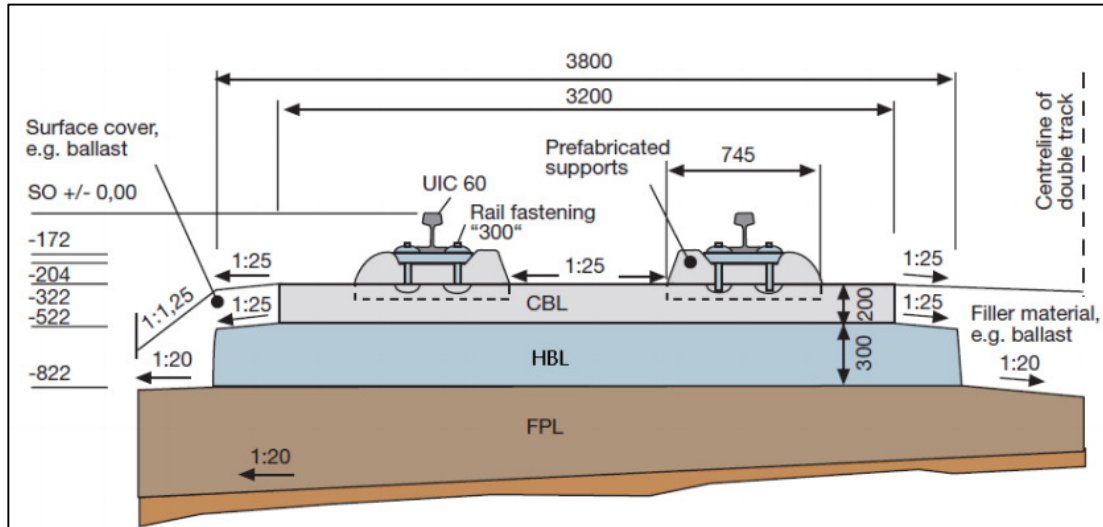
Yukarda açıklananların dışında bu başlık altında incelenen diğer üstyapı sistemleri temelde birbirine benzemektedir. Bunlara dair enkesitler Şekil 2.39, Şekil 2.40 ve Şekil 2.38'de görülebilir.



Şekil 2.38: BTE üstyapı enkesiti [5].

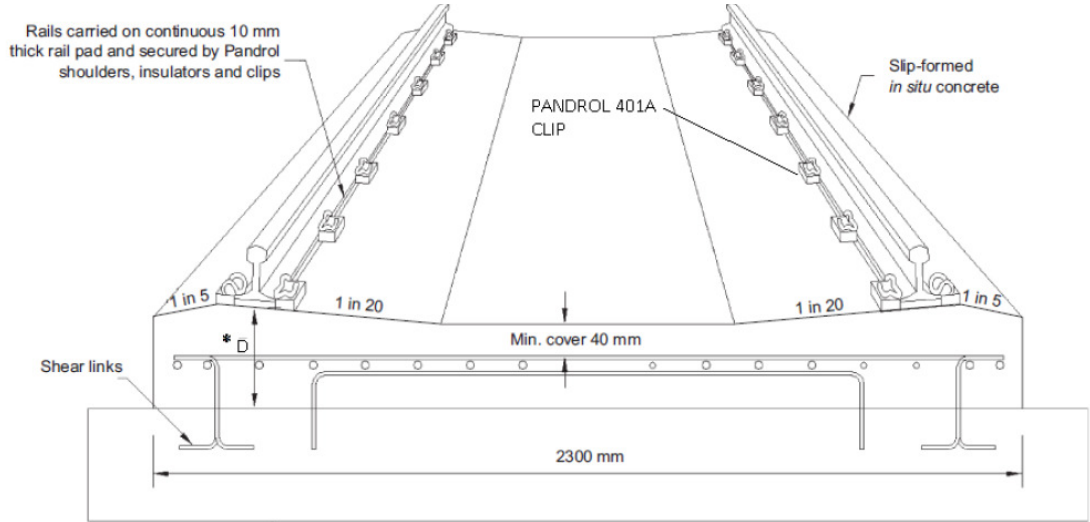


Şekil 2.39: FCC üstyapı enkesiti [5].



Şekil 2.40: Hochtief/SHRECK-MIEVES/LONGO üstyapı enkesiti [5].

Bunlara ilaveten İngiltere’de geliştirilmiş olan PACT sistem yukarıdakilere göre biraz farklı bir yapıdadır. Bu sistem temelden başlayarak üstte doğru inşa edilmektedir ancak günümüzde üstyapı sistemlerinde genel olarak “top-down” (üstten tabana doğru) yapım metodu tercih edilmektedir. Şekil 2.41’de üstyapı özellikleri görülmektedir [5].



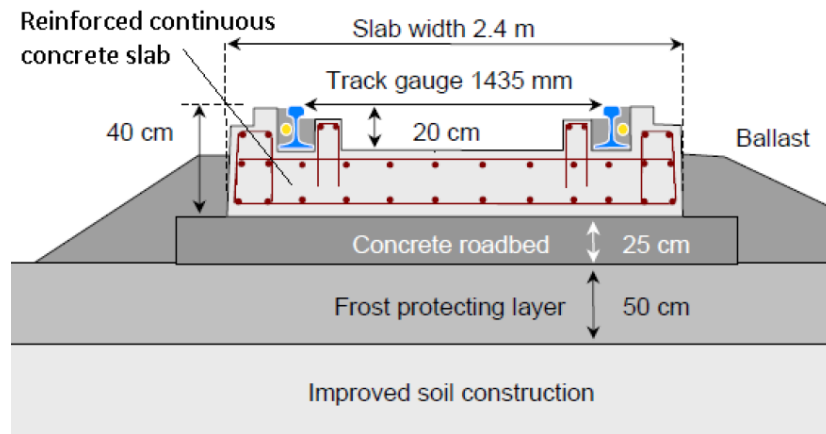
Şekil 2.41: PACT üstyapı sistemi [5].

2.4.3 Sürekli desteklenmiş raylı sistemler

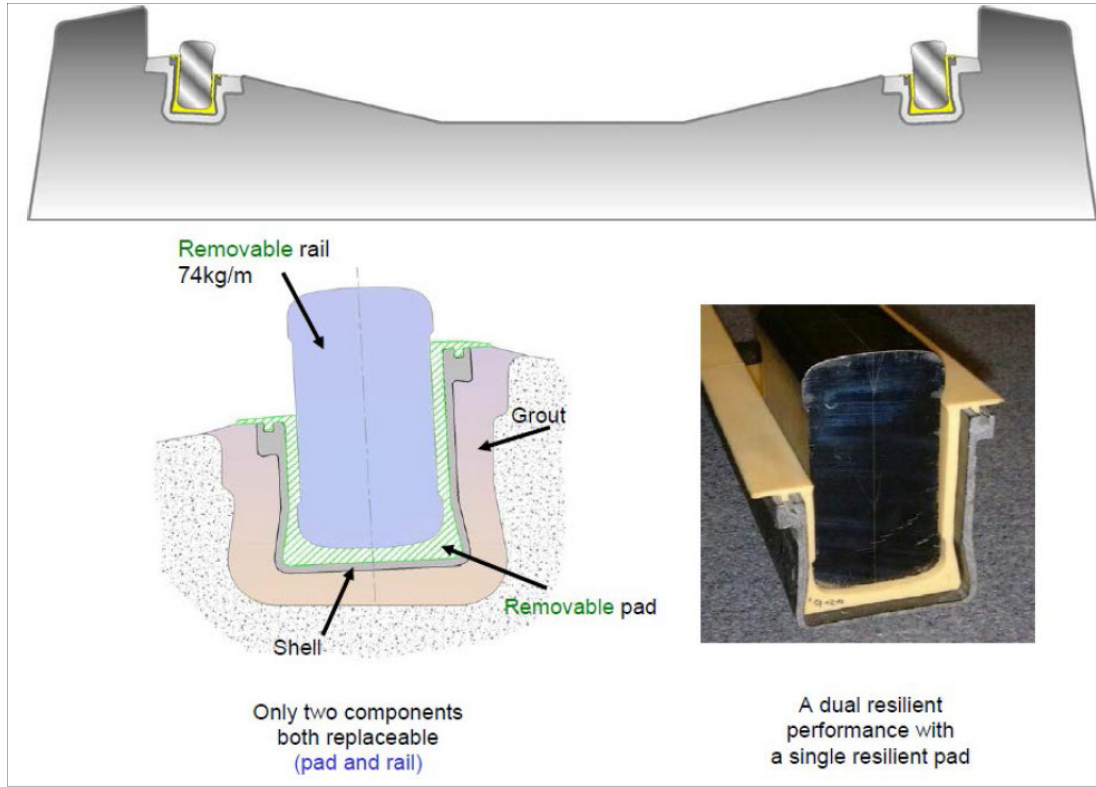
Bu sistemlerde iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Birinde raylar gömülü durumda olup bağlantı elemanı gerektirmemekte, diğerinde raylar bağlantı elemanları kullanılarak sabitlenmektedir.

2.4.3.1 Gömülü raylı sistemler

Gömme raylı sistemlerde ray üstyapı sisteminde bırakılan özel yuvasına yerleştirilmektedir. Burada elastiklik rayın yerleştirildiği oluğun içi sürekli olarak elastik bir malzeme ile kaplanarak sağlanmaktadır. Bu türde de farklı isimler altında uygulamalar yapılmıştır. Bu üstyapılar özellikle tramvay hatları için uygun bir sistemdir. Bunlara örnek olarak Deck Track, INFUNDO-Edilon ve BBERS üstyapı sistemleri gösterilebilir. Bu sistemlere ait enkesitler Şekil 2.42, Şekil 2.43 ve Şekil 2.44'te gösterilmiştir [5].



Şekil 2.42: INFUNDO-Edilon üstyapı enkesiti [5].



Şekil 2.43: BBERS üstyapı enkesiti [5].

Deurne (Hollanda) yakınlarında 1976 yılında uygulanan pilot projede, işletim hızı 160 km/h değerine kadar çıkmıştır. Hatta eski NP46 tipte raylar ve 6 m'lik prefabrik beton plaklar kullanılmış olup olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Raylardaki aşınma oranının da diğerlerine göre önemli miktarda az olduğu yapılan yenileme çalışmalarıyla gözlenmiştir [6].

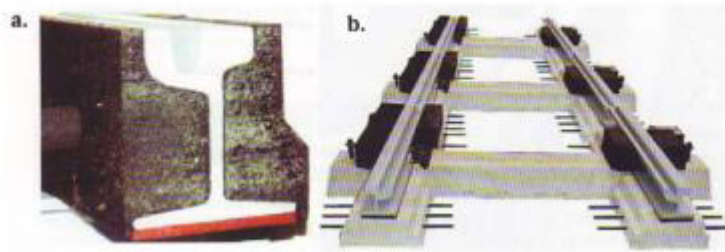


Şekil 2.44: Deck Track üstyapı sistemi [5].

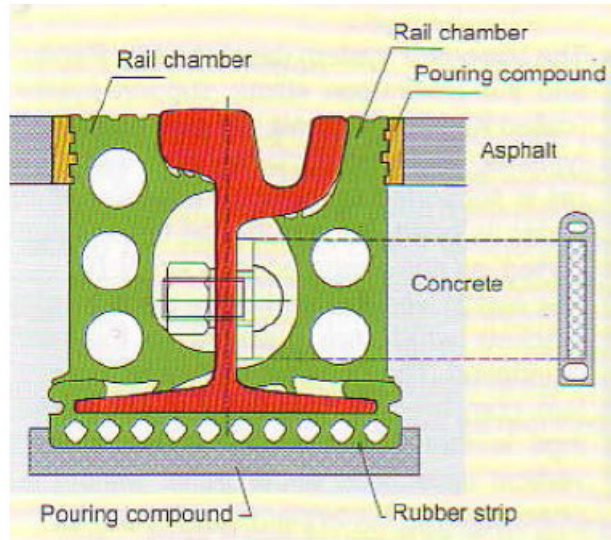
2.4.3.2 Bağlantı elemanlı raylı sistemler

Bu türde de raylar sürekli destekli bir durumdadır ve betona gömülerek değil bağlantı elemanlarıyla sabitlenmektedir. Dünyada çeşitli uygulamaları yapılmıştır. Bunlar ERL, Vanguard, KES, Track, SFF ve Saargummi üstyapı sistemleri olarak gösterilebilir. Raylar sürekli destekli olduğundan kullanılacak bağlantı elemanı sayısının azalacağı açıktır. Genel olarak rayların çevresi tamamen elastik malzemelerle kaplanmakta ve ray altında sürekli bir şekilde elastik tabaka bulunmaktadır.

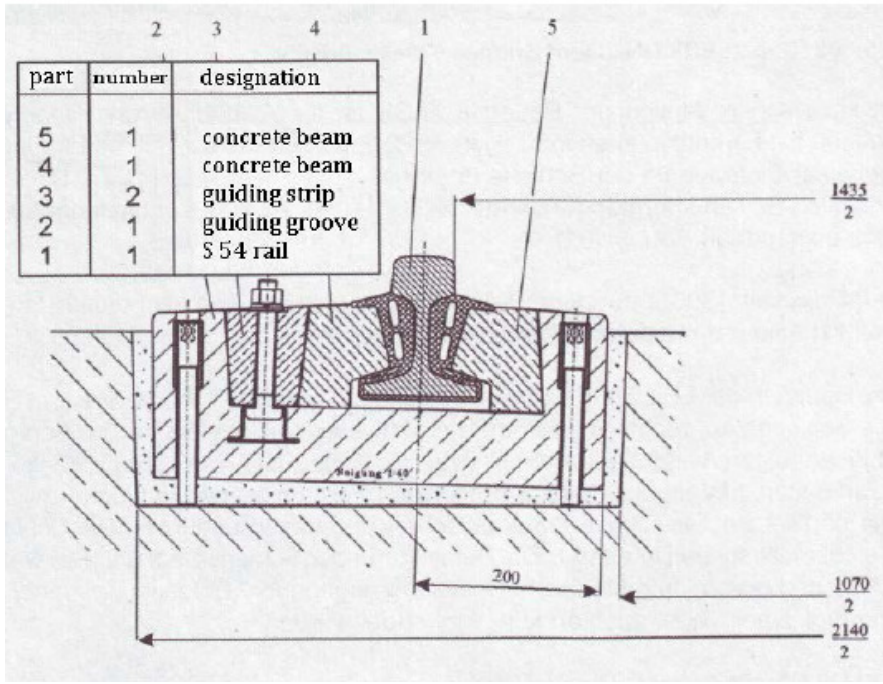
Şekil 2.45'te Cocon, Şekil 2.46'da ERL, Şekil 2.47'de SFF, Şekil 2.48'de Saargummi ve Şekil 2.49'da KES üstyapısı gösterilmektedir.



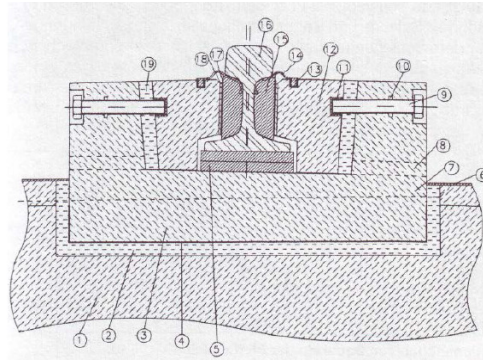
Şekil 2.45: Cocon üstyapı [5].



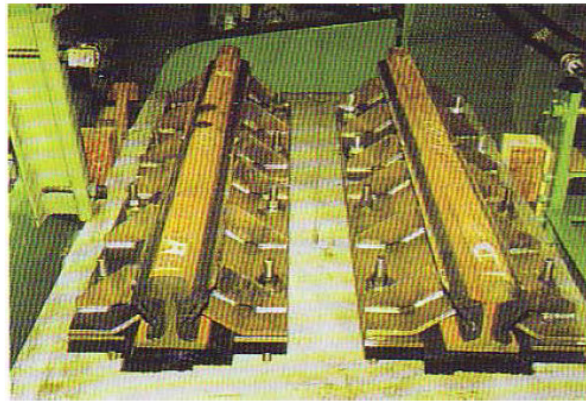
Şekil 2.46: ERL üstyapı sistemi [5].



Şekil 2.47: SFF üstyapı kesiti [5].



Şekil 2.48: Saargummi üstyapı kesiti [5].



Şekil 2.49: KES üstyapı [5].

2.4.4 Balastsız üstyapıların avantajları

Edinilen tecrübelerle göre balastsız üstyapının avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [2, 3]:

- Yüksek seyir hızlarına uygundur.
- Metro hatlarında tünel kesitinin küçültülmesine imkân verir, dolayısıyla maliyette tasarruf sağlanmış olur.
- Köprü ve viyadüklerde balastın kaldırılması neticesinde köprülere etkileyen yükün azaltılması sağlanmış olur
- Dingil yükü ağır olan taşıtların hareketine daha uygundur.
- Aynı şartlarda işletme koşullarında balastlı üstyapıya göre altyapıya aktarılan gerilmeler daha azdır.
- Balastlı üstyapıya göre ömrü daha uzundur ve bakım masrafları daha azdır.

3. YERİNDE DÖKME BETON ÜSTYAPI ELEMANLARI

Klasik bir demiryolunda kullanılan elemanlardan farklı olarak rijit üstyapıda balastın yerine betonarme veya asfalt bir yapı bulunmaktadır. Daha önceki bölümde açıklanan üstyapı tiplerine bakıldığında traverslerin yerine betonarme plak veya kiriş elemanların da kullanıldığı görülecektir. Rijit demiryolu üstyapısını meydana getiren elemanlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Ray
- Bağlantı elemanları
- Travers / betonarme plak / plinth betonu (ray altı kirişi)
- Betonarme/asfalt veya güçlendirilmiş yatak

3.1 Raylar

Raylar demiryolu araçlarına yuvarlanma yüzeyi sağlayan ve aynı zamanda kılavuz görevi gören üstyapı elemanlarıdır. Raylar günümüzde yüksek mukavemetli çelik malzemeden üretilmektedir. 1767 yılında maden ocaklarında Reynold tarafından taşıyıcı ahşap kirişlerin üzerinde koruma görevi gören bir yapı şekli kullanılmış, daha sonra 1789 Jessop tarafından taşıyıcı özellikte raylar kullanılmaya başlanmıştır [3].

Rayın sıvı haldeki çelik malzemesi yaklaşık 1250 °C’de haddeleme işlemine sokulur ve daha sonra 50 °C’de düzeltme işlemine tabi tutulur. Bu işlem sırasında ray içinde istenmeyen gerilmeler oluşabilir. Bu tip kusurlar ultrasonik yöntemle tespit edilir. Ray yüzeyindeki kusurlar da girdap akım yöntemi kullanılarak tespit edilir [11].

Raylar uygulamada yaygın olarak 18, 24, 30, 36 m boylarında üretilir. Bundan daha büyük boylarda da ray üretilmektedir. Demiryolunda konforu artıran bir faktör de rayların kaynakla birleştirilerek uzun kaynaklı ray (UKR) olarak kullanılmasıdır. Büyük boyda ray kullanımı kaynak ve işçilikten tasarruf sağlayacaktır ve taşıma ve montaj süresini de azaltacaktır.

TCDD ve DLH (AYGM) kriterlerine göre kullanılacak minimum ray boyu 50 km/h hızlarda 3 m, daha büyük hızlı hatlarda ise 5 m olmalıdır. Dar kurplarda

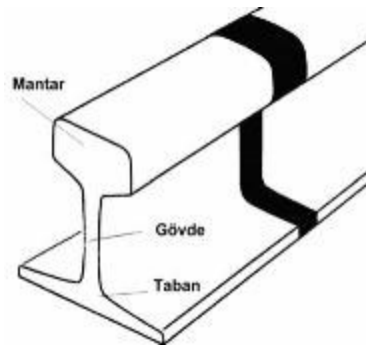
rayların özel makinelerle bükülmesi gerekmektedir. Alman Demiryollarına göre bu sınırlar oluklu raylarda yarıçapı 180 m altındaki kurplar, Vinyol tipi raylar için de yarıçapı 150 m altındaki kurplardır. Ray profillerinin ağırlıkları ilk zamanlarda 25 kg/m ve daha düşük ağırlıkta idi. Zamanla demiryollarındaki ve demiryolu araçlarındaki gelişme ile birlikte artan ihtiyaca cevap verebilmek için ray kesitleri artırıldı ve günümüzde birim ağırlıkları 70 kg/m'ye kadar çıkmıştır [11].

Normal demiryollarında Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) standartlarına uygun raylar kullanılmaktadır. UIC 54, UIC 60, UIC 71 başlıca kullanılan raylardır. 2001 yılında EN 13674 ray sınıflandırma standardı UIC yerine yürürlüğe girmiştir. Sıkça kullanılan raylara ait mekanik özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Rayların mekanik özellikleri.

Ray tipi	Kesit alanı (mm ²)	Birim ağırlık (kg/m)	Mukavemet momenti W (cm ³)	Atalet momenti I (x 10 ⁻⁸ m ⁴)	Eğilme rijitliği EI (x 10 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	1,14
UIC60	7687	60,34	377	3055	6,42	0,97
BS113A	7183	56,39	278	2349	4,90	1,18

Raylar Şekil 3.1'de görüldüğü gibi mantar, gövde ve taban olmak üzere üç kısımdan oluşur.



Şekil 3.1: Rayın kısımları [12].

Mantar: Mantar tekerleklere yuvarlanma yüzeyi sağlayan kısımdır ve aşınmaya karşı sertleştirme işlemi uygulanır. Tekerlek temasının iyi olması için mantarın üst kısmı bombelidir. Üst köşeler buden içi eğriliğe uygun olması için dairesel şekillidir [11].

Gövde: Mantar ile tabanı birleştiren kısımdır. Rayların bulonlu (cebireli) birleşimleri gövde kısmından yapılır. Bu nedenle gövde tasarımında tekerlek yüklerine ilaveten burada açılacak bulon delikleri ve bu delikler civarında meydana gelecek kesme gerilmeleri de dikkate alınır.

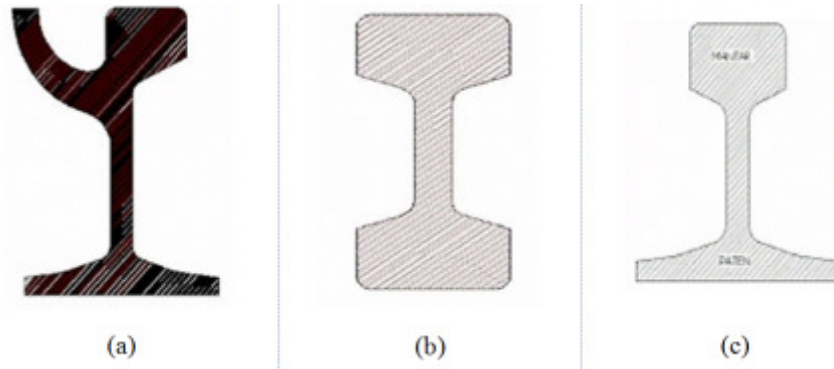
Taban (paten): rayın traverslere veya travers görevi gören beton kiriş ya da plağa basmasını ve tespitini sağlayan kısımdır. Rayın devrilmemesi için mantar kısmından daha geniş ve altı düz olarak tasarlanmıştır. Böylece alttaki traverslere veya betona gerilmeler daha geniş bir alana yayılarak azaltılmış olarak aktarılır.

3.1.1 Ray tipleri

Günümüzde demiryollarında üç tip ray kullanılmaktadır:

- Oluklu raylar
- Çift mantarlı raylar
- Tek mantarlı (Vinyol tipi) raylar

Bu tiplere ait enkesitler Şekil 3.2’de görülmektedir.



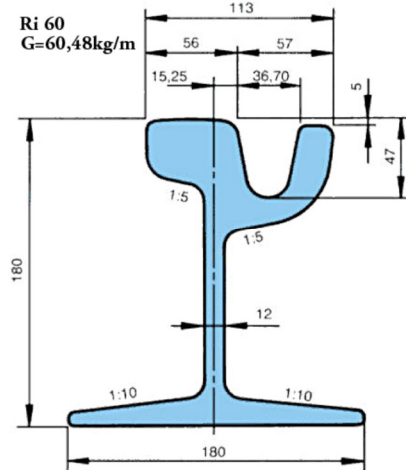
Şekil 3.2: Ray tipleri, a) Oluklu ray b) Çift mantarlı ray c) Vinyol tipi ray.

3.1.1.1 Oluklu raylar

Oluklu raylar çoğunlukla cadde seviyesinde aynı zamanda karayolu olarak kullanılan yollarda kullanılmaktadır. Genellikle tramvay hatları başlıca kullanım alanı olmakla birlikte hemzemin geçitlerde, karayolu araçlarının kullanacağı demiryolu kısmında da kullanılmaktadır.

3.1.1.2 Çift mantarlı raylar

Şekil 3.2 (b)’de görüldüğü gibi biri üstte diğeri altta olmak üzere iki mantar bulunmaktadır. Bu ray ilk başta üst mantar aşındıktan sonra rayın ters çevrilmesiyle



Şekil 3.4: Oluklu ray kesiti [12].

3.1.2 Raylarda bulunması gereken özellikler

1. Ray, gövdesinin üzerine gelen dingil yüklerini taşıyabilmesi ve yeterli esneme mukavemeti sağlayabilmesi için yeterli kalınlıkta olmalıdır.
2. Ray mantarı aşınmaya karşı yeterli dirence sahip olmalı ve buna uygun olacak şekilde sertleştirilmiş olmalıdır.
3. Tekerlekle temas yüzeyinin istenen şekilde bir temas sağlanabilmesi için optimum ovalliğe sahip olması gerekir.
4. Gövde kalınlığının bulonlu (cebireli) birleşimler de dikkate alınarak açılacak deliklerden dolayı kesit zayıflamasına meydan vermeyecek şekilde yeterli kalınlıkta olmalıdır [2]

3.2 Bağlantı Elemanları

Bağlantı elemanları rayları traverslere veya rijit üstyapıya direk olarak tespit edilmesini sağlayan malzemelerdir. Demiryolunda bağlantı elemanı olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar şöminman bağlantıları (anti şöminman takozu), travers ankrajları, pedler ve ray tespit elemanları olarak sıralanabilir. Bağlantı elemanı dendiğinde ilk akla gelen malzeme rayı traverslere tespit eden malzemeler olup burada bu tip bağlantı malzemeleri üzerinde durulacaktır.

Bağlantı elemanlarının aşağıdaki özellikleri sağlaması gerekir:

- Ekartman genişliğinin ve ray eğiminin bozulmamasını sağlamak
- Raydan gelen yükleri emniyetli bir şekilde traverse veya alttaki betonarme plağa iletmek

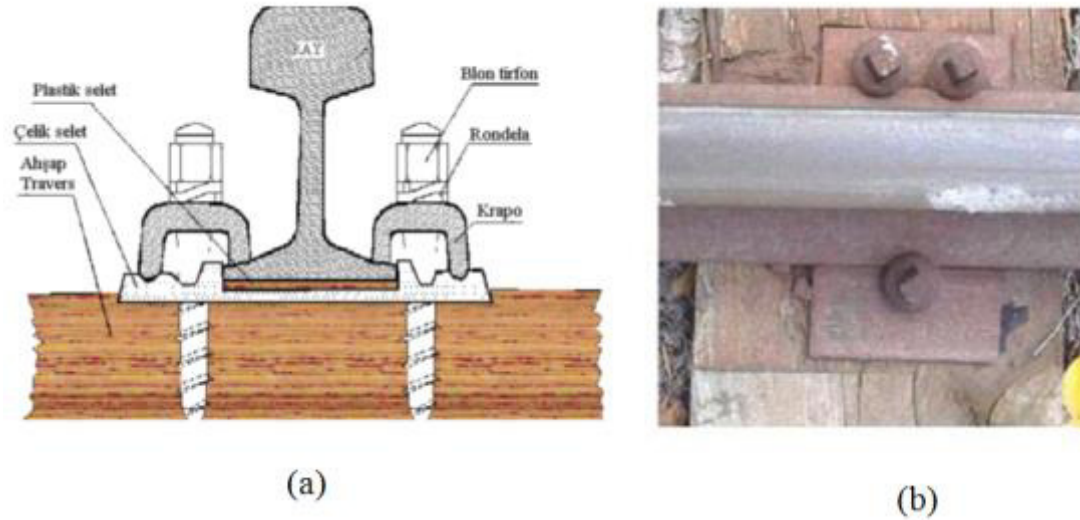
- Ray altı elastik ped vasıtasıyla elektrik izolasyonu sağlamak
- Elastik pedlerin gürültü ve titreşimleri istenen seviyede sönümleyecek kapasitede olması
- Proje ömrü içinde yeterli dayanımı sağlamalı, deforme olmamalı
- Yanal kuvvetlere karşı yeterli dayanıklılıkta olmalı
- Montaj ve bakımının kolaylıkla yapılabilir olması

Ray bağlantı elemanları rijit ve elastik olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır.

3.2.1 Rijit bağlantı sistemi

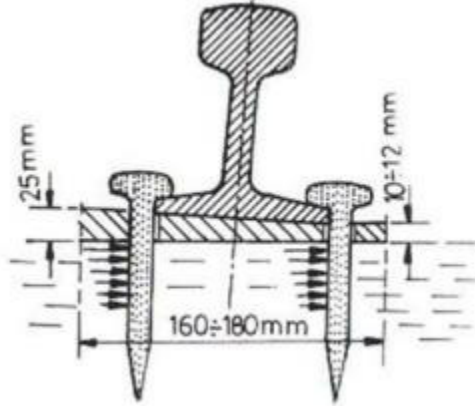
Rijit bağlantılar sadece ahşap ve demir traverslerde kullanılmaktadır. Bu sistemde raylar traverslere bulon veya çivilerle doğrudan bağlanır. Bağlantı elemanı sürekli dinamik yüklere maruz kaldığından bulon ve çivilerde zamanla gevşeme olmakta ve bağlantı özelliği zayıflamaktadır ve derayman riski ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu bağlantıların bakımı ve takibi elastik bağlantılara göre daha zor olmaktadır.

Şekil 3.5'te N tipi rijit bağlantı kesit ve görünüşü gösterilmektedir.

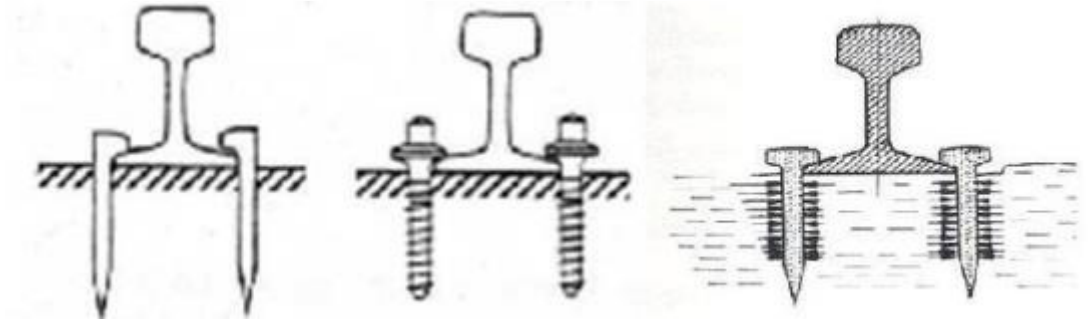


Şekil 3.5: N tipi rijit bağlantı a) Kesit b) Plan görünüşü [13].

Seletli ve seletsiz rijit bağlantılara ait kesitler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de görülebilir.



Şekil 3.6: Seletli rijit bağlantı [14].



Şekil 3.7: Seletsiz rijit bağlantılar [14].

3.2.2 Elastik bağlantı

Bu sistemde cıvatalı ve yaylı olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Elastik bağlantı tipi cıvatalı ve yay (gergi kısılacı)lı olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Direkt (rijit) bağlantıların zamanla gevşemesi ve bakım sorunu ortaya çıkarması nedeniyle ülkemizde de son yıllarda elastik bağlantı sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Cıvatalı tipe örnek Nabla bağlantısı Şekil 3.8’de görülmektedir.



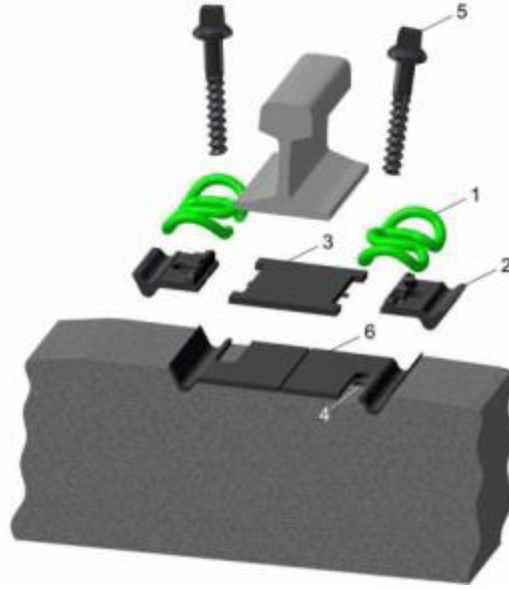
Şekil 3.8: Nabla bağlantı elemanı (cıvatalı elastik bağlantı elemanı) [14].

Cıvatalı tipe örnek Nabla bağlantısında Şekil 3.8’de görüldüğü üzere gergi kısılacı yerine yaylanma görevini üstlenen bir plaka kullanılmaktadır. Plaka yerine çubuk şeklinde bir eleman da kullanılabilir.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.9’da Pandrol ve Vossloh yaylı bağlantı elemanlarını oluşturan parçalar gösterilmektedir. Bunlar farklı gergi kısılacı kullanılan iki farklı tip bağlantılar yaylı bağlantılara örnek gösterilebilir.



Şekil 3.9: Pandrol bağlantı elemanı (yaylı bağlantı) [14].



Poz.	Bileşenler
1	Gergi kısıkaçı Skl 21
2	Açı kılavuz plakası Wfp 21 K NT
3	Elastik ray seleti Zw 1000
4	Plastik dübel Sdü
5	Tirfon Ss
6	Yükseklik ayar plakası HAP

Şekil 3.10: Vossloh bağlantı elemanı (yaylı bağlantı) [14].

3.3 Traversler

Balast tabakası ya da rijit tabaka üstüne belli aralıklarla döşenmiş, ray vasıtasıyla aktarılan dingil yüklerini alıp yayarak altındaki balast veya rijit tabakaya ileten, raya mesnet görevi gören üstyapı elemanlarıdır. Traversler aynı zamanda yan etkilere karşı da hattı korumaktadır, bunun yanında ekartman genişliğini sabit tutma görevini de yerine getirmektedirler. Traversler ahşap, betonarme, çelik ve plastik olmak üzere dört kısma ayrılır.

Traverslerin gerçekleştirmesi gereken görevler [11]:

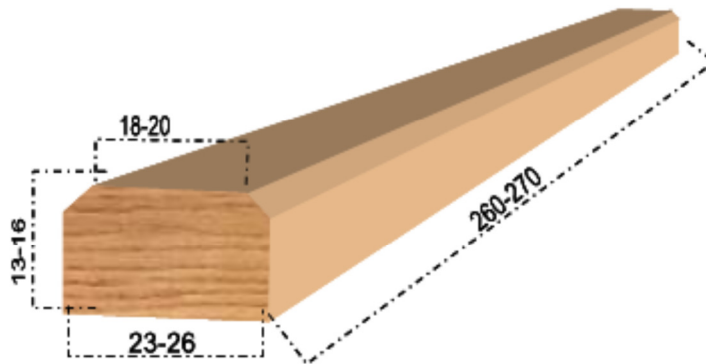
- Raydan gelen yükleri yayarak alt tabakaya iletmek
- Hat açıklığı (ekartman)ı sabit tutmak
- Traverslerde rayların oturacağı kısma önceden eğim verilerek uygun ray eğiminin (1/20 veya 1/40) travers ile sağlanması.
- Traverslerin montaj açısından en uygun ağırlığa sahip olması gerekir. Stabilite açısından çok hafif olmaması istenir.
- Proje ömrünü tamamlayacak derecede sağlam ve çevre şartlarına bu süre boyunca dayanması istenir.
- Kullanılacak rayın tespitine uygun imal edilmesi gerekir
- Yatay ve düşey yönlerde yeterli mekanik dayanıma sahip olmak.
- Ani kırılma olmaması için yeterli derecede elastiklik özelliğine sahip olmalı

Modern demiryollarına ilk olarak ahşap traversler kullanılmıştır. Daha sonra artan ihtiyaçlara cevap vermesi açısından çelik traversler geliştirilmiş ve birçok yerde kullanılmıştır. Beton teknolojisinin gelişmesi sonucunda beton malzemesinde de kırılmalara karşı yeterli mukavemet elde edilmesiyle daha ağır yükleri taşımada beton traversler tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak günümüzde hafif olması ve betona göre daha elastik olması dikkate alınarak ahşap travers kullanımına devam edilmektedir. Bunların yanın da plastik malzemedен travers kullanımı da denenmiştir.

3.3.1 Ahşap travers

Demiryolunda dünyada en çok kullanılan travers tipi ahşap traverstir. Ahşap traversleri ömürleri ortalama 20 yıldır. Kreozotlama adı verilen ilaçlama yöntemiyle traversin ömrü ağaç cinsine bağlı olarak 45 yıla kadar çıkabilmektedir. Bunun yanında bazı sert ağaçlardan elde edilen traverslerin ömrü 50 yılı bulmaktadır. Kreozotlama, 1 m³ ahşaba 10 bar basınç altında 500 kg katran yağı emdirilerek yapılmaktadır. Bununla birlikte traversin ömrünü muhafaza edebilmek için ahşabın çatlaması ve uçlardan yarılmasının önüne geçilmelidir. Bunun için travers uçlarına çelik bilezik ile çemberleme yapılması ya da alınlarına plaka veya demir çakılması yöntemi uygulanır [11].

Ahşap travers boyutları UIC 863 standardında belirtilmiştir. Kabul testleri, toleransları ve ebatlarını tanımlayan diğer bir standart EN 13485 standardıdır. Şekil 3.11’de bir ahşap travers ölçüleri gösterilmektedir. Şekil 3.12’de ahşap travers koruma yöntemleri görülmektedir.



Şekil 3.11: Ahşap travers ölçüleri [15].



Şekil 3.12: Ahşap travers koruma yöntemi a) S demiri b) Delikli plaka [15].

Ahşap traverslerin hatta adaptasyonu 1-3 yıl kadar sürebilmektedir. Düşeydeki burkulması 5 mm'yi geçerse kullanılmamalıdır. Avrupada yapımında en çok kullanılan ağaç tipleri sırasıyla kayın ve meşedir. Bunlardan daha dayanıklı tropik ağaçlar olan okaliptus ve azobe de travers üretiminde kullanılan ağaçlardır. Kayın traversin ıslak taşıma dayanımı 2,5 Mpa ve kuru haldeki taşıma dayanımı da 3,8 Mpa'dır. Meşe de ıslak taşıma dayanımı 1,9 Mpa ve kuru durumda da 2,9 Mpa'dır [11].

Ahşap traverslerin hem olumlu hem de olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Olumlu özellikleri:

- Esnek olduğundan darbe emici özelliği vardır. Titreşimleri sönümler ve gürültüyü önler.
- Hafif olduklarından kolayca taşınabilir ve inşaat kolaylığı sağlar.
- Elektrik yalıtımı sağlar.

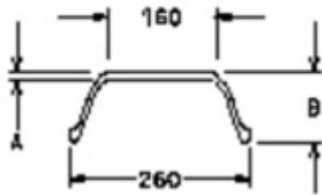
Olumsuz özellikleri:

- Rutubete karşı dayanıksızdır.
- Maliyetleri nispeten yüksektir.
- Ömürleri diğer traverslere göre kısadır.
- Yangına karşı dayanıksızdır.
- Hafif olduğundan yanal kuvvetlere dayanımı düşüktür.

- Cebireli birleşimlerde bulon delikleri zamanla genişlediğinden bağlantı elemanları zayıflar ve bu boşluklara su girip içerde çürümeye sebep olur, ayrıca deliklerde çatlaklar meydana gelebilir.

3.3.2 Çelik traversler

Çelik traversler demiryolunun ilk zamanlarından beri kullanılmışlardır. Ahşap ve beton traverse göre olumsuz yönleri nedeniyle bugün pek kullanılmamaktadır. Ömürleri iklim şartları da elverdiği sürece 50 yılı bulmaktadır. Çok rutubetli ortamlarda çelik traversler de paslanmaya maruz kalarak zayıflamaktadır. Genelde U kesitli olarak imal edilirler ve uçlarında bükülmüş şekildedir. Çelik travers uygulaması ve kesiti Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.13: Çelik travers (a) enkesiti (b) uygulaması [16].

Çelik traversler Şekil 3.14'te görüldüğü üzere Y tipi olarak da kullanılmaktadır. Bu türler genellikle düşük hızlı, dingil yükleri daha az olan tali hatlarda ve kentiçi raylı sistemlerde kullanılır. Normal traversten farklı olarak raya üç noktadan bağlanmaktadır. Diğerlerine oranla yanal ve boyuna yer değiştirmelerde daha yüksek dirençlidirler ve daha rijit bir çerçeve oluştururlar.



Şekil 3.14: Y tipi çelik travers [17].

Çelik traverslerin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi listelenebilir [2].

Olumlu yönleri:

- Ömürleri ahşap traverslere göre daha uzundur.
- Depolanması istiflenmesi kolaydır, diğer traverslerden daha az yer kaplar.
- Hafif olduğundan taşınması ve yerleştirilmesi kolaydır
- Yangına karşı ahşaptan daha dayanıklıdır
- Balastlı hatlarda balast içine gömülü olması hem balast tabakası kalınlığından tasarruf sağlar hem de uçlarındaki kıvrımlar sayesinde boyuna ve yanal yer değiştirmelere karşı direnci ahşap traversten daha fazla olur.

Olumsuz yönleri:

- Hafif olması ray ve traverslerin teşkil ettiği çerçevenin stabilitesini düşürür.
- Darbelere karşı direnci zayıftır. Şekil değiştirmelere maruz kalmaktadır.
- Titreşim ve darbeleri sönmülmesi iyi olmadığından konfor ve gürültü açısından avantajlı değildir.
- Elektrik iletkenliği nedeniyle izolasyon sağlanması daha zordur.
- Bakım maliyetleri yüksektir.
- Rutubetli ortamlara karşı dayanımı düşüktür.
- Çarpma vb. sönmülendirilemeyen şoklar nedeniyle balastta aşınma olur. Balast tabakasına iletilen şiddetli darbeler balastın ufalanmasına ve su geçirme özelliğinin azalmasına neden olur.
- Yanal yer değiştirmelerde beton traverten göre daha az dirençlidir.

3.3.3 Beton traversler

Ahşap ve çelik traverslerden sonra demiryolunda artan yüklerin uzun süre ve emniyetli, aynı zamanda da konforlu bir şekilde karşılanabilmesi için beton teknolojisinin de gelişmesiyle birlikte beton traversler kullanılmaya başlandı.

İlk olarak 1920 yılından sonra monoblok olarak kullanılmaya başlandı. İlk zamanlarda donatısız olarak üretilmişlerdi. Sonra donatısız traverslerin çatlaması sonucu demir çubuklarla birbirine bağlı ikiz blok halinde kullanıldı. Edinilen tecrübeler neticesinde çatlama ve kırılmaların önüne geçebilmek için ray altı elastik pedler kullanılmaya başlanmış ve donatılı beton traversler tasarlanmıştır. Beton kalitesinin artması ve art-germe ve ön-germe tekniğinin uygulanmasıyla beton traverslerde iyi bir başarı elde edilmiştir. Günümüzde yeni demiryollarında genellikle beton travers tercih edilmektedir.

Beton traverslerin ömrü yaklaşık 50 yıl kadardır. Beton sınıfı EN13230-1:2002 standardında C45/55 olarak verilmektedir. Su/çimento oranı ise 0,45'in altında olmalı ve çimento dozajının 300 kg/m^3 den az olmaması sağlanmalıdır [2, 11].

3.3.3.1 Beton traverslerin özellikleri

- Sert ahşap traverslere göre daha ucuzdur.
- Servis ömrü daha uzundur.
- Yanal yer değiştirmeye karşı direnci ahşap traversten daha fazladır.
- Bağlantı elemanlarının bakımı ahşaplara göre daha azdır.
- Ağırlığı fazladır. Bu açıdan yerleştirmesi zor olmakla birlikte çerçeve stabilitesini artırır.
- Esnekliği az olduğundan titreşimlerin ve gürültünün önlenmesi için elastik ped kullanılması gereklidir.
- Taşıma ve montaj sırasında dikkat edilmesi gerekir, çatlama veya kırılma olması durumunda beton travers kullanılmaz hale gelir [2].

Beton traversler monoblok ve ikiz blok olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir.

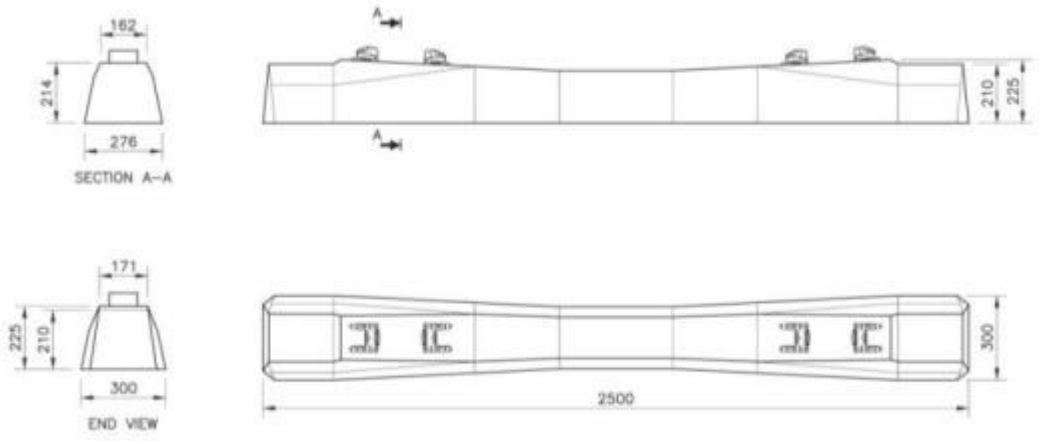
3.3.3.2 Monoblok beton traversler

Demiryollarında kullanılan betonarme traverslerin yaklaşık %80'i monoblok, %20'si ikiz blok traverstir. Çeşitli kesitlerde üretilmektedir. Orta kısmında gerilmeler azaldığı için kesit daraltılmaktadır [15].

B70 tipi monoblok beton travers özellikleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.15: B70 tipi monoblok beton travers [18].



Şekil 3.16: B70 tipi bir monoblok beton travers ölçüleri [19].

Monoblok traverslerin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [11]:

- Orta kısmında çelik bağlantı çubukları olmadığından kesit daha küçüktür.
- İkiz bloklu traverslere kıyasla donatı miktarı daha azdır.
- Yanal direnci ikiz bloklu traversten daha azdır. Buna karşın yükü alt tabakaya daha iyi yayarlar.
- Yanal direnç ahşap traversten fazla ikiz blok beton traversten küçüktür.
- Hat bakım ekibi için ikiz blok traverse göre daha düzgün yüzey sağlar

Monoblok traversler de art-germeli ve ön-germeli olarak ikiye ayrılmaktadır.

Ön germeli monoblok beton travers

Tek parça öngermeli monoblok beton traversler ilk olarak İngiltere’de geliştirilmiş, ABD, Rusya, Kanada, Avustralya gibi birçok ülkede kullanılmaktadır. Üretim aşamasında 20-30 m uzunluğunda çelik bir travers kalıbı hazırlanarak donatıları yerleştirilir. Art germeli traverse göre donatısı daha incedir ($\Phi 2,5$). Daha sonra donatılar gerdirilir ve ardından beton dökülür. Beton yeterli mukavemete eriştiği zaman normal travers boyunda kesilerek üretim tamamlanır. İngiltere’de uygulanan ilk germe kuvveti 32 tondur ve kesildikten sonra kalan kuvvet 27 ton olmaktadır. Almanya’da ise ilk germe kuvveti 39 ton ve kesildikten sonra kalan kuvvet 32 ton olmaktadır [2].

Art germeli monoblok beton travers

Art germeli monoblok travers tipi Almanya’da geliştirilmiş olup Türkiye, Hindistan, İtalya, Meksika, Avusturya, Finlandiya gibi birçok ülkede uygulanmaktadır. Bu tipte çelik kalıplar normal bir travers boyunda hazırlanır. Donatı çapı yaygın olarak $\Phi 7,5$ kullanılır. Beton dökülmeden önce kalıp içine 4 adet tırtıklı boru yerleştirilir ve borulara U şeklinde 2 adet donatı yerleştirilir. Bu aşamadan sonra beton dökülür ve boruların da içine çimento enjeksiyonu yapılır. Kür altında 8 saat beklendikten sonra betonun %70 priz alması sağlanır ve bu aşamada borulardaki çubuklara çekme kuvveti uygulanır. 4 adet ucun her birine 8 ton olmak üzere toplamda 32 tonluk bir kuvvet uygulanarak somun yardımıyla çekilen donatılar traverse ankre edilir ve betonun geri kalan prizini tamamlaması beklenir. Şekil 3.17’de üretim aşaması gösterilmektedir[11].

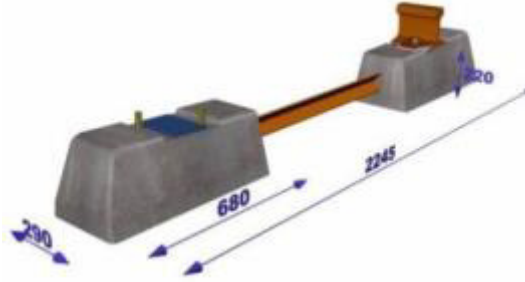


Şekil 3.17: Artgermeli travers üretimi [20].

3.3.3.3 Çift bloklı (ikiz blok) beton traversler

Bunlarda, iki ön gerdirmeli beton blok bir çelik çubuk veya çelik taşıyıcı ile ekartmana göre bağlanır. İkiz blok traversler ilk olarak Fransa'da geliştirilmiş olup Belçika, Arnavutluk, Brezilya, Meksika, İspanya, Portekiz gibi birçok ülkede kullanılmaktadır [11].

Şekil 3.18'de B440 ikiz blok travers görülmektedir



Şekil 3.18: B440 (U31) ikiz blok travers [21].

İkiz blok traversler monobloklara göre daha ağır olduğundan yanal kuvvetlere karşı direnci fazladır. Genellikle blokları bağlayan profil L veya Y şeklinde seçilir. Bu bağlantı profili balastlı hatlarda ekartmanı sabit tutmak için kullanılmaktadır. Balastsız üstyapılı hatlarda kullanılması durumunda ikiz bloklar yapı tipine göre değişmekle beraber genellikle beton içine gömülü kaldığından bağlantı çubuğuna ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ancak bazı durumlarda, önceki bölümde anlatılan Rheda üstyapısı örneğinde olduğu gibi, ikiz blokları birleştiren eleman yine kullanılmakta ve beton içine gömülebilmektedir.

3.4 Betonarme Kiriş (Plinth)

Balastsız üstyapılarda travers yerine üstyapı tipine göre değişmekle birlikte prefabrik betonarme plak, yerinde dökme betonarme kiriş veya betonarme döşeme de uygulanmaktadır. Bölüm 2'de açıklandığı gibi bazı üstyapılarda travers ve beton plak birlikte içi içe kullanılmaktadır. Tünellerde tünel kaplamasından sonra üstyapı altına faz betonu olarak adlandırılan dolgu betonu dökülmekte ve bunun üstüne ray altı kirişi (plinth) teşkil edilir.

Burada kirişlerin yüksekliği genellikle 25 cm civarında olmaktadır. Kirişler enine ve boyuna donatılıdır. Enine donatılar alttaki faz betonu dökülürken betonda filiz olarak bırakılabileceği gibi sonradan epoksi ile de ankre edilebilmektedir. Ray altı kirişi

genellikle faz betonu ile birlikte dökülmediğinden aderansın sağlanması için beton dökümü sırasında yüzeyde aderans artırıcı gerekli işlemlerin yapılmasına özen gösterilmelidir. Plinth ile faz betonu ara yüzünde oluşacak çatlaklar kirişin (plinth) alttaki faz betonundan tamamen ayrışmasına neden olmamalıdır. Ayrıca donatı sıklığı ile birlikte beton kalitesinin de iyi seçilmesi betonun dinamik yükler altında çatlayıp ufalanmasını ve ray altında boşluklar oluşmasını önlemesi açısından önemlidir. Plinth uygulaması Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19: Tünel içinde plinth betonlu üstyapı.



Şekil 3.20: Plinth betonlu üstyapı uygulaması [22].

4. LVT ÜSTYAPI TİPİ VE KULLANILDIĞI HAT

4.1 LVT Üstyapısı Bileşenleri

Bölüm 2’de bu sistem hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Marmaray tünelleri içinde bu üstyapının tercih edilmesinin sebebi çok iyi titreşim önleme kapasitesine sahip olması gösterilebilir. Şekil 2.14’te LVT sistemi meydana getiren elemanlar gösterilmiş olup betonarme blok, beton blok pedi, kauçuk bot ya da çizme adı verilen üç bileşenden meydana gelmektedir. Ray altı pedi ve seleti genelde tüm üstyapı tiplerinde kullanıldığından LVT kapsamı dışında tutulabilir. Bu bileşenlerin özellikleri aşağıda açıklanmaktadır.

4.1.1 Kauçuk bot (çizme)

Beton blokların ve blok altı pedin içine yerleştirildiği kauçuk malzemeden yapılan bot veya çizme adı verilen yapı elemanıdır. Esnek bir malzemeden yapılmış olması, ray ve blok pedi ile elde edilen elastik davranışı hiç şüphesiz artırmaktadır. Ayrıca blokların sadece altını değil de kenarlarını da kaplamış olması olası yanıl kuvvetlerde darbe yüklerinin ve titreşimlerin yapıya zarar vermeden sönümlenmesine katkı sağlamaktadır.

4.1.2 Blok pedi (elastik selet)

Mikro gözenekli olan bu ped, sistemin ana elastik bileşenidir. Betonarme blok altında iyi bir yük dağılımı ve titreşimlerin sönümlenmesini sağlar. Aynı şekilde ray altı pedi de titreşim sönümlendiğinden LVT sistemli bir üstyapı darbe ve titreşime karşı iki aşamalı bir koruma altında olmaktadır. Standart bir LVT bloklu sistemin dinamik rijitliği formül (4.1) den hesap edilebilir.

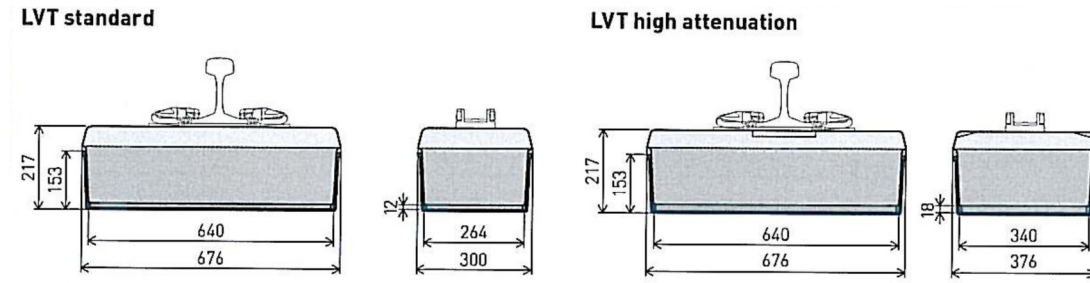
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (4.1)$$

Burada C sistemin dinamik rijitliği, C_1 ray altı pedi dinamik rijitliği ve C_2 de beton blok altındaki pedin dinamik rijitliği olarak alınabilir. Projede kullanılan ray altı ped 150 kN/mm, blok ped de 40 kN/mm dinamik rijitliğe sahiptir. Bu durumda (4.1)

denkleminde sistemin rijitliği 31 kN/mm olarak bulunur. Yüksek seviyede titreşim ve gürültü önlemi gerektiren yerlerde Şekil 4.1’de görüldüğü gibi LVT HA olarak adlandırılan bloklar kullanılarak sistemin dinamik rijitliğinin 18 kN/mm olması sağlanmaktadır. LVT HA bloklarda taban alanı artırılarak ve blok altında daha elastik bir ped konarak sistemin dinamik rijitliği istenen düzeye indirilmektedir [22].

4.1.3 Betonarme blok

Sonneville AG tarafından üretilen LVT bloklar “LVT Standart” ve “LVT HA (High Attenuation)” olmak üzere başlıca iki çeşittir. Şekil 4.1’de bu iki türe ait kesitler görülmektedir.

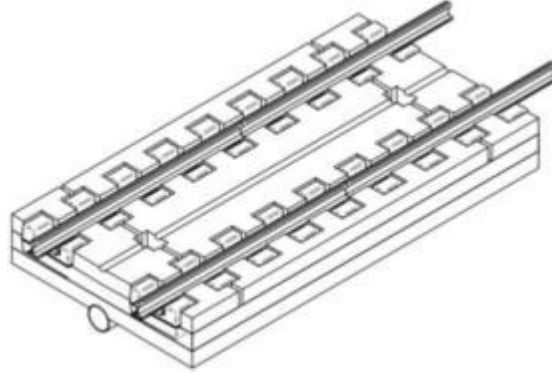


Şekil 4.1: LVT Standart ve LVT HA blok kesitleri [23].

Bu ikisine ilaveten makas bölgelerinde ve birleşim yerlerinde birleşimin aynı blok üzerinde kalmasını sağlayacak şekilde blokların boyları artırılabilir. Ayrıca üzerinde trafik akışını sağlamak için gömülü raylı bir sistem oluşturacak şekilde “LVT Trafik” olarak da Sonneville tarafından üretilmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te LVT sistemin makas ve trafik tipleri gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Makas bölgesinde LVT bloklar [10].



Şekil 4.3: LVT Trafik sistemi [10].

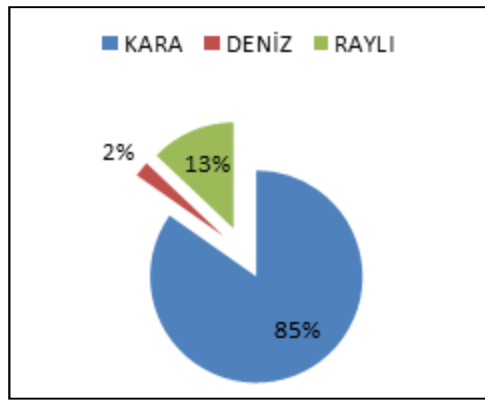
4.2 LVT Üstyapısı Özellikleri

LVT Sistemin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Projenin özelliğine göre tasarlanabilen bileşenler ve değişik bağlantı sistemlerine uygun olması çok çeşitli demiryolu projelerinin ihtiyacını karşılayabilmektedir.
- İkinci aşama beton miktarını ve betondaki donatı miktarını azaltarak da tasarruf sağlamaktadır.
- Hattın üstten tabana doğru (top-down) inşa edilir ve LVT blokların beton içinde gömülmesi çok hassas bir hat yapımına imkân verir.
- Bakım maliyetleri düşük olmaktadır, derayman durumunda veya ihtiyaç duyulduğunda sistemi oluşturan tüm parçalara kolayca erişilebilmekte ve bunlar değiştirilebilmektedir.
- Raylar arasının engelsiz olması hattın aerodinamik özelliğini artırmaktadır. Ayrıca bakım ekibi için kolay bir erişim sağlar, acil durumlarda da yolcular için engelsiz bir yol oluşturmaktadır.
- İnşaat faaliyetleri sırasında hattın döşenmesinin hemen ardından, beton dökümünü beklemeden raylar üzerinde iş makineleri çalışabilir ve bu elektromekanik ve diğer işlerin de aynı zamanda yapılmasına olanak verir, böylece inşaat süresi azalmasına katkı sağlar.
- Kalıp sistemlerine ihtiyaç duyulmadığı için beton işleri oldukça kolay olup bu sayede hızlı bir montaj elde edilmektedir.
- Tekil bloklar arasında bir bağlantı olmadığı için elektrik yalıtımı konusunda da fayda sağlamaktadır.

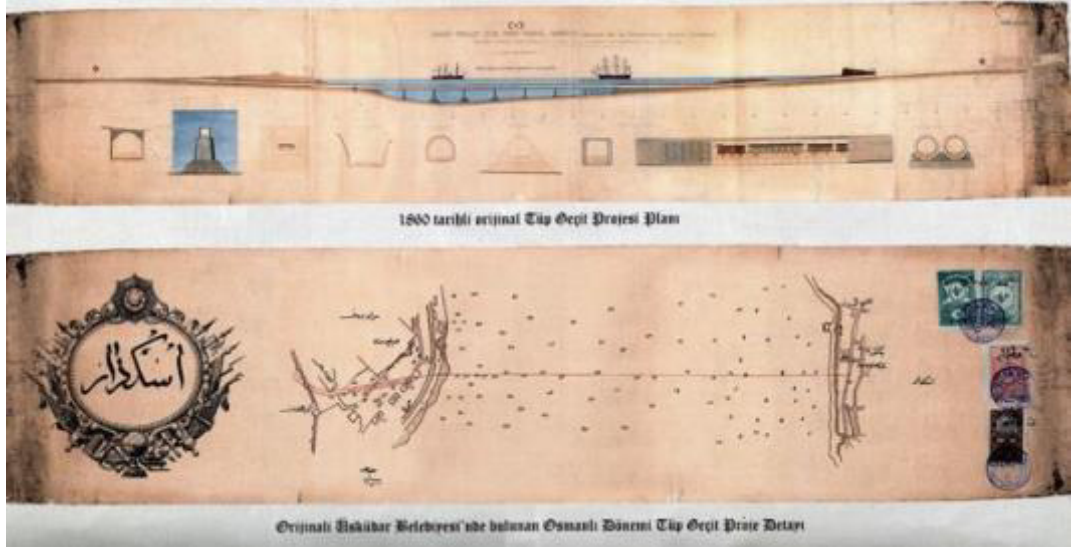
4.3 LVT Üstyapısının Kullanıldığı Örnek Hat

Son yıllarda ülkemizde raylı toplu taşıma sektörüne yatırımlar artırılmıştır. Nüfusu 13 milyonu aşan ve gittikçe artan bir nüfusa sahip İstanbul'da karayollarında ki trafik yoğunluğu özel araç sahiplenmelerinin artmasıyla birlikte gittikçe artmaktadır. İstanbul'da tamamlanan demiryolu projeleriyle birlikte raylı sistemin ulaşımındaki payı, dünyadaki diğer metropollerle kıyaslandığında, çok düşük kalmaktadır. İleride ulaşım ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için ulaşım yatırımları artmakta ve bunda da en büyük pay raylı sistemlere ayrılmaktadır. Şekil 4.4' İstanbul'daki ulaşımın türel dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.4: İstanbul'da türle göre ulaşım oranları [23].

Marmaray Projesi de İstanbul ulaşımına büyük katkı sağlayacak dünyada gerçekleştirilen en önemli projelerinden biridir. Avrupa ve Asya kıtalarını denizin altından birleştirme fikri ilk olarak 1860 yılında Sultan Abdülmecid tarafından ortaya konmuş ve Boğaz'ın altından direkler üzerinde tüp içinden geçen bir demiryolu projesi hazırlanmış ancak proje gerçekleştirilememiştir. Daha sonra 1902 yılında Sultan II. Abdülhamid bir proje daha hazırlattırılmış olup bu projede tünel deniz tabanına oturmuş bir şekilde tasarlanmış ancak bu proje de uygulanamamıştır. Bahsedilen bu projelere ait görüntüler Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görülebilir.



Şekil 4.5: Sultan Abdulmecid tarafından hazırlatılan tüp geçit projesi (1860) [24].

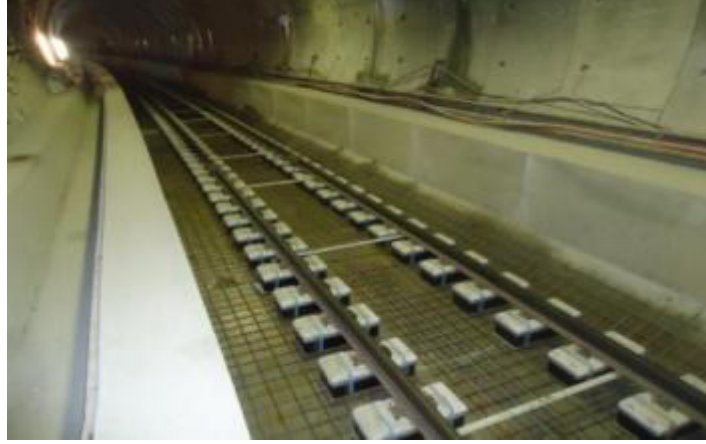


Şekil 4.6: Sultan 2. Abdulhamid tarafından hazırlatılan proje (1902) [24].

Marmaray Projesi, Avrupa yakasında Halkalı ile Anadolu yakasında Gebze arasında yer alan 76,3 km uzunluğunda bir demiryolu projesidir. Projenin ilk aşaması olan 13,5 km’lik boğaz geçiş kısmı işletmeye açılmıştır. Bu ilk aşamada hattın tünel içinde kalan 13 km’lik bölümü betonarme rijit üstyapı, diğer kısmı da balastlı üstyapı olarak inşa edilmiştir.

Tüneller yoğun yerleşim alanlarının altından geçtiği için gürültü ve titreşim için önlem alınması birinci derecede önemlidir. Tünel üstü örtü kalınlığının az olduğu kesimlerde zemin kalitesinin de çok iyi olmaması, seçilecek üstyapı tipinin yüksek seviyede titreşim ve gürültü sönümleme kapasitesine sahip olmasını gerektirmektedir. Marmaray Projesi’nde bu kriterleri sağlamak için tünellerde

üstyapı sistemi olarak bir önceki bölümde kısaca tanıtılan “Sonneville” tarafından üretilen LVT (Low Vibration Track) üstyapısı seçilmiştir. Şekil 4.7’de beton döküm öncesi aşama görülmektedir.



Şekil 4.7: Tünel içinde LVT üstyapı inşaatı (beton döküm öncesi).

LVT sisteminde, standart olarak üretilen bir LVT blok orta dereceli gürültü ve titreşim önleme kapasitesine sahiptir. Yüksek seviyede gürültü ve titreşim önleme ihtiyacı olması durumunda LVT sistemler bunu karşılayacak şekilde üretilmektedir. Titreşim ve gürültü önlemi için FTA (Federal Transit Administration) ve AFTA (American Public Transit Association) kriterleri esas alınmıştır. FTA’ya göre, yerleşim alanlarında genellikle titreşim hızı 50 VdB ya da daha düşük olmaktadır. Bu da insanın algılayabileceği 65 VdB civarındaki değerin altında kalmaktadır. 70 VdB civarındaki değerler sıklıkla hissedilebilir ancak kabul edilebilir bir seviyededir. Tablo 4.1’de özellikli yapılara dair FTA (Birleşik Ulaştırma Dairesi)’ya göre gürültü ve titreşim önlemlerine ilişkin sınır değerler görülmektedir

Tablo 4.1: FTA kriterlerine göre özel binalar için gürültü ve titreşim seviyeleri.

Bina veya mekân türü	Titreşim etki seviyesi		Gürültü etki seviyesi
	(VdB re 1 micro inch/sec)	(dB re 1e-9 m/sn)	(dB re 20 micro Pascals)
Konser Salonu	65 VdB	93 dB	25 dBA
TV stüdyosu	65 VdB	93 dB	25 dBA
Kayıt Stüdyosu	65 VdB	93 dB	25 dBA
Oditoryum	72 VdB	100 dB	30 dBA
Tiyatro	72 VdB	100 dB	35 dBA

Proje güzergâhında hastane gibi titreşim ve gürültüye karşı çok daha hassas olan yapılar mevcuttur. Üstyapı seçiminde bunlarında göz önünde bulundurulması

gerekmektedir. Tablo 4.2’de özellikli yapılar için APTA (Amerikan Toplu Ulaşım Kurumu)’ya göre gürültü ve titreşim önlemleri sınır değerleri görülmektedir.

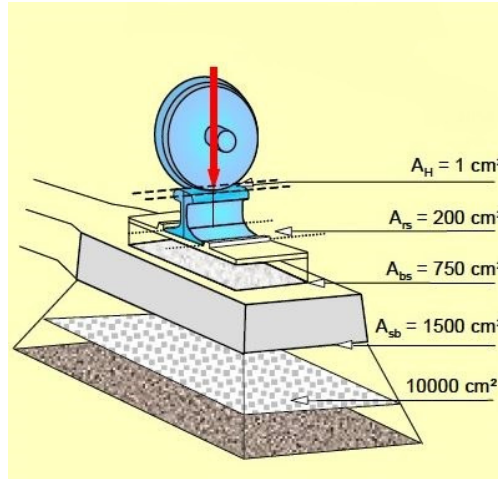
Tablo 4.2: APTA kriterlerine göre özel binalar için gürültü ve titreşim seviyeleri.

Bina veya mekân türü	Maksimum araç geçiş gürültü seviyesi
İbadethane	30-35 dB(A)
Hastane	35-40 dB(A)
Okul ve kütüphane	35-40 dB(A)
Üniversite binaları	35-40 dB(A)

5. LVT İÇİN DEMİRYOLU ÜSTYAPISI HESABI VE ÖRNEK HATTA PARAMETRİK İRDELEMESİ

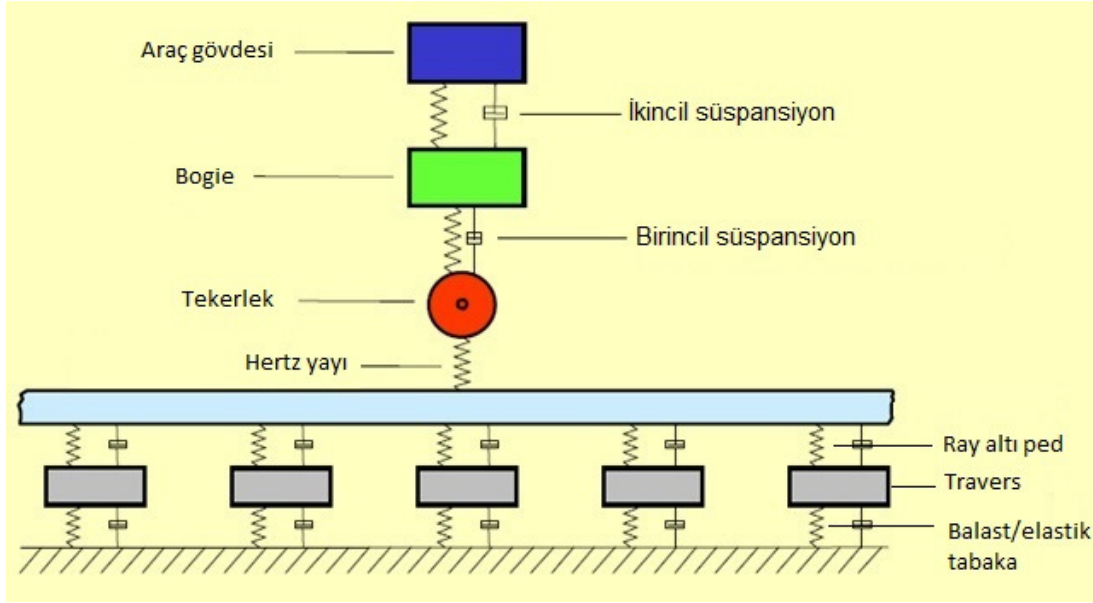
5.1 Üstyapı Tasarımı

Üstyapı hesaplamalarında düşey kuvvetler olarak adlandırılan tekerlek yükleri esas alınır. Geleneksel bir demiryolunda tekerlek yükü sırasıyla ray, ray altı selet, travers ve balast veya rijit tabaka yardımıyla zemine iletilir. Tabakalar arsanda tekerlek ray arasındaki gerilmeler en yüksek seviyededir. Bu sırasıyla ray altındaki tabakalar yardımıyla azaltılarak zemine iletilir. Bir örnek olarak bu iletim şematik olarak Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere tabakalar arasında yük iletim alanlarının büyüklüğü piramit şeklinde üstten aşağıya doğru artmaktadır.



Şekil 5.1: Üstyapı yük aktarma prensibi [9].

Üstyapının gerçek modellemesi Şekil 5.2’de gösterilen model gibi olmaktadır. Ancak kolaylık sağlaması açısından hesaplarda bu model biraz daha basite indirgenmektedir.



Şekil 5.2: Üstyapı dinamik modelleme [9].

5.1.1 Üstyapıya etkiyen kuvvetler

Üstyapıya etkiyen kuvvetler yatay ve düşey olmak üzere iki kısımda incelenmektedir [25].

5.1.1.1 Düşey kuvvetler

Hattın doğrultusuna düşeyde etkiyen kuvvetler iki sınıfa ayrılabilir:

- Statik kuvvetler
- Dinamik kuvvetler

Düşey statik kuvvetler

Üstyapının kendi ağırlığı ile demiryolu arabalarının dingillerinden aktarılan kuvvetlerdir. Hesaplarda üst yapının kendi ağırlığı araçlardan gelen dingil yüklerine göre küçük olduğundan ihmal edilebilirler. Hesaplarda genellikle dingil yükü 25 ton alınmaktadır. Ray ağırlığı ve travers aralıklarının fonksiyonu olarak yolun dayanabileceği dingil ağırlığına göre hatlar Uluslararası Demiryolları Birliğince (U.I.C) beşe ayrılmıştır:

- A : 16 ton/dingil
- B : 18 ton/dingil
- C : 20 ton/dingil
- D : 22,5 ton/dingil
- E : 25 ton/dingil

Ayrıca sanat yapılarında 1 m uzunluk başına düşen ağırlık bakımından beş alt kısma ayrılmıştır:

- 1 : 5 t/m
- 2 : 6,4 t/m
- 3 : 7,2 t/m
- 4 : 8,0 t/m
- 5 : 8,8 t/m

Örneğin, C3 olarak sınıflandırılmış bir yolda dingil ağırlığı 20 t ve yayılı yük 7,2 t/m'dir. Üstyapının kendi ağırlığı ise 180-200 kg/m kadardır [25].

Düşey dinamik kuvvetler

Düşey dinamik kuvvetleri meydana getiren sebepler aşağıdaki gibi açıklanabilir [25]:

- i. Raylar arasında sıcaklık farklarından dolayı rayda iç gerilmelerin oluşmasını engellemek için belli mesafelerde $\Delta \ell$ dilatasyon payı bırakılır. Bu şekilde raylar uzayıp kısalarak iç gerilmelere sebep olmazlar. Bu eklenti yerlerinde tekerlek bir raydan ötekine geçerken ilk rayın eğilmesi nedeniyle ikinci rayın başına çarpar ve bu olay “şok” diye adlandırılır. Bunun sonucunda doğrultusu tekerleğin merkezinden geçen bir kuvvet doğar. Bu kuvvetin düşey bileşeni düşey dinamik kuvvetlerden biridir.
- ii. Ondülasyonlar da düşey dinamik kuvvetlerin oluşmasının nedenlerindedir. Raydaki ve üstyapının stabilitesinin bozulmasından dolayı ray üzerinde kot farkları meydana gelebilir. Bu durumda tekerlek dalgalı bir yüzeyden gideceği için dinamik kuvvet oluşur.
- iii. Buharlı lokomotiflerde piston kolunun hareketini tekerleklerle ileten biyele gelen kuvvetin düşey bileşeni de önemli düşey dinamik kuvvetlerden biridir.
- iv. Özellikle buharlı lokomotiflerde tekerleğin bazı kısımlarında kütle birikimleri atalet kuvvetlerinin doğmasına neden olur. Bu kuvvetlerin düşey bileşenleri göz önüne alınması gerekli düşey dinamik kuvvetlerdendir.

5.1.1.2 Yatay kuvvetler

Yatay kuvvetler yol eksenine yatay ve dik olarak etkiyenler şeklinde iki kısımda incelenebilir.

Yol eksenine paralel yatay kuvvetler

- i. Contalardaki şoklardan meydana gelen dinamik kuvvetlerin yatay bileşenleri.
- ii. Buharlı lokomotiflerde biyele gelen kuvvetlerin yatay bileşenleri.
- iii. Yürütücü tekerlekler yuvarlanırken hareket yönüne karşıt yönde ray mantarı üzerine etki eden aderans kuvveti.
- iv. Frenleme sırasında rayla tekerlek arasında hareket yönünde doğan frenleme kuvveti, bu kuvvet şu şekilde hesap edilir [25]:

$$F = G_f \cdot \mu_f \quad (5.1)$$

G_f : Frenlenen ağırlık

μ_f : Fren sürtünmesi

- v. Sıcaklık değişimlerinden ötürü rayların uzayıp kısılmasıyla doğan kuvvetler.

Yol eksenine dik kuvvetler

Yol eksenine yatay etkiyen kuvvetler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Araçların kurbalardan geçişi sırasında dengelemeyen merkezkaç kuvvetleri sonucu tekerleklerin dışa doğru gitmeye zorlanması nedeniyle raylara iletilen kuvvetler.
- ii. Araçların yan yüzeylerine gelen rüzgârların araçları ötelemeye zorlaması sonucu tekerleklerden raylara aktarılan kuvvetler.

5.1.1.3 Diğer kuvvetler

Yukarıda belirtilen kuvvetler dışında üstyapıya etkiyen çeşitli kuvvetler bulunmaktadır. Bunlardan yol eksenine paralel olanlar ötekilerine göre önemsizdirler.

Araçların kurbalardan geçmesi sırasında tekerleklerin dingillere rijit olarak bağlanması nedeniyle kurbaya tam uyamazlar ve tekerler rayı belirli bir açı altında keserler. Bundan dolayı yol eksenine paralel ve dik kuvvetler meydana gelir.

Buna ilaveten rayla tekerlek budeni arasındaki aralık ve ray-tekerlek teması nedeniyle arabaların asılı kısımları düşey, boyuna ve yol eksenine dik doğrultu etrafında yaylanma yapar. Bunun sonucunda üstyapıyı etkileyen kuvvetler ortaya çıkar [25].

5.1.1.4 Sıcaklık gerilmeleri

Sıcaklık farklılıkları nedeniyle raylarda meydana gelen boyuna deformasyonlara kısmen veya tamamen engellenmesi neticesi rayda yazın basınç, kışın ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Kış aylarında ortaya çıkan çekme gerilmeleri rayda enine doğrultuda kırılmalar meydana getirirler. Rayın döşenmesini izleyen ilk kış aylarında bu enine kırılmalar fazla olduğu halde daha sonraki yıllarda azaldıkları tesbit edilmiş bulunmaktadır. Yazın ortaya çıkan basınç gerilmeleri ise hattın yanal doğrultuda kaymasına neden olur [25].

ΔT sıcaklık farkında L uzunluğundaki bir rayda ortaya çıkan gerilmenin değeri rayın Δl boy değişmesinin serbest bir şekilde olup olmamasına göre değişmektedir. Δl boy değişmesi formül (5.2) ile elde edilir.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Ray ΔL boy değişmesini serbestçe yapabiliyorsa sıcaklıktan dolayı gerilme $\sigma = 0$ olacaktır. Rayın döşenmesi sırasında uçları arasında herhangi bir boşluk bırakılmamışsa sıcaklık farkının neden olduğu ΔL boy değişmesinden aşağıda (5.3) ifadesiyle verilen çekme veya basınç gerilmeleri meydana gelecektir.

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (5.3)$$

Bu gerilmeleri meydana getiren kuvvetler (5.4) formülünden hesap edilir (Evren, 2002).

$$P = \alpha \cdot \Delta l \cdot E \cdot F \quad (5.4)$$

P: Kuvvet

α : Sıcaklık katsayısı

Δl : Uzama miktarı

F: Ray kesit alanı

5.1.2 Yatak katsayısı

Bir rayın boyutlandırmasını yapabilmek için önce çerçeve sistemin üzerinde oturduğu altyapının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek gerekir. Araç tekerlekleri tarafından iletilen düşey dinamik dingil yükleri elastik bir ortam olan

çerçeve tabanına traverslerin oturma alanı tarafından iletilir. Bu durum araştırmacıları, yol çerçevesini elastik ortama oturan sürekli kiriş kabul ederek çözüm arama yoluna götürmüştür. Statik yükler altında demiryolu altyapısında oluşacak zorlanmaların nasıl belirleneceği konusunda ilk önemli çalışmayı E. Winkler yapmıştır. Bu Winkler hipotezi olarak anılır ve yatak katsayısı (C) (5.5)'e göre hesaplanır:

$$C = \frac{P}{y} \quad (5.5)$$

P: Zemine gelen etki/zeminin gösterdiği tepki (kg/cm²)

y: Çökme miktarı (cm)

Bu bağıntıya göre C, birim çökme elde etmek için birim alana yüklenmesi gereken yükten faydalanılarak hesaplanır. Bu hesaplamaya itiraz eden araştırmacılarından A. Föppl bu hipotezin sadece homojen zeminler için doğru sonuçlar vereceğini, homojen olmayan zeminler çok değişken olduğundan bu tür zeminlerde doğru sonuç vermeyeceğini öne sürmüştür. Başka araştırmacılarından da bu yönde itirazlar gelmiştir. Yatak katsayısının kirişin eğilme rijitliğine bağlı olduğunu gösteren araştırmalar da yapılmıştır [2, 11].

Yapılan birçok araştırma sonucunda yatak katsayısı (C)'nin 5 kg/cm³ ile 40 kg/cm³ arasında bir değer aldığı gözlenmiştir.

Daha sonra yapılan araştırmalarda üstyapıyı oluşturan elemanların yay katsayıları saptanarak önce tüm üstyapı için bir yay katsayısı hesaplanmış, sonra da bu yay katsayıları kullanılarak (5.6) ve (5.7) formülüne göre yatak katsayısı hesabı yapılmıştır.

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (5.6)$$

$$C = \frac{C_0}{F} \quad (5.7)$$

C₀: Eşdeğer yay katsayısı (kg/cm)

C₁, C₂, C₃: Üstyapıyı oluşturan tabakaların yay katsayıları (kg/cm)

C: Yatak katsayısı (kg/cm³)

F: Alan (cm²)

Eisenmann'a göre; balçık için yatak katsayısı $C=2 \text{ kg/cm}^3$, kohezyonlu kötü zeminler için $C= 5 \text{ kg/cm}^3$, iyi tabanlı sıkı zeminler için $C= 10 \text{ kg/cm}^3$ olarak verilmiştir [2].

Zimmermann'a göre yatak katsayısı hesabında üstyapı parametrelerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Buna göre yatak katsayısı formül (5.8) den hesap edilir:

$$C = \frac{1}{4B} \cdot \frac{P}{y} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{EI} \cdot \frac{P}{y}} \quad (5.8)$$

P: Tekerlek yükü (kg)

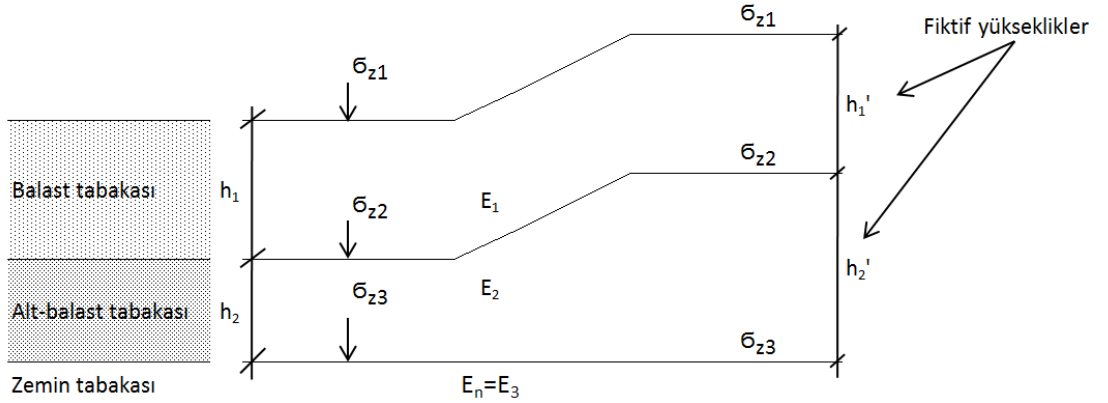
B: Sonsuz kirişin itibari genişliği (cm)

y: Yol çerçevesinin ölçülen çökme değeri (cm)

E: Ray çeliğinin elastisite modülü (kg/cm^2)

I: Rayın atalet momenti (cm^4)

Eisenmann, Odemark'ın eşdeğer tabaka teorisinden faydalananarak yaptığı hesapta; yatak katsayısı Şekil 5.3'te görüldüğü üzere üç tabakadan oluşan bir üstyapıda fiktif tabaka yükseklikleri kabul edilmiş bu yükseklikler (5.9) ve (5.10) yardımıyla hesap edilmiştir. Daha sonra bu değerler kullanılarak (5.11) ile C_0 katsayısı bulunmuştur [2].



Şekil 5.3: Eşdeğer tabaka teorisi şeması

$$h'_1 = c \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{E_1/E_3} \quad (5.9)$$

$$h'_2 = c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{E_2/E_3} \quad (5.10)$$

$$C_0 = \frac{E_3}{(h'_1 + h'_2)} \quad (5.11)$$

($1 \leq i \leq n$) olmak üzere n sayıda tabakadan oluşan bir üstyapıda bu formül genelleştirilirse (5.12) ve (5.13) gibi olur [2].

$$h'_i = c \cdot h_i \cdot \sqrt[3]{E_i/E_n} \quad (5.12)$$

$$C_0 = \frac{E_n}{(h'_1 + h'_2 + \dots + h'_{n-1})} \quad (5.13)$$

Bu eşitliklerde E_n en alt tabakanın elastiklik modülüdür ve yapı altındaki doğal zemini temsil etmektedir. $h_1, h_2 \dots h_{n-1}$ ise doğal zemin üzerine döşenmiş tabakaların yukarıdan aşağıya doğru yüksekliklerini göstermektedir.

“c” katsayısı sistemi oluşturan tabakaların daneleri arasındaki bağlantıyla ilişkilidir. Birbirine yalnızca hidrolik olarak bağlı danelerden oluşan tabakalar için bu katsayı 0,90; çimento ile bağlı danelerin oluşturduğu tabakalarda bu katsayı 0,83 alınmaktadır.

Bu teoriye göre tabakalı sistem eşdeğer bir elastik ortama dönüştürüldüğünde herhangi bir “i” tabakasının tabanındaki düşey basınç gerilmesinin hesabında tabaka yüksekliği h_i iken verilen eşitliklerde bunun h'_i olarak alınması gerekir. Bu şekilde elde edilen hesap sonuçlarının gerçek gerilme yayılışına uygunluğu deneysel olarak da saptanmıştır [2, 11].

5.1.3 Dinamik etki katsayısı

Üstyapı tasarımı kolaylaştırılmış bir yöntem olarak statik yükler altında elastik zemine oturan sürekli kiriş şeklinde hesap edildiğinden, dinamik yüklerin de hesaba katılmış olması açısından dinamik etki katsayısı kullanılmaktadır. Böylece statik yükler bu katsayı ile artırılarak dinamik yükler de tasarıma dâhil edilmiştir. Dinamik etkilerin dikkate alınmış olmasını sağlamak için hız katsayısı olarak adlandırılan bir katsayıdan faydalanılmaktadır. Bu katsayı Schramm’a göre (5.14) formülünden hesaplanmaktadır [2].

$$\alpha = 1 + 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot V^2 + 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot V^3 \quad (5.14)$$

Eisenmann ve ekibinin (Münih Teknik Üniversitesi) yaptığı çalışmaya göre dinamik etki katsayısı (5.15) ve (5.16) bağıntılardan elde edilir.

$V < 60$ km/h arasındaki hızlar için:

$$\rho = 1 + t.S \quad (5.15)$$

$60 < V \leq 200$ km/h arasındaki hızlar için:

$$\rho = 1 + t.S. \left(1 + \frac{V - 60}{140} \right) \quad (5.16)$$

Burada t güvenlikle ilgili bir katsayı olup altyapıda 1, balastta 2, çerçevede de 3 alınması önerilmektedir. “t”nin 1 alınması %68,3 güvenli bir hesap sağlar. Aynı şekilde 2 alınması %94,1 ve 3 olarak alınması da %99,7 güvenli bir hesap sağlamaktadır.

Formül (5.16)’da yer alan “S”nin değeri ise Tablo 5.1’den alınmaktadır.

Tablo 5.1: “S” katsayısı değeri.

Üstyapının durumu	“S” katsayısı değeri
İyi	0,1
Orta	0,2
Kötü	0,3

5.2 Parametrik İrdeleme

Bu bölümde farklı işletmeler altında LVT sistem taşıyıcı tabakasının nasıl etkilendiği ve boyutlandırmadaki değişiklikler gösterilecektir. Örnek olarak seçilen zemin üzerinde üç farklı durum için hesap yapılacak olup birinci durumda yük treni, ikinci ve üçüncü durumlarda sırasıyla yolcu treni ve hızlı tren parametreleri kullanılacaktır. Demiryolu hattı ve araçları ile ilgili parametrelerin bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Yolcu trenleri:

- Maksimum statik aks yükü :19,25 t
- Boji aks aralığı :3,2 m (veya işletmeye göre 2,2 - 2,4 m)
- Boji mesafesi :8 m
- Tipik yaysız ağırlık :2000 kg/aks

Yük trenleri:

- Maksimum statik aks yükü :25 t

- Boji aks aralığı :1,6 m (veya işletmeye göre 2,2 m; 2,4 m)
- Boji mesafesi :8 m
- Tipik yaysız ağırlık :2000 kg/aks

Üstyapı özellikleri:

- Ray tipi :UIC60 (60 E1)
- Ekartman genişliği :1435 mm
- Ray eğimi :1/40

Proje güzergâhı üzerinde çok çeşitli tipte zemin ve kaya sınıfı mevcut olabilmektedir. Zemin sınıflarının yatak katsayıları farklı olacağından tasarımda her bölge için analizin tekrar yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada sadece bir tür zemin sınıfı kabulü yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Bir projenin geçtiği güzergâhta çok çeşitli zemin sınıfları ile karşılaşılabilir. Bu çalışmada hesabın yapılacağı hat kesiminde zemin kalitesi QS3 olarak kabul edilmiştir. Bu durumda taban zemini için istenen taşıma gücü Tablo 2.2'den P3 olarak alınırsa tabloda formasyon tabakası için bir kalınlık önerilmediği görülür. Formasyon tabakası yerine 20 cm kalınlığında grobeton uygulanması öngörülerek hesaplar yapılmıştır.

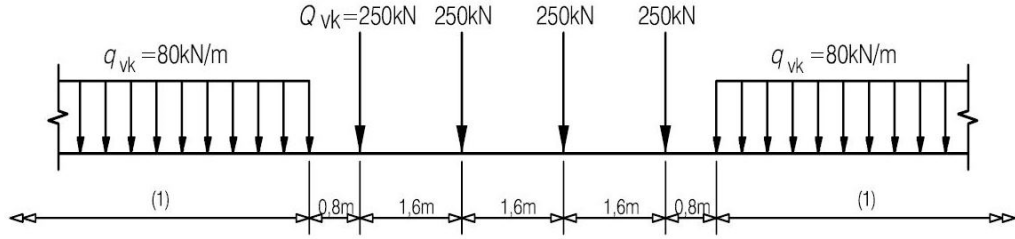
5.2.1 Yük treni işletmesi durumu için yapısal analiz

Yapısal analiz için SAP2000 programı kullanılmıştır. SAP2000 programında sonlu elemanlar metoduyla her türden yapısal sistemin lineer ve nonlinear analizi, 2D ve 3D statik ve dinamik analizi gibi birçok çeşit analizi gerçekleştirme imkânı bulunmaktadır.

Model oluşturmada programın içindeki hazır şablonlar kullanılabilir. Aynı zamanda modelin AutoCAD gibi programlara çizilip programa aktarmak suretiyle oluşturulması da mümkündür. Programda çubuk elemanlar, plak, çerçeve, düğüm noktaları, solid elemanlar, rijit diyafram veya yaylı birleşimler, çeşitli özelliklere sahip mesnetler rahatlıkla modele aktarılabilir.

5.2.1.1 Yükleme durumu

Yük trenleri için UIC'ye göre Yükleme Modeli 71 Şekil 5.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Yük trenleri için yükleme modeli (LM 71).

Seçilen düz bir hat kesiminde en elverişsiz durumu elde etmek (5.17) ve (5.18)'deki yük kombinasyonları ile analiz gerçekleştirilecektir.

$$1,4. \left[D + \frac{5}{3} (\rho. L) \right] \quad (5.17)$$

$$1,8. [D + (\rho. L)] \quad (5.18)$$

D: Üstyapının zati yükü

L: Tren düşey statik yükü

ρ : Dinamik etki katsayısı

Dinamik etki katsayısının belirlenmesi

Dinamik etki katsayısı Eisenman'ın (5.15) ve (5.16) formülleri ile hesaplanmıştır.

Verilen parametrelerden;

$V=100$ km/h

$t=1$ ve $S=0,2$ alınarak

$60 < V \leq 200$ km/h hızlar için geçerli (5.16) formülünden dinamik etki katsayısı:

$\rho = 1,26$ hesap edilir.

5.2.1.2 Modelleme ve statik analiz

Programda üstyapı sistemi solid, çerçeve ve kabuk elemanlar (frame ve shell) kullanılarak modellenmiştir. Taşıyıcı betonarme tabaka alan (shell), LVT bloklar solid, raylar çerçeve eleman olarak tanımlanmıştır. Taşıyıcı betonarme tabaka küçük sonlu elemanlara bölünmüştür. Üstyapı modeli için 24 m uzunluğunda ve 3 m genişliğinde bir blok kullanılmıştır. Raylar uzun kaynaklı düşünülerek tek parça çerçeve eleman olarak tanımlanmıştır. Ray altındaki elastik selet ve LVT blok pedi için yay katsayıları kullanılmış ve bu katsayılar aşağıda verilen rijitlik değerlerinden elde edilmiştir.

- Ray pedi (selet) rijitlik katsayısı: 150000 kN/m^3

- Betonarme blok pedi rijitlik katsayısı: 40000 kN/m³
- LVT kauçuk taban rijitlik katsayısı: 2000000 kN/m³

Betonarme blok pedi ile kauçuk taban birlikte düşünülürse denklem (5.6) kullanılarak LVT blok altında eşdeğer rijitlik aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_{eş} = \frac{1}{40000} + \frac{1}{2000000}$$

$$k_{lvt} = 39215 \text{ kN/m}^3$$

Taşıyıcı betonarme tabaka ile zemin arasındaki elastik yayların hesabında zeminin yatak katsayısı iyi bir taban için 10 kg/cm³ ($\approx 100000 \text{ kN/m}^3$) kabul edilebilir [3, 25].

Zemin ile taşıyıcı tabaka arasında 20 cm kalınlığında C14 sınıfı grobeton olduğu öngörüldüğünden taşıyıcı tabaka altında kalan grobeton rijitliği denklem (5.19) kullanılarak hesap edilmiştir. Grobeton ve zemin tek tabaka olarak düşünülürse eşdeğer rijitlik katsayısı denklem (5.20) ile elde edilir.

$$k = \frac{E}{L} \quad (5.19)$$

E: Elastiklik modülü

L: Boy/kalınlık

C14 grobeton tabakası elastiklik modülü $E_c = 26150 \text{ MPa}$.

$$k_b = \frac{26150000}{0,20}$$

$k_b = 130750000 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunur.

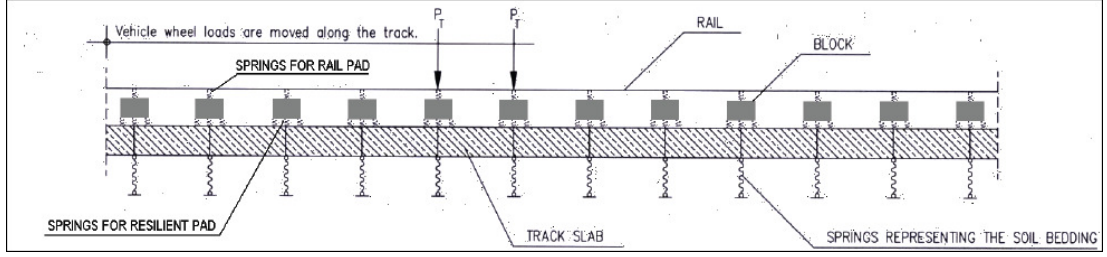
Daha önce belirtildiği gibi seçilen iyi kalitede bir zemin için yatak katsayısı $C = 100000 \text{ kN/m}^3$ alınırsa (5.20)'den eşdeğer rijitlik hesaplanır.

$$k_{eş} = \frac{1}{k_{grobeton}} + \frac{1}{k_{zemin}} \quad (5.20)$$

$$k_{eş} = \frac{1}{130750000} + \frac{1}{100000}$$

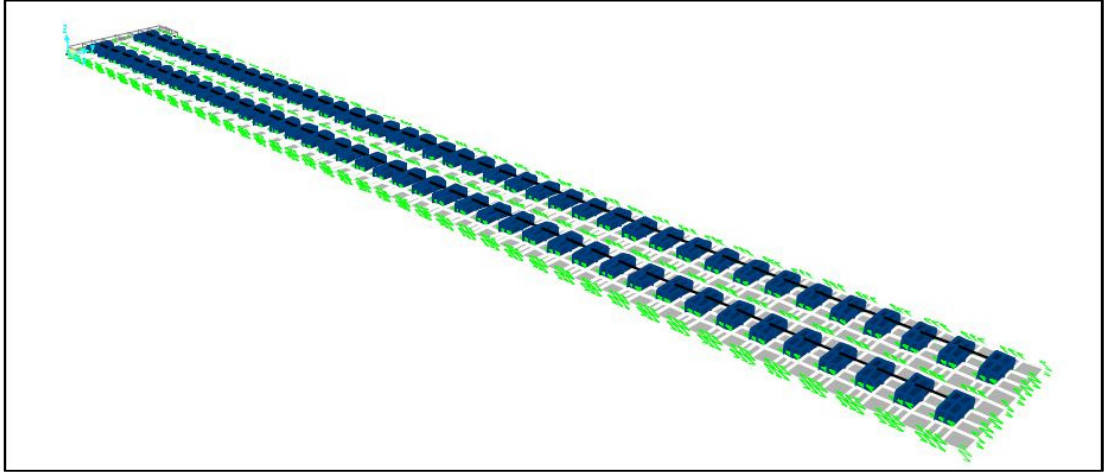
$k_{eş} = 99923 \text{ kN/m}^3$ bulunur.

Ray pedi ve LVT blok rijitlik katsayılarının üreticiye göre değişebileceği unutulmamalıdır. Üstyapı modelleme sistemi Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

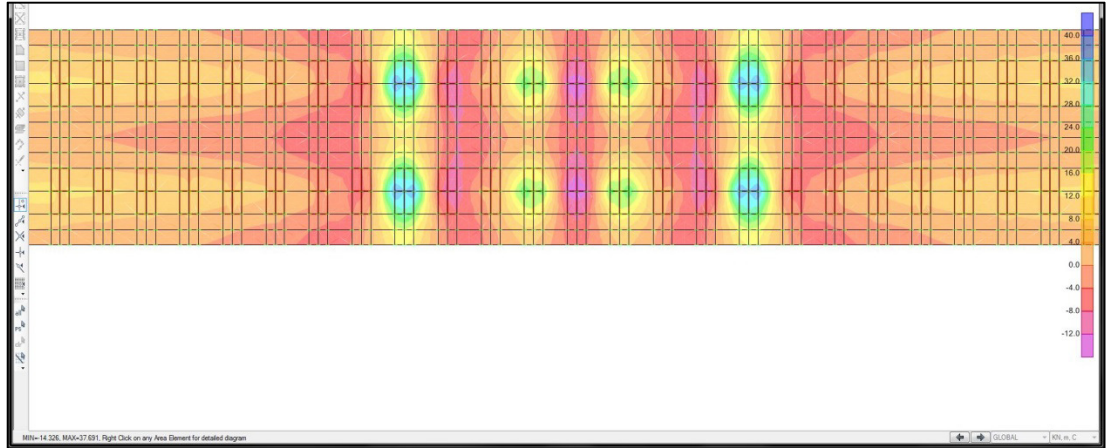


Şekil 5.5: LVT üstyapı analiz programı için modelleme şeması.

Şekil 5.6'da SAP2000 programında oluşturulan LVT sisteme ait modelleme görülmektedir. Statik analiz sonuçları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmektedir.

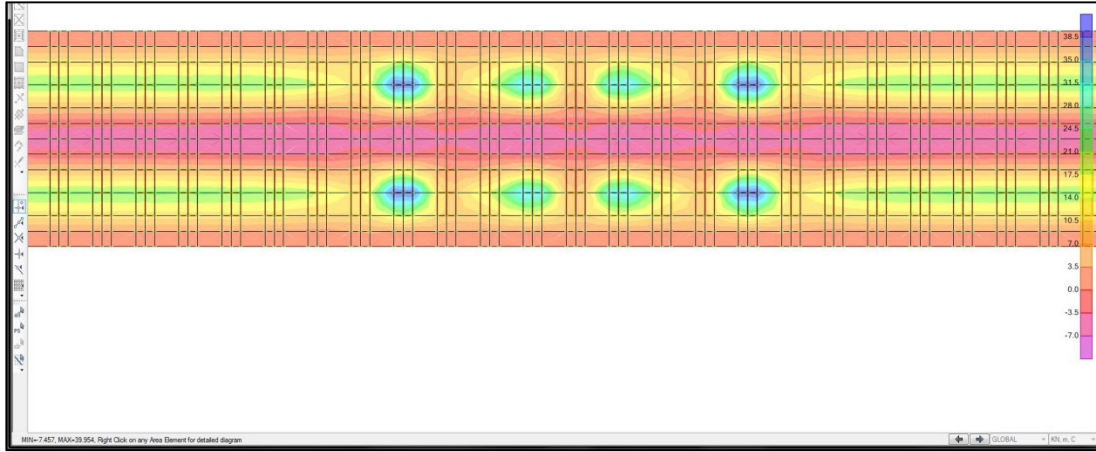


Şekil 5.6: LVT sistem SAP2000 model görüntüsü.



Şekil 5.7: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).

Yük trenleri için maksimum momentler (5.17)'de verilen 1. yükleme kombinasyonundan elde edilmiştir. Boyuna doğrultuda maksimum ve minimum moment değerleri 37,7 kNm ve -14,3 kNm elde edilmiştir. Enine doğrultuda maksimum ve minimum momentler 40 kNm ve -7,5 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.8: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).

5.2.1.3 Betonarme hesap

Hesap yapılan bölüm için taşıyıcı tabaka betonarme hesabı için beton sınıfı C30 ve çelik S420 olarak seçilmiştir. Betonarme hesaba ait kriterler Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2: Betonarme hesap için karakteristik değerler.

Tanım	Sembol	Değer	Birim
Elastik kiriş genişliği	b_w	1000	mm
Beton basınç dayanımı (tasarım)	f_{cd}	20	MPa
Beton çekme dayanımı (tasarım)	f_{ctd}	1,28	MPa
Beton elastisite modülü	E_c	32000	MPa
Donatı çeliği akma dayanımı (tasarım)	f_{yd}	365	MPa
Donatı çeliği elastisite modülü	E_s	200000	MPa
Pas payı	d'	50	mm

Dizayn moment değerleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’den alınmaktadır. Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik özellikleri Tablo 5.2’de gösterilmektedir. Taşıyıcı tabaka basit donatılı kiriş gibi düşünülmüştür.

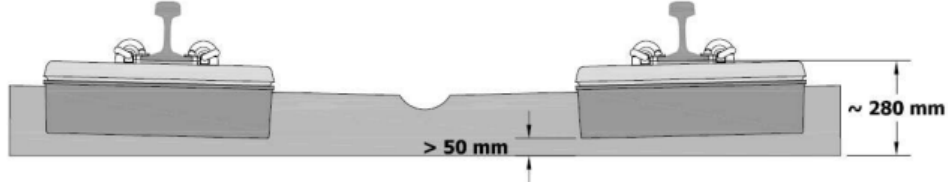
Betonarme hesapta (5.21) ve (5.22) denklemlerinin düzenlenmesiyle elde edilen (5.23) denklemi kullanılarak donatı oranı ρ pratik olarak elde edilmiştir.

$$0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot a = A_s \cdot f_{yd} \quad (5.21)$$

$$M_d = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (5.22)$$

$$\frac{M_d}{b_w \cdot d^2} = \rho \cdot f_{yd} \cdot \left(1 - 0,588 \cdot \rho \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}\right) \quad (5.23)$$

Şekil 5.9’da normal bir hat için tipik betonarme kesit gösterilmektedir.



Şekil 5.9: Normal bir hatta LVT sistem tipik betonarme kesiti [10].

Yapılan hesaplarda pozitif momentler için hesaplanan donatıların alta ve negatif momentler için hesaplanan donatıların üste konacağı bilinmektedir. Burada sadece donatı alanlarının tespiti ile yetinilmiştir.

Boyuna doğrultu:

$M_d = 37,0$ kNm için:

Kesit yüksekliği normal bir hat için minimum olarak $h = 280$ mm alınır. Faydalı kesit yüksekliği:

$$d = h - d' = 280 - 50 = 230 \text{ mm}$$

Verilen kesit özellikleri ve malzeme karakteristikleri (5.23)’de yerine yazılarak ρ değişkenine göre denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho = 0,001995$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 459 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 644 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur. Bu durumda seçilen 280 mm yüksekliğindeki kesitin yeterli olduğu görülmektedir.

$M_d = -14,3$ kNm için:

(5.23) denkleminin çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,00075$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 172 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 644 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur. Bu durumda seçilen 280 mm yüksekliğindeki kesitin boyuna doğrultuda yeterli olduğu görülmektedir.

Enine doğrultu:

Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik özellikleri Tablo 5.2'ten alınarak hesaplar (5.21), (5.22) ve (5.23) denklemleri ile aşağıdaki gibi yapılmıştır. Hattın ortasındaki drenaj kanalının 10 cm olduğu kabul edilerek enine doğrultuda efektif tabaka kalınlığı hesaplarda $h=180 \text{ mm}$ alınmıştır.

$M_d = 40 \text{ kNm}$ için:

$$h = 180 \text{ mm}$$

$$d = h - d' = 180 - 50 = 130 \text{ mm}$$

(5.23) denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho = 0,007$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 912 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 364 \text{ mm}^2$$

$$A_s > A_{s,min}$$

TS500'e göre maksimum donatı için $\rho \leq 0,02$ koşulu sağlanmalıdır.

$$A_{s,max} = 0,02 \cdot b_w \cdot d = 2600 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

$M_d = -7,5 \text{ kNm}$ için:

(5.23) denklemi çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,00123$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 160 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 364 \text{ mm}^2$$

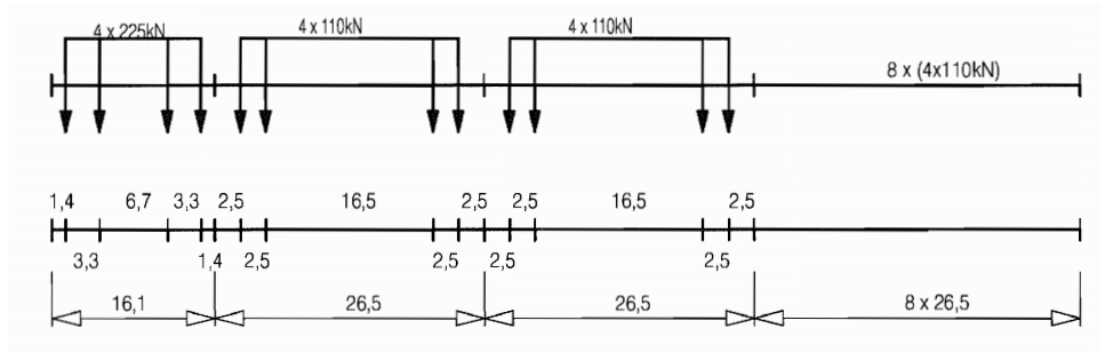
$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur. Bu durumda seçilen kesitin enine doğrultuda yeterli olduğu görülmektedir.

Yük treni yükleme sonucunda LVT sistemde oluşan boyuna ve enine doğrultudaki momentlerin normal bir LVT üstyapı tipi için verilen minimum kesit boyutları tarafından karşılanabildiği görülmektedir. Burada enine doğrultudaki kesitte hattın ortasından geçen drenaj kanalına dikkat edilmesi gerekmektedir. Drenaj eğer hattın ortasından sağlanacaksa kanal derinliğinin artması durumunda minimum kesit değerleri yeterli olmayabilir.

5.2.2 Yolcu treni işletmesi durumu için yapısal analiz

Yapısal analiz için SAP2000 programında aynı model üzerinde yükleme durumları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Yükleme durumu için BS EN 1991-2:2003 standardında lokomotifle çekilen yolcu treni (Tip-2) olarak verilen Şekil 5.10'da gösterilen model kullanılmıştır. Burada ilk iki kısımdaki yüklemelerin alınması en elverişsiz durumu ortaya çıkarmak için yeterli olacaktır.

Seçilen düz bir hat kesiminde en elverişsiz durum için daha önce verilen (5.17) ve (5.18)'deki yük kombinasyonları ile analiz gerçekleştirilecektir.



Şekil 5.10: Yolcu treni yükleme modeli örneği.

Dinamik etki katsayısının belirlenmesi

Dinamik etki katsayısı Eisenman'ın (5.16) formülü ile hesaplanmıştır. Yolcu treninin hızı maksimum 120 km/h alınırsa,

$$V=120 \text{ km/h}$$

$$t=1$$

$$S=0,2 \text{ alınarak}$$

60<V≤200 km/h hızlar için geçerli (5.16) formülünden dinamik etki katsayısı:

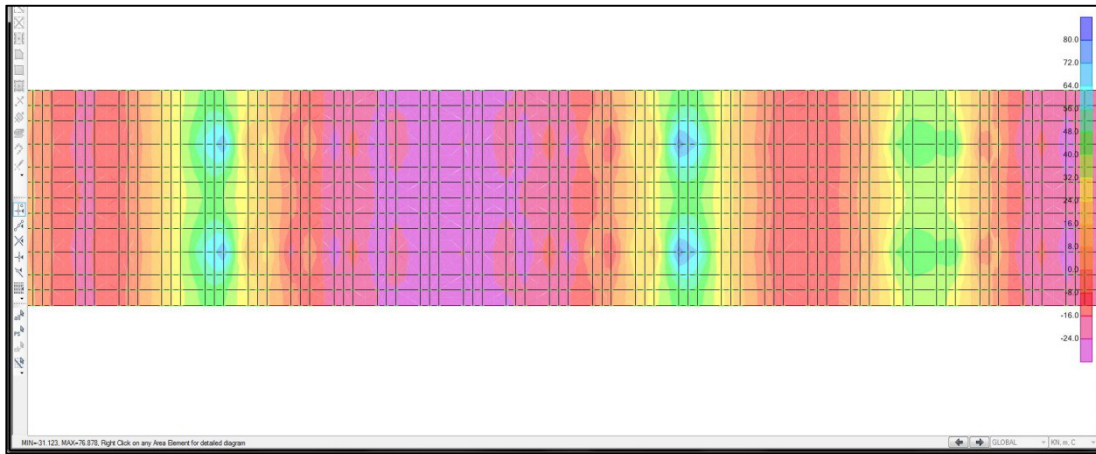
$$\rho = 1 + 1 \times 0,2 \times \left(1 + \frac{120 - 60}{140}\right)$$

$$\rho = 1,286 \text{ hesap edilir.}$$

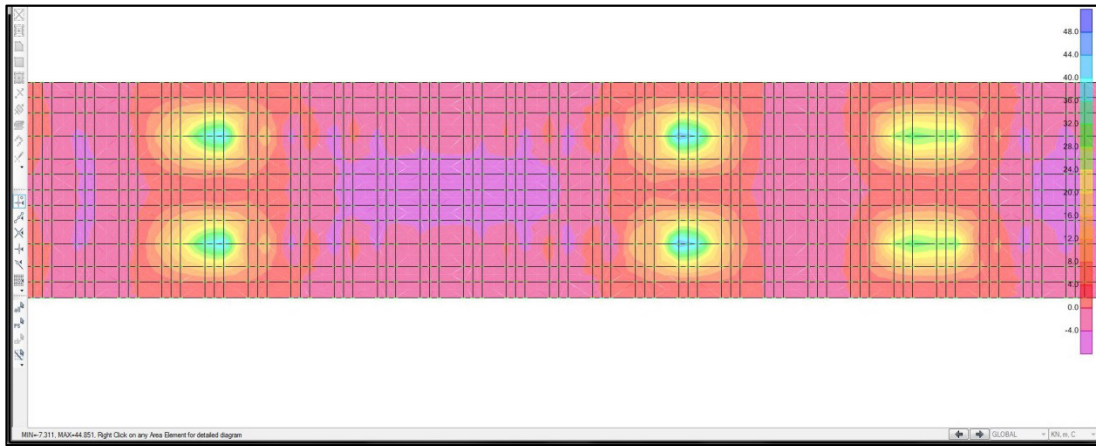
5.2.2.1 Modelleme ve statik analiz

Modellemede kullanılan değerler 5.2.1.2 başlığı altında açıklandığı gibi alınmıştır. Statik analiz sonuçları şekil 5.11 ve şekil 5.12’de gösterilmektedir.

Yolcu treni yüklemesi için maksimum momentler (5.17)’de verilen 1. yk kombinasyonundan elde edilmiştir. Boyuna doğrultuda maksimum ve minimum moment değerleri 76,9 kNm ve -31,12 kNm, enine doğrultuda maksimum ve minimum momentler 44,8 kNm ve -7,3 kNm olarak bulunmuştur.



şekil 5.11: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).



şekil 5.12: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).

5.2.2.2 Betonarme hesap

Hesaplar 5.2.1.3 başlığı altında aşılanan veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dizayn moment değerleri şekil 5.11 ve şekil 5.12’den alınmaktadır. Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik zellikleri Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Boyuna doğrultu:

$$\underline{M_d = 76,9 \text{ kNm için:}}$$

Kesit yüksekliği $h = 300 \text{ mm}$ alınırsa faydalı kesit yüksekliği:

$$d = h - d' = 300 - 50 = 250 \text{ mm}$$

Verilen kesit özellikleri ve malzeme karakteristikleri (5.23)'de yerine yazılarak ρ değişkenine göre denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho = 0,0035$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 876 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 700 \text{ mm}^2$$

TS500'e göre maksimum donatı için $\rho \leq 0,02$ koşulu sağlanmalıdır.

$$A_{s,max} = 0,02 \cdot b_w \cdot d = 5000 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

$$\underline{M_d = -31,12 \text{ kNm için:}}$$

(5.23) denklemi çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,0014$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 346 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 700 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur.

Enine doğrultu:

Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik özellikleri Tablo 5.2'ten alınarak hesaplar (5.21), (5.22) ve (5.23) denklemleri ile aşağıdaki gibi yapılmıştır. Hattın ortasındaki drenaj kanalının 15 cm olduğu kabul edilirse enine doğrultuda efektif tabaka kalınlığı $h = 130 \text{ mm}$ alınarak hesap yapıldığında maksimum donatı oranı geçilmektedir. Bu durumda kesit yüksekliği 300 mm seçilmiştir.

$$\underline{M_d = 44,8 \text{ kNm için:}}$$

$$h = 300 - 150 = 150 \text{ mm (150 mm drenaj kanalı)}$$

$$d = h - d' = 150 - 50 = 100 \text{ mm}$$

(5.23) denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho = 0,01454$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 1454 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 280 \text{ mm}^2$$

$$A_s > A_{s,min}$$

TS500'e göre maksimum donatı için $\rho \leq 0,02$ koşulu sağlanmalıdır.

$$A_{s,max} = 0,02 \cdot b_w \cdot d = 2000 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

$M_d = -7,3 \text{ kNm}$ için:

(5.23) denklemi çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,00204$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 204 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 280 \text{ mm}^2$$

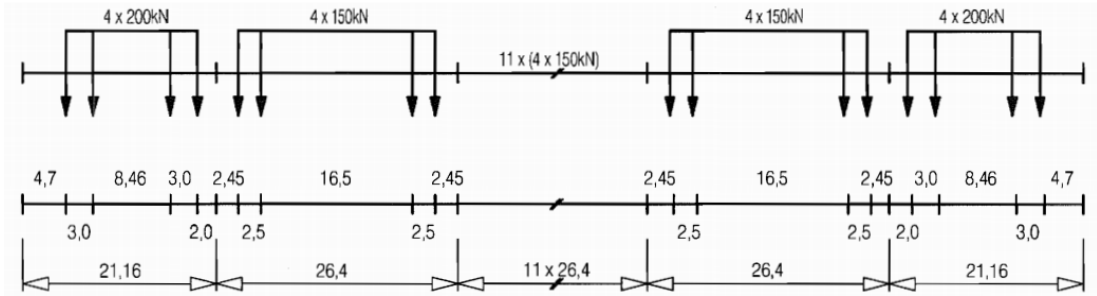
$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur.

Yolcu treni yükleri altında hızın 120 km/h olması yük treni durumuna göre dinamik etki katsayısını artırdığı için moment değerleri biraz artmıştır. Betonarme hesapta ise bu artıştan dolayı kesit yüksekliğinde büyük bir değişiklik yapma ihtiyacı olmadığı, donatı miktarının artırılmasıyla momentlerin karşılandığı görülmektedir. Ancak hattın ortasından geçen drenaj kanalının derinliği burada 15 cm alındığı için üstyapı kesiti bir miktar artırılmıştır. Ayrıca drenaj kanalının ortada değil de hattın kenarında olması durumunda kesitte bir değişikliğe gidilmesi gerekmeyecek ve enine doğrultudaki donatıdan bir miktar tasarruf sağlanabilecektir.

5.2.3 Hızlı tren işletmesi durumu için yapısal analiz

Yapısal analiz için SAP2000 programında aynı model üzerinde yükleme durumları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Yükleme durumu için BS EN 1991-2:2003 standardında hızlı tren yükleme modeli (Tip-3) olarak verilen Şekil 5.13'de

gösterilen model kullanılmıştır. Burada ilk iki kısımdaki yüklemelerin alınması en elverişsiz durum ortaya çıkarmak için yeterli olacaktır.



Şekil 5.13: Hızlı tren için yükleme durumu örneği.

Önceki bölümde olduğu gibi burada da seçilen düz bir hat kesiminde en elverişsiz durum için (5.17) ve (5.18)'deki yük kombinasyonları ile analiz gerçekleştirilecektir.

Dinamik etki katsayısının belirlenmesi

Tren hızı 200 km/h üstünde olduğundan dinamik etki katsayısı için Eisenman'ın (5.16) formülü geçerli olmamaktadır. Tren hızı 250 km/h alınırsa $60 < V \leq 300$ km/h hızlar için geçerli (5.24)'de verilen hıza bağlı katsayı kullanılabilir [2].

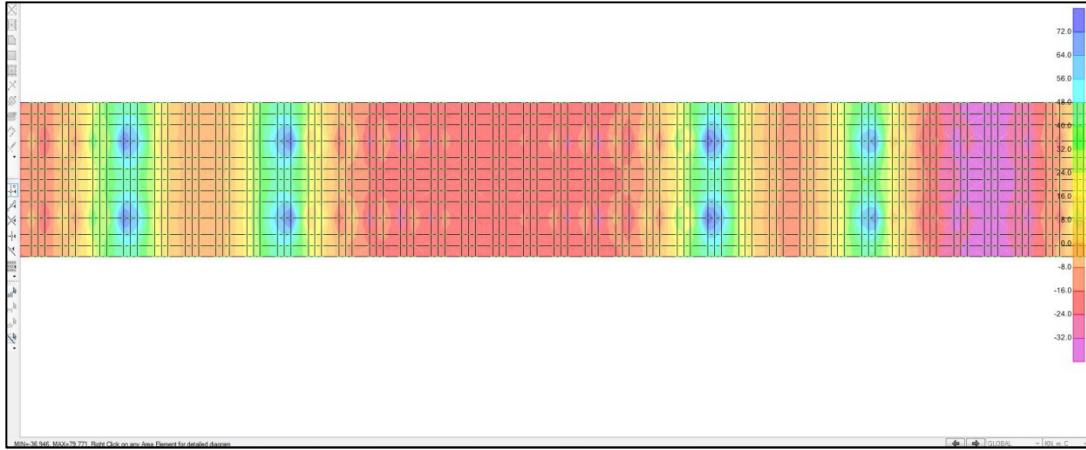
$$\rho = 1 + 0,5 \times \left(\frac{V - 60}{190} \right) \quad (5.24)$$

$$\rho = 1 + 0,5 \times \left(\frac{250 - 60}{190} \right)$$

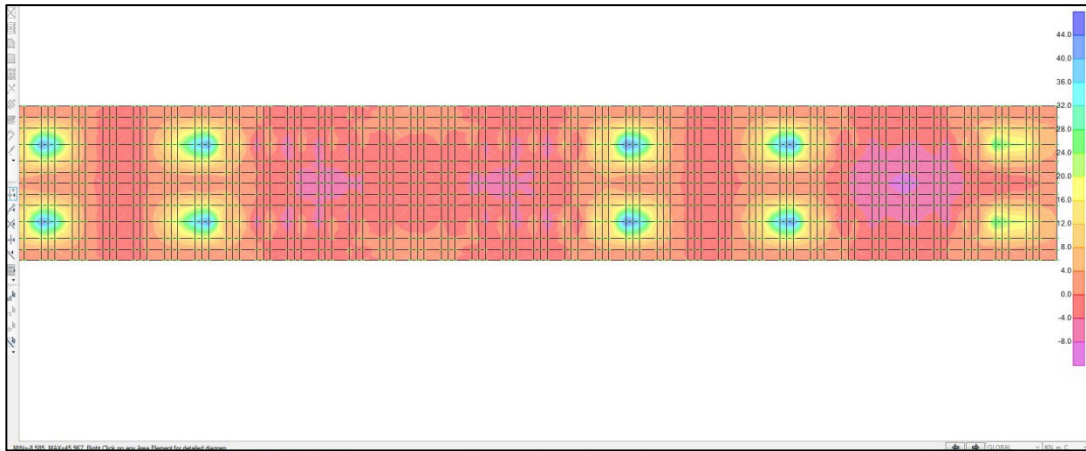
$\rho = 1,5$ hesap edilir.

5.2.3.1 Modelleme ve statik analiz

Modellemede kullanılan değerler 5.2.1.2 başlığı altında açıklandığı gibi alınmıştır. Statik analiz sonuçları Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Yolcu treni yüklemesi için maksimum momentler (5.17)'de verilen 1. yük kombinasyonundan elde edilmiştir. Boyuna doğrultuda maksimum ve minimum moment değerleri 79,8 kNm ve -36,9 kNm, enine doğrultuda maksimum ve minimum momentler 45,9 kNm ve -8,6 kNm olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14: Boyuna doğrultu moment diyagramı (M11).



Şekil 5.15: Enine doğrultu moment diyagramı (M22).

5.2.3.2 Betonarme hesap

Hesaplar 5.2.1.3 başlığı altında açılan veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dizayn moment değerleri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten alınmaktadır. Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik özellikleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Boyuna doğrultu:

$M_d = 79,8 \text{ kNm}$ için:

Kesit yüksekliği normal bir hat için ortadaki drenaj kanalı 150 mm düşünülerek 300 mm alınırsa faydalı kesit yüksekliği:

$$d=h- d'=300-50=250 \text{ mm}$$

Verilen kesit özellikleri ve malzeme karakteristikleri (5.23)'de yerine yazılarak ρ değişkenine göre denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho= 0,0036$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 910 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 700 \text{ mm}^2$$

TS500'e göre maksimum donatı için $\rho \leq 0,02$ koşulu sağlanmalıdır.

$$A_{s,max} = 0,02 \cdot b_w \cdot d = 5000 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

$M_d = -36,9 \text{ kNm}$ için:

(5.23) denklemi çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,00165$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 412 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 700 \text{ mm}^2$$

$A_s < A_{s,min}$ olduğu için minimum donatı kullanılması uygundur.

Enine doğrultu:

Kesit ve kullanılan malzeme karakteristik özellikleri Tablo 5.2'ten alınarak hesaplar (5.21), (5.22) ve (5.23) denklemleri ile aşağıdaki gibi yapılmıştır. Hattın ortasındaki drenaj kanalının 150 mm olduğu kabul edilerek enine doğrultuda efektif tabaka kalınlığı hesaplarda $h=150 \text{ mm}$ alınmıştır.

$M_d = 46,9 \text{ kNm}$ için:

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$d = h - d' = 150 - 50 = 100 \text{ mm}$$

(5.23) denkleminin çözümünden donatı oranı:

$$\rho = 0,015$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 1500 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 280 \text{ mm}^2$$

$$A_s > A_{s,min}$$

TS500'e göre maksimum donatı için $\rho \leq 0,02$ koşulu sağlanmalıdır.

$$A_{s,max} = 0,02 \cdot b_w \cdot d = 2000 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

$M_d = -8,6$ kNm için:

(5.23) denklemi çözümünden donatı oranı

$$\rho = 0,0024$$

$$A_s = \rho \cdot b_w \cdot d = 242 \text{ mm}^2 \text{ bulunur.}$$

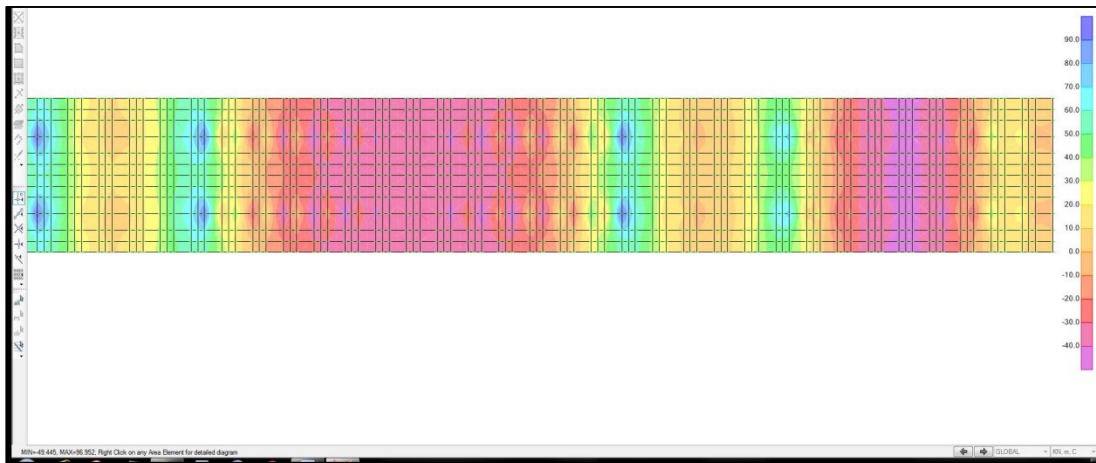
Donatı uygunluk kontrolü:

$$\rho_{min} = 0,80 \cdot \frac{f_{cta}}{f_{yd}} = 0,0028$$

$$A_{s,min} = \rho_{min} \cdot b_w \cdot d = 280 \text{ mm}^2$$

$A_{s,min} < A_s < A_{s,max}$ olduğu için seçilen kesit ve hesaplanan donatı uygundur.

Seçilen yüksek hızlı tren aks yükleri yük treni ve yolcu treninden daha düşük olduğu halde dinamik etkilerin hesaba katılması nedeniyle taşıyıcı tabakada oluşan moment değerleri daha yüksek olmuştur. Yolcu treni durumunda oluşan momentler yüksek hızlı trenden daha düşük olmakla birlikte yakın değerler aldığı görülmektedir. Her iki durumda da LVT sistem kesit özellikleri aynı kalmaktadır. Ancak hattın ortasındaki drenaj kanalının derinliği enine doğrultudaki donatı miktarını ve kesit yüksekliğini etkilemektedir. Yapılan hesaplarda daha önce belirtildiği gibi zemin yatak katsayısı iyi bir zemin için 100000 kN/m^3 olarak alınmıştır. Farklı zemin koşuluna bir örnek olarak daha önce açıklanan yüksek hızlı hat modeli için zemin yatak katsayısı 20000 kN/m^3 olarak alınırsa (5.17)'deki yük kombinasyonu için elde edilen boyuna doğrultudaki moment diyagramı Şekil 5.16 gibi olmaktadır. Burada momentlerin önemli ölçüde arttığı görülebilir.



Şekil 5.16: Farklı zemin durumu için boyuna doğrultu moment diyagramı.

6. SONUÇLAR

Raylı sistemler konusunda ülkemizdeki yatırımların başlangıcı aslında çok eskiye dayanmaktadır. Bu konuda İstanbul'daki taksim Karaköy tüneli Londra'dan sonra dünyadaki ikinci yeraltı işletmesidir. Bununla birlikte günümüzde diğer ülkelerle kıyaslandığında geride kalındığı açıktır. Son yıllarda bu açığın giderilmesine yönelik demiryolu yatırımları artırılmış ve bugün yüksek hızlı hatlar işletmeye açılmıştır ve birçok yeni hattın inşaatı hâlihazırda devam etmektedir.

Demiryolunda taşınan insan sayısının artması doğal olarak hattın statik açıdan güvenliğinin önemini de artırmıştır. Bunun yanında işletmesel maliyetler sebebiyle dünyada geleneksel balastlı sistemlere alternatif olacak balastsız üstyapı arayışına gidilmiş ve çeşitli tipte uygulamalar ortaya çıkmıştır. Örneğin Japonya'da ortaya çıkan ve hızlı tren hatlarında uygulanan Shinkansen üstyapı tipinde başlangıcından günümüze kadar 50 yıllık uzun bir işletme döneminde ölümcül bir kaza meydana gelmemesi güvenlik açısından balastsız üstyapıların önemine dikkat çekmektedir. Bu çalışmamızda dünyada kullanılan çeşitli balastsız üstyapılar genel özellikleri ile tanıtılmıştır. Bu uygulamaları incelemenin çeşitli koşullarda yapılacak demiryolu hatlarında en uygun üstyapı tipinin seçilmesine kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir.

Balastsız üstyapı tiplerinden LVT sistem için yapılan tasarım çalışmasında düz bir hat kısmı ele alınmış ve farklı işletme yükleri altında statik analizi yapılmıştır. Üstyapının statik hesapları yük treni, yolcu treni ve hızlı tren işletmeleri dikkate alınarak FEA programı ile yapılmıştır. Yük trenleri için UIC'nin Yükleme Modeli 71'deki yükleme durumu kullanılmıştır. Normal yolcu ve yüksek hızlı trenler için sırasıyla BS EN 1991 standardında belirtilen Tip-2 ve Tip-3 yükleme modelleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde AREMA'ya göre iki yük kombinasyonundan faydalanılmıştır.

Normal yük trenlerinin aks yükleri yolcu ve yüksek hızlı trenlerin aks yükünden daha büyüktür. Buna karşın yük treni maksimum hızı 100 km/h kabul edilmişken, yolcu ve yüksek hızlı trenlerin hızları sırasıyla 120 km/h ve 250 km/h alındığı için hızla

doğru orantılı olarak dinamik etki katsayısı büyümüş ve bu nedenle analiz sonuçlarında yolcu ve yüksek hızlı tren işletmesi altında moment değerleri yük treni durumuna göre daha büyük hesaplanmıştır.

Şehir içi metro hatlarında maksimum hız genellikle 100 km/h alındığından bu durumda sadece yük treni dikkate alınarak tasarım yapılırsa emniyetli tarafta kalınmış olacaktır. Ancak hız kısıtlaması olmayan hatlarda 100 km/h hızın üstüne çıkılacak durumlarda karışık işletmeler için mutlaka tüm durumların değerlendirilmesi gerekmektedir. Burada yapılan analizlerden en yüksek moment değerleri aks yükleri az olmasına rağmen dinamik etki katsayısının artması nedeniyle yüksek hızlı tren işletmesi altında gerçekleştiği görülmüştür. Kullanılan yükleme modelleri araç tiplerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca bu çalışmada yapılan hesaplamalarda üstyapının oturduğu zemin tabakasının iyi kalitede bir zemin olduğu kabul edilmiştir. Bir proje güzergâhında kısa mesafelerde dahi zemin kalitesinin değişiklik gösterebileceği bilinmektedir. Bu nedenle zemin koşullarının iyi tespit edilmesi önemlidir. Örneğin zemin yatak katsayısı 20.000 kN/m^3 alındığında yüksek hızlı trenler için yapılan hesapta boyuna doğrultudaki moment değerleri yaklaşık olarak %20 ile %30 kadar artış göstermiştir.

KAYNAKÇA

- [1] wikipedia.com, (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde [http://en.wikipedia.org/wiki/Track_\(rail_transport\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Track_(rail_transport)) adresinden alındı
- [2] Öztürk, Z. (2012). *Demiryolu Üstyapısı Hesaplamaları ders notları*. İstanbul: İTÜ.
- [3] Bıçakçı, O. (1981). *Demiryollarında Balastsız Üstyapı ve Boyutlandırılması*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [4] Fleische, W., & Lieschke, H. (September 2006). Innovative Slab Track Systems. *RTR Special State-of-the-Art*.
- [5] Michas, G. (2012). *Slab Track Systems for High-Speed Railways*. Stockholm: Division of Highway and Railway Engineering Department of Transport Science School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology.
- [6] Öztürk, Z., & Öztürk, T. (2005). Kentiçi Demiryolunda Balastsız Üstyapı Tasarımları ve Uygulama Esasları. *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*. Antalya.
- [7] RAIL.ONE. (tarih yok). 04 24, 2015 tarihinde http://www.railone.com/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/en/Rheda2000_EN_2011_ebook.pdf adresinden alındı
- [8] Profillidis, V. A. (2011). *Railway Management And Engineering (Third Edition)*. Burlington, USA: Ashgate Publishing Company.
- [9] Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Netherlands: MRT Productions, Delft University of Technology.
- [10] Sonneville AG. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.sonneville.com/en/low-vibration-track-lvt/> adresinden alındı
- [11] Öztürk, Z., & Arlı, V. (2009). *Demiryolu Mühendisliği*. İstanbul: İstanbul Ulaşım A.Ş.
- [12] Sevim, R. (2007). *İstanbul'da Kentiçi Raylı Sistemler ve Üstyapı Hesaplamaları*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [13] MEB. (2013). *Raylı Sistemler Teknolojisi Raylar ve Bağlantılar*. Ankara: MEB.
- [14] Akçaaer, M. Z. (2014). *Demiryolu Ray - Travers Bağlantı Sistemlerinin ve Uygulanan Testlerin İncelenmesi*. İstanbul: İTÜ.
- [15] MEB. (2013). *Raylı Sistemler Teknolojisi Balast ve Travers*. Ankara: MEB.
- [16] Violin, M. (tarih yok). *Steel Ties and Turnout Sets*. 4 24, 2015 tarihinde http://www.narstco.com/Steel_Ties_and_Turnout_Sets.pdf adresinden alındı

- [17] Peiner-Traeger. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.peiner-traeger.de/en/products/product-range.html> adresinden alındı
- [18] Rayhaber. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://i0.wp.com/www.rayhaber.com/wp-content/uploads/B-70-Beton-Travers.jpg> adresinden alındı
- [19] Aveng Infraset. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.infraset.com/products/1435mm-gauge-concrete-sleepers/b70-fastclip> adresinden alındı
- [20] SİTAŞ. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.sivastravers.com.tr/urunler.aspx#prettyPhoto> adresinden alındı
- [21] Consolis Sateba. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.sateba.com/article196.html> adresinden alındı
- [22] www.flickr.com. (2013). 5 1, 2015 tarihinde <https://www.flickr.com/photos/rtd-denver/12240961376/in/photostream/> adresinden alındı
- [23] İETT. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde www.iett.gov.tr/tr/main/pages/istanbulda-toplu-tasima/95 adresinden alındı
- [24] UDH Bakanlığı. (tarih yok). 4 24, 2015 tarihinde <http://www.marmaray.gov.tr/icerik/marmaray/153-Yıllık-Hayal-Gerçek-Oldu/48> adresinden alındı
- [25] Evren, G. (2002). *Demiryolu*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mevlüt MERT
Doğum Yeri ve Tarihi : Çayeli/1976
E-Posta : mevlut.mert@yahoo.com
Öğrenim Durumu :1998, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

AYGM/Marmaray Bölge Müdürlüğü:

- Marmaray Projesi batırma tüp ve istasyon inşaatları kontrol mühendisi (2005–2013)
- Levent-Hisarüstü Metro Hattı tünel ve istasyon inşaatları kontrol mühendisi (2013- devam)