

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ ANALİTİK VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emir Yalçın AKSOP

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : ULAŞTIRMA  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan GÜLER

Mart 2018

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ ANALİTİK  
VE NÜMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

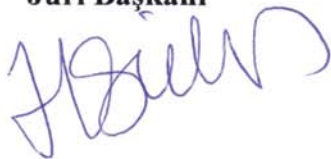
**Emir Yalçın AKSOP**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

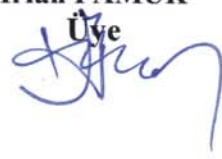
**Enstitü Bilim Dalı : ULAŞTIRMA**

**Bu tez 13.03.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.**

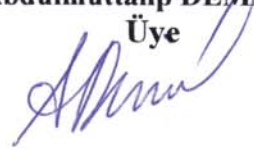
**Doç. Dr.  
Hakan GÜLER  
Jüri Başkanı**



**Yrd. Doç. Dr.  
İrfan PAMUK  
Üye**




**Yrd. Doç. Dr.  
Abdullah DEMİREL  
Üye**



## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Emir Yalçın AKSOP

13.03.2018

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen Tez Danıőmanım Doç. Dr. Hakan GÜLER'e, tezimin başarıyla sonuçlanmasını gönülden isteyen ilk müdürüm İnşaat Yüksek Mühendisi Ahmet ÇELEBİ'ye ve Dr. Dağhan ÇELEBİ'ye tez boyunca yaptıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim. Özellikle değer verdiğim güzel insan Hazel AYDIN'a ve sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|   |     |
|---|-----|
| TEŞEKKÜR.....   | i   |
| İÇİNDEKİLER .....                                     | ii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....                 | v   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                | vii |
| TABLOLAR LİSTESİ .....                                | x   |
| ÖZET .....  | xi  |
| SUMMARY .....   | xii |
| BÖLÜM 1.  |     |
| GİRİŞ .....   | 1   |
| 2.1. Çalışmanın İçeriği.....                          | 2   |
| BÖLÜM 2.  |     |
| DEMİRYOLU SİSTEMİ....                                 | 4   |
| 2.1. Demiryolu Tanımı ve Gelişimi.....                | 4   |
| 2.2. Demiryolu Türleri .....                          | 6   |
| BÖLÜM 3.  |     |
| DEMİRYOLU ÜSTYAPISI .....                             | 8   |
| 3.1. Balastlı Demiryolu Üstyapısı .....               | 9   |
| 3.2. Balastsız Demiryolu Üstyapısı .....              | 10  |
| 3.3. Demiryolu Üstyapısını Oluşturan Bileşenler ..... | 16  |
| 3.3.1. Raylar .....                                   | 17  |
| 3.3.2. Seletler.....                                  | 20  |
| 3.3.3. Traversler.....                                | 22  |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 3.3.4. Bağlantı malzemeleri..... | 27 |
| 3.3.5. Balast.....               | 30 |
| 3.3.6. Alt balast.....           | 32 |
| 3.3.7. Toprak gövde.....         | 32 |

#### BÖLÜM 4.

|   |    |
|---|----|
| DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARI .....   | 34 |
| 4.1. Demiryolu Üstyapısına Gelen Kuvvetler .....                                | 34 |
| 4.2. Demiryolu Üstyapısında Yükler ve Yük Aktarım Prensibi .....                | 36 |
| 4.3. Demiryolu Üstyapısına Gelen Kuvvetler Üzerine Çalışmalar .....             | 36 |
| 4.4. Winkler Yarı Uzayı ve Yatak Katsayısı .....                                | 37 |
| 4.4.1. Yatak katsayısı kavramı .....  | 38 |
| 4.5. Elastik Zemine Oturan Kiriş Modelinde Diferansiyel Denklemin<br>Çözüm..... | 39 |
| 4.5.1. Dinamik etki katsayısı .....   | 43 |

#### BÖLÜM 5.

|   |    |
|---|----|
| SONLU ELEMANLAR VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ<br>YÖNTEMİ..... | 45 |
|---|----|

#### BÖLÜM 6.

|  |    |
|--|----|
| DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ ANALİTİK MODELİ.....              | 49 |
| 6.1. Demiryolu Üstyapısına Gelen Kuvvetler .....                 | 49 |
| 6.2. Demiryolu Üstyapısında Yükler ve Yük Aktarım Prensibi ..... | 52 |

#### BÖLÜM 7.

|   |    |
|---|----|
| DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ NÜMERİK MODELİ.....                          | 55 |
| 7.1. Elastik Yatağa Oturan Kiriş Eleman .....                               | 56 |
| 7.2. Balast Tabakası Düzlem, Ray ve Travers Kiriş Eleman .....              | 57 |
| 7.3. Balast Tabakası Enine Düzlem, Ray ve Travers Kısa Kiriş<br>Eleman..... | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 7.4. Elastik Yatağa Oturan Izgara Kiriş Eleman ..... | 59 |
| 7.5. Üç Boyutlu Demiryolu Üstyapı Model Sistemi..... | 61 |
| BÖLÜM 8.   |    |
| ARAŞTIRMA BULGULARI.....                             | 65 |
| BÖLÜM 9.   |    |
| SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....                          | 68 |
| KAYNAKLAR.....                                       | 70 |
| EKLER.....   | 73 |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 82 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

|        |  |
|--------|--|
| $a$    | :Travers (mesnet) aralığı.                                       |
| $b$    | :Sanal (fiktif, hayali) kiriş genişliği.                         |
| $b_t$  | :Travers taban genişliği.  |
| $C$    | :Balast tabakasının yatak katsayısı                              |
| $e$    | :Hat açıklığı  |
| $E$    | :Elastisite modülü.  |
| $E_b$  | :Balast malzemesine ait elastisite modülü                        |
| $EI$   | :Eğilme rijitliği.   |
| $I$    | :Atalet momenti.   |
| $k_i$  | :Yay katsayısı.  |
| $k_s$  | :Yatak katsayısı.  |
| $k_b$  | :Balast tabakası ve zeminin rijitlik (esneklik) katsayısı.       |
| $L$    | :Elastik (Karakteristik) uzunluk.                                |
| $L_i$  | :Hesabı yapılan noktaya ait sağ tarafındaki sonlu parça boyu     |
| $L_j$  | :Hesabı yapılan noktaya ait sol tarafındaki sonlu parça boyu     |
| $l_t$  | :Travers taban uzunluğu.   |
| $M(x)$ | : $x$ metre uzaklıktaki eğilme momenti                           |
| $M$    | :Eğilme momenti  |
| $P(x)$ | :Kiriş tabanının elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi. |
| $P$    | :Statik tekerlek yükü.   |
| $q_s$  | :Yol kalitesi katsayısı  |
| $T$    | :Kesme kuvveti   |
| $t$    | :Traversin başlangıcından rayın eksenine kadar olan mesafe       |
| $t_e$  | :Emniyet katsayısı   |
| $V$    | :Seyir hızı  |
| $y$    | :Yer değiştirme, çökme   |

|            |  |
|------------|--|
| $y(x)$     | :x metre uzaklıktaki ray çökmesi         |
| $\mu$      | :Poisson oranı                           |
| $\sigma_s$ | :Taban basıncı                           |
| $\varphi$  | :Dinamik etki katsayısı                  |
| ATD        | :Asfalt beton taşıyıcılı tabaka          |
| CR         | :Contalı ray                             |
| HM         | :Herbert Meir tipi ray bağlantı sistemi  |
| KPO        | :K tipi ray bağlantı sistemi             |
| LVT        | :Düşük titreşimli demiryolu              |
| TCDD       | :Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları |
| TSE        | :Türk Standartları Enstitüsü             |
| UKR        | :Uzun kaynaklı ray                       |
| UIC        | :Uluslararası Demiryolu Birliği          |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1. Çift hatlı demiryolu enkesiti .....  | 6  |
| Şekil 2.2. Çift hatlı demiryolu sistemi .....   | 6  |
| Şekil 3.1. Balastlı demiryolu üstyapısı.....  | 9  |
| Şekil 3.2. Balastlı demiryolu üstyapısını oluşturan bileşenler.....                     | 9  |
| Şekil 3.3. Rheda 2000 sistemine ait üstyapı kesiti.....                                 | 11 |
| Şekil 3.4. Züblin sistemine ait bir uygulama.....                                       | 12 |
| Şekil 3.5. Stedef sisteminde kullanılan travers blok yapısı.....                        | 12 |
| Şekil 3.6. LVT sisteminde kullanılan travers blok yapısı.....                           | 13 |
| Şekil 3.7. (a) Tek blok traversli ATD sistemi, (b) İkiz blok traversli ATD sistemi..... | 13 |
| Şekil 3.8. Shinkansen sistemine ait bir uygulama.....                                   | 14 |
| Şekil 3.9. ÖBB sistemine ait bir uygulama.....  | 14 |
| Şekil 3.10. Gömülü ve sıkıştırılmış ray sistemi.....                                    | 15 |
| Şekil 3.11. Taşıyıcı betona mesnetli gömülü ray sisteminde beton döküm uygulaması.....  | 15 |
| Şekil 3.12. Gömülü ray sisteminin işletmedeki hali.....                                 | 16 |
| Şekil 3.13. Klasik demiryolu üstyapısı .....  | 16 |
| Şekil 3.14. UIC60 ray kesiti.....   | 18 |
| Şekil 3.15. Malzeme şekillerine göre ray sınıfları.....                                 | 19 |
| Şekil 3.16. Selet ve selet bağlantısı .....   | 20 |
| Şekil 3.17. Selet kesiti.....   | 21 |
| Şekil 3.18. Yumuşak ve rijit seletin ray ve travers üzerindeki etkileşimi.....          | 22 |
| Şekil 3.19. (a) Ahşap travers, (b) Çelik travers, (c) Beton travers.....                | 23 |
| Şekil 3.20. Tek bloklu beton travers.....   | 24 |
| Şekil 3.21. İkiz bloklu beton travers.....  | 25 |
| Şekil 3.22. Yekpare beton travers tip ölçütleri.....                                    | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.23. İkiz blok beton travers tip ölçütleri.....  | 26 |
| Şekil 3.24. Plastik travers uygulaması.....   | 26 |
| Şekil 3.25. Rayın raya bağlantı.....  | 28 |
| Şekil 3.26. Cebire demiri kullanılan ray bağlantı kesiti.....   | 28 |
| Şekil 3.27. Rayın traverse bağlantısı.....  | 29 |
| Şekil 3.28. Elastik yataklı ray bağlantı sistemi uygulaması.....  | 29 |
| Şekil 3.29. Balast malzemesi olarak çeşitli kayaç örnekleri.....  | 30 |
| Şekil 4.1. Yol yapısına gelen etkiler.....  | 35 |
| Şekil 4.2. Gerilme ( $\sigma$ ) – yer değiştirme ( $y$ ) eğrisi.....                                    | 39 |
| Şekil 4.3. Elastik temel model üzerinde sonsuz kiriş.....   | 39 |
| Şekil 4.4. Kiriş eleman modeli.....   | 40 |
| Şekil 5.1. Farklı boyutlu sonlu eleman örnekleri.....   | 45 |
| Şekil 5.2. Duvara ankastre asılı bir kirişin sürekli ve sonlu parçalara ayrılmış modeli.....            | 46 |
| Şekil 5.3. Çubuk eleman genel ve yerel eksenleri.....   | 48 |
| Şekil 5.4. Genel ve lokal eksenler.....   | 48 |
| Şekil 6.1. Balast tabakası üzerine oturmuş demiryolu sistemi.....                                       | 50 |
| Şekil 6.2. Elastik yatağa oturan kirişin sonlu eleman modelinin kurulması.....                          | 50 |
| Şekil 6.3. Balastlı üstyapı şematik planı.....  | 52 |
| Şekil 6.4. Balastlı demiryolu uygulama örneği ve yükleme durumu.....                                    | 52 |
| Şekil 6.5. Örnekte kullanılan rayın enine ve boyuna ölçüleri.....                                       | 53 |
| Şekil 6.6. Örnekte kullanılan traversin genişliğine ve uzunluğuna ait ölçüleri....                      | 53 |
| Şekil 6.7. Analitik modelin yer değiştirme grafiği.....   | 54 |
| Şekil 6.8. Analitik modelin moment grafiği.....   | 54 |
| Şekil 7.1. Elastik yatağa oturan kiriş elemanın SAP2000 modeli.....                                     | 56 |
| Şekil 7.2. Model-2'nin SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....                                | 57 |
| Şekil 7.3. Balast tabakası boyuna düzlem, ray ve travers kiriş elemandan oluşan SAP2000 modeli.....     | 58 |
| Şekil 7.4. Model-3'ün SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....                                 | 58 |
| Şekil 7.5. Balast tabakası enine düzlem, ray ve travers kısa kiriş elemandan oluşan SAP2000 modeli..... | 59 |
| Şekil 7.6. Model-4'ün SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....                                 | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 7.7. Elastik yatağa oturan ızgara kiriş elemanın SAP2000 modeli.....       | 60 |
| Şekil 7.8. Model-5'in SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....          | 60 |
| Şekil 7.9. Üç boyutlu demiryolu üstyapı model sisteminin SAP2000 modeli.....     | 61 |
| Şekil 7.10. Model-6'nın SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....        | 62 |
| Şekil 7.11. Y32 boji sistemi.....  | 63 |
| Şekil 7.12. Balastlı demiryoluna oturan boji sisteminin üç boyutlu gösterimi.... | 63 |
| Şekil 7.13. Y32 boji aksının dörtlü taker yükü yüklemesi.....                    | 64 |
| Şekil 7.14. Model-7'nin SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali.....        | 64 |



## TABLolar LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Tablo 2.1. Raylı sistemlerin yolcu kapasitesin göre sınıflandırılması.....  | 7  |
| Tablo 3.1. Yapım yöntemlerine göre bazı rijit üstyapı türleri .....         | 11 |
| Tablo 3.2. Bazı raylara ait kesit ölçüleri .....                            | 17 |
| Tablo 3.3. TSE 2400 standardına göre ray sınıfları .....                    | 19 |
| Tablo 3.4. Bazı raylara ait mekanik özellikler .....                        | 20 |
| Tablo 3.5. Bazı seletlerin mekanik özellikleri.....                         | 21 |
| Tablo 3.6. Bazı yekpare beton travers teknik bilgileri.....                 | 27 |
| Tablo 3.7. Beton travers standartları .....                                 | 27 |
| Tablo 3.8. Bağlantı malzemeleri standartları .....                          | 29 |
| Tablo 3.9. Balast dane sınıfı kategorileri.....                             | 31 |
| Tablo 3.10. Balast granülometrik özellikleri .....                          | 31 |
| Tablo 4.1. Çeşitli zeminler için yatak katsayısı değerleri.....             | 39 |
| Tablo 4.2. Emniyet ve yol kalite katsayıları.....                           | 43 |
| Tablo 7.1. Y32 bojinin bazı teknik özellikleri.....                         | 63 |
| Tablo 8.1. Demiryolu üstyapı modellerine ait çökme ve moment değerleri..... | 65 |

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Demiryolu hattı, Balastlı demiryolu hattı, Balastsız demiryolu hattı ve Sonlu elemanlar

Demiryolu hattının hayata geçebilmesi için, öncelikle projelendirilmesi gerekmektedir. Projelendirme süreci inşaat mühendisliği açısından hem geometrik yönden hem de zemin üzerine inşa edilecek üstyapı analizi yönünden incelenmektedir. Geometrik yönden inceleme; belirli kriterlere göre düz hat ve kurpların tasarımıdır. Üstyapı analizinin incelenmesi ise, zemin koşullarına göre zemine aktarılacak yük ile zeminde oluşacak gerilmeler ve deplasman hesaplarının doğruluğudur.

Bu çalışmada, balast tabakası üzerine oturan ray ve traverslerden oluşan yapı elastik yatağa oturan kiriş olarak sonlu elemanlar yöntemiyle iki (2D) ve üç (3D) boyutlu modellendirilerek çözülmüştür. Sonlu eleman programı olarak SAP2000 programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar geleneksel yöntemle (analitik model, Winkler Elastik Yatak Modeli) çözümlenerek, karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle boyuna doğrultuda bulunan yerdeğiştirme ve momentler geleneksel yöntemle hemen hemen aynı sonuçları vermiştir. Sonlu elemanlarla kurulan modelde balast tabakası yay, düzlem (2D) ve üç boyutlu eleman (3D) olarak modellendirilmiştir. Balast tabakasının yay olarak çözümünde yatak katsayısı, düzlem ve üç boyutlu eleman olarak çözümünde ise elastisite modülü kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modellerin doğruluğu test edildikten sonra demiryolu üstyapısı ve altyapısını oluşturan bileşenlerin boyutlandırılması yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

# **INVESTIGATION OF RAILWAY SUPERSTRUCTURE CALCULATIONS BY ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS**

## **SUMMARY**

Keywords: Railway track, Ballasted railway track, Ballastless railway track and Finite elements

In order to be able to carry out of railway track, it is required that the design phase should be completed in front. In terms of civil engineering, the projecting process is investigated in aspect of the geometry and the superstructure analysis to be built on the ground. Investigation in geometric aspect is the design of the curves and straight line according to the specific criteria. Examination of the superstructure analysis is the accuracy in calculations of stresses and displacement to occur in ground and the loads to be transferred to the ground according to the soil conditions.

In this study, rails and sleepers structure which are laid on ballast layer modelled and solved as two (2D) and three dimensional (3D) models using finite element methods as a beam on an elastic foundation. SAP2000 program is used as the finite element program. The system is also modelled and solved with conventional method (analytical method, Winkler's Model of Elastic Foundation) and the results are compared to each other. The results of displacements and moments along the beam are calculated in very close proximity in both methods. The ballast layer is modelled as a spring model, a plane element (2D) and a solid element (3D) in finite element methods. The modules of subgrade reaction are used in the spring model and the stress-strain modules are used in the plane and solid elements. After testing the accuracy of the models created by the finite element method, dimensioning of the components forming the railway superstructure and infrastructure are done and successful results are obtained.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsan doğası gereği her zaman bir yerlere ulaşma amacı güder. Bu ulaşımı kısa mesafelerde yürüyerek yapabileceği gibi yaşadığı kentte toplu taşıma araçlarıyla veya özel araçlar ile yapabilmektedir. Ancak, kentlerdeki gelişen nüfus ve gelirin artması ile özel araç alımlarında da artışlar olmaktadır. Bu artışlar kentlerin yolculuk taleplerini karşılayamayacak duruma gelir ve trafik problemlerini doğurur. Ulaşım ve toplu taşıma planları yapılarak doğru yatırım kararları ile kentlerin trafik problemleri çözülebilir. Nüfusu her yıl artan şehirlerde yolculuk taleplerinin toplu taşıma araçları ile karşılanması en uygun yöntemlerden biridir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için şehirde yaşayan insanların toplu taşıma sistemine adapte edilmesi gerekmektedir. Güvenli bir toplu taşıma türü olan demiryolu hem şehirlerde hem de şehirler arası yolculuklarda konforlu, güvenli, ekonomik ve hızlı bir ulaşım alternatifi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca demiryolu araçlarının yolcu kapasitesi ile şehirlerdeki yolculuk talepleri rahatlıkla karşılanabilmektedir.

Günümüzde her ne kadar hava, deniz, kara ve raylı ulaşımlara yatırımlar yapılsa da bunların işletmeye geçmeden önceki süreçlerinde altyapılarının sağlamlığı için bir üstyapı hesaplarının kesinlikle yapılması gereklidir.

Bu çalışmada, demiryolu üstyapısının modellenmesi konusunda yapılmış olan tez, makale, sempozyum gibi akademik çalışmalardan ve demiryolu üzerine yazılmış kitaplardan yararlanılmıştır.

Çalışmanın yöntemi olarak, analitik ve nümerik modelleme yöntemleri ile demiryolu üstyapı analizleri yapılacak, analitik ve nümerik hesaba göre bu analizler karşılaştırılacak, analiz çıktılarına göre demiryolu üstyapı modellerinin hesap sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılacaktır.

Çalışmanın birinci bölümünde teze giriş yapıldıktan sonra, ikinci bölümünde demiryolu sistemi ve türleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde demiryolu üstyapısı ve üstyapı sistemini oluşturan bileşenlerine ait elemanlar tariflenmiştir. Demiryolu araçlarından gelen yüklerin raya ve ray elemanından da altyapıya aktarılması prensibi anlatılan dördüncü bölüm ile birlikte demiryolu üstyapı hesap yöntemi üzerine olan çalışmalara değinilmiştir. Ayrıca bu bölümde, demiryolu üstyapı hesap çözümlerinde kullanılacak olan elastik yatağa oturan kirişlerin matematiksel denklemleri çıkarılmıştır. Beşinci bölümde sonlu elemanlar yöntemi anlatılarak, demiryolu üstyapısının nümerik hesapları için kullanılan sonlu elemanlar yazılımı olan SAP2000 hakkında kısa bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde, elastik yatağa oturan balastlı demiryolunun analitik modeli oluşturulmuş ve Winkler Yöntemine göre hesabı yapılmıştır. Yedinci bölümde demiryolu üstyapısına ait farklı boyutlarda nümerik modeller SAP2000 yazılımında oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. SAP2000 yazılımında oluşturulan demiryolu üstyapı model türlerinin analizlerinden elde edilen nümerik hesap sonuçları ile Winkler Yöntemi ile bulunan analitik hesap sonuçlarının üzerinde durulduğu sekizinci bölümde analitik ve nümerik yöntem karşılaştırmaları yapılmıştır. Tezin son bölümü olan dokuzuncu bölümde demiryolu üstyapı hesaplarındaki bulgulardan elde edilen sonuçlar üzerindeki temel durumlar açıklanmıştır.

### **1.1. Çalışmanın İçeriği**

Bu tez çalışmasında, balastlı demiryolu bileşenlerinin (ray, travers, bağlantı malzemesi, balast, altbalast ve toprak gövde) karakteristik özelliklerinin incelemesi yapılacak ve tren yükleri altında demiryolu üstyapı analizi analitik ve nümerik yöntemlerle incelenecektir. Üstyapının zorlanma hesapları trenlerden gelen yükler dikkate alınarak yapılacaktır. Bu amaçla balastlı demiryolu hattını oluşturan üstyapı bileşenlerinde meydana gelen yerdeğiştirme ve eğilme momenti büyüklükleri hesaplanacaktır. Yapılan analitik hesaplamalarda elastik yatağa oturan kiriş modelleri dikkate alınacak ve sonlu eleman programı kullanılarak nümerik modeller geliştirilerek analizler gerçekleştirilecektir. Ayrıca, analitik ve nümerik modellerin

analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılarak demiryolu üstyapısının doğru bir şekilde modellenmesi sağlanacaktır. Winkler'in elastik yatak modelinin bu çalışmanın özü olduğu için ve SAP2000 yazılımı ile modellenen farklı boyutlardaki demiryolu üstyapılarının analitik model olarak çözümü yapılan elastik yatağa oturan kirişin Winkler'in yarı uzay yatağa oturma prensibi anlatılarak sonuçların karşılaştırılması yapılacaktır.



## **BÖLÜM 2. DEMİRYOLU SİSTEMİ**

### **2.1. Demiryolu Tanımı ve Gelişimi**

Sabit bir hat üzerinde, hareketini mekanik sistem ile sağlayan araçlarla beraber içinde insan, eşya veya ağır yüklerin taşınmasına yardımcı olan tesislerin oluşturduğu yapıya demiryolu denir. Teknik bir tanımlama yapılacak olursa; demiryolu sistemi bir konumdan başka bir konuma demir bir yol üzerinde, mekanik bir kuvvetle hareket ettirilen demir tekerlekli araçlar içinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin tümüdür [1].

Demiryolu sistemi ray, travers, balast gibi üstyapı elemanları ve drenler, yarma ve dolgu gibi altyapı elemanlarının dışında; güzergahı boyunca yer alan istasyon, emniyet ve sinyalizasyon tesisleri ile demiryolu araçlarının oluşturduğu bir bütündür [1].

Demiryolu gelişimi, endüstri gelişiminden, özellikle buharın kullanılması, kömür ve demir madenlerinin yaygın olarak işlenmesinden çok fazla etkilenmiştir. Demiryolunun ilk hatları 1830 yıllarında birçok Avrupa kentinde işlemeye başlamış ve birçok demiryolu kurumu 20. yüzyılın başında büyük kapasitede çalışmıştır. Demiryolunun gelişmesinde en önemli etken yüksek hız imkanı ile hızlı ulaşımdır. 1835'de İngiltere'de 100 km/sa, 1890 yılında Fransa'da 144 km/sa, 1903 yılında Almanya'da 213 km/sa hıza ulaşılmıştır [2].

Demiryolu ulaştırması sisteminin kendisine özgü bir teknik ve organizasyon bütünlüğü vardır. Demiryolu organizasyonu aşağıda sıralanan ana başlıkları kapsar [3]:

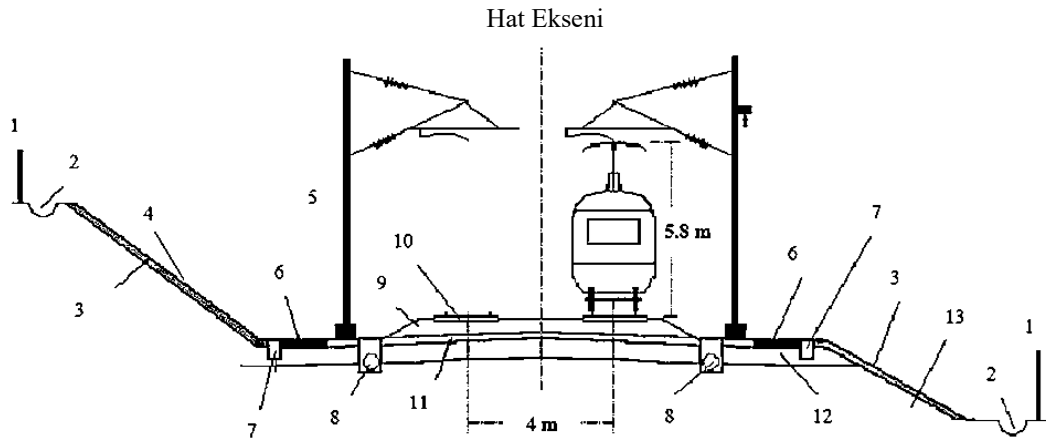
- Demiryolu hizmeti için sistem altyapısı,
- Demiryolunun hizmet performansı için gerekli olan katarlar, binalar ve sanat yapıları,

- Demiryolu sistem altyapısının yönetimi.

Demiryolu sistem altyapısı aşağıdaki bileşenleri kapsamaktadır:

1. Demiryolu üstyapısı (raylar, traversler, bağlantı malzemeleri, balast tabakası ve diğer üstyapı bileşenleri),
2. Demiryolu altyapısı (alt balast tabakası ve toprak gövde),
3. Diğer sistem altyapı bileşenleri:
  - a. Mühendislik yapıları ve tesisleri (köprüler, hemzemin geçitler, kurplar, drenaj sistemleri, haberleşme sistemleri, istinat ve iksa duvarları),
  - b. Kamulaştırma genişliği, sınır işaretleri ve koruyucu yapılar,
  - c. Demiryolu sinyalizasyonu, merkezi kontrol ve birbirine bağlı haberleşme sistemleri, tren hareketlerinin güvenliğini sağlayan sistemler ve makasların yerleri, sinyalizasyonu düzenleyen tesisler, sinyal ışıkları, sinyal göstergeleri ve sabit sinyaller,
  - d. Özel demiryolu haberleşme şebekeleri,
  - e. Havai ve yerden demiryolu elektrik kabloları, katanerler, transferlerin yapıldığı istasyonlar,
  - f. Demiryolu istasyonları ve bekleme yerleri,
  - g. Demiryolu sistem altyapısı tesislerinin bakımı, tamiri ve kullanılması için gerekli binalar ve yapılar,
  - h. Demiryolu sistem altyapısının işletmesi ve korunması için ve demiryolu trafiği için gerekli olan tüm havai ve yeraltı sistemleri.

Bir demiryolu sistemine ait enkesiti oluşturan tüm elemanlar aşağıdaki Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere sırasıyla; 1 ile kamulaştırma genişliği sonunu belirten tel-çit, 2 ile hendek, 3 ile şev, 4 ile şev üst yüzeyi, 5 ile kataner direkleri, 6 ile emniyet yolu, 7 ile kablo kanalı, 8 ile drenaj sistemi, 9 ile balast, 10 ile travers, 11 ile alt balast, 12 ile toprak gövde, 13 ile dolgu gösterilmektedir [4].



Şekil 2.1. Çift hatlı demiryolu enkesiti

Aşağıdaki Şekil 2.2.'de işletme halindeki çift hatlı demiryolu sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çift hatlı demiryolu sistemi

## 2.2. Demiryolu Türleri

Demiryolu sisteminde kullanılan araçların diğer ulaşım türlerine göre büyük taşıma kapasiteli olması, düşük enerji kullanımlı olması, daha iyi yolcu konforu sağlaması, güvenli olması, düşük bakım maliyetlerinin bulunması, yüksek teknoloji ve ekonomik olması ile birlikte hem şehirlerimizde hem de şehirler arası ulaşımında farklı demiryolu türlerinin kullanıldığı bilinmektedir.

Şehirlerarasındaki demiryolu, şehiriçinde kullanılan raylı sistemlere göre daha ağır dingil yüklerine sahiptir, hızlar daha yüksektir ve kapasitesi daha fazladır. Tablo 2.1.’de açıklandığı gibi raylı sistemlerde yolcu kapasitesine göre bir sınıflandırma yapmak mümkündür.

Tablo 2.1. Raylı sistemlerin yolcu kapasitesine göre sınıflandırılması

| Raylı Sistem Türleri | Yolcu Kapasitesi (kapasite/yön/saat) |
|----------------------|--------------------------------------|
| Bölgesel Tren        | 50.000 ve >                          |
| Metro                | 30.000 – 50.000                      |
| Hafif Raylı Sistem   | 15.000 – 25.000                      |
| Tramvay              | 10.000 – 15.000                      |

Genel anlamda kullanım amaçlarına göre raylı sistemler yedi sınıfa ayrılabilir [3].

1. Bölgesel demiryolu hatları: Hızları yüksek ve dingil ağırlıkları fazladır.
2. Hafif raylı sistemler: Daha düşük hızlara ve hafif dingil ağırlığına sahiptirler.
3. Yüksek hızlı demiryolları: Saatte 250 km’den fazla hıza ulaşabilen trenleri taşıyan hatlardır.
4. Monoraylar: Kent içinde hafif raylı sistemlerin yerine kullanılan ve genellikle yerden yüksekte bir yapı üzerinde (viyadüklerle) kurulu sistemden oluşan bir demiryolu türüdür.
5. Maglev: Kent içinde hafif raylı sistemlerin yerine kullanılan ve elektromanyetik bir sistemden oluşan çok yüksek hızlara çıkabilen bir demiryolu türüdür.
6. Rak demiryolu: Dağlık bölgelerde kullanılan özel dişli mekanizmasına sahip demiryollarıdır.
7. Endüstri demiryolları: Fabrika (sanayi) içinde kullanılan demiryollarıdır.

Demiryolu işletme kuruluşlarının öncelikli beklentileri birim zamanda taşınacak yolculuğun kapasitesini artırmak olmasına rağmen; gürültünün azaltılması, emisyonların asgari düzeye indirilmesi gibi çevresel etmenler ve kullanım amacı ulaşım türünün seçilmesinde önemli etkenlerdir [3].

### **BÖLÜM 3. DEMİRYOLU ÜSTYAPISI**

Uzun yıllardır bilinen ve günümüzde de kullanılan demiryolu hatları ray, travers, bağlantı malzemesi, balast, alt balast ve toprak gövdeden oluşmaktadır ve literatürde geleneksel demiryolu olarak tariflenmektedir. Bu demiryolu hatları genellikle kendi kamusal genişliği ile korunan bir yapı içerisinde yer almaktadır. Balastlı demiryolu hatlarının şehir içinde, tünellerde, köprülerde kullanılmasıyla birlikte balast malzemesinin bakımının zor ve bakım maliyetinin yüksek olması üzerine çeşitli balastsız üstyapı tipleri geliştirilmiştir.

Balastsız demiryolu hatları ilk olarak 1972 yılında Almanya'nın Bielefeld ile Hamm şehirleri arasında yapılmıştır ve Rheda olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen tecrübeler ve teknolojiye gelişmelerle 1,000 m uzunluğundaki Rheda 2000 balastsız demiryolu hattı Almanya'nın Erfurt ve Halle-Leipzig şehirleri arasında yapılmıştır [5]. Balastsız demiryolu hatlarının bakım maliyetleri balastlı demiryollarına nazaran çok düşüktür ancak ilk yapım maliyetleri çok yüksektir. Bu sebeple ulusal demiryolu organizasyonları yapım maliyetlerinin düşük olmasından dolayı balastlı demiryollarını tercih etmektedirler [5].

Demiryolu yapısında; altyapı platformu üzerine oturan, üzerinde trenlerin hareket etmesini sağlayan, katarlardan (demiryolu taşıtları) gelen yükleri platforma aktaran ray, travers, bağlantı malzemeleri ve taşıyıcı tabaka (beton plak veya balast) demiryolu üstyapısını oluşturur. Bir demiryolunun oluşturulabilmesi için, yüzeyde zeminin üstyapıya uygun hale getirilmesi gereklidir. Kazı, dolgu, zemin iyileştirme gibi işlemler sonrası oluşturulan ve zemin durumuna göre balast altına serilen alt balastlı yapıya demiryolunun altyapısı denir. Altyapı üzerine oturtulacak balast, travers, raylar demiryolunun üstyapısı ile ilgilidir.

### 3.1. Balastlı Demiryolu Üstyapısı

Malzeme serimine uygun toprak gövde ve gerekli durumlarda kullanılabilir alt balast tabakası üzerinde balast, travers, bağlantı malzemesi ve raylardan oluşan kısma balastlı üstyapı adı verilmektedir. Balastlı demiryolu üstyapısına ait bir yapı Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Balastlı demiryolu üstyapısı

Balastlı üstyapı yapım, bakım, onarım kolaylıkları ve düşük maliyetli olmaları, yüksek titreşimleri ve gürültüleri önlemesi ve yükleri zemine malzeme özelliklerinden (balastın elastikiyeti) dolayı titreşimler ile azaltarak aktarması sebebiyle günümüzde de, özellikle yüksek hızlı demiryolu hatlarında, tercih edilmektedir. Balastlı demiryolu üstyapısına ait bir enkesit ve üstyapı elemanları Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Balastlı demiryolu üstyapısını oluşturan bileşenler

### 3.2. Balastsız Demiryolu Üstyapısı

Balast tabakasının yerine beton, betonarme veya asfalttan yapılan taşıma tabakalarının kullanıldığı demiryolu üstyapısı balastsız üstyapı ya da rijit üstyapı olarak isimlendirilmektedir. Balastsız üstyapılarda raylar, taşıma tabakası üzerinde olabileceği gibi taşıma tabakasının içine de gömülü olabilir. Günümüzde balastsız demiryolu sistemi şehirlerindeki tramvay, metro gibi raylı sistemlerde inşaat ve bakım maliyetleri açısından tercih edilebilir. Genellikle köprülerde, tünellerde, viyadüklerde sıklıkla tercih edilir. Şehirlerde diğer lastik tekerlekli araçlarla birlikte trafiğin gitmesi istendiği yerlerde de balastsız üstyapı tercih sebebidir.

Rijit üstyapı sisteminde balastlı demiryolu üstyapısındaki doğal elastiklik; ray altında, ray ve travers arasında veya travers altında kullanılacak elastik malzemelerle sağlanır. Rijit (balastsız) üstyapı sistemleri yapı tiplerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

1. Ayrık mesnetli,
2. Sürekli mesnetli.

Ayrık mesnetli rijit üstyapı sistemi traversli veya traverssiz olarak bağlantı elemanlarıyla bir alt kademedeki taşıma tabakasına oturtulur. Traversli olanlar; betona gömülü traversli ve asfalt beton üzeri traverslidir. Traverssiz olanlar; prefabrik üretim veya yekpare dökümlü beton üstyapılardır.

Sürekli mesnetli rijit üstyapı sisteminde, raylar elastik bir yatak içinde olduğu ve sürekli olarak bu yataklara mesnetlendiği için sistem gömülü raylı rijit üstyapı olarak bilinir. Ray mantarının tek tarafı ve her iki tarafı desteklenmiş olmak üzere iki farklı türü vardır.

Balastsız üstyapılara örnek olarak günümüzde Rheda 2000, Rheda Berlin, Züblin, Edilon (Infundo), Stedef, Shinkansen gibi rijit üstyapılar Almanya, Avusturya,

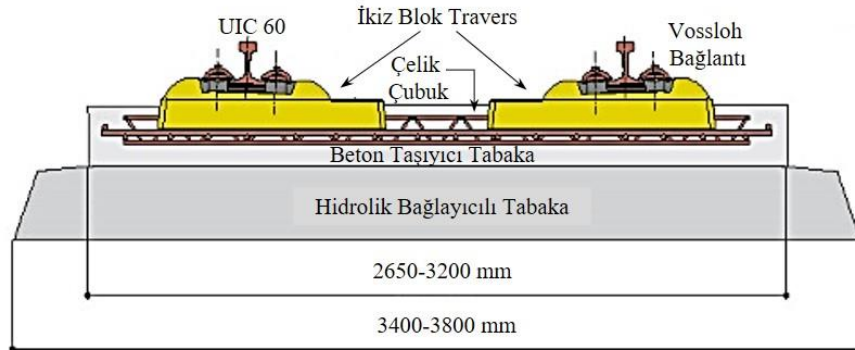
Hollanda, Fransa, Japonya gibi ülkelerde yüksek hızlı tren hatlarında veya kentçi cadde tramvay hatlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Tablo 3.1.'de günümüzde kullanılan rijit üstyapıların sınıflandırılması verilmiştir [6].

Tablo 3.1. Yapım yöntemlerine göre bazı rijit üstyapı türleri

| Betona gömülü traversler | Asfalt veya beton üzeri traversler | Prefabrik beton döşemeler | Yekpare beton döşemeler | Gömülü ray   | Sıkıştırılmış ve sürekli desteklenen ray |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------|--|
| Rheda                    | ATD                                | Shinkansen                | Lawn-rail               | Edilon Sedra | SFF                                      |
| Rheda 2000               | Walter                             | Bögl                      | Hochtief                | (Infundo)    | ERC                                      |
| Züblin                   | Sato                               | ÖBB                       |                         |              | Saarumi                                  |
| Sonneville               | Getrac                             |                           |                         |              |  |
| Stedef                   |                                    |                           |                         |              |  |

Betone gömülü traversli imal edilen rijit üstyapı tiplerinden Rheda ve Züblin sistemleri Almanya'da ilk kullanıldıkları yerlere göre isimlendirilmiştir. Rheda sistemi geliştirilerek Rheda 2000 sistemine dönüştürülmüştür. Rheda sistemlerinde traversler tek blok (yekpare) olabileceği gibi ikiz blok da olabilmektedir. Züblin sisteminde ikiz blok traversler birbirine çelik çubuklar ile bağlanarak betona bağlanır. Züblin sisteminde kullanılan traverslerin betona montajında özel yerleştirme makineleri kullanılır. Bu Züblin sistemi için bir dezavantajdır. Şekil 3.3.'de Rheda 2000 sistemine ait bir kesit [7] ve Şekil 3.4.'de Züblin sistemine ait bir uygulama gösterilmiştir [8].

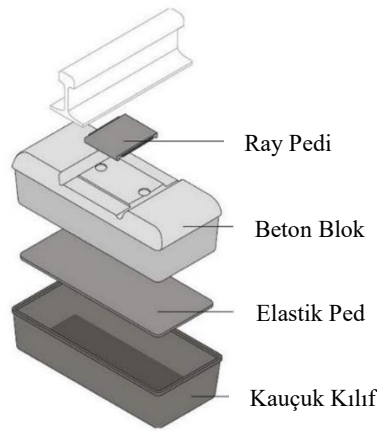


Şekil 3.3. Rheda 2000 sistemine ait üstyapı kesiti

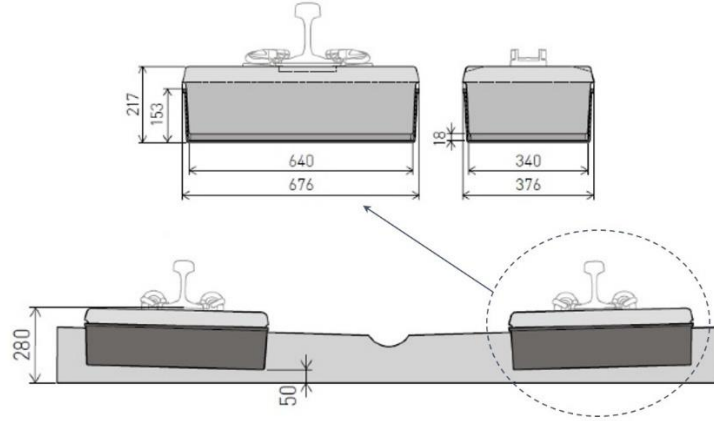


Şekil 3.4. Züblin sistemine ait bir uygulama

Stedef rijit üstyapı sistemi Fransa'da geliştirilmiştir. Bir kılıf içinde yer alan ortası bağlı ikiz blok traverslerden oluşmaktadır. Kılıf içinde ayrıca elastik pedler ve su geçirmez keçe bulunmaktadır. Sonneville (LVT) rijit üstyapı sistemi de Fransa'da geliştirilmiştir ve Fransa ile İngiltere'nin birbirine deniz altından bağlandığı Manş Tüneli'nde kullanılmıştır. Stedef sistemi ile benzerlik göstermektedir. Çünkü üreticileri aynıdır. LVT sistemindeki ikiz blok traverslerin ortasında herhangi bir bağlantı çubuğu yoktur. Bu iki sistemin en büyük avantajı, yüksek sönümlenebilirliğine sahip olmalarından dolayı gürültü ve titreşimleri azaltıcı özelliği bulunmaktadır. LVT sisteminde kullanılan beton travers blokları Stedef sistemine göre daha büyüktür. Şekil 3.5.'de Stedef ile LVT sisteminde kullanılan travers blok yapısı ve Şekil 3.6.'da Sonneville sistemine ait kesit ve travers blok yapısı gösterilmiştir [9].

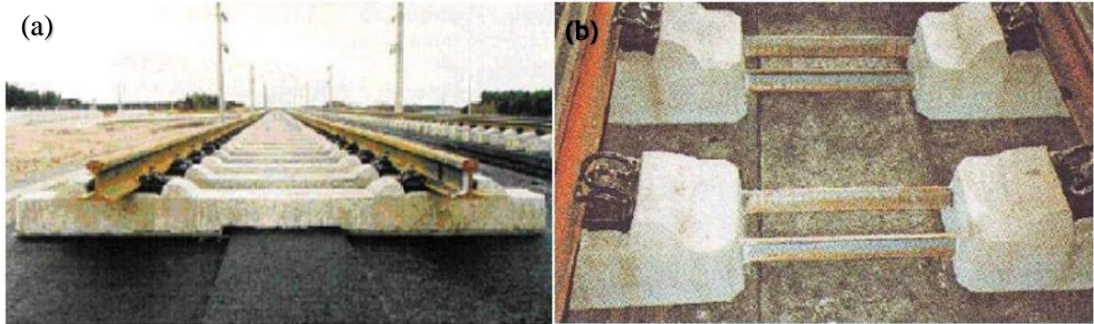


Şekil 3.5. Stedef sisteminde kullanılan travers blok yapısı



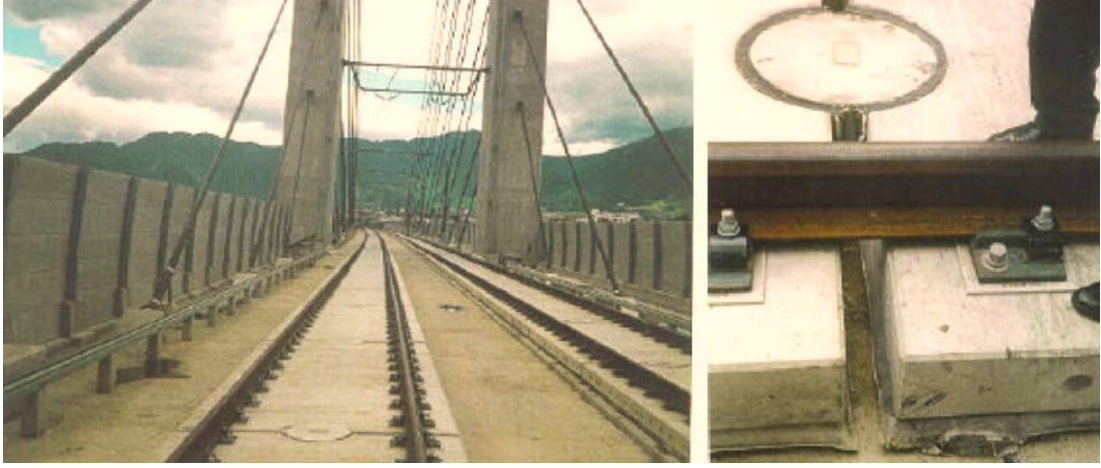
Şekil 3.6. LVT sisteminde kullanılan travers blok yapısı

Asfalt beton üzeri traversli imal edilen rijit üstyapı tiplerinden ATD sistemi, hidrolik olarak bağlanmış taşıyıcı tabaka üzerine serilen asfalt betonuna belirli aralıklarla ikiz blok travers ya da tek blok traverslerin konulması ile oluşturulur. Traversler arasında kalan boşluk sentetik malzemeler ile doldurulur. Şekil 3.7.'de hem tek blok traversli hem de ikiz blok traversli asfalt beton taşıyıcılı rijit üstyapı sistemi gösterilmiştir [10].



Şekil 3.7. (a) Tek blok traversli ATD sistemi, (b) İkiz blok traversli ATD sistemi

Prefabrik olarak imal edilen rijit üstyapı tiplerinden Shinkansen sistemi Japonya'da yüksek hızlı tren hatlarında kullanılmaktadır. Üstyapı elemanları, çimento kullanılarak dengelenmiş bir alt tabaka, yanıl ve uzunlamasına hareketi önlemek için 0.40 cm çapında beton silindirler ve bu silindirlerin bağlandığı 4.93 m x 2.34 m x 0.19 m ölçülerinde öngerilmeli beton plak döşemelerden oluşmaktadır. Döşemeler yaklaşık 5 ton ağırlığındadır. Şekil 3.8.'de Shinkansen sistemine ait bir uygulama gösterilmiştir [11].



Şekil 3.8. Shinkansen sistemine ait bir uygulama

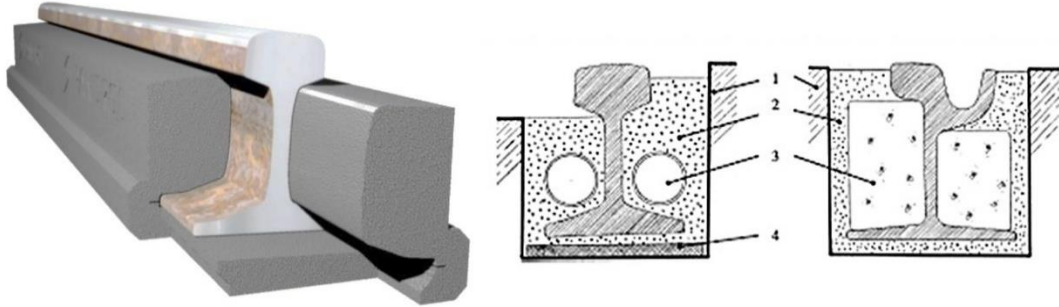
ÖBB rijit üstyapı sistemi Avusturya’da geliştirilmiş elastik yataklı ray taşıma plakası olarak bilinmektedir. Uzunluğu 5.16 m, genişliği 2.10-2.40 m arasında ve öngermesiz donatı bulunan bir prefabrik betonarme blok sistemidir. Bu sistemde 65 cm’de bir ray destek noktası teşkil edilir. Ray taşıma plakasının hatta sabitlenmesi boşluklardan en son beton dökümü ile sağlanır. Bu yapıdaki taşıyıcı blok sistem 1 ton ağırlığındadır. Şekil 3.9.’da ÖBB sistemine ait bir uygulama gösterilmiştir [12].



Şekil 3.9. ÖBB sistemine ait bir uygulama

Gömülü raylı rijit üstyapı tiplerinden Edilon Sedra (Infundo) sistemi Hollanda’da geliştirilmiştir. Raylar muhafazaya alınarak yanal kısımlardan özel karışımlarla

desteklenmektedir. Aynı zamanda raylar sürekli olarak tabandan hat boyunca mesnetlidir. Şekil 3.10.'da gömülü ray sistemine ait sıkılaştırılmış ray gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Gömülü ve sıkılaştırılmış ray sistemi

Şekil 3.10.'da yer alan elastik yatağa oturan gömülü ray sistemi kesitlerinde; 1 numara ile boyuna yönde girintiyi, 2 numara ile elastik malzemeyi, 3 numara ile elastik esaslı çubuk malzeme, 4 numara ile boşlukları dolduran malzeme gösterilmektedir.

Taşıyıcı betonuna sabitlenmiş ve bağlantı elemanları ile teşkil edilmiş gömülü ray sistemleri de günümüzde kullanılmaktadır. Şekil 3.11.'de bu tarz rijit üstyapılı gömülü ray uygulaması ve Şekil 3.12.'de bu uygulamanın işletmedeki hali gösterilmiştir.



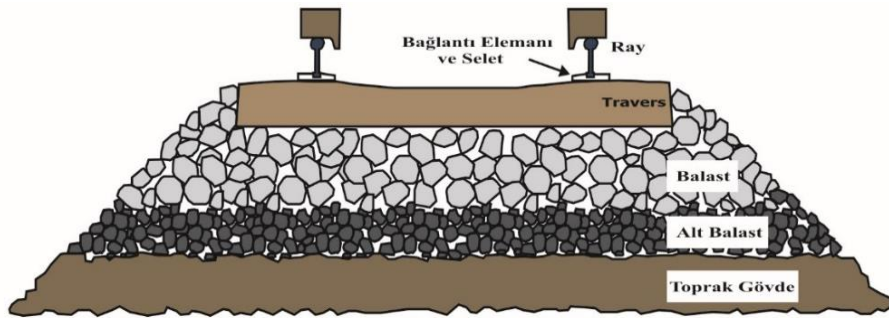
Şekil 3.11. Taşıyıcı betona mesnetli gömülü ray sisteminde beton döküm uygulaması



Şekil 3.12. Gömülü ray sisteminin işletmedeki hali

### 3.3. Demiryolu Üstyapısını Oluşturan Bileşenler

Geleneksel demiryolunda yer alan ve geniş bir uygulama alanına sahip olan balastlı demiryolunun hat bileşenleri iki gruba ayrılır. İlk grup üstyapı olarak tasarlanır ve raylardan, bağlantı malzemesinden, traverslerden ve balast tabakasından oluşur. İkinci grup altyapı olarak tasarlanır ve alt balast malzemesi ile toprak gövdeden oluşur. Demiryolu altyapısı daneli malzemeden oluşurken, balast tabakası hariç üstyapısının tamamı daneli olmayan bir yapıdadır. Bu tez çalışmasında sadece balastlı hattın üstyapı hesapları incelendiği için altyapı sistemine ve rijit üstyapı malzemelerine değinilmemiştir. Klasik demiryolu sistemini oluşturan bileşenler Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Klasik demiryolu üstyapısı ve elemanları

### 3.3.1. Raylar

Üzerinde demiryolu araçlarının yol ile temasını sağlayan, araçlardan gelen ağırlığı ve etkileri traverslere aktaran, kılavuz olarak döşenmiş ve kaliteli çelik malzemeden yapılmış üstyapı elemanına ray denir.

Raylar; aşınmaya karşı yeterli dayanımı sağlayacak kadar sert, ancak darbeler ve üzerine gelen yükler nedeniyle oluşabilecek şekil değişimleri nedeniyle hemen kırılmayacak kadar yumuşak bir çelikten imal edilirler.

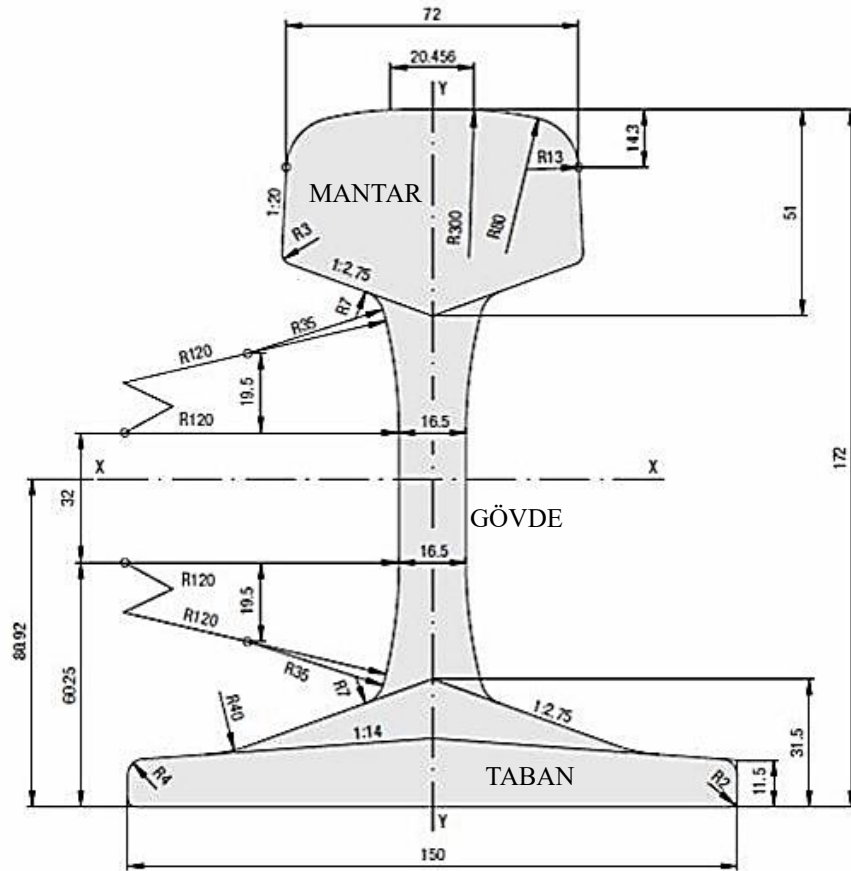
Modern çelik bir rayın tabanı düz olup en kesiti I-profilinden türetilmiştir. I-profilinin üst kenarları ray mantarını oluşturacak şekilde dönüştürülmüştür. İngiliz mühendis Charles Vignoles bu tasarımı 1830 yılında gerçekleştirmiştir. Avrupa'da çoğunlukla kullanılan ray profili (Vignoles profili) UIC60 rayıdır. UIC60 ismindeki 60 değeri metre başına rayın kg cinsinden ağırlığını belirtmektedir [3].

Raylar tren tekerleklerine düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlar ve tekerlek dizilerine hat boyunca kılavuzluk yaparlar. Raylar tren araçlarının düşey yüklerini taşıyarak onları traversler üzerine dağıtır. Aynı zamanda raylar, sinyalizasyon sistemi için bir elektrik iletkeni vazifesi de görürler.

Raylar; mantar, gövde ve taban olmak üzere üç bölümden oluşur. Bazı rayların ölçüleri Tablo 3.2.'de verilmiştir [18]. Şekil 3.14.'de ise UIC60 rayının kesiti gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Bazı raylara ait kesit ölçüleri

| Ray Cinsi (kg/m) | Taban Genişliği (mm) | Yüksekliği (mm) | Mantar Genişliği (mm) | Gövde Kalınlığı (mm) |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| 60.340           | 150                  | 172             | 72                    | 16.5                 |
| 49.050           | 125                  | 148             | 67                    | 14                   |
| 49.430           | 125                  | 149             | 67                    | 14                   |
| 46.303           | 134                  | 145             | 64                    | 15                   |
| 39.520           | 120                  | 138             | 62                    | 12                   |



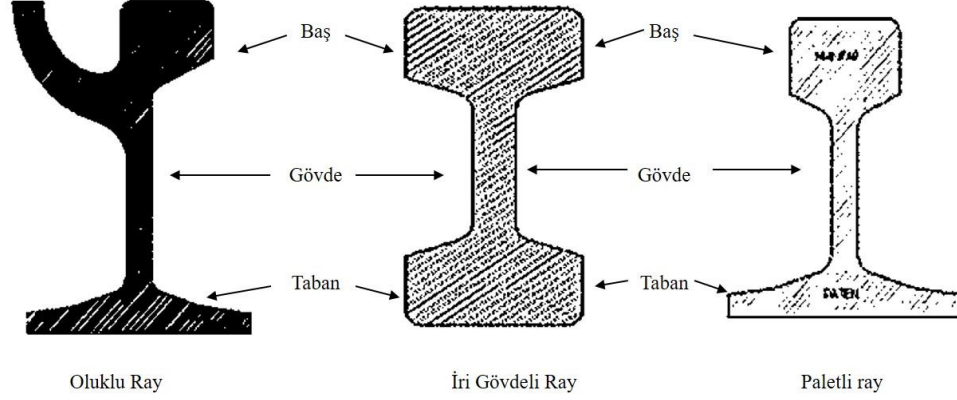
Şekil 3.14. UIC60 ray kesiti

Raylar, demiryollarında malzeme şekli bakımından üç sınıfa ayrılırlar.

1. Oluklu raylar,
2. İri gövdeli raylar,
3. Patenli raylar (Vignol raylar).

Oluklu raylar, en çok tramvay hatlarında yani eşdüzey yollar (lastik tekerlekli araç trafiği) ile kesişimlerde kullanılırlar. İri gövdeli raylar, simetrik bir şekildedir. İri gövdeli raylar bir alt ve bir üst mantardan oluşmaktadır. Üst mantarlar ile birlikte alt mantarların da aşınmasından dolayı günümüzde sadece Fransa'nın ikinci derece hatlarında kullanılmaktadır. Patenli raylar ise traverse bağlantısının geniş bir kısımdan meydana geldiği bir ray türüdür [1].

Aşağıdaki Şekil 3.15.'de malzeme şekillerine göre sınıflandırılan raylar ve bölümleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Malzeme şekillerine göre ray sınıfları

TSE 2400 standardında rayların sınıflandırılması, kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri belirtilmiştir. Raylar, TSE 2400 standardına göre normal raylar (R) ve aşınmaya dayanıklı raylar (ADR) olmak üzere dayanıklılık kabiliyetleri açısından iki sınıfa ayrılırlar. Aşağıdaki Tablo 3.3.'de TSE 2400 standardında yer alan ray sınıfları verilmiştir [18].

Tablo 3.3. TSE 2400 standardına göre ray sınıfları

| Normal Raylar (R) | Aşınmaya Dayanıklı Raylar (ADR) |
|-------------------|---------------------------------|
| 7 kg/m (R 7)      | 34 kg/m (ADR-34)                |
| 10 kg/m (R 10)    | 39 kg/m (ADR-39)                |
| 12 kg/m (R 12)    | 41 kg/m (ADR-41)                |
| 14 kg/m (R 14)    | 46 kg/m (ADR-46)                |
| 18 kg/m (R 18)    | 49 kg/m (ADR-49)                |
| 19 kg/m (R 19)    | 54 kg/m (ADR-54)                |
| 20 kg/m (R 20)    | 60 kg/m (ADR-60)                |
| 24 kg/m (R 24)    | 64 kg/m (ADR-64)                |
| 30 kg/m (R 30)    |                                 |
| 33 kg/m (R 33)    |                                 |

Raylar, ray ve travers altına konan seletlerle birlikte traverslere bağlanırlar. Raylar, traverslere bağlantı malzemesi ile tutturulur. Bağlantı malzemesinin rayla temas noktası olan gergi kısıkaçı (krapo) arasında elektrik yalıtımı sağlayan malzeme bulunur.

Günümüzde şehiriçi raylı sistem hatlarında ve şehirler arası demiryolu hatlarında kullanılan raylar, UIC Standartlarına ve EN 13674 standardına uygun, R260 kalitesinde olmalıdır [19].

Bazı rayların mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.4.'de verilmiştir.

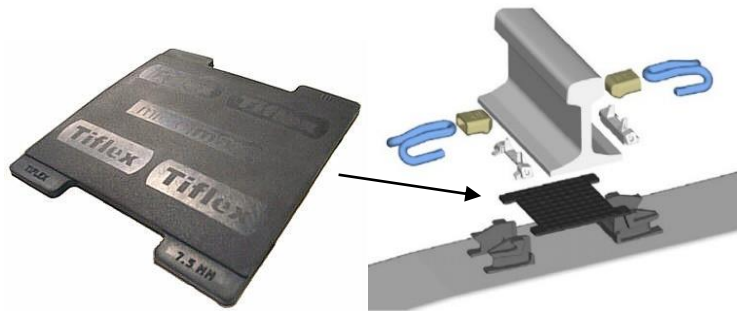
Tablo 3.4. Bazı raylara ait mekanik özellikler

| Özellikler                 | Birimi          | R 46  | S49   | UIC 60 | AREA 136 |
|----------------------------|-----------------|-------|-------|--------|----------|
| Ağırlığı                   | kg/m            | 46,30 | 49,43 | 60,34  | 67,56    |
| Enkesit Alanı              | mm <sup>2</sup> | 5906  | 6297  | 7687   | 8606     |
| Atalet Momenti             | cm <sup>4</sup> | 1588  | 1819  | 3055   | 3949     |
| Ağırlık Merkezi Yüksekliği | mm              | 67,20 | 73,70 | 80,90  | 85,01    |

25 tondan (250 kN) daha büyük üstyapı kuvvetlerine karşı hattın bir direnç sağlaması için; rayların yüksek mukavemetli, contasız ve tercihen ağırlığının 60 kg/m olması önerilmektedir [3].

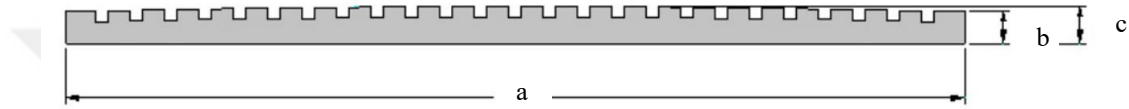
### 3.3.2. Seletler

Betonarme traversli bir demiryolu hattında seletler, çelik raylar ile traversler arasına konur. Seletler, traversleri aşınmadan ve darbeden kaynaklanan hasarlardan korur ve raylarda elektrik izolasyonu sağlar. Şekil 3.16.'da bir selet ve selet bağlantısı örneği yer almaktadır.



Şekil 3.16. Selet ve selet bağlantısı

Seletler; malzeme cinsine göre kauçuk ve çelik olmak üzere ikiye ayrılırken, sönüm özelliklerine göre de yumuşak ve rijit olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yumuşak seletler yüksek frekanslı titreşimleri sönümler. Yumuşak seletler yüksek frekanslı titreşimlerin traverslere ve daha alt tabakalara yani balast içine iletimini önler. Ancak, rijit seletler dingil yüklerini ve yüksek frekanslı yük titreşimlerini tekerlek altındaki traverslere doğrudan iletirler. Seletler, ray altı pedi olarak 12 metre boyutlarında rulo şekillerinde imal edilirler. Genişlikleri kullanılacak ray tipine göre belirlenir. Şekil 3.17.'de selet kesiti gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Selet kesiti

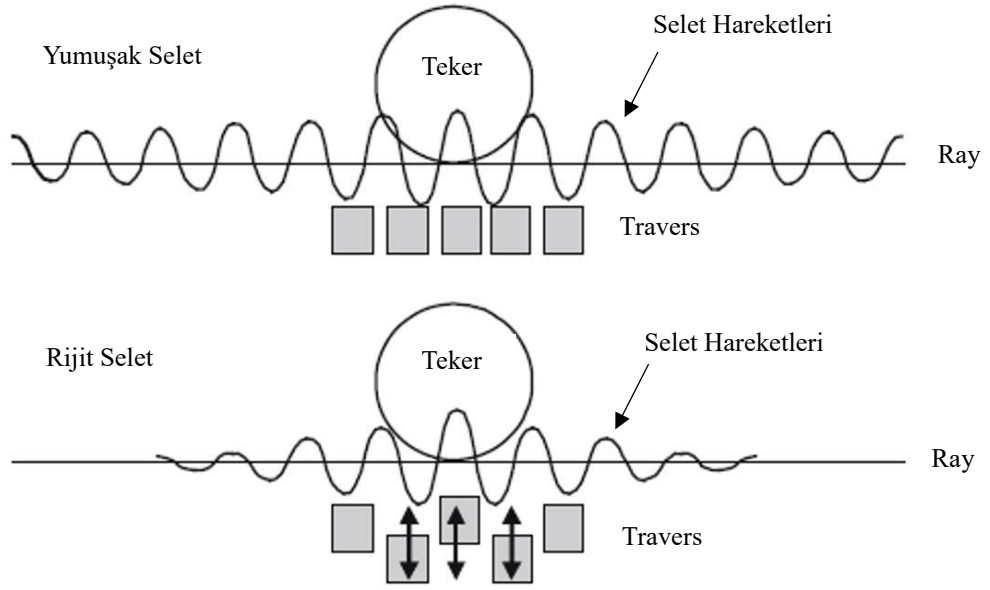
Şekil 3.17.'deki selet kesitinde gösterilen  $a$  genişliği ray taban genişliğine göre 80–315 mm arasındadır. Seletin ilk yüksekliği olan  $b$  mesafesi 6-7 mm arasında iken  $c$  yüksekliği 7-8 mm arasındadır.

Ray altında kullanılan bazı seletlerin mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.5.'de verilmiştir [14].

Tablo 3.5. Bazı seletlerin mekanik özellikleri

| Özellik          | Yumuşak elastik tabaka<br>(Fc584) | Normal elastik tabaka<br>(Fc9) | Sert elastik tabaka<br>(Fc846) |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Dinamik rijitlik | $970 \times 10^6$ N/m             | $1420 \times 10^6$ N/m         | $2990 \times 10^6$ N/m         |
| Sönüm katsayısı  | $32 \times 10^3$ Ns/m             | $34 \times 10^3$ Ns/m          | $29 \times 10^3$ Ns/m          |

Günümüzde kauçuk malzemeden yapılmış ve sönüm kabiliyeti yüksek seletler tercih edilmektedir. Seletler tüm hattın rijitliğini etkilerler. Hat bir tren yüküyle yüklendiği zaman yumuşak seletler rayların daha büyük sehim yapmalarına imkan verir ve tren dingil yükleri daha çok travers üzerine dağıtılır. Aşağıdaki Şekil 3.18.'de yumuşak ve rijit seletin ray ve traverslerdeki etkileşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Yumuşak ve rijit seletin ray ve travers üzerindeki etkileşimi

### 3.3.3. Traversler

Raydan gelen yükleri daha geniş bir yüzeye yayarak balasta ileten, hat açıklığını sabitleyen ve yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, rayın altına döşenmiş yol üstyapı malzemesine travers denir. Traversler, ray ile balast malzemeleri arasında belirli açıklıklarda konur. Konvansiyonel hatlarda travers eksenleri arasındaki bu açıklık mesafesi 62-63 cm olarak uygulanmaktadır. Hızlı tren hatlarında ise travers eksenleri arası mesafe 60 cm'dir. Hattın kurplu kesimlerinde 50 cm'ye kadar travers aralıkları düşürülebilir. Rijit üstyapılı hafif raylı sistem hatlarında travers eksenleri arası açıklık 75 cm'ye kadar çıkabilir.

Traversler raylara destek sağlar, hattın genişliğini ve yatay geometrisini korur. Traversler; yatay, düşey ve boyuna kuvvetleri raydan itibaren balast yatağına iletir. Traversler aynı zamanda iki ray arasında elektrik yalıtımı sağlarlar.

Raylı sistemlerde kullanılan traversler dörde ayrılır:

1. Ahşap traversler,
2. Çelik traversler,

3. Beton traversler,
4. Plastik traversler.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan traversler; ahşap traversler, çelik traversler ve beton traversler (tek bloklu ve ikiz bloklu) olmak üzere üç tanedir. Şekil 3.19.'da ahşap, çelik ve beton travers örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.19. (a) Ahşap travers, (b) Çelik travers, (c) Beton travers

Ahşap traversler; eski ana hatlarda, daha çok makaslarda ve çelik köprülerde kullanılmaktadır. Geri dönüşüm özelliği, iyi bir elastikiyet özelliğine sahip olması, kolay taşınması, elektriksel yalıtım özelliği ve her koşula uyarlanması önemli özelliklerindedir. Ahşap traversler genelde 254 mm genişliğe, 127 mm kalınlığa ve 2600 mm uzunluğa sahiptirler. Normal boydaki ahşap traverslerin ağırlığı 85 ila 110 kg, ortalama ömürleri ise 15 ila 30 yıl arasında değişmektedir.

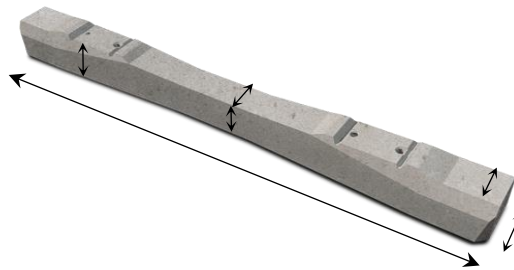
Çelik traversler; çelik malzeme ile yapılmış olan traverslerdir. Demir travers denilen bu traversler maliyetleri ve iklim şartlarına dayanıksız oldukları için tercih edilmemektedirler. Ancak, çelik traversleri koşulları uygun ülkeler kullanmaktadırlar. Sadece 68 kg kütleyle sahip olmaları kolay yerleştirilmelerini sağlamaktadır. Ancak balast tabakası ile tam olarak etkileşim sağlanamamaktadır.

Beton traversler; yüksek kaliteli beton içerisine yerleştirilmiş bulunan çelik çubukların gerdirilmesi yoluyla elde edilen traverslerdir. Diğer traverslere göre ağırlıkları fazla olup yüksek hıza ve dingil basıncına uygun olduğu için raylı sistemlerde kullanımı yaygındır. Çelik köprüler haricinde bütün hatlarda kullanılır. Ayrıca üretimi kolay ve maliyeti düşüktür. Beton traverse esneklik kazandırmak amacıyla ray tabanının altına

isabet eden bölgede plastik seletler veya daha kalın lastikten mamul pedler kullanılmaktadır. Beton traverslerin en önemli avantajlarından birisi, üzerine gelen yük kalktıktan sonra durumunu korumasıdır. Yani traverslerde, çekme gerilmelerinden dolayı çatlaklar oluşmamakta ve donatıya zarar verecek su girişi gerçekleşmemektedir.

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarının (TCDD) 2012-2016 yılları arasındaki istatistiğine bakıldığında; çelik traverslerin %0.8 oranında, ahşap traverslerin %4.3 oranında, beton traverslerin ise %94.9 oranında ülkemizde kullanıldığı görülmektedir [15]. Bu oranlara bakıldığında beton travers kullanımının vazgeçilmez olduğu aşikardır. Beton traversler tek bloklu (yekpare) ve ikiz bloklu olmak üzere iki türdedir. Günümüzde balastlı demiryolu hatları genellikle tek bloklu betonarme traversler kullanılmakta iken bazı demiryollarında ikiz bloklu betonarme traversler de kullanılmaktadır. Tek bloklu beton traversler genelde 2515 mm uzunluğunda, 264 mm genişliğinde, ray altında 203 mm, merkezde ise 165 mm kalınlığındadır. Toplam kütlesi yaklaşık 285 kg'dır. En önemli dezavantajı ağırlıklarıdır.

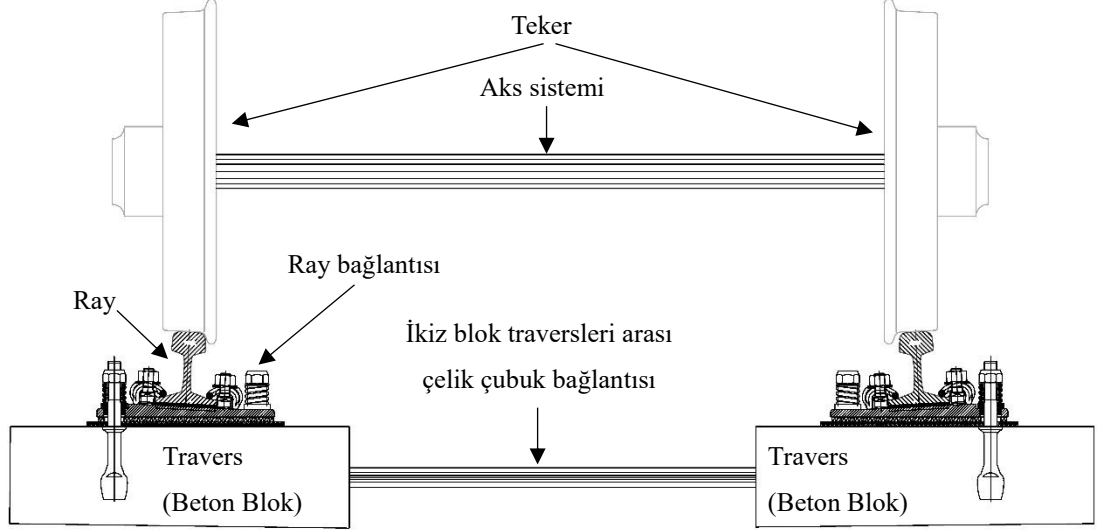
Tek bloklu beton traversler ön germeli ve art germeli olarak iki şekilde üretilmektedir. Ön germeli traverslerde 320 kN germe kuvveti ve art germeli traverslerde 325 kN germe kuvveti uygulanarak, rayın mesnet alanında oturan traverseste 260 kN germe kuvveti sağlanır [14]. Şekil 3.20.'de tek bloklu beton travers örneği yer almaktadır.



Şekil 3.20. Tek bloklu beton travers

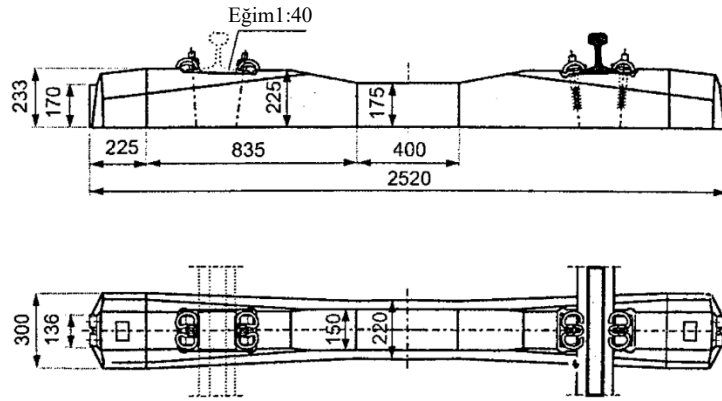
İkiz blok traversler iki adet beton ve bu blokları birleştiren bir çelik çubuktan oluşur. İkiz blok travers tek blok traverse göre kütlesi daha az olup yaklaşık 130 kg'dır.

Özellikle balastsız üstyapılarda hem yerüstü hem yeraltı raylı sistem hatlarında kullanılmaktadır. Şekil 3.21.'de ikiz bloklı beton travers kesiti yer almaktadır.

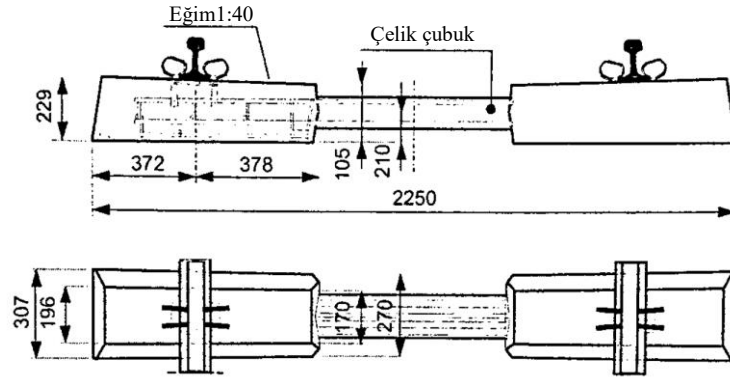


Şekil 3.21. İkiz bloklı beton travers kesiti

Şekil 3.22.'de yekpare beton travers, Şekil 3.23.'de ikiz blok beton travers tip ölçütleri gösterilmiştir [6].



Şekil 3.22. Yekpare beton travers tip ölçütleri



Şekil 3.23. İkiz blok beton travers tip ölçütleri

Plastik traversler; balastlı ve balastsız demiryollarının tünel kesimlerinde, metroların açık hatlarında, köprü ve viyadüklerde çelik yuva içinde doğrudan kullanılır. Plastik traversler gürültüyü azaltır ve en iyi elektrik ızalasyon malzemesi olup çok hafiftir. Şekil 3.24.'de plastik travers uygulaması gösterilmiştir [16].



Şekil 3.24. Plastik travers uygulaması

Günümüzde tek blok olarak bilinen B.55K, B.58, B.70W, B.75 ve B.90 gibi bazı yekpare beton traversler dünya genelindeki demiryolu hatlarında kullanılmaktadırlar. Ülkemizdeki konvansiyonel hatlarda B58 tipi, yüksek hızlı demiryolu hatlarında ise B70 tipi yekpare beton travers kullanılmaktadır [17]. Bazı yekpare beton traverslerin teknik bilgileri Tablo 3.6.'da verilmiştir [15].

Tablo 3.6. Bazı yekpare beton travers teknik bilgileri

| Ölçüler   | B 70  | B 58  | B 55 <sup>1</sup> |
|---|-------|-------|-------------------|
| Uzunluk (cm)                                    | 260   | 240   | 230               |
| Orta Alt Genişlik (cm)                          | 22    | 22    | 22                |
| Uç Alt Genişlik (cm)                            | 30    | 30    | 30                |
| Orta Yükseklik (cm)                             | 17,5  | 17,5  | 17,5              |
| Uç Yükseklik (cm)                               | 20    | 20    | 20                |
| Ağırlık (Seletli) (kg)                          | 300   | 252   | 242               |
| Çimento Dozajı (kg)                             | 500   | 450   | --                |
| 28 Günlük Ortalama Küp Basınç Dayanımları (MPa) | 75    | 65    | --                |
| Ömür (yıl)                                      | 20-30 | 20-30 | 20-30             |

<sup>1</sup> B55 tipi travers günümüzde pek tercih edilmemektedir.

Ülkemizde uygulanan beton traversler için aşağıdaki Tablo 3.7.'de bazı standartlar yer almaktadır [20].

Tablo 3.7. Beton travers standartları

| Standart       | Açıklama  |
|----------------|---|
| TS EN 13230-1: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Beton Traversler ve Mesnetler - Bölüm 1: Genel Kurallar  |
| TS EN 13230-2: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Beton Traversler ve Mesnetler - Bölüm 2: Ön gerilmeli Yekpare Traversler                               |
| TS EN 13230-3: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Beton Traversler ve Mesnetler - Bölüm 3: Takviyelendirilmiş İkiz Traversler                            |
| TS EN 13230-4: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Beton Traversler ve Mesnetler - Bölüm 4: Makaslar ve Kesişen Demiryolları İçin Ön gerilmeli Traversler |

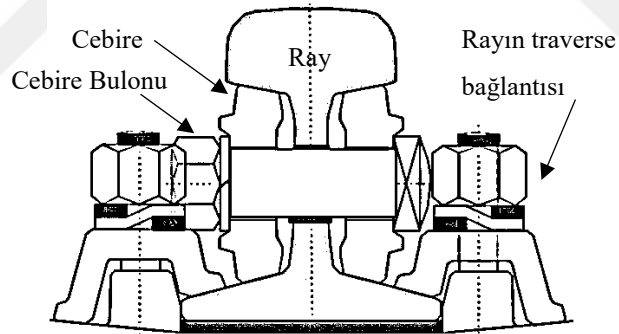
### 3.3.4. Bağlantı malzemeleri

Demiryolunun döşenmesi sırasında rayların istenen konumda tutulması istendiği için rayların birbirine ve traverse bağlanması gerekir. Çünkü raylar 12, 18, 24 ve 36 metrelik uzunluklarda imal edilirler. Traversler belli aralıklarla (60-63 cm arası) balast tabakası üzerine konur ve bu traversler üzerine raylar serilerek Şekil 3.25.'de görüldüğü üzere contalı (CR) veya kaynaklı (UKR) olmak üzere iki şekilde bağlantıları gerçekleştirilir. Demiryolu hattının sabit bir kılavuz görevi görebilmesi için rayın raya ve rayın da traverse bağlanması gerekmektedir.

Contalı ray (CR) bağlantısında cebire demiri, cebire bulonu ve rondela malzemeleri kullanılmaktadır. Kaynaklı raylar, uzun kaynaklı raylar (UKR) olarak isimlendirilir ve ray kaynağı çeşidi olan yakma alın kaynağı ya da alüminotermite kaynak yapılarak raylar birbirlerine bağlanırlar. Rayların kırılmasını önlemek ve conta bakım masraflarını azaltmak amacıyla kaynaklı ray bağlantısı günümüzde tercih edilmektedir. Şekil 3.25.'de rayın raya bağlantısı, Şekil 3.26.'da ise contalı ray bağlantı kesiti gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Rayın raya bağlantısı



Şekil 3.26. Cebire demiri kullanılan ray bağlantı kesiti

Travers türlerine (ahşap, çelik, beton) göre rayın traverse bağlantısı için birçok bağlantı türü vardır. Rayı traverse bağlayan yarı elastik bağlantı sistemi olarak K (KPO klips) tipi bağlantı sistemi TCDD hatlarında çok sık kullanılmaktadır [14]. K tipi bağlantı malzemeleri; çelik selet, tirfon, krapo, krapo blonu ve rondeladır. Elastik bağlantı sistemi olarak Almanya'da Herbert Meir ve ekibi tarafından geliştirilen Herbert Meir (HM) tipi bağlantı sistemi günümüzde farklı tipleri ile kullanılmaktadır [14]. Pandrol, Nabla, Vossloh, Fastclip, Deenik gibi rayın traverse elastik olarak bağlandığı sistemler vardır [2]. Gerek şehiriçi raylı sistem hatlarında, gerekse yüksek

hızlı demiryolu hatlarında kullanılan elastik bağlantılardan İngiliz tipi Fastclip bağlantısı ve Avusturya tipi Vossloh bağlantısı Şekil 3.27.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Rayın traverse bağlantısı

Plastik endüstrisindeki gelişmeler ve yapılan testler sonucu yeni bir bağlantı sistemi geliştirilmiştir. Bu plastik bağlantı sistemi elastik yataklı ray sistemi olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.28.'de plastik bağlantı uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Elastik yataklı ray bağlantı sistemi uygulaması

Rayın traverse bağlantısı için kullanılacak malzemeler, Tablo 3.8.'de yer alan standartlara uygun olarak belirlenmelidir [21].

Tablo 3.8. Bağlantı malzemeleri standartları

| Standart       | Açıklama  |
|----------------|---|
| TS EN 13481-1: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Bağlantı Sistemleri İçin Performans Özellikleri - Bölüm 1: Tarifler                                |
| TS EN 13481-2: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Bağlantı Sistemleri İçin Performans Özellikleri Bölüm 2: Beton Traversler İçin Bağlantı Sistemleri |
| TS EN 13481-3: | Demiryolu Uygulamaları - Demiryolu - Bağlantı Sistemleri İçin Performans Özellikleri Bölüm 3: Ahşap Traversler İçin Bağlantı Sistemleri |

### 3.3.5. Balast

Demiryolu platformu (balast sermeye elverişli altyapı durumu) üzerine döşenen, belirli aralıklarla yerleştirilen traverslerin boş kısımlarını dolduran ve traverslerin tabanına yataklık eden, traverslerden gelen yükleri yayarak bir alt katmana (zemine veya duruma göre alt balasta) aktaran, demiryolu araçlarından gelen gürültüleri sönmleyen, kırılmış, köşeli ve iyi sertliği olan taşlara balast denir.

Balast malzemesi olarak granit, kireç taşı, curuf veya diğer kırma taşlar iyi balast malzemesi olarak dikkate alınır. Balast taşı olarak granit ve bazalt en yaygın olarak kullanılanlardır.

Yapısal açıdan balast; iyi bir elastikiyet yapısında olmalı, gürültüyü sönmlemeli, iyi bir drenaj kapasitesine sahip olmalıdır. Danelerin boyutu 15-63 mm arasında, 30-60 mm çapında ve balast taşlarının birbirleriyle bağlantıları iyi olmalıdır. Demiryolu en kesiti göz önüne alındığında balast malzemesinin tabaka kalınlığı, üzerindeki traverse ve araçlardan gelen yüke göre 30-50 cm arasında değişmektedir. Şekil 3.29.'da balast malzemesi için bazı kayaç örnekleri yer almaktadır.



Şekil 3.29. Balast malzemesi olarak çeşitli kayaç örnekleri

Balastın demiryolu yapısındaki önemli görevleri aşağıda açıklanmıştır:

- Traversten gelen araç yüklerini demiryolu platformu üzerinde daha geniş alana eşit olarak yayar ve gürültüyü önler.
- Traverslere elastik yataklık görevi görür.
- Yolun esnekliğini sağlar.
- Yolu ekseninde tutar.
- Yağmur sularını süzerek, doğal drenaj görevi görür.
- Altyapıyı dondan korur.

Demiryolu balastı için dane büyüklüğü üst sınır değeri 50-63 mm, alt sınır değeri 31,5 mm'dir. TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak belirlenen demiryolu balastı dane sınıfları ilgili kategoriye göre belirlenmelidir [22]. Tablo 3.9.'da TS EN 13450'ye göre balast dane sınıfları verilmiştir [23].

Tablo 3.9. Balast dane sınıfı kategorileri

| Elek göz<br>açıklığı<br>(mm) | Demiryolu balastı dane büyüklüğü<br>(31.5 mm – 50 mm) |        |        | Demiryolu balastı dane büyüklüğü<br>(31.5 mm – 63 mm) |       |       |
|------------------------------|---|--------|--------|---|-------|-------|
|                              | Elekten geçen kütlece yüzde                           |        |        |   |       |       |
|                              | Dane sınıfı kategorisi                                |        |        |   |       |       |
|                              | A   | B      | C      | D   | E     | F     |
| 80                           | 100   | 100    | 100    | 100   | 100   | 100   |
| 63                           | 100   | 97-100 | 95-100 | 97-99   | 95-99 | 93-99 |
| 50                           | 70-99   | 70-99  | 70-99  | 65-99   | 55-99 | 45-99 |
| 40                           | 30-65   | 30-70  | 25-75  | 30-65   | 25-75 | 15-40 |
| 31.5                         | 1-25  | 1-25   | 1-25   | 1-25  | 1-25  | 0-7   |
| 22.4                         | 0-3   | 0-3    | 0-3    | 0-3   | 0-3   | 0-7   |
| 31.5-50                      | ≥ 50  | ≥ 50   | ≥ 50   | -   | -     | -     |
| 31.5-63                      | -   | -      | -      | ≥ 50  | ≥ 50  | ≥ 85  |

Balastlara ait granülometrik özellikler aşağıdaki Tablo 3.10.'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Balast granülometrik özellikleri

| Elek Delik Çapı |       | Elekten Geçen Malzeme Miktarı (% olarak) |
|-----------------|-------|--|
| (inç)           | (mm)  |  |
| 3"              | 76,2  | 100                                      |
| 2 ½ "           | 63,5  | 90-100                                   |
| 1 ½ "           | 38,10 | 20-55                                    |
| ¾ "             | 19,05 | 0-15                                     |
| ½ "             | 12,70 | 0-5                                      |
| No: 200 elek    |       | 0-1                                      |

### 3.3.6. Alt balast

Balast tabakası ile zemin arasında bir geçiş tabakası olarak alt balast malzemesi tercih edilir. Genellikle alt balast tabakası yüksek hızlı demiryolu inşaatlarında tercih edilmektedir.

Demiryolu yapısının oturacağı zeminin iyi olmasına göre dane boyutu 0.05-20 mm arasında olan kum-agrega karışımı gibi malzemeler kullanılabilir. Zeminin iyileştirilmesi gibi durumlarda jeosentetikler veya çimento/kireç karışımı gibi malzemeler de kullanılabilir. Alt balast tabakası, yapım farklılıklarından ve tekrarlanan yüklerden kaynaklanan çökmeleri engellemek amacıyla en az 15 cm kalınlığına sahip olmalıdır.

Alt balast tabakası; trenlerden kaynaklı yüklerin daha geniş bir yüzeye yayılmasına imkan vermek aynı zamanda drenaj kalitesini artırarak soğuktan ve don etkisinden dolayı hat yapısının farklılaşmasını önlemek, temel altındaki malzemenin balast tabakasına karışmasını engellemek amacıyla tasarlanırlar [22].

Balast ve zemin arasında oluşturulan alt balast tabakanın özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- a. Demiryolunun taşıma kapasitesini arttırmak,
- b. Demiryolu araçlarından gelen yüklerin altyapıya daha iyi dağılımını sağlamak,
- c. Yol yatağının dinamik yükler altındaki çalışmasına katkıda bulunmak,
- d. Balast ve altyapı arasında filtre görevi yapmak,
- e. Demiryolunu erozyona ve dona karşı korumak,
- f. Balast tabakası gibi suları uzaklaştırmak.

### 3.3.7. Toprak gövde

Toprak gövde, demiryolu hattının yatağı için hazırlanan ve üzerine demiryolu elemanlarının inşa edilebileceği durumdaki düzleştirilmiş bir zemin veya kaya

yüzevidir. Rayların tam bir kılavuz görevi görebilmesi için toprak gövde üzerine bazen ek bir altyapı tabakası konur. Alt balast ve balast tabakası bu altyapı tabakası üzerine serilir.

Toprak gövde malzemesinde kullanılan toprak elastik veya plastik davranışa sahip olabilir. Toprakta elastik deformasyonu (elastik oturma) demiryolu araçlarının meydana getirdiği trafik yükleri oluşturur. Toprak gövdeye etki eden yük ortadan kalktıktan sonra toprak gövde ilk durumuna geri döner. Toprak gövdedeki bu değişimden dolayı ray ve travers elemanlarında zorlanmalar meydana gelir. Bu sebeple, ray ve travers elemanlarındaki gerilmeleri düşürmek ve balast tabakasının kalınlığını azaltmak için belirli sınırlar içinde toprak gövdeyi oluşturmak gereklidir. Böylelikle, demiryolu yapısında uygun elastik deformasyon koşulları sağlanabilir.

Taşıt, yol ve toprak işleri üçlününün doğru ve dinamik bir şekilde işlemesi ve özellikle ray ile tekerleğin sürtünmesini en aza indirilmesi, demiryolu inşaatının en başında yapılan toprak işlerinin performansına bağlıdır [24].

## **BÖLÜM 4. DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARI**

Demiryolu üstyapı hesapları için yıllar süren çalışmalar ve tecrübeler ile ortaya çıkan ve literatürde yer alan Winkler Yöntemi, günümüzde halen en kullanışlı hesap yöntemi olarak bilinmektedir. Sonlu elemanlar yöntemleriyle de Winkler Yöntemi rahatlıkla kurulabilmektedir.

Tezin bu bölümünde balastlı demiryolu üstyapısına gelen yükler bahsedilecek ve bu yüklerin zemine aktarımı anlatılacaktır. Ayrıca, üstyapının zorlanmasına yönelik çalışmalara değinilecektir. Winkler'in geliştirdiği model üzerinde durulacak ve yatak katsayısı kavramı tanımlanacaktır. Elastik yatağa (balast tabakası) oturan bir kirişin diferansiyel denklemi çıkarılacaktır.

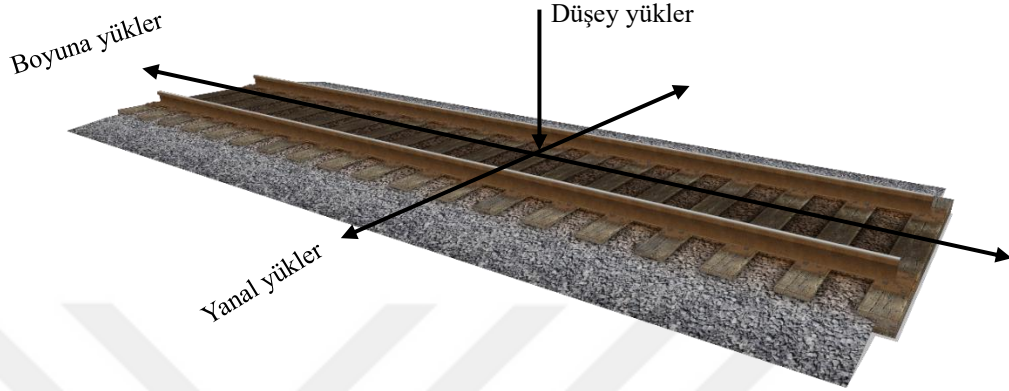
Ayrıca, demiryolu üstyapı hesaplarının analitik çözümlerinde kullanılması için statik hesaba katılabilen ve dinamik hesabın pratik çözümünü veren dinamik etki katsayısı da bahsedilecektir.

### **4.1. Demiryolu Üstyapısına Gelen Kuvvetler**

Demiryolu üstyapısının gerilme davranışına geçilmeden önce, yol yapısına etki eden demiryolunu zorlayıcı etkilerden bahsetmek gerekir. Demiryolu araçlarından hatta gelen yükler yönlerine bağlı olarak üç gruba ayrılırlar. Bu yükler; düşey, yanal ve boyuna yöndeki zorlayıcı kuvvetlerdir.

Taşıt-yol etkileşimine, seyir koşullarına, yol yapısının özelliklerine, taşıt özelliklerine sıcaklık gibi çevresel faktörlere vb. bağlı olarak ortaya çıkan ve demiryolu yapısını zorlayan türde de kuvvetler bulunmaktadır [25].

Demiryolunun üstyapı hesaplarındaki izlenen yöntem; araçların ağırlığından, sarsılmasından, hızlanma veya yavaşlamasından meydana gelen hareketlerin düşey, yanal ve boyuna yöndeki etkilerini ayrı ayrı incelemektir. Şekil 4.1.'de yol yapısına gelen etkiler gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yol yapısına gelen etkiler

Yanal yükler; kurplu kesimlerde tren hareketine bağlı olarak merkezkaç kuvvetinden, düz hatlarda ise ray-teker arasındaki konikliğe bağlı olarak tekerlerin merkez konumunun yatay olarak yer değişmesinden doğan (Klingel hareketi) ve raya temas eden rüzgar etkilerinden meydana gelen kuvvetlerdir. Boyuna yükler; demiryolu aracının hareketi esnasında frenaj ve demerajdan kaynaklanan ve termal etkilerin oluşturduğu ray genişlemelerinin meydana geldiği kuvvetlerdir. Düşey yükler; demiryolu araçlarının dingil yüklerinden dolayı meydana gelen statik ve dinamik yüklerdir. Demiryolu hattının üstyapısında araç geçişleri esnasında ray-travers-balast-zemin etkileşimli dinamik zorlanmalara maruz kalırken, tekerlek yükü altında da statik gerilmelere neden olur. Demiryolu üstyapı elemanları düşey yüklere göre boyutlandırılır.

Demiryolu üstyapı hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından statik analizlerde yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmektedir. Bu tez çalışmasında yer alan statik analizlerde de, yanal ve boyuna yöndeki kuvvetler ihmal edilmiştir. Düşey yöndeki dingil yüklerinden meydana gelen kuvvetlerin, üstyapıda bir noktaya etki ettiği durum dikkate alınmış ve bu nokta altında oluşan üstyapının çökmesi ve momenti gibi zorlanmaları hesaplanmıştır.

## 4.2. Demiryolu Üstyapısında Yükler ve Yük Aktarım Prensibi

Günümüzde tipik aks yükleri yüksek hızlı trenlerde 20 ton, karışık hatlarda 22.5 ton ve ağır yük hatlarında 36 ton dolayındadır [14]. Ray ve travers ağırlıklarına göre üstyapının dayanabileceği aks yükleri, Uluslararası Demiryolu Birliğince (UIC) aks başına düşen yükler olarak dört sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflar sırası ile şöyledir; A sınıfı 16 ton, B sınıfı 18 ton, C sınıfı 20 ton, D sınıfı 22.5 ton [2].

Demiryolu araçlarından zemine aktarılan yükler öncelikle araç yapısından başlayarak teker aksamının çalıştığı ve boji sistemi denilen aksların yer aldığı kısma iletilir. Bir klasik boji sisteminde yanyana iki ve karşılıklı olmak üzere toplamda dört adet teker bulunur. Aks başına iki teker yükü gelir. Her teker temas noktasından yükleri raylara iletirler. Raylar, kılavuz olarak görev aldığı demiryolu sisteminde, araçlardan gelen yükleri tekerlerden kendilerine alırlar. Demiryolu sisteminde mesnet noktalarını oluşturan traversler, raylara gelen yükleri yayar ve bir alt kısma yani balast tabakasına yükleri aktarır. Balast tabakasında, üzerine gelen yükleri sönümleyerek bir altındaki tabaka olan toprak gövdeye aktarır.

## 4.3. Demiryolu Üstyapısına Gelen Kuvvetler Üzerine Çalışmalar

Demiryolunun ilk yıllarında değişik yol tipleri, yani farklı ray kesitleri, bağlantı elemanları, travers türleri ve yol çerçevesinin üzerine oturacağı değişik yatak tipleri yoktu. Dolayısıyla, en uygun seçeneği bulmayı amaçlayan özgün modellere ve hesap yöntemlerine gerek görülüyordu. Demiryolu ağlarının yaygınlaşmasıyla, değişik yol tipleri kullanıldı. Raylar kırıldıkça, balast tabakasında aşırı zorlanma sonucu çökmeler oluştuğunda, güvenilir hesap yöntemlerine gereksinim duyulmaya başlandı.

Demiryollarında statik yükler altında meydana gelen iç kuvvetlerin hesaplanabilmesine yönelik ilk çalışma 1867 yılında Emil Winkler tarafından yapılan "Boyuna yönde balastlı demiryolu hesabı için elastik yataklı kiriş modeli" çalışmasıdır. Günümüzde halen Winkler adıyla kullanılmakta olan bu model, statik hesaplamaların kolaylığı bakımından hep tercih edilmiştir. 1888 yılında Zimmermann

deneysel çalışmalar yaparak Winkler teorisini kanıtlamıştır [25]. Winkler modelinin temelinde birbirine çok yakın ve birbirinden bağımsız yaylardan oluşan bir yatak kabulü vardır.

Winkler hipotezi ile oluşturulan elastik zemine oturan sürekli kiriş modeli Zimmermann tarafından geliştirilerek, taban karakteristiklerinin sabit olduğu varsayımıyla demiryolu çerçevesi elastik tabana oturan sürekli kiriş şeklinde düşünülmüş ve yoldaki statik zorlanmalar hesaplanmıştır.

Winkler Modeli'nin ayırık mesnetli, diğer bir deyişle enine traversli demiryoluna uygulanması için ise yaklaşık 40 yıl geçmiştir. Zimmermann 1888 yılında enine traversli yoldaki eğilme momentlerini ve travers altında oluşan balast gerilmelerini Winkler Modeli ile hesaplamışsa da, enine traversli yolun sürekli mesnetlenmiş kiriş modeli ile hesaplanabileceğini ilk kez Timoshenko kanıtlamıştır [25].

Demiryolu üstyapısının statik ve dinamik stabilitesi ile ilgili problemleri anlamak ve çözmek amacıyla matematik model uygulamalarına yönelik araştırmaların sıklıkla kullanıldığı yukarıdaki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Demiryolu üstyapısının matematik modellerinin kurulması ve nümerik çözüm yöntemi ile hesaplarının yapılması sonlu eleman mantığı ile çalışan bilgisayar yazılımlarıyla günümüzde kolaylıkla sağlanabilmektedir.

#### **4.4. Winkler Yarı Uzayı ve Yatak Katsayısı**

Konvansiyonel hatta demiryolu, temelde boyuna iki sürekli ray elemanından oluşur. Raylar, sabit aralıklarla ray tabanından desteklenen traverslere mesnetlenir ve deforme edilemeyen bir ortam ile yan taraflardan sabitlenmiş balast yatağı üzerine oturur. Balast yatağı da aynı zamanda deforme olmayan elastik bir yapıdadır. Temel hesaplamalarda genellikle Winkler hipotezinin geçerli olduğu öngörülmüştür. Bu hipotez 1867 yılında Eşitlik 4.1'deki haliyle formüle edilmiştir. Bu formüle göre her bir destek noktasında basınç dayanımı yerel sıkıştırma ile orantılıdır [6].

$$\sigma_s = k_s \cdot y \quad (4.1)$$

Burada;  $\sigma_s$  taban basıncını,  $y$  çökmeyi,  $k_s$  yatak katsayısını ifade etmektedir.

Elastik alan temellerindeki gerilmeler ve kesit kuvvetlerinin bulunmasında yatak katsayısı metodu kullanılır. Yatak katsayısı metodu, ilk olarak 1867 yılında Winkler'in yarı uzayındaki elastik zemin modeli ile formüle edilmiştir.

Eşitlik 4.1'de gösterildiği gibi herhangi bir yük etkisindeki elastik bir kirişin elastik bir yatak üzerinde bulunduğu ve yükün altında oluşan  $\sigma_s$  taban basıncının aynı noktadaki  $y$  çökmesi ile orantılı olduğu varsayılmıştır. Aynı zamanda yük altındaki noktadan belirli bir mesafedeki taban basıncı, yine o mesafedeki çökme değeri ile orantılıdır.

Burada komşu taban basınçlarının etkisi göz önüne alınmadığı için, bu durum yatak katsayısı metodunun en büyük eksikliği olarak bilinmektedir. Eşitlik 4.1 ile tanımlanan basitleştirilmiş zemin modeli Winkler yarı uzayı olarak bilinir [26].

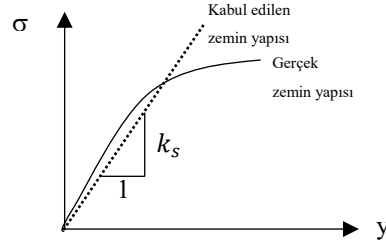
#### 4.4.1. Yatak katsayısı kavramı

Yatak katsayısı  $k_s$  kavramını ilk olarak 1888 yılında Zimmermann tarafından kullanılmıştır. Zimmermann da Winkler gibi demiryolu rayını sürekli elastik mesnetlenmiş kiriş olarak esas almıştır. Zimmermann, bir traversin yüzey yükü ile yatağın çökmesi arasında daima bir orantı bulunduğunu saptamıştır. Travers yükü ile çökmeler arasındaki  $k_s$  sabit oranına Zimmermann yatak katsayısı adını vermiştir. Yatak katsayısı  $k_s$ , temel tabanı üzerinde belirli bir noktadaki  $\sigma_s$  taban basıncının aynı nokta altındaki  $y$  oturmasına oranı olarak tanımlanır:

$$k_s = \frac{\sigma_s}{y} \quad (4.2)$$

Günümüzde plaka basınç deneyleri yapılarak geoteknik alanda yatak katsayısı belirlenmektedir. Gerçek zemin yapısının doğrusal olarak kabul edildiği bir ortamda,

gerilme ( $\sigma$ ) – yer değiştirme ( $y$ ) eğrisinin doğrusalına ait eğimi yatak katsayısını verir. Yatak katsayısının ifadesi Şekil 4.2.’de gösterilmiştir [27].



Şekil 4.2. Gerilme ( $\sigma$ ) – yer değiştirme ( $y$ ) eğrisi

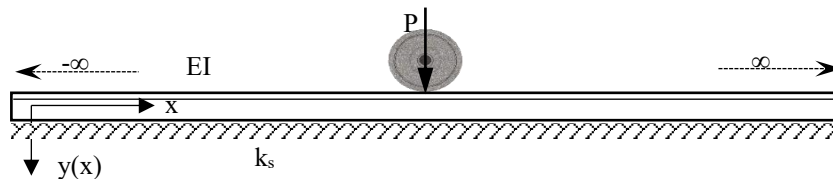
Yatak katsayısı, zeminin tabakalı yapısına ve alan temelinin taban kesitlerine göre değişen oturma ölçüsünün bir fonksiyonudur. Bu sebeple, yatak katsayısı asla zeminin bir sabiti değildir. Bowles tarafından verilen zemin türleri için yatak katsayısı değerleri Tablo 4.1.’de gösterilmiştir [28].

Tablo 4.1. Çeşitli zeminler için yatak katsayısı değerleri

| Zemin Cinsi              | $k_s$ (kN/cm <sup>3</sup> ) | Zemin Cinsi              | $k_s$ (kN/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Gevşek kum               | 4800-16000                  | Killi zeminler:          |                             |
| Orta sıklıkta kum        | 9600-80000                  | $q_a \leq 200$ kPa       | 12000-24000                 |
| Sıkı kum                 | 64000-128000                | $200 < q_a \leq 800$ kPa | 24000-48000                 |
| Killi orta sıklıkta kum  | 32000-80000                 | $q_a > 800$ kPa          | >48000                      |
| Siltli orta sıklıkta kum | 24000-48000                 |                          |                             |

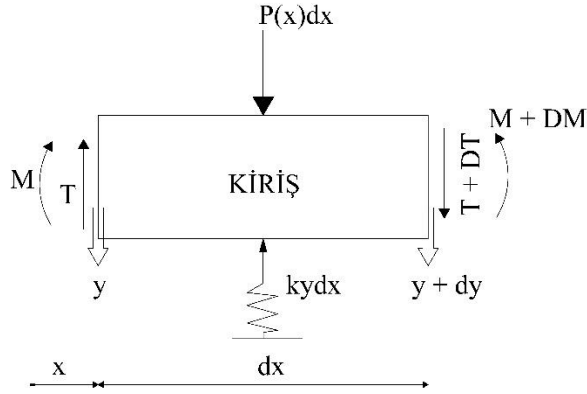
#### 4.5. Elastik Zemine Oturan Kiriş Modelinde Diferansiyel Denklemiin özümü

Elastik zemin katsayısı  $k_s$  olan, Şekil 4.3.’e göre tam merkezden bir tekerlek yükü ( $P$ ) ile yüklenen, elastik bir temel tarafından sürekli olarak desteklenen (Winkler yarı uzay sistemi) ve eğilme rijitliği  $EI$  olan sonsuz uzunlukta ve  $b$  genişliğinde bir kiriş düşünelim [6]. Tekil yük altındaki sonsuz yataklı kirişin diferansiyel denkleminin elde edilişi Şekil 4.4.’de birim uzunluktaki hali ile temsil edilmektedir [6].



Şekil 4.3. Elastik temel model üzerinde sonsuz kiriş

Şekil 4.3.'de P tekerlek yükü (kN), EI eğilme rijitliği (kNcm<sup>2</sup>), k<sub>s</sub> yatak katsayısı (N/cm<sup>3</sup>), y(x) x metre uzaklıktaki ray çökmesi (cm).



Şekil 4.4. Kiriş eleman modeli

Kirişin çökme  $y(x)$  ve moment  $M(x)$  denklemini oluşturmak için önce Şekil 4.4.'de gösterilen kiriş eleman modelinin denge koşullarını yazarız.

$$P dx + \frac{dT}{dx} dx = ky dx \quad (4.3)$$

$$T dx = \frac{dM}{dx} dx \quad (4.4)$$

Winkler yarı uzayı üzerine oturduğu kabul edilen b genişliğinde elastik bir sonsuz uzunluktaki kirişin, bir yük altındaki eğilme eğrisinin diferansiyel denklemi ile eğilme momentinin diferansiyel denklemi arasında bir eşitlik vardır.

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = \sigma_s \cdot b \quad (4.5)$$

Mukavemetten:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki (4.6) bağıntısında iki kez türev uygulanırsa:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -\sigma_s \cdot b \quad (4.7)$$

Winkler yarı uzayına ait (4.1) bağıntısındaki  $\sigma_s$  eşitliği (4.7) bağıntısında yerine konursa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -k_s \cdot b \cdot y \quad (4.8)$$

Bu iki bağlantıdan;  $\sigma_s$  taban basıncına bağlı olarak  $y$  çökmesi için, 4. dereceden bir diferansiyel denklem türetilebilir [26].

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_s \cdot b \cdot y = P(x) \quad (4.9)$$

Yukarıdaki bağıntıdan yola çıkarak elastik bir kirişe ait denklem şu şekilde yazılabilir:

$$EI y^4 + k_s \cdot b \cdot y = 0 \quad (4.10)$$

$x > 0$  olmak üzere (4.9) bağıntısı için sınır şartları şunlardır:

$$y(\infty) = 0; \quad y'(0) = 0; \quad y''(0) = \frac{P}{2EI} \quad (4.11)$$

Yer değiştirmenin üstel fonksiyonu sınır şartlara göre ikame edildikten sonra elastik kirişteki çökme denklemi aşağıdaki bağıntı şeklinde ortaya çıkar:

$$y(x) = \frac{P \cdot L^3}{8EI} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \cdot \left( \cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) = \frac{P}{2k_s \cdot L} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \cdot \left( \cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \quad (4.12)$$

Kirişte meydana gelen eğilme momenti denklemi:

$$M(x) = \frac{P \cdot L}{4} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \cdot \left( \cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right) \quad (4.13)$$

Tekil bir yük etkisindeki elastik bir kiriş için yukarıdaki (4.10) denklemin sabit teriminin 4. dereceden kökü elastik uzunluk  $L$  olarak bilinir. Uzunluğu  $l$  olan bir elastik kirişte,  $l/L \geq 2\pi$  ise sonsuz uzunlukta kiriş olarak yorumlanır [26].

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot EI}{k_s \cdot b}} \quad (4.14)$$

$P$  statik tekerlek yükünün kirişin tam orta noktasında ( $x=0$ ) etkimesi durumunda oluşacak yer değiştirme ve moment değerlerine ilişkin eşitlikler;

Yer değiştirme denklemi:

$$y = \frac{P}{2 \cdot b \cdot k_s \cdot L} \quad (4.15)$$

Moment denklemi:

$$M = \frac{P \cdot L}{4} \quad (4.16)$$

Burada;  $P$ : statik tekerlek yükü (kN),  $P(x)$ : kiriş tabanının elastik tabana ilettiği düşey basınç gerilmesi ( $\text{kN/cm}^2$ ),  $y(x)$ : kirişin düşey elastik yer değiştirmesi (cm),  $M(x)$ : kirişin eğilme momenti (kN.cm),  $L$ : elastik (karakteristik) uzunluk (cm),  $k_s$ : elastik tabanın yatak katsayısı ( $\text{kN/cm}^3$ ),  $b$ : elastik kiriş genişliği (cm),  $y$ : kirişin yük uygulandığı nokta altındaki düşey elastik yer değiştirmesi (cm),  $M$ : kirişin yük uygulandığı nokta altındaki eğilme momenti (kN.cm),  $EI$ : kirişin eğilme rijitliği ( $\text{kN.cm}^2$ ).

Elastik zemine oturan, ray ve traversin kiriş elemanı olarak düşünüldüğü sistemin orta noktasına bir tekil yükün ( $P$ ) etki ettirildiği durum Ek-A'da yer alan Şekil A.1.'de gösterilmiştir. Ayrıca; bu kirişte meydana gelen şekil değiştirme eğrileri Ek-A'da yer alan Şekil A.2.'de, moment eğrileri ise Şekil A.3.'de gösterilmiştir.

#### 4.5.1. Dinamik etki katsayısı

Demiryolunun yapısı, kalitesi ve aracın mekanik özellikleri bilinmeden dinamik analiz yapılamamaktadır. Demiryolları yapısı itibari ile dinamik bir karakterde olduğu için statik hesapların yapılmasından sonra bulunan değerlerin dinamik etki katsayısı ile artırılması gerekir. Bu sebeple; Winkler Yöntemi ile statik hesapta kullanılmak üzere geliştirilen bazı oranlar etki ettirilerek demiryolu üstyapı analitik çözümlerinde dinamik hesaplamalar yaklaşık olarak kolaylıkla yapılmaktadır.

Eisenmann ve ekibi tarafından Münih Teknik Üniversitesi Ulaştırma Enstitüsü'nde, seyir hızı ve yol kalitesine bağlı olarak bir dinamik etki katsayısı geliştirilmiştir [14]. Eisenmann, dinamik büyütme katsayıları ile ilgili olarak aşağıdaki ifadeleri vermektedir:

$$\varphi = 1 + t_e \cdot q_s; \quad V < 60 \text{ km/saat} \quad (4.17)$$

$$\varphi = 1 + t_e \cdot q_s \cdot \left(1 + \frac{V-60}{140}\right); \quad 60 < V \leq 200 \text{ km/saat} \quad (4.18)$$

$$\varphi = 1 + t_e \cdot q_s \cdot \left(1 + \frac{V-60}{380}\right); \quad V > 200 \text{ km/saat} \quad (4.19)$$

Burada;  $\varphi$  dinamik büyütme katsayısını,  $t_e$  emniyet faktörünü,  $q_s$  yol kalitesini,  $V$  ise seyir hızını (km/saat) ifade etmektedir. Tablo 4.2.'den yol kalitesine göre emniyet faktörünü ve yol kalitesi değerini elde etmek mümkündür.

Tablo 4.2. Emniyet ve yol kalite katsayıları

| Dinamik Etkinin Hesaplanacağı Bölge | Emniyet Katsayısı ( $t_e$ ) | Yol Kalitesi | Yol Kalite Katsayısı ( $q_s$ ) |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------------|
| Ray tekerlek teması ve zemin        | 1                           | Çok iyi      | 0.1                            |
| Yanal yük ve balast                 | 2                           | İyi          | 0.2                            |
| Ray ve travers                      | 3                           | Kötü         | 0.3                            |

Bu dinamik etki katsayılarını (4.20) ve (4.21) eşitliklerinde bir çarpan olarak kullanarak demiryolu üstyapısının dinamik dingil yükleri etkisi altındaki zorlanması

basit bir şekilde hesaplanabilmektedir. Elastik kirişin tam orta noktası için yer değiştirme ve moment eşitliklerini veren (4.15) ve (4.16) bağıntılarına dinamik etki katsayısının bir çarpan olarak eklenmesi ile oluşturulan denklemler şu şekildedir:

Yer değiştirmenin dinamik etkili denklemi:

$$y = \varphi \cdot \frac{P}{2 \cdot b \cdot k_s \cdot L} \quad (4.20)$$

Momentin dinamik etkili denklemi:

$$M = \varphi \cdot \frac{P \cdot L}{4} \quad (4.21)$$

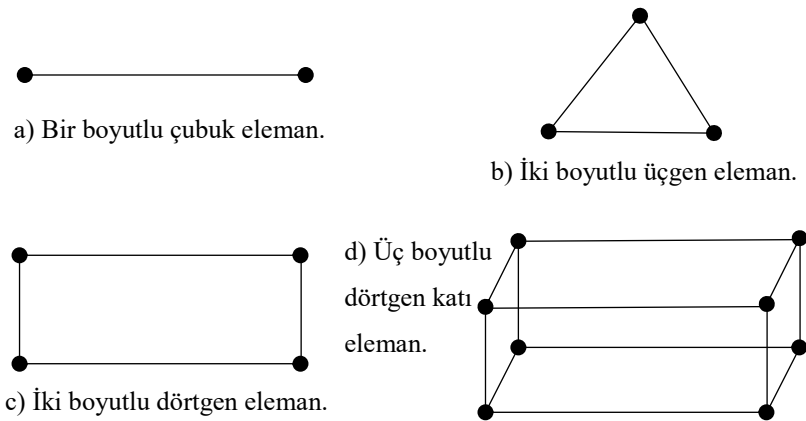
Burada; P: statik tekerlek yükü (kN), L: elastik uzunluk (cm),  $k_s$ : elastik tabanın yatak katsayısı ( $\text{kN}/\text{cm}^3$ ), b: fiktif kiriş genişliği (cm), y: kirişin yük uygulandığı nokta altındaki düşey yer değiştirmesi (cm), M: kirişin yük uygulandığı nokta altındaki eğilme momenti (kN.cm),  $\varphi$ : dinamik büyütme katsayısı olarak ifade edilmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan analitik ve nümerik model çözümleri statik yük altında incelendiği için dinamik etki katsayısı dikkate alınmamıştır.

## BÖLÜM 5. SONLU ELEMANLAR VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar, birçok mühendislik problemlerini belirli sınırlar çerçevesinde küçük parçalara ayırarak inceleyen bir sayısal çözüm yöntemidir. Problemin küçük parçalara ayrılması ile mesnet şartları, sisteme ait özellikler ve dış yüklerin sürekli ya da ani değişimleri kolayca göz önüne alınabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi analitik yöntemlerle çözülmesi zor olan, karmaşık ve homojen olmayan problemlere kolaylıkla uygulanabilir. Sonlu elemanlar yönteminde model sonlu uzunluktaki parçalara ayrılmaktadır. Bu parçaların her birine sonlu eleman denir. Bu parçaların birleştikleri köşe noktaları da düğüm noktaları olarak adlandırılır. Sonlu eleman yüzeyinin şekil değiştirmesi, düğüm noktalarının yer değiştirme özelliklerine göre ifade edilebilir. Eğilme hesaplarında düğüm noktalarının yer değiştirme özelliklerinin belirlenmesi, sistemin yer değiştirme miktarının ve her düğüm noktasındaki kesit tesirlerinin bulunması için yeterlidir. Şekil 5.1.'de bazı türdeki geometrilere ait sonlu model çizimleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı boyutlu sonlu eleman örnekleri

Sonlu elemanlar analizi gerçek bir problemin matematik olarak ifade edilmesidir. Bu sistem alt parçalara ayrılabilen model olup, malzeme özelliklerine ve uygulanabilir sınır şartlarına sahiptir. Şekil 5.2.'de yer alan örnekteki gibi duvara ankastre olarak sabitlenmiş  $l$  uzunluğunda elastik yapıya sahip bir kiriş düşünelim. Bu elastik kirişin serbestlik derecesi sonsuz sayıdadır. Çözümü, sürekli yöntem olarak kısmi diferansiyel denklemler ile çözülür. Aynı kirişi  $a$  uzunluktaki sonlu parçalara bölerek sistemi çözmek istersek, sistemin serbestlik derecesi sonlu sayıda olacağı için adi diferansiyel yöntemlerle çözülebilir.



Şekil 5.2. Duvara ankastre asılı bir kirişin sürekli ve sonlu parçalara ayrılmış modeli

Sonlu elemanlar yöntemlerindeki işlem adımları şu şekildedir:

1. Sistem sonlu elemanlar ile modellenerek homojen birim elemanlara bölünür,
2. Sistemin global aksları, düğüm noktalarının serbestlik dereceleri ve sınır şartları oluşturulur,
3. Elemanların rijitlik matrisleri lokal ekseninde oluşturulur,
4. Elemanların rijitlik matrisleri lokal ekseninden global eksenlere dönüştürülür,
5. Global rijitlik matris oluşturulur,
6. Elemanların yükleri düğüm noktalarına aktarılır,
7. Global yük vektörü oluşturulur,
8. Sistemin matris denklemleri çözülür,
9. Elemanların lokal deplasmanları global deplasmanlar vektöründen elde edildikten sonra, iç kuvvetleri hesaplanır.

Sonlu elemanlar yöntemi çok güçlü ve günümüzde çok sıklıkla kullanılan bir sayısal hesaplama yöntemidir. Son 40 yılda bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak gelişen sayısal hesap yöntemleri içinde çok önemli bir yer tutmaktadır.

Günümüzde farklı bilim dalları için geliştirilmiş sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, STAAD, LUSAS, PLAXIS, AutoDESK ürünleri gibi analiz yazılımları bulunmaktadır. SAP2000 yazılımı da inşaat mühendisliği açısından önemli bir sonlu eleman analiz programıdır.

SAP2000 yazılımı Amerikan CSI Şirketi (Computers and Structures, Inc.) tarafından geliştirilmiş ve 30 yılı aşkın süredir mühendislik alanında modellerin geliştirilmesi, analizi ve boyutlandırılması için kullanılan genel amaçlı bir yazılımdır [29].

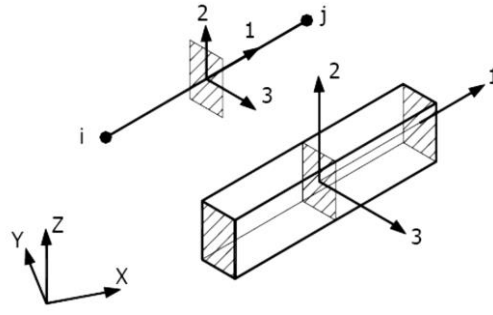
SAP2000 yazılımı, Windows ortamında çalışmakta ve tüm işlemler özel Grafik Kullanıcı Arayüzü yardımı ile SAP2000 ekranı üzerinde gerçekleştirilmektedir [30].

Herhangi bir yapı sisteminin SAP2000 programı ile analiz ve boyutlandırılmasında, genel olarak, aşağıdaki yol izlenmektedir [30]:

1. Sistemin oluşturulması,
2. Malzeme özelliklerinin tanımlanması,
3. Yüklerin tanımlanması,
4. Analiz
5. Boyutlandırma.

Sistem modelleri, genel (global) bir koordinat sistemine göre oluşturulmaktadır. Koordinat sistemi X, Y, Z eksenlerinden oluşan kartezyen bir sistem olabileceği gibi, r,  $\theta$ , z eksenlerinden oluşan silindirik bir sistem olarak da seçilebilir. X, Y, Z eksenleri sağ el kuralına uygun olarak düzenlenmiştir [30].

Sistem modelini oluşturan düğüm noktası, çubuk, sonlu eleman gibi her nesne kendi yerel (local) eksenine sahiptir. Her nesne için farklı olmak üzere, 1, 2 ve 3 olarak tanımlanan bu eksenler kesit özelliklerinin, yüklerin ve iç kuvvetlerin tanımlanmasında kullanılır. Aşağıdaki Şekil 5.3.'de basit bir örnek üzerinde X, Y, Z ile genel sistem eksenleri ve 1, 2, 3 ile yerel eksenleri gösterilmiştir [30].



Şekil 5.3. Çubuk eleman genel ve yerel eksenleri

SAP2000’de hem genel hem yerel eksen takımları sağ el kuralına uymaktadır. İki eksenin yerleşimi bilindiğinde diğer eksenin belirlenmesi bu kurala göre yapılmaktadır. Şekil 5.4.’de genel ve lokal eksenler gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Genel ve lokal eksenler

## **BÖLÜM 6. DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ ANALİTİK MODELİ**

Tezin bu bölümünde, balastlı demiryolu modeli için kabul edilen parametrelerde (travers aralığı, ray tipi, yatak katsayısı gibi) demiryolu bileşenlerinin yol yapısındaki statik gerilmelerin hesabı için analitik yöntem olarak Winkler'in elastik yatağa oturan kiriş modeli kullanılmıştır.

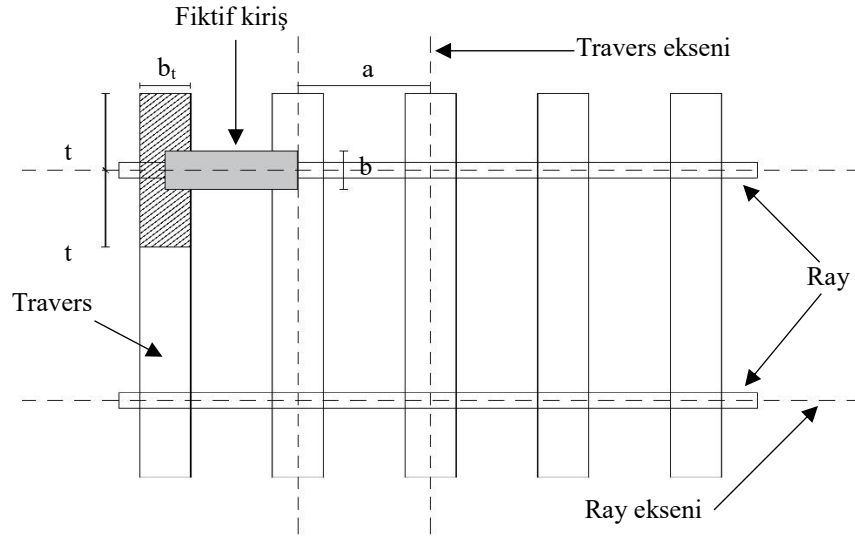
Elastik özellikte olduğu bilinen bir malzemenin alttan başka bir elastik özellikteki malzeme ile desteklendiği durumlarda, zorlanma analizinin sadece bir tek elastik malzeme için hesaplanması yeterlidir. Bu durumda ilk elastik malzeme üzerinde bulunan ikinci elastik malzemenin etkisi modellendirilir. Demiryolları, asfalt veya beton yol kaplamaları bu tür yapılara örnek verilebilir.

Winkler'in elastik yatak modeline göre yer değiştirme sadece yükün uygulandığı yönde ortaya çıkar. Elastik yatağın diğer elemanlarında bir değişiklik olmadığı varsayılır. Böylelikle analitik model hesaplarında kolaylık sağlanmış olunur. Tabii bu hesapların nümerik analizlerle desteklenmesi gereklidir.

Sonlu eleman yöntemleri ile modelin kurulmasında, zemin tabakası üzerine yerleştirilmiş balast tabakası yerine balast tabakasının görevini üstlenecek yaylar ile temas halinde olan bir kiriş eleman tasarlanır.

### **6.1. Elastik Yatağa Oturan Balastlı Demiryolunun Analitik Modeli**

Winkler Metoduna göre boyuna yöndeki demiryolu üstyapının kesit tesirleri hesabında; ray ve traversin elastik yatak olarak kabul edilen balast üzerine oturan sonsuz uzunluklu bir kiriş olduğu düşünülmektedir.



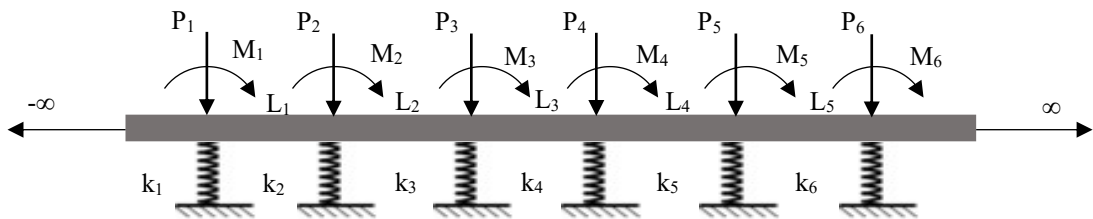
Şekil 6.1. Balast tabakası üzerine oturmuş demiryolu sistemi

Winkler hipotezine bağlı olarak Şekil 6.1.'deki yol çerçevesi, traverslerin yük ileten kısımlarının döndürülerek, uç uca eklenmesiyle ray ve traverslerden oluşan genişliği  $b$  olan fiktif bir sürekli kirişe dönüştürülür.

$$b = \frac{2 \cdot t \cdot b_t}{a} \quad (6.1)$$

Burada;  $b$ : fiktif kiriş genişliği,  $t$ : traversin başlangıcından rayın eksenine kadar olan mesafe,  $b_t$ : travers genişliği,  $a$ : traversler arası mesafedir.

Demiryolu üstyapı hesabında, elastik bir kirişin matematik modelinden faydalanır. Sonsuz uzunluktaki kiriş, elastik zemin üzerine yaylar aracılığıyla bağlanır. Yaylar ile kiriş elemanın birleşim noktalarında, yani traverslerin eksenleri düğüm noktaları olarak alınır. Sistem uzunluğu  $L$  olan,  $n$  adet elemana bölünür (Şekil 6.2.).



Şekil 6.2. Elastik yatağa oturan kirişin sonlu eleman modelinin kurulması

Sistemin yay katsayılarını hesaplamak için elastik yatağın yatak katsayısı değeri kullanılır. Yay katsayılarının tespit edilmesinde aşağıdaki (6.2) bağıntısından yararlanılmaktadır:

$$k_i = k_s \cdot b \cdot \frac{(L_i + L_j)}{2} \quad (6.2)$$

Burada;  $k_i$ : yay katsayısı,  $k_s$ : yatak katsayısı,  $b$ : fiktif kiriş genişliği,  $L_i$  ve  $L_j$  ise düğüm noktasının sağ ve sol kısımlarının sonlu parça uzunluğudur.

Kirişin uç noktalarındaki yay katsayıları, orta noktalardaki yay katsayılarının yarısı kadar değerdedir. Orta noktalardaki yay katsayılarının hesabı eşitlik (6.2) ile bulunduktan sonra bu değerin yarısı uç noktaların yay katsayısını verir. Bunun sebebi, uç noktaların yanındaki sonlu parçanın tek olmasıdır.

Yaylar üzerine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş, düğüm noktalarına (ray ve traversin kesişim noktaları) etki eden kuvvet ve momentlerin etkisiyle düşey yönde  $y$  kadar yer değiştirme yapar. Balastın yay elemanı olarak düşünüldüğü ve ray ile traversin bir kiriş elemanı olarak modellenip fiktif genişlikle elastik zemine oturduğu demiryolu yapısındaki zorlanmaların analitik hesabı için Bölüm 4.5’de diferansiyel denklem çözümleri ile elde edilen eşitlik (4.14) kullanılarak kirişin elastik boyu, eşitlik (4.15) ile kirişin üzerine gelen yükten dolayı meydana çıkan çökme değeri ve eşitlik (4.16) ile kirişte meydana gelen moment değerleri hesaplanabilir.

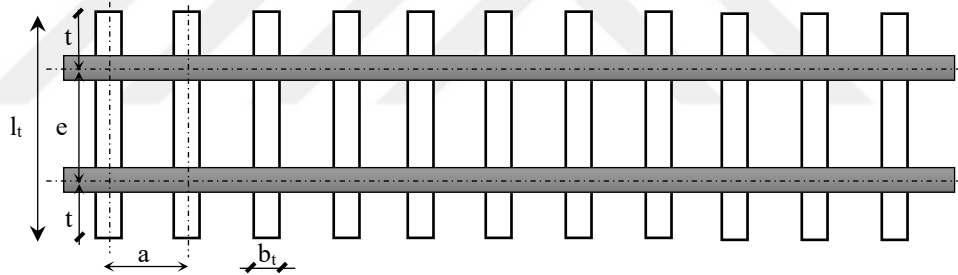
Demiryolu üstyapısına ait balastın düzlem elemanı olarak hesapları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilebilmektedir. Sonlu elemanlar modelinde balast tabakası düzlem elemanı, balast tabakasının üzerindeki ray ve traversler ise kiriş elemanı olarak alınmıştır. Düzlem elemanı olarak modellenen balast tabakasının yatak katsayısı Vesic tarafından geliştirilen bir bağıntı ile elastisite modülüne dönüştürülür [26].

$$C = \frac{E_b}{b \cdot (1 - \mu^2)} \quad (6.3)$$

Burada  $C$ : balast yatak katsayısı,  $E_b$ : balastın elastisite modülü,  $b$ : fiktif kiriş genişliği,  $\mu$  ise Poisson oranını ifade etmektedir.

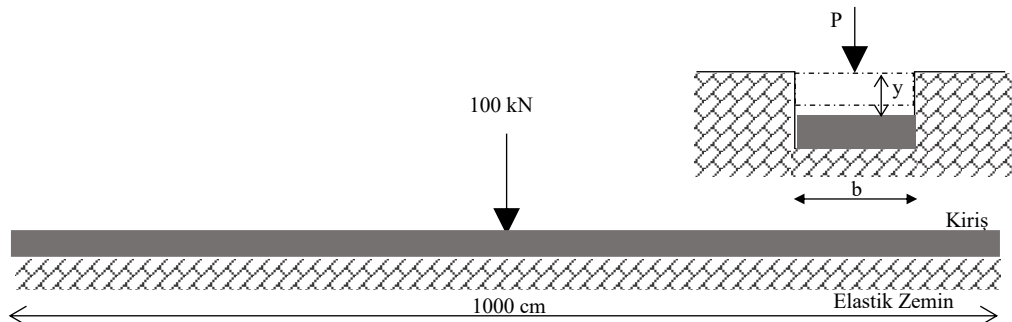
## 6.2. Elastik Yatağa Oturan Balastlı Demiryolunun Analitik Model Uygulaması

Şekil 6.3.'de balastlı demiryolu üstyapısının, Şekil 6.4.'deki gibi elastik zemine oturan basit kiriş modeli (Model-1) için üstyapı hesabında Ek B'de Tablo B.1.'deki malzeme parametreleri kullanılmıştır. Winkler Yöntemi ile hesaplamada öncelikle ray ve traversin kiriş eleman olarak modellendiği fiktif kiriş genişliği Eşitlik (6.1) ile hesaplanmıştır. Daha sonra elastik zemine oturan kirişin elastik uzunluğu Eşitlik (4.14) ile bulunmuştur. Winkler yarı uzayındaki elastik zemine oturan bir kirişin diferansiyel denklemlerinden elde edilen çökme ve moment değerleri sırası ile Eşitlik (4.15) ve (4.16)'e göre hesaplanmıştır. Analitik hesap sonuçlarına göre teker yük altındaki çökme değeri 0.1734 cm, moment değeri ise 2,677.78 kNcm olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.3. Balastlı üstyapı şematik planı

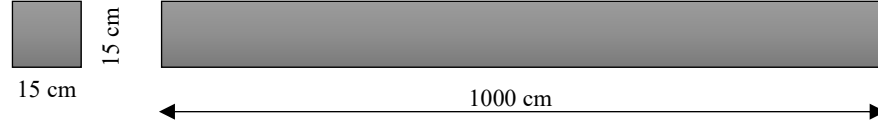
Burada;  $a$ : traversler arası mesafe (cm),  $e$ : hat açıklığı (cm),  $l_t$ : travers uzunluğu  $b_t$ : travers genişliği (cm),  $t$ : traversin ray dış kenarına olan mesafesi (cm).



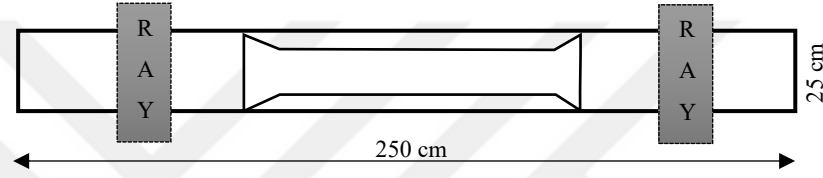
Şekil 6.4. Balastlı demiryolu uygulama örneği ve yükleme durumu

Burada; P: teker yükü (kN), b: fiktif genişlik (cm), y: çökme (cm)

Balastlı demiryolunda, elastik yatağa oturan ve balastın yay olarak modellendiği sonlu eleman uygulamasında raylar 15 cm x 15 cm olan kare eleman (Şekil 6.5.), traversler ise 25 cm x 250 cm olan dikdörtgen eleman (Şekil 6.6.) olarak ele alınmıştır.



Şekil 6.5. Örnekte kullanılan rayın enine ve boyuna ölçüleri



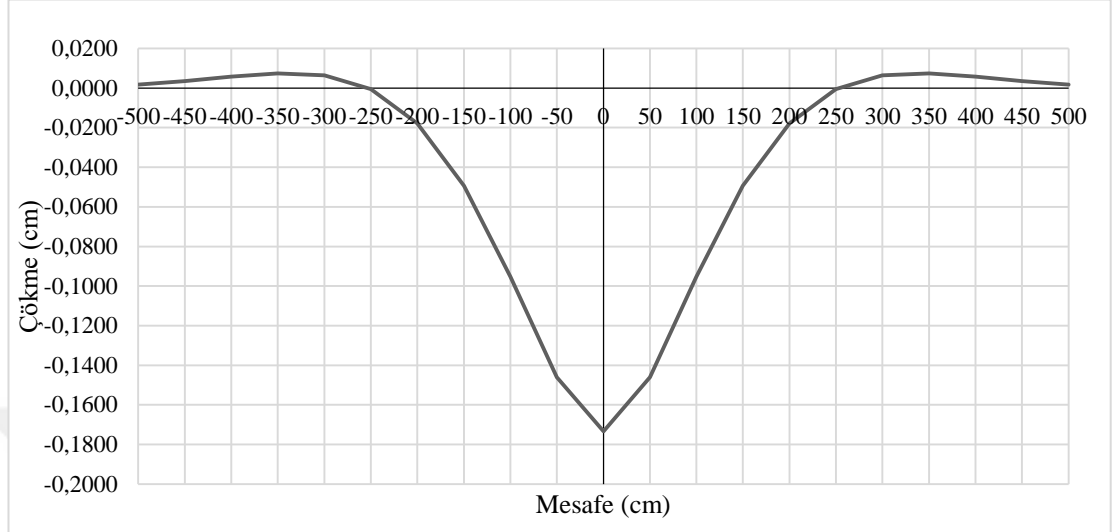
Şekil 6.6. Örnekte kullanılan traversin genişliğine ve uzunluğuna ait ölçüleri

Elastik yatağa oturan Şekil 6.3.'deki bir kirişin, Winkler'in yarı uzay sistemindeki modeline göre çökme ve moment değerlerinin hesaplanışına ait işlem adımları aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

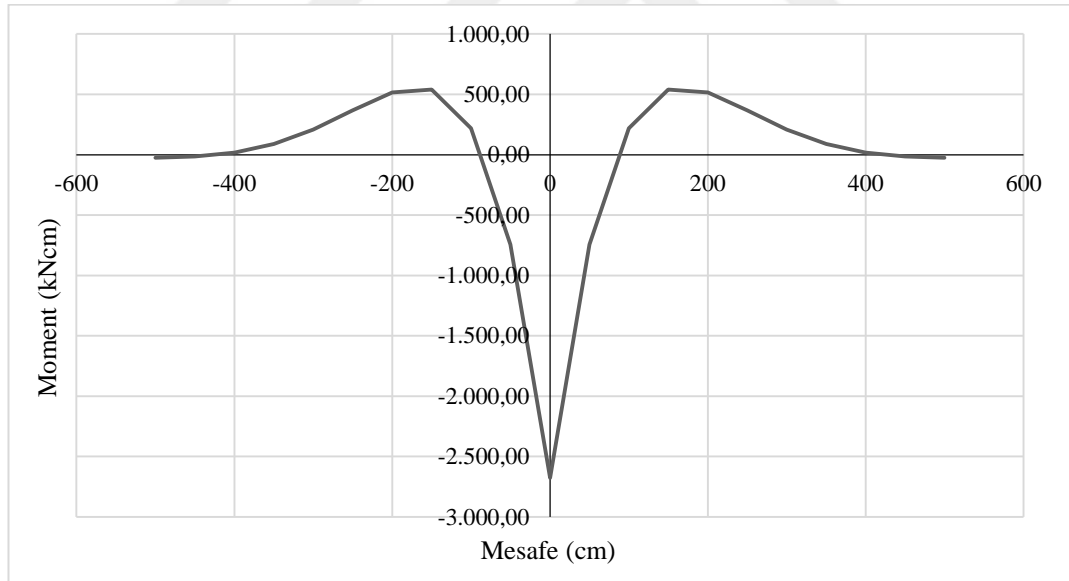
İşlem adımları şöyledir:

1. Şekil 6.3.'e göre  $2t + e = l_t$  olduğu bilinmektedir. Buradan t değeri Ek B'de Tablo B.1.'deki veriler kullanılarak  $t=50$  cm bulunur.
2. Eşitlik (6.1) ile elastik yatağa oturan kirişin fiktif değeri  $b=38.46$  cm olarak bulunur.
3. Ray ve traversin birlikte düşünüldüğü kiriş elemanın elastik boyu eşitlik (4.14) ile  $L=107.111$  cm bulunur.
4. 100 kN'luk yükün etki ettiği nokta altında oluşan (yani kiriş elemanın tam orta noktasındaki) çökme değeri eşitlik (4.15) ile  $y=0.1747$  cm bulunur.
5. Eşitlik (4.16) ile kiriş elemanın tam orta noktasındaki moment değeri ise  $M=2,671.24$  kNcm olarak bulunur.

Analitik hesaba göre elde edilen yer değiştirme ve moment eğrilerinin grafikleri sırasıyla aşağıdaki Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Analitik modelin yer değiştirme grafiği



Şekil 6.8. Analitik modelin moment grafiği

## **BÖLÜM 7. DEMİRYOLU ÜSTYAPI HESAPLARININ NÜMERİK MODELİ**

Balastlı demiryolu üstyapısının analitik modeli Winkler Yöntemi ile çözümüne ait prensipler daha önce Bölüm 4'te gösterilmiş olup, bu bölümde basit bir yük katarı etkisiyle şekil değiştiren balastlı üstyapıda tekerlek yükünün etki ettiği nokta altında meydana gelen çökme değerleri ve eğilme momentleri SAP2000 yazılımı ile hesaplanmıştır. SAP2000 yazılımında Winkler kiriş modeli bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak farklı nümerik modeller oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi esaslı SAP2000 yapısal analiz yazılımında balast tabakası, sonlu eleman ağında noktalar altına yerleştirilmiş yaylarla temsil edilmektedir. Bu yayların yay katsayıları, kiriş elemanın fiktif kiriş genişliği ve balast tabakasının yatak katsayısı ile çarpımından elde edilmektedir. Her bir düğüm noktasının etkili alanı, o düğüm noktasına komşu olan sonlu elemanların alanlarının dörtte birlerinin toplamına eşit olmakta, dolayısıyla eleman boyutu eşit olan bir sonlu eleman ağında dahi köşede, kenarda veya ortada olan yayların katsayıları değişik değerler almaktadırlar [27].

Bölüm 4'te demiryolu üstyapısına gelen kuvvetlerden bahsedilmişti. Bu çalışmada, üstyapı hesapları analizleri için 20 tonluk (200 kN) aks yükü tüm nümerik modellerde de kullanılmıştır. Aks yükünden tekerlere gelen yükler, 10 tonluk (100 kN) yük olarak modellerin ilgili düğüm noktalarına etki ettirilir.

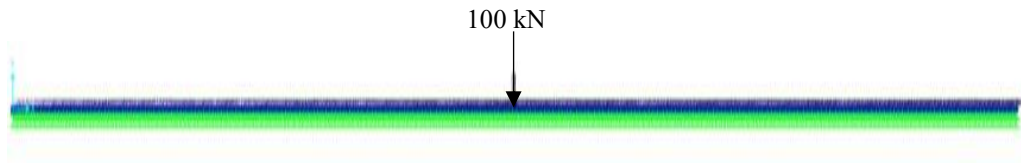
Nümerik modellerden elde edilen çökme ve moment değerleri Winkler Yönteminin kullanıldığı analitik model ile Bölüm 8'de karşılaştırılmıştır. Nümerik modeller için Ek C'de çözüm sonuçları ile elde edilen grafikler verilmiştir.

### 7.1. Elastik Yatağa Oturan Kiriş Eleman

Winkler yönteminin analitik olarak modellenmesi Bölüm 6.2’de anlatılmıştır. Bu bölümde, Bölüm 6.2’de yer alan Şekil 6.3.’deki elastik yatak üzerine oturan demiryolu üstyapısı sonlu elemanlar yazılımı SAP2000 ile nümerik olarak modellenmiştir. Balast tabakasının elastik yatak olarak düşünüldüğü bu bir boyutlu modelde, ray ve travers elemanlar sonsuz uzunluktaki bir kiriş eleman olarak modellenmiş (Model-2) ve elastik zemine yaylar aracılığı ile düğüm noktalarından bağlanmıştır.

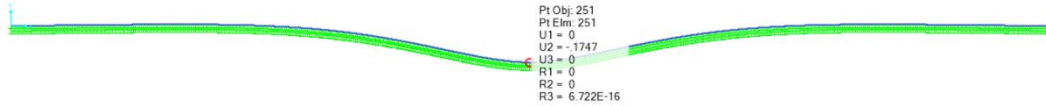
Bu bir boyutlu modelde kiriş eleman balast tabakası yerine kullanılan yaylar aracılığı ile mesnetlenmiştir. Elastik yatağa oturan sonsuz kirişin elastisite modülü  $E=2.1 \times 10^4$  kN/cm<sup>2</sup>, balast tabakasının yatak katsayısı  $k_s=70$  N/cm<sup>3</sup> alınmıştır. Ray ve traversin birlikte düşünüldüğü fiktif kiriş genişliği (6.1) eşitliğinden hesaplanarak,  $b=38.46$  cm bulunmuştur. Demiryolu aracından gelen aks yükü, teker yüküne dönüştürülerek  $P=100$  kN olarak sistemin tam orta noktasına etki ettirilmiştir.

Sonsuz kirişin boyutları Şekil 6.5.’de olduğu gibi 15x15 cm kare eleman olarak alınmıştır. Elastik yatağa oturan kirişin boyu Şekil 6.4.’deki gibi 1,000 cm kabul edilmiştir. Sistem 2 cm’lik sonlu uzunluktaki parçalara ayrılarak toplamda 500 sonlu elemana bölünmüştür. Her bir sonlu eleman parçalarının düğüm noktaları yaylar üzerine gelecek şekilde sistem modellenmiştir. Balast tabakasının yatak katsayısı (6.2) eşitliğinden fiktif kiriş genişliğine bağlı olarak yay katsayısına dönüştürülmüştür. Modelin en uçlarına sistemin ara düğüm noktalarına göre yarım yay katsayısı değeri atanmıştır. Eşitlik 6.2 kullanılarak uç düğüm noktaları yay katsayısı  $k_1=2.6922$  kN/cm, ara düğüm noktaların yay katsayısı  $k_2=5.3844$  kN/cm hesaplanmıştır. Şekil 7.1.’de SAP2000’de oluşturulan model görülmektedir.



Şekil 7.1. Elastik yatağa oturan kiriş elemanın SAP2000 modeli

SAP2000’de oluşturulan Şekil 7.1.’deki model (Model-2) analiz edilerek; yer değiştirme değeri 0.1747 cm, moment değeri 2,671.24 kNcm olarak bulunmuştur. Ek B’de Tablo B.2.’de Model-2 için kullanılan parametreler yer almaktadır. Şekil 7.2.’de elastik yatağa oturan kirişin SAP2000’de ki analizi sonucu oluşan deforme olmuş hali yer almaktadır.



Şekil 7.2. Model-2'nin SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

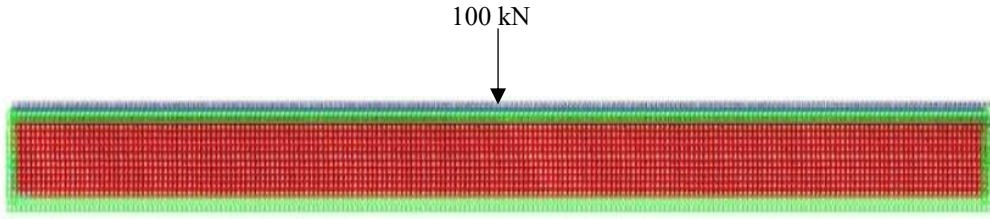
## 7.2. Balast Tabakası Düzlem, Ray ve Travers Kiriş Eleman

Bu modelde ray ve traversten oluşan sonsuz uzunluktaki kiriş ile balast tabakası bir olarak iki boyutlu modellenmiştir (Model-3). Balast tabakası düzlem eleman olarak modellenip düğüm noktalarından; ray ve traversten oluşan yapı ise kiriş eleman olarak balast tabakasının düğüm noktalarına bağlanmıştır. Balast tabakası düzlem eleman olarak modellendiği için; balast tabakasının yatak katsayısı  $C=70 \text{ N/cm}^3$  ve Poisson oranı  $\mu=0.35$  alınarak ve (6.3) eşitliği kullanılarak balast tabakasının elastisite modülü  $E_b=2.3622 \text{ kN/cm}^2$  hesaplanmıştır. Elastik yatağa oturan kiriş elemanın boyu 1,000 cm alınmıştır.

Balast tabakası 2000 adet sonlu düzlem elemana bölünmüştür. Ray ve traversin birlikte düşünüldüğü fiktif kiriş genişliği (6.1) eşitliğinden hesaplanarak,  $b=38.46 \text{ cm}$  bulunmuştur. Ray ve traverslerden oluşan sonlu uzunluktaki kiriş eleman 5 cm uzunluğunda 200 sonlu parçaya bölünmüştür. Demiryolu aracından gelen aks yükü, teker yüküne dönüştürülerek  $P=100 \text{ kN}$  olarak sistemin tam orta noktasına etki ettirilmiştir.

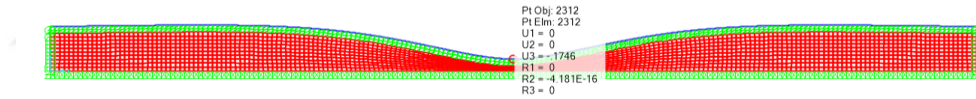
Balast tabakası doğal zemine oturduğu için en alt düğüm noktaları SAP2000 programında sabit mesnet olarak atanmıştır. Sistemin sol ve sağ tarafları düşeyde

kayıcı mesnet olarak tanımlanmıştır. Şekil 7.3.'de SAP2000'de oluşturulan model görülmektedir.



Şekil 7.3. Balast tabakası boyunca düzlem, ray ve travers kiriş elemandan oluşan SAP2000 modeli

Kiriş elemanın orta noktası olan 251'nci düğüm noktasında oluşan çökme değeri 0.1746 cm, moment değeri ise 2,664.60 kNcm olarak elde edilmiştir. Ek B'de Tablo B.3.'de Model-3 için kullanılan parametreler yer almaktadır. Şekil 7.4.'de balast tabakasının düzlem elaman olarak ve ray ile traversin boyuna kiriş eleman olarak modellendiği sistemin SAP2000'deki analizi sonucu oluşan deforme olmuş hali yer almaktadır.



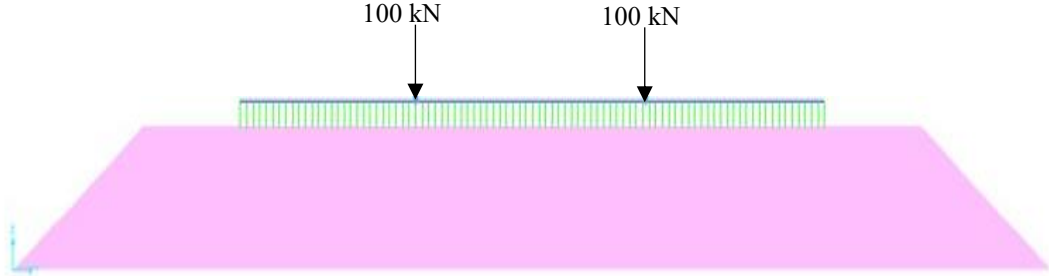
Şekil 7.4. Model-3'ün SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

### 7.3. Balast Tabakası Enine Düzlem, Ray ve Travers Kısa Kiriş Eleman

Sadece traversin ve balastın ayrı ayrı modellendiği bu yapı sistemi enine yönde iki boyutlu olarak modellenmiştir (Model-4). Balast tabakası düzlem eleman olarak modellenip düğüm noktalarından; travesten oluşan yapı ise kiriş eleman olarak balast tabakasının düğüm noktalarına bağlanmıştır. Balast tabakası düzlem eleman olarak modellendiği için; balast tabakasının yatak katsayısı  $C=70 \text{ N/cm}^3$  ve Poisson oranı  $\mu=0.35$  alınarak ve (6.3) eşitliği kullanılarak balast tabakasının elastisite modülü  $E_b=1.5356 \text{ kN/cm}^2$  hesaplanmıştır.

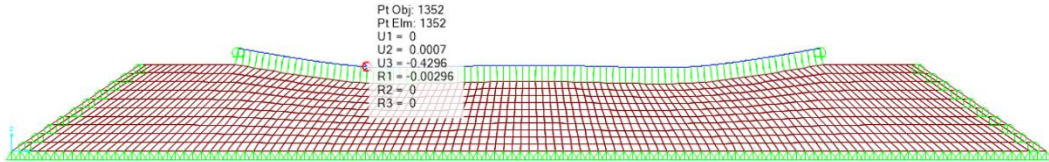
Balast tabakası sonlu düzlem elemanlara bölünmüştür. Traversin oluşturduğu sonlu uzunluktaki kiriş eleman 3 cm uzunluğunda 90 sonlu parçaya bölünmüştür. Demiryolu

aracından gelen yük, teker yüküne dönüştürülerek her iki rayın olduğu düşünüldüğü düğüm noktalarına 100 kN olarak etki ettirilmiştir.



Şekil 7.5. Balast tabakası enine düzlem, ray ve travers kısa kiriş elemandan oluşan SAP2000 modeli

SAP2000'de oluşturulan Şekil 7.5.'deki model (Model-4) analiz edilerek; yer değiştirme değeri 0.4296 cm, moment değeri 1,613.64 kNcm olarak bulunmuştur. Ek B'de Tablo B.4.'de Model-4 için kullanılan parametreler yer almaktadır. Şekil 7.6.'da balast tabakasının düzlem elaman olarak ve ray ile traversin kısa kiriş eleman olarak modellendiği sistemin SAP2000'deki analizi sonucu oluşan deforme olmuş hali yer almaktadır.

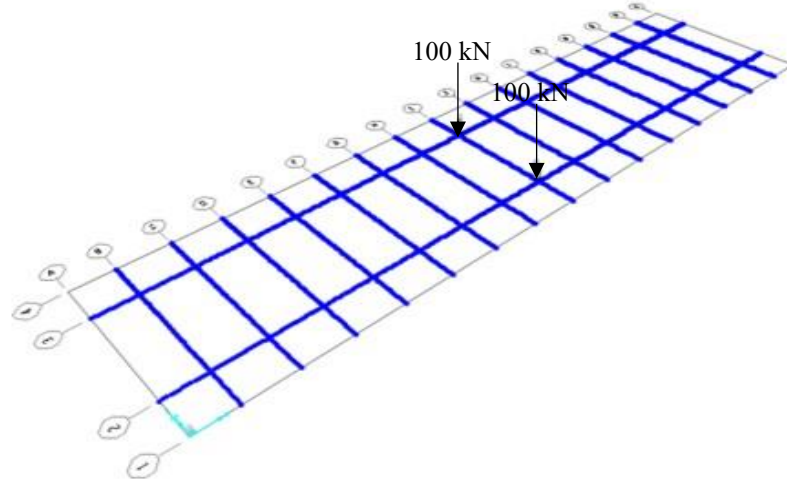


Şekil 7.6. Model-4'ün SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

#### 7.4. Elastik Yatağa Oturan Izgara Kiriş Eleman

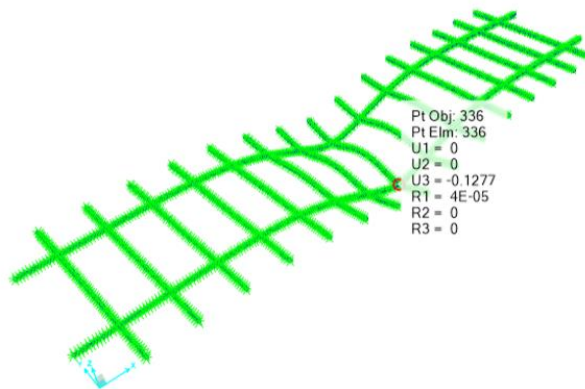
Bu bir boyutlu modelde ray ve traversten oluşan kiriş elemanı balast tabakası üzerine yaylar aracılığı ile hem enine hem boyunda yönde mesnetlenmiştir (Model-5). Elastik yatağa oturan sonsuz uzunluktaki kirişin elastisite modülü  $E=2.1 \times 10^4$  kN/cm<sup>2</sup>, balast tabakasının yatak katsayısı  $k_s=70$  N/cm<sup>3</sup> alınmıştır. Ray ve traversin birlikte düşünüldüğü kiriş genişliği (6.1) eşitliğinden hesaplanarak,  $b=38.46$  cm bulunmuştur. Demiryolu aracından gelen aks yükü, teker yüküne dönüştürülerek hem sağ rayın orta noktasına hem de sol rayın orta noktasına 100 kN olarak etki ettirilmiştir.

1,000 cm uzunluğundaki ray elemanı 4 cm'lik sonlu eleman parçaları ile bölünmüş ve 250 parçaya ayrılmıştır. Travers elemanı 260 cm boyunda modellendiği için her bir sonlu parça eleman boyu 4 cm olacak şekilde 65 parçaya ayrılır.



Şekil 7.7. Elastik yatağa oturan ızgara kiriş elemanın SAP2000 modeli

SAP2000'de oluşturulan Şekil 7.7.'deki model (Model-5) analiz edilerek; yer değiştirme değeri 0.1277 cm, moment değeri 2,265.19 kNcm olarak bulunmuştur. Ek B'de Tablo B.5.'de Model-5 için kullanılan parametreler yer almaktadır. Şekil 7.8.'de elastik yatağa oturan ızgara kirişin SAP2000'deki analizi sonucu oluşan deforme olmuş hali yer almaktadır.

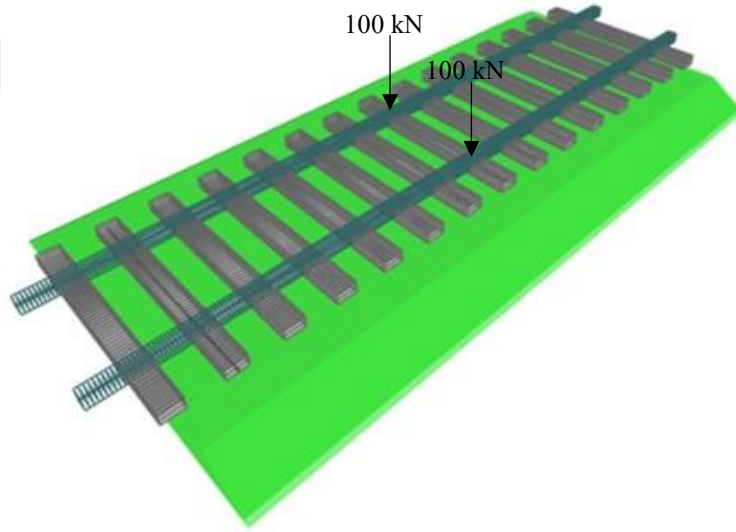


Şekil 7.8. Model-5'in SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

### 7.5. Üç Boyutlu Demiryolu Üstyapı Model Sistemi

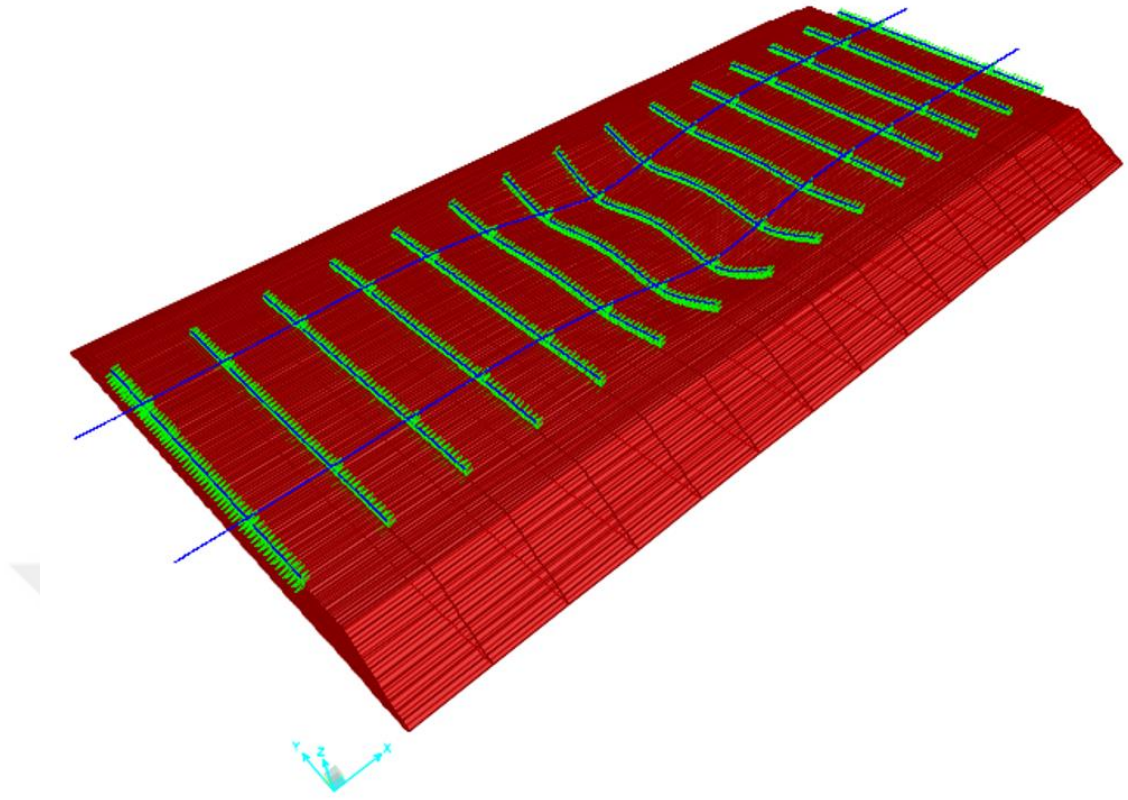
Şekil 7.7.'de ızgara kiriş eleman modeli geliştirilerek balast tabakasına oturtulmuş ray ve travers yapısı balast tabakası ile birlikte üç boyutlu olarak modellenmiştir (Model-6). Sistemin boyuna yöndeki ölçüleri Bölüm 7.2'deki modele ait parametrelerden, sistemin enine yöndeki ölçüleri Bölüm 7.3'deki modele ait parametrelerden alınmıştır.

Balast tabakasının sonlu parçalara ayrılmasında oluşacak eleman sayısının fazlalığından dolayı, SAP2000 programında bu üç boyutlu modelin boyuna yöndeki kısmında sadece ray ve travers kesişimlerinin olduğu bölgeler daha kısa sonlu parçalara ayrılmıştır. Enine yöndeki sonlu parça boyu ise aynen korunmuştur. Demiryolu aracından gelen aks yükü, teker yüküne dönüştürülerek hem sağ rayın orta noktasına hem de sol rayın orta noktasına 100 kN olarak etki ettirilmiştir.



Şekil 7.9. Üç boyutlu demiryolu üstyapı model sisteminin SAP2000 modeli

SAP2000'de oluşturulan Şekil 7.9.'daki model (Model-6) analiz edilerek; yer değiştirme değeri 0.1032 cm, moment değeri 1,897.44 kNcm olarak bulunmuştur. Şekil 7.10.'da demiryolu üstyapısının SAP2000'de ki üç boyutlu analizi sonucu oluşan deforme olmuş hali yer almaktadır.



Şekil 7.10. Model-6'nın SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

Demiryolu araçlarından gelen tren yükleri aks yükleri olarak tekerlere dağıtılır. Aks yükleri ise araçların hareketini sağlayan ve araç gövdesini taşıyan çelik dökümden imal edilen boji sisteminden gelir. Bojiler klasik ve gelişmiş olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. İlk boji sistemleri (Klasik boji); sabit bir iskelet gövdesine sahip, tekerlek setleri sabit olan ve birincil ile ikincil süspansiyon sistemlerinden meydana gelmektedir [31]. Gelişmiş bojilerde ise iki parçadan meydana gelen boji iskeletindeki tekerlekler birbirinden bağımsız olarak hareket edebilirler ve birincil süspansiyonları yoktur [31].

Günümüzde Y25, Y27, Y31, Y32, Y33 tiplerinde boji türleri vardır [32]. TCDD'de Y32 tipi boji sistemi kullanılmaktadır. Y32 boji sisteminin teknik özellikleri Tablo 7.1.'de verilmiştir [33].

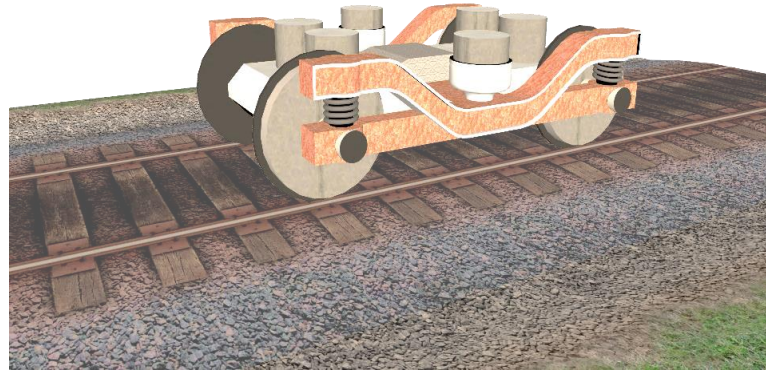
Tablo 7.1. Y32 bojinin bazı teknik özellikleri

| Özellik                | Y32 Boji Değerleri |
|------------------------|--------------------|
| Aks eksenleri mesafesi | 2560 mm            |
| Tekerlek çapı          | 920 mm             |
| Boji ağırlığı          | 6000 kg            |
| Maksimum servis hızı   | 160 km/h           |
| Aks çapı               | 155 mm             |
| Aks yükü               | 16 ton             |

TCDD'nin kullanmış olduğu Y32 boji sistemi Şekil 7.11.'de gösterilmiştir [33]. Boji sisteminin balastlı bir demiryolu üstyapısında raylara oturduğu durumun üç boyutlu hali Şekil 7.12.'de gösterilmiştir. Y32 boji sistemi için, Tablo 7.1.'de belirtilen aks yükleri ele alınmış ve Model-6 sistemine ait sonlu eleman yapısı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu yeni modelin (Model-7) SAP2000 yazılımında analizi yapılmıştır.

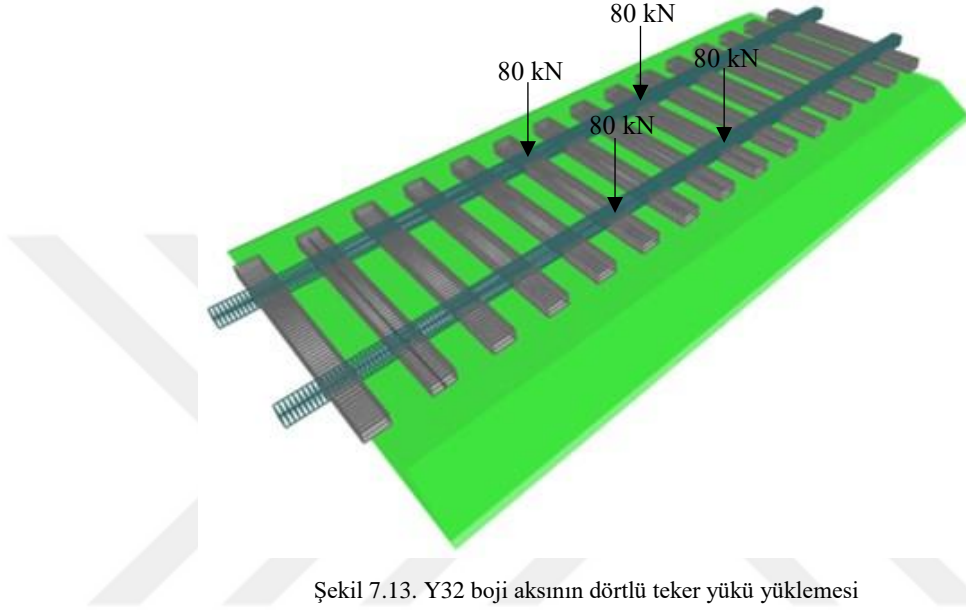


Şekil 7.11. Y32 boji sistemi

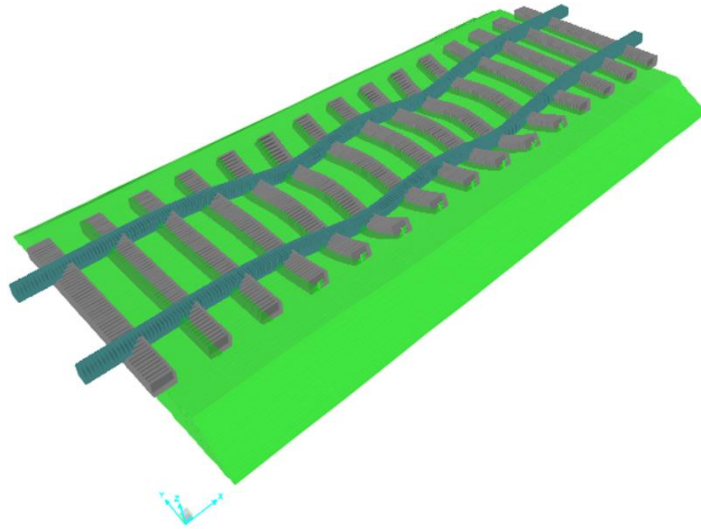


Şekil 7.12. Balastlı demiryoluna oturan boji sisteminin üç boyutlu gösterimi

Modelde, Y32 boji sistemine ait 16 ton (160 kN) aks yükü her bir teker başına 8 ton olarak (80 kN) etki ettirilmiştir. SAP2000 yazılımında oluşturulan modeldeki yükleme durumu Şekil 7.13.'de, modelin analizi sonucu oluşan deformasyon hali ise Şekil 7.14.'de gösterilmiştir. Analiz sonucunda; yer değiştirme değeri 0.0725 cm, moment değeri 1,485.93 kNcm olarak bulunmuştur.



Şekil 7.13. Y32 boji aksının dörtlü teker yükü yüklemesi



Şekil 7.14. Model-7'nin SAP2000'de analizi sonucu deforme olmuş hali

## BÖLÜM 8. ARAŞTIRMA BULGULAR

Elastik zemine oturan basit kiriş modelinin (Model-1) analitik ve nümerik olarak hesabı karşılaştırıldığında, sonuçların oldukça birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan sonra geliştirilen diğer sonlu eleman modellerinde ise modele etki eden demiryolu üstyapı sistemine ait her bir parçanın atalet momenti, elastisite modülü, Poisson oranı gibi mekanik özelliklerinin son derece önemli olduğu tespit edilmiştir. Model-3’de kullanılan balast tabakasının elastisite modülü hesabında, Vesic’in geliştirdiği formül üzerinden hesaplanan elastisite modülü değerinin kullanılması sonucu ortaya çıkan çökme değerinin, diğer modellere göre bir miktar yüksek olmasına karşın, moment değeri olarak en düşük sonucu vermektedir. Nümerik analizi yapılan tüm modellere ait hesap sonuçlarının karşılaştırılmış hali Tablo 8.1.’de verilmiştir.

Tablo 8.1. Demiryolu üstyapı modellerine ait çökme ve moment değerleri

| Demiryolu Üstyapı Modelleri                           | Çökme (cm) | Moment (kNcm) |
|---|------------|---------------|
| Model-1: Winkler yöntemi                              | 0.1734     | 2,677.78      |
| Model-2: Elastik yatağa oturan kiriş eleman           | 0.1747     | 2,671.24      |
| Model-3: Balast tabakası boyuna düzlem                | 0.1746     | 2,664.60      |
| Model-4: Balast tabakası enine düzlem                 | 0.4296     | 1,613.64      |
| Model-5: Elastik yatağa oturan ızgara kiriş eleman    | 0.1277     | 2,265.19      |
| Model-6: Üç boyutlu demiryolu üstyapı model sistemi   | 0.1032     | 1,897.44      |
| Model-7: Y32 Boji aksının dörtlü teker yükü yüklemesi | 0.0725     | 1,485.93      |

UIC 60 rayı kullanılarak üstyapı analizi yapılan bir çalışmada [25]; geleneksel yöntem ile çökme değerinin 0.18796 cm, moment değerinin 2,470.25 kNcm çıktığı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilen üstyapının çökme değerinin 0.19 cm, moment değerinin 2,457.41 kNcm çıktığı sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizin geleneksel yöntem (Winkler Yöntemi) çok yakın olduğu ve bu çalışmada da sonuçların aynı yakınsaklığı verdiği tespit edilmiştir.

Analizlerde kullanılan malzemelere ait mekanik özelliklerin, üstyapıya etki eden teker yükü altındaki çökmeler ve momentler ile doğrudan bir etkileşimde olduğu ortaya çıkmaktadır. Bulgularda ortaya konan tespitlere göre, demiryolu üstyapı hesapları hem Winkler (analitik) yöntemiyle hem de sonlu elemanlar (nümerik) yöntemiyle çözülebilmektedir. Elastik yatağa oturan kiriş elemanlarda travers aralıkları, travers genişliği, sistemde kullanılacak ray profili, balast tabakasının yatak katsayısı gibi parametreler etkili olurken, balast tabakasının direkt modellendiği tasarımlarda Poisson oranının etkili olduğu görülmektedir. En fazla çökme ve moment değerlerinin teker yükü altında olduğu ancak bu değerlerin kabul edilebilir sınırları aşmadığı için modellerde kullanılan üstyapı bileşenlerine ait boyutların uygun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Üstyapı parametrelerinden travers temas yüzeyi alanı ve travers aralığı, ray atalet momenti ve balast yatak katsayısından daha çok balast basıncına etki etmektedir. Bu nedenle travers alanının artırılması ve travers aralığının azaltılması travers çökmesini yani balast sıkışmasını azaltır [14]. Travers aralığının değişimi ray çökmesini önemli derecede değiştirirken eğilme momentini çok az değiştirir. Travers tipinin ray çökmesine etkisi önemsiz olurken, eğilme momenti %10'a kadar değiştirmektedir [14].

Alman demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi 1.2-1.5 mm olarak belirlenmiştir [34]. Demiryolu üstyapı modelleri incelendiğinde SAP2000'de en gerçekçi sonuçların iki boyutlu elastik yatağa oturan ızgara kiriş modeli ile balast, travers ve rayın üç boyutlu olarak modellendiği sistem olduğu düşünülmektedir.

Balastlı hat için, statik ray çökmesini en çok etkileyen hat parametresi zemin-balast rijitliğidir. Hat rijitliği, yola ve taşıta gelen dinamik gerilme ve titreşimleri belirleyen en önemli parametre olduğu için dinamik analiz yapılarak en uygun değer belirlenmelidir. Hat yatağının rijitliği zemin tipine (zayıf zemin, iyi zemin, kaya ve beton zemin), balast malzemesine, balast tabaka yüksekliğine ve balastın temizliğine bağlı olarak değişmektedir [34].

Karmaşık demiryolu üstyapıları çeşitli yolcu ve yük katarları ile yüklenerek ray üzerinde birkaç noktadan etki ettirilen teker yüklerine göre çökme ve moment değerleri dengeleme vasıtasıyla bulunabilir. Tek bir teker yükü altında gelen moment değeri bir kat iken, iki teker yükü altındaki en büyük moment değeri 0.79 kat, üç teker yükü altındaki en büyük moment değeri ise 0.70 kat oranında değişmektedir [6].

Ek B'de verilen malzemelerin boyutlarına göre model sonuçları incelendiğinde; demiryolu üstyapısı elemanlarının uygulamada kullanılan özelliklerde olması, bu çalışmada modellemenin gerçekliğini de ortaya koyulmuştur.



## BÖLÜM 9. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; tren yükleri altında bulunan tek hatlı ve balastlı demiryolu üstyapısında meydana gelen çökmeler ve ray elemanında oluşan momentler, geleneksel yöntem olan zeminin bir yay olarak kabul edildiği Winkler yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilen farklı modellerle analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modeller, basit modelden (Tek boyutlu) karmaşık modele (İki boyutlu ızgara, iki ve üç boyutlu) doğru geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerde üstyapı şekli ve karmaşık yüklemeler basitleştirilirken sonlu elemanlar yönteminde ise bu karmaşık problemler çok kolay bir şekilde çözülebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile geliştirilen basit modeller üzerinde yapılan analizler sonucu üstyapıda oluşan çökme ve moment değerleri geleneksel yöntemde bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve hemen hemen aynı sonuçlar bulunmuştur (Model 1, 2 ve 3). Sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilen basit modellerin doğruluğuna karar verildikten sonra iki ve üç boyutlu modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen iki boyutlu ızgara modelin demiryolu üstyapısını ve yüklemeleri iki boyutta en iyi temsil eden model olduğu düşünülmektedir (Model 5). İki boyutlu ızgara model geliştirilerek üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur (Model 6). İki boyutlu ızgara model ile üç boyutlu modelin çökme ve ray elemanda oluşan moment değerleri yakın çıkmıştır. Üç boyutlu model ile iki boyutlu ızgara model arasındaki farkın üç boyutta tanımlanan travers uç noktalarında bulunan balast uzunluğu ve balast tabakasının şev eğiminin olduğu düşünülmektedir. Her iki yöntemle bulunan sonuçların yakın çıkması üç boyutlu modelin doğruluğunu göstermektedir.

Geliştirilmiş olan üç boyutlu modeli çok karmaşık demiryolu üstyapı çeşitlerine uygulamak mümkündür. Bunun için TCDD'nin günümüzde kullanmış olduğu Y32 boji sistemli demiryolu aracı baz alınarak üç boyutlu model analizi yapılmıştır (Model-7). Üç boyutlu modelde; malzeme özellikleri, tabaka kalınlıkları, enkesit şekli ve yüklemeler çok kolay bir şekilde tanımlanabilir ve analizler gerçekleştirilebilir.

Üç boyutlu sonlu eleman modelini ve zemin özelliklerini dikkate alan sonlu eleman modelleri arasında ayrıntılı bir çalışma yaparak, demiryolu üstyapı malzemelerinin boyutlandırılmasının yapılabileceği düşünülmektedir.

Demiryolu üstyapısında menset görevi gören traverslerin aralığını değiştirerek, farklı ray tiplerinde oluşacak gerilmelere göre optimum balast kalınlığının hesaplanabileceği de düşünülmektedir.

Ayrıca, ANSYS ve ABAQUS gibi diğer sonlu eleman yazılımları ile demiryolu üstyapısı modelleri oluşturularak, bu tezde kullanılan SAP2000 yazılımı ile hesaplanan sonuçlara göre karşılaştırmalar da yapılabilir.

## KAYNAKLAR

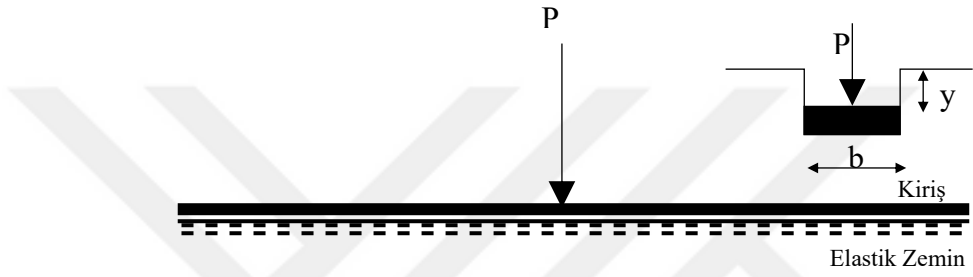
- [1] Evren, G., Demiryolu, ISBN 975-511-193-X, 7, 151-152, İstanbul, 2002.
- [2] Profillidis, V. A., Railway Engineering, 2nd ed., ISBN 978-0-7546-1279-7, 2, 36, 136, (2005-2007).
- [3] Güler, H., Demiryolu 1, Demiryolu Mühendisliği Ders Notları, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ulaştırma Anabilim Dalı, 2013, Sakarya.
- [4] [www.railway-technical.com/infrastructure](http://www.railway-technical.com/infrastructure), Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [5] Hidirov S., Güler H., Demiryolu Altyapısında Güvenirlik, Bulunabilirlik, Sürdürülebilirlik ve Emniyet (RAMS), 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017, ISITES2017 Baku – Azerbaijan.
- [6] Esveld, C., Modern Railway Track, 2nd ed., MRT Productions, 71, 74, 76, 234, (2001).
- [7] <https://goo.gl/QXSPBk>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [8] <https://goo.gl/83aP6D>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [9] <https://goo.gl/s9zyiX>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [10] Köse, H., Balastsız Üstyapıda Asfalt Ve Beton Taşıyıcı Tabakaların Teknik Ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2015.
- [11] <https://goo.gl/fP1uKh>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [12] <https://goo.gl/fkUi2K>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [13] <https://goo.gl/i9gyNE>, Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [14] Arlı, V., Demiryolu Mühendisliği, Genişletilmiş 2.Baskı, ISBN 978-605-60958, 29, 69, 74, 75, 77, 121, 139, 141, İstanbul, 2015.

- [15] Kozak, M., Beton Traversin Gelişimi ve Üretim Aşamasının Araştırılması, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:6 , No: 2, 2010 (73-81), e-ISSN:1305-631X.
- [16] [www.lankhorstrail.com/en/rail-sleepers](http://www.lankhorstrail.com/en/rail-sleepers), Erişim Tarihi: 04.01.2018.
- [17] Raylı Sistemler Teknolojisi, Balast ve Travers, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2013.
- [18] Türk Standardı, TS 2400 Demiryolu Rayları, 1.Baskı, ICS 45.080, Ankara, 1986.
- [19] Metro Tasarım Kriterleri, T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.
- [20] Türk Standardı, TS EN 13230, Demiryolu Uygulamaları, Demiryolu - Beton Traversler ve Mesnetler, Ankara, 2004.
- [21] Türk Standardı, TS EN 13481, Demiryolu Uygulamaları, Demiryolu - Bağlantı Sistemleri İçin Performans Özellikleri, Ankara, 2007.
- [22] Toksoy, S., Demiryolu Altyapı Güçlendirmesinde Geosentetiklerin Kullanımı, T.C. Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2017.
- [23] Türk Standardı, TS 7043 EN 13450, 1.Baskı, ICS, 91.100.15, Demiryolu Balastları İçin Agregalar, 2004, Ankara.
- [24] Ekim, O., Yüksek Hızlı Demiryolları İçin Geometrik Özellikler Ve Altyapı, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2007.
- [25] Yalçın, N. S., Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2006.
- [26] Güler, H., Demiryolu Üstyapı Hesaplarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı Lisansüstü Tezi, İstanbul, 1998.
- [27] Önalp A., Sert S., Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, ISBN 978 975 511 465 3, 205, 207, İstanbul, Birsen Yayınevi, 2010.

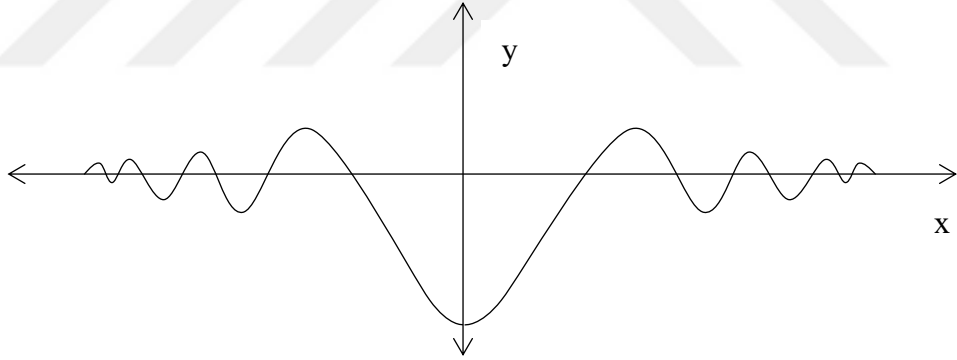
- [28] Bowles, J. E., Foundation Analysis and Design: McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA, 1996.
- [29] Computer and Structures, Inc., 2016, SAP2000 Ultimate 18.2.0 Structural Analysis Program.
- [30] Özmen, G., Orakdöğen, E., Darılmaz, K., Örneklerle SAP 2000 – V17, Birsen Yayınevi, 2015.
- [31] [www.muhandisbeyinler.net/boji-bogie-nedir](http://www.muhandisbeyinler.net/boji-bogie-nedir), Erişim Tarihi: 15.01.2018.
- [32] [www.elh.de/index.php?id=45](http://www.elh.de/index.php?id=45), Erişim Tarihi: 15.01.2018.
- [33] [www.tuvasas.com.tr/index.php?sayfa=urun\\_detay&urun\\_no=21](http://www.tuvasas.com.tr/index.php?sayfa=urun_detay&urun_no=21), Erişim Tarihi: 15.01.2018.
- [34] Şahin, O., Demiryolunda Hat Rijitliğinin ve Etkilerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2011.

## EKLER

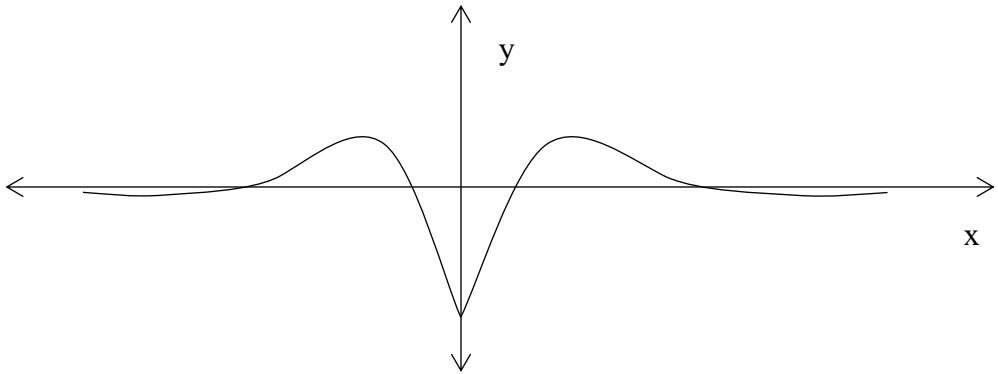
**EK A:** Elastik zemine oturan, ray ve traversin kiriş eleman olarak düşünüldüğü sistemin orta noktasına bir tekil yükün (P) etki ettirildiği durum, bu durum sonucunda meydana gelen şekil değişimi ve moment eğrileri.



Şekil A.1. Elastik zemine oturmuş sonsuz uzunluktaki kiriş



Şekil A.2. Çökme grafiği



Şekil A.3. Moment grafiği

**EK B:** Analitik ve nümerik analizlerde kullanılan modellere ait parametreler.

Tablo B.1. Model-1 için kullanılan parametreler

| Malzeme                        | Özellik                                   |
|--------------------------------|---|
| Travers boyu:                  | $I_t = 250 \text{ cm}$                    |
| Hat açıklığı:                  | $e = 150 \text{ cm}$                      |
| Elastisite modülü:             | $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$     |
| Yatak katsayısı:               | $k_s = 70 \text{ N/cm}^3$                 |
| Kiriş eleman boyu:             | $L_{\text{kiriş}} = 1000 \text{ cm}$      |
| Yük:                           | $P = 100 \text{ kN}$                      |
| Kiriş elemanın atalet momenti: | $I_{\text{kiriş}} = 4218.75 \text{ cm}^4$ |

Tablo B.2. Model-2 için kullanılan parametreler

| Malzeme                      | Özellik                             |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Eleman boyu:                 | $L=1000 \text{ cm}$                 |
| Elastisite modülü:           | $E=2.1 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$ |
| Yatak katsayısı:             | $k_s=70 \text{ N/cm}^3$             |
| Travers genişliği:           | $b_t=25 \text{ cm}$                 |
| Travers dış kenar uzunluğu:  | $t=50 \text{ cm}$                   |
| Travers aralıkları mesafesi: | $a=65 \text{ cm}$                   |
| Teker yükü:                  | $P=100 \text{ kN}$                  |
| Sonlu eleman uzunluğu:       | $L_{\text{sem}}=2 \text{ cm}$       |

Tablo B.3. Model-3 için kullanılan parametreler

| Malzeme                      | Özellik                             |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Eleman boyu:                 | $L=1000 \text{ cm}$                 |
| Elastisite modülü:           | $E=2.1 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$ |
| Yatak katsayısı:             | $C=70 \text{ N/cm}^3$               |
| Travers genişliği:           | $b_t=25 \text{ cm}$                 |
| Travers dış kenar uzunluğu:  | $t=50 \text{ cm}$                   |
| Travers aralıkları mesafesi: | $a=65 \text{ cm}$                   |
| Balat kalınlığı:             | $B_t=40 \text{ cm}$                 |
| Teker yükü:                  | $P=100 \text{ kN}$                  |
| Sonlu eleman uzunluğu:       | $L_{\text{sem}}=5 \text{ cm}$       |

Tablo B.4. Model-4 için kullanılan parametreler

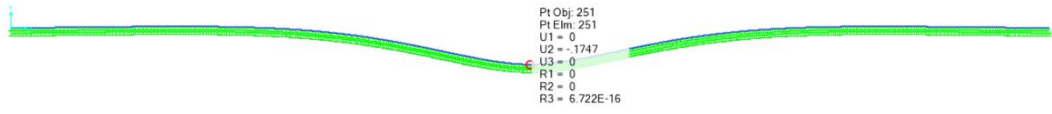
| Malzeme                        | Özellik                        |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Balast alt uzunluğu:           | $B_{Lalt}= 480$ cm             |
| Balast üst uzunluğu:           | $B_{Lüst}= 360$ cm             |
| Balat kalınlığı:               | $B_t=40$ cm                    |
| Yatak katsayısı:               | $C=70$ N/cm <sup>3</sup>       |
| Travers elastisite modülü:     | $E_t=1,000$ kN/cm <sup>2</sup> |
| Travers genişliği:             | $b_t=25$ cm                    |
| Travers yüksekliği:            | $S_t=15$ cm                    |
| Travers uzunluğu:              | $S_L=270$ cm                   |
| Teker yükü:                    | $P=100$ kN                     |
| Travers sonlu eleman uzunluğu: | $L_{sem}= 3$ cm                |
| Balast sonlu eleman uzunluğu:  | $L_{Alt-sem}=4$ cm             |
| Balast sonlu eleman uzunluğu:  | $L_{Üst-sem}=3$ cm             |
| Balast sonlu eleman uzunluğu:  | $L_{Yatay-sem}=4$ cm           |

Tablo B.5. Model-5 için kullanılan parametreler

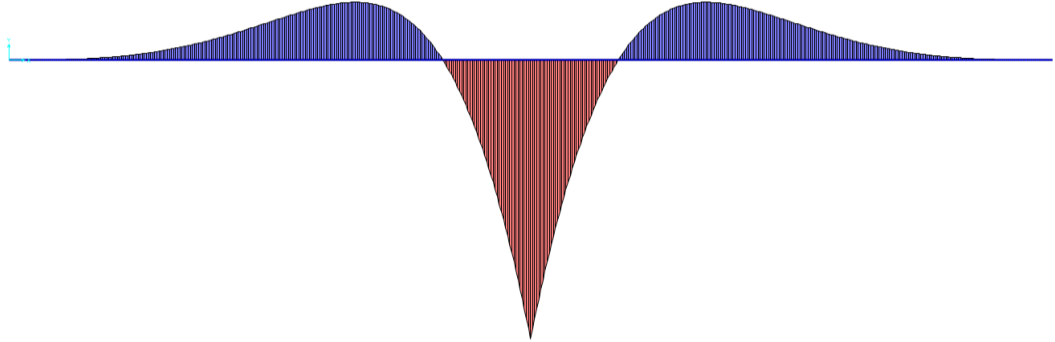
| Malzeme                      | Özellik                                |
|------------------------------|--|
| Ray boyu:                    | $L=1000$ cm                            |
| Elastisite modülü:           | $E=2.1 \times 10^4$ kN/cm <sup>2</sup> |
| Hat genişliği:               | $e=150$ cm                             |
| Ray genişliği:               | $r_b=15$ cm                            |
| Ray yüksekliği:              | $r_t=15$ cm                            |
| Travers uzunluğu:            | $S_L=270$ cm                           |
| Travers elastisite modülü:   | $E_t=1,000$ kN/cm <sup>2</sup>         |
| Travers genişliği:           | $b_t=25$ cm                            |
| Travers yüksekliği:          | $s_t=15$ cm                            |
| Travers dış kenar uzunluğu:  | $t=50$ cm                              |
| Travers aralıkları mesafesi: | $a=64$ cm                              |
| Yatak katsayısı:             | $k_s=70$ N/cm <sup>3</sup>             |
| Poisson oranı:               | $\mu=0,35$                             |
| Etki yükü:                   | $P=100$ kN                             |
| Sonlu eleman uzunluğu:       | $L_{sem}=4$ cm                         |

**EK C:** SAP2000’de oluşturulmuş modellerin (Model-2, Model-3, Model-4, Model-5, Model-6, Model-7) yer değiştirme ve moment eğrileri ile hesap sonuçları.

Model-2: Elastik yatağa oturan kiriş elemana ait SAP2000’de oluşturulmuş modelin yer değiştirme ve moment eğrileri aşağıda gösterilmiştir. Yer değiştirme değeri 0.1747 cm, moment değeri 2,671.24 kNcm olarak bulunmuştur.



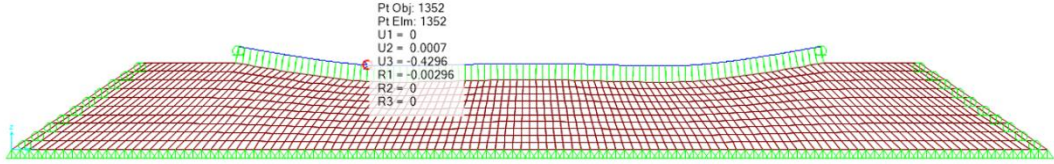
Şekil C.1. Model-2'e ait yer değiştirme eğrisi



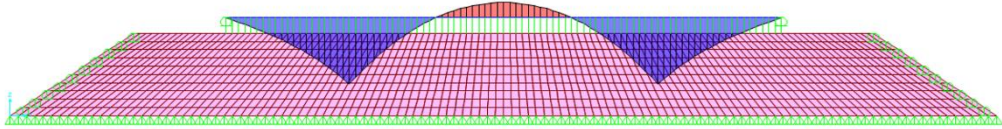
Şekil C.2. Model-2'e ait moment eğrisi



Model-4: Balast tabakası enine düzlem, ray ve travers kısa kiriş elemana ait SAP2000'de oluşturulmuş modelin yer değiştirme ve moment eğrileri aşağıda gösterilmiştir. Yer değiştirme değeri 0.4296 cm, moment değeri 1,613.64 kNcm olarak bulunmuştur.

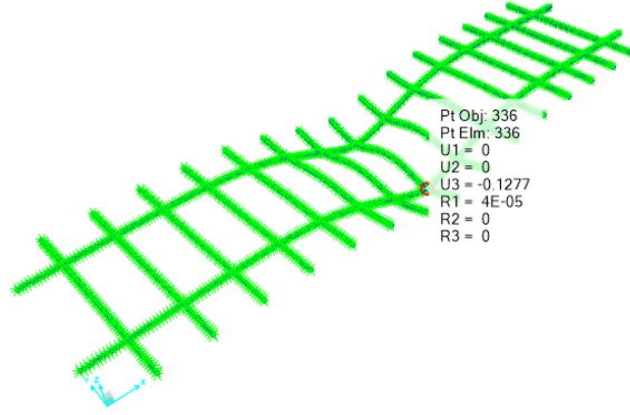


Şekil C.5. Model-4'e ait yer değiştirme eğrisi

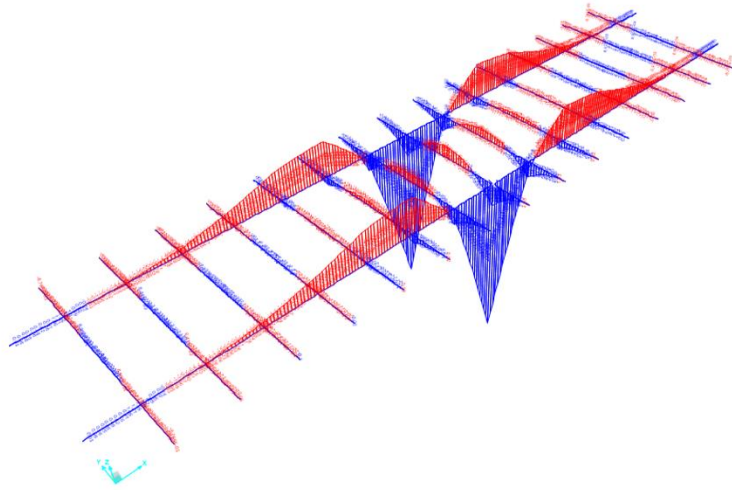


Şekil C.6. Model-4'e ait moment eğrisi

Model-5: Elastik yatağa oturan ızgara kiriş elemana ait SAP2000'de oluşturulmuş modelin yer değiştirme ve moment eğrileri aşağıda gösterilmiştir. Yer değiştirme değeri 0.1277 cm, moment değeri 2,265.19 kNcm olarak bulunmuştur.

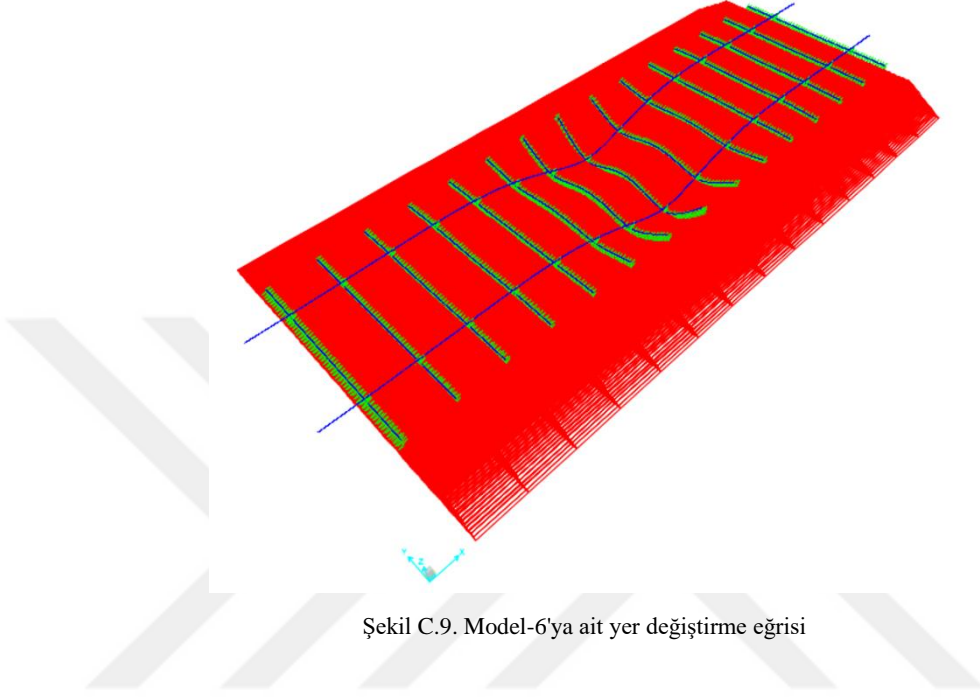


Şekil C.7. Model-5'e ait yer değiştirme eğrisi

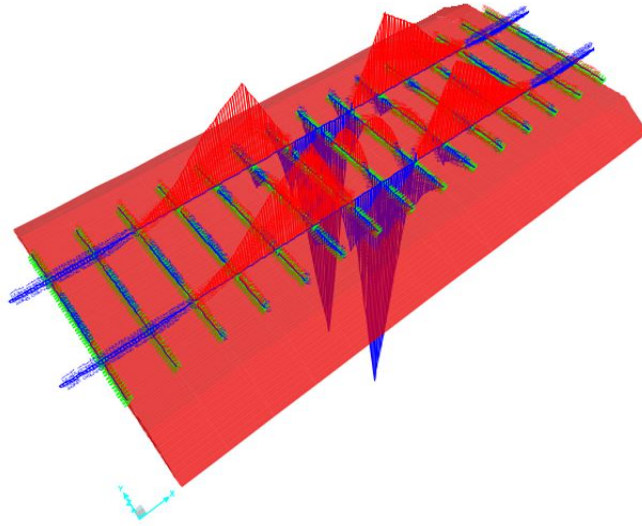


Şekil C.8. Model-5'e ait moment eğrisi

Model-6: Üç boyutlu demiryolu üstyapısı model sistemine ait SAP2000'de oluşturulmuş modelin yer değiştirme ve moment eğrileri aşağıda gösterilmiştir. Yer değiştirme değeri 0.1032 cm, moment değeri 1,897.44 kNcm olarak bulunmuştur.

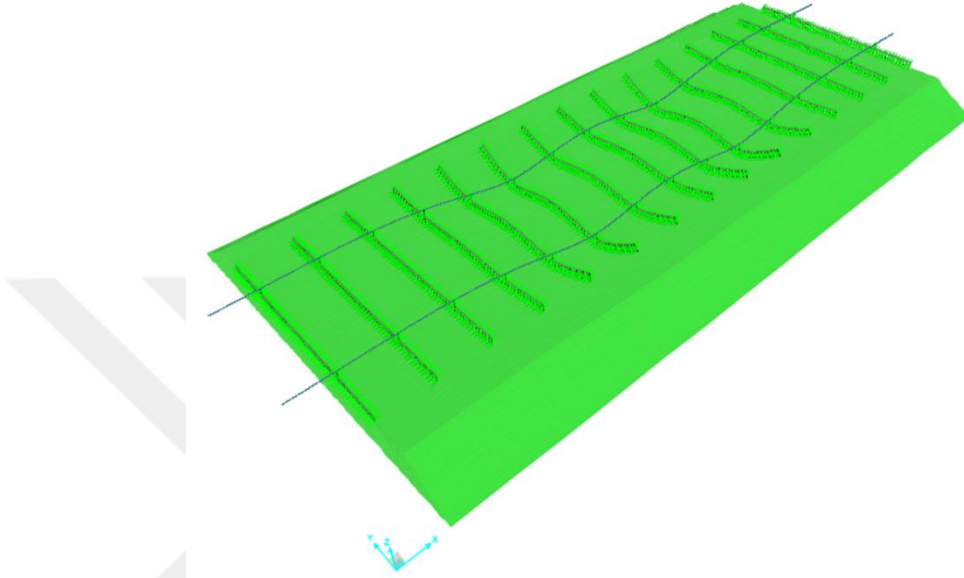


Şekil C.9. Model-6'ya ait yer değiştirme eğrisi

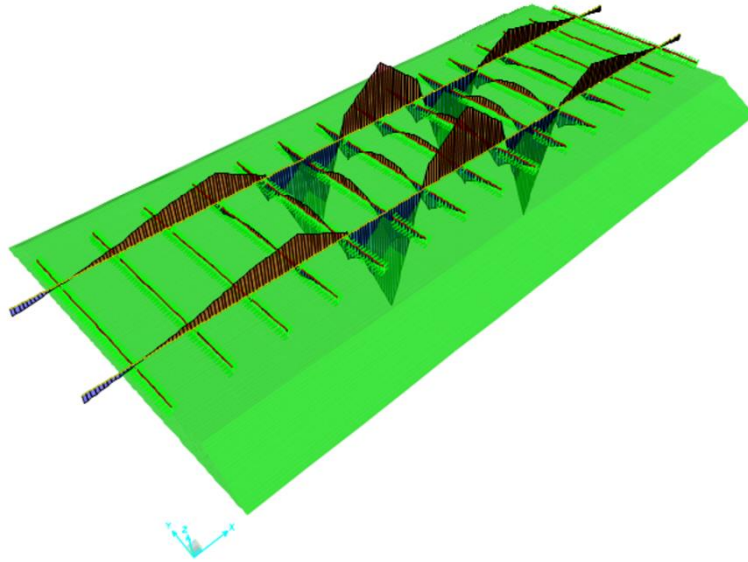


Şekil C.10. Model-6'ya ait moment eğrisi

Model-7: Üç boyutlu ve Y32 boji sistemine ait aks yükünün (dört teker yükü) etki ettirildiği demiryolu üstyapısı model sistemine ait SAP2000’de oluşturulmuş modelin yer değiştirme ve moment eğrileri aşağıda gösterilmiştir. Yer değiştirme değeri 0.0725 cm, moment değeri 1,485.93 kNcm olarak bulunmuştur.



Şekil C.11. Model-7'ye ait yer değiştirme eğrisi



Şekil C.12. Model-7'ye ait moment eğrisi

## ÖZGEÇMİŞ

Emir Yalçın Aksop, 12.01.1988'de Ağrı'da doğdu. İlk eğitimini Tekirdağ'da, orta ve lise eğitimini İzmit'te tamamladı. 2005 yılında İzmit Lisesi'nden mezun oldu. 2006 yılında üniversite hayatına başladı. 2007 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Zonguldak Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü'nde bölüm birincisi oldu. Yatay geçiş ile geldiği Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu'ndan bölüm birincisi olarak 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne dikey geçiş yaptı ve 2012 yılında buradan mezun oldu. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında tezi ile ilgili makale sunumunu Azerbaycan'ın Bakü şehrinde Mimarlık ve İnşaat Üniversitesi'nde yaptı. 2012, 2013 ve 2014 yıllarının yaz dönemlerinde Almanya'da ulaştırma üzerine sertifikalı yazılım eğitimleri aldı. 2013 yılında Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Dairesi Başkanlığı'nda iş hayatına başladı. 2014–2017 yılları arasında Kocaeli Metro Projesi, Gebze-Darica Metro Projesi ve İzmit Tramvay Projesi'nde kontrol görevliliğini üstlendi. Halen Kocaeli Büyükşehir Belediyesi'nde Toplu Taşıma Dairesi Başkanlığı'nda inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır.