

Demiryolu Altyapı ve Üstyapı Hesaplarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi ve Hat Bileşenlerinin Boyutlandırılması

¹Emir Yalçın Aksop ve ^{*2}Hakan Güler

¹Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

^{*2}Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

Özet:

Bu çalışmada, balast tabakası veya beton plak 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 ve PLAXIS programları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar geleneksel (Winkler Elastik Yatak Modeli) yöntemler ile de 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 karmaşık demiryolu üstyapıları çeşitli yolcu ve yük katarları ile yüklenerek analizler yapılmış, demiryolu üstyapısı ve altyapısını oluşturan bileşenlerin boyutlandırılması yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu hattı, Balastlı demiryolu hattı, Balastsız demiryolu hattı ve Sonlu elemanlar.

Analysing Railway Substructure and Superstructure by Using Finite Element Methods and Dimensioning of Track Components

¹Emir Yalçın Aksop ve ^{*2}Hakan Güler

¹Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Sakarya

^{*2}Sakarya University Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Sakarya

Abstract:

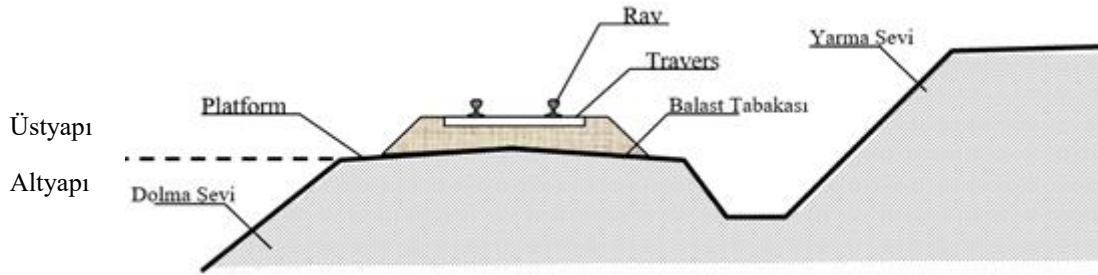
In this study, rails and sleepers structure which are laid on ballast layer or concrete plate modelled and solved as two (2D) and three dimensional (3D) models using finite element methods as a beam on an elastic foundation. SAP2000 and PLAXIS programs were used as the finite element program. The system is also modelled and solved with conventional (Winkler's Model of Elastic Foundation) methods and the results were compared with each other. The results of displacements and moments along the beam were nearly found similar in both methods. The ballast layer modelled as a spring model, a plane element (2D) and a solid element (3D) in finite element methods. The modules of subgrade reaction were used in the spring model and the stress-strain modules were used in the plane and solid elements. After testing the accuracy of both conventional and finite element models, the complex railway superstructures were loaded and analysed under various passenger and freight trains. The superstructure and substructure components were dimensioned on the base of analysis results and successful results were obtained.

Key words: Railway track, Ballasted railway track, Ballastless railway track and Finite elements.

1. Giriş:

Konvansiyonel demiryolu altyapı ve üstyapı sistemi sırasıyla doğal zemin, toprak gövde, alt balast, balast, travers, bağlantı malzemesi ve raylardan oluşmakta ve balastlı üstyapı olarak isimlendirilmektedir. Doğal Zemin, toprak gövde ve alt balastdan oluşan yapıya demiryolu altyapısı adı verilmektedir. Balast, travers, bağlantı malzemesi ve raylardan oluşan yapıya ise üstyapı adı verilmektedir. Balast tabakasının yerine donatılı beton plak kullanılması durumunda sistem balastsız üstyapı ya da plak üstyapı olarak isimlendirilmektedir. Balastsız üstyapılarda raylar beton plaklar üzerine konur ya da plaklar içine gömülü olabilir. Balastlı ve balastsız üstyapılar hem şehiriçi ham de şehirlerarası demiryolu hatlarında kullanılmaktadır.

Bir demiryolunun oluşturulabilmesi için, yüzeyde zeminin üstyapıya uygun hale getirilmesi gereklidir. Kazı, dolgu, zemin iyileştirme gibi işlemler sonrası oluşturulan yapıya demiryolunun altyapısı denir. Altyapı üzerine oturtulacak balast, travers, raylar demiryolunun üstyapısı ile ilgilidir. Bir demiryolu yapısını oluşturan enkesitteki tüm elemanlar aşağıdaki Şekil 1’de gösterilmiştir. Demiryolu üstyapısı; raylar, traversler, bağlantı malzemeleri, balast tabakası ve diğer üstyapı bileşenlerinden oluşmaktadır. Demiryolu altyapısı ise alt balast tabakası ve toprak gövdeden oluşmaktadır.



Şekil 1. Demiryolu altyapı ve üstyapı elemanları

Elastik yatağa oturan kirişlerin klasik yöntemlerle yüklemeler altında deplasmanlarını incelemek mümkündür. Sonlu elemanlar yönteminin sunduğu avantajlar sayesinde, klasik modele nazaran çok daha gerçekçi modeller kurulabilmektedir. Sistemi oluşturan ray, travers ve balastlardan oluşan yapı ayrı ayrı elemanlar olarak düşünülerek her birine ait deformasyon değerleri hesaplanabilmektedir. Güçlü bir program ve akıllıca bir modelleme sistemi gerçeğe yakın çözümü için gereklidir. Bu çalışmada, balast tabakası üzerine oturan ray-traverslerden oluşan yapı elastik yatağa oturan kiriş olarak sonlu elemanlar yöntemiyle ve klasik (Winkler) yöntemle çözülmüştür.

2. Malzemeler ve Metot

Demiryolu araçlarından gelen yükler, araç tekerlekleri ile rayların yüzeylerine aktarılır. Raylar, kılavuz görevi görerek araçların hareket etmesini sağlar. Bu hareket mesnet noktalarını oluşturan traverslerle desteklenir. Traversler, raylara gelen yükleri yayar ve bir alt kısma yani balast malzemesine yükleri aktarır. Balastlarda, üzerine gelen yükleri sönümleyerek zemine aktarır. Demiryolu modellemesinde ray, travers ve balastlardan oluşan yapı ayrı ayrı elemanlar olarak tasarlanmaktadır. Klasik (analitik) yöntem ve nümerik (sonlu elemanlar-FEM) yöntemler ile demiryolları modellenebilmektedir. Klasik yöntem ile model kurulurken, zemin elastik yatak olarak düşünülür. Nümerik yöntemlerde yani sonlu elemanlar yönteminde (FEM) ise elastik yatağa karşılık gelen zemin yatak katsayıları yay elemanları ile sisteme bağlanır. Yine nümerik yöntemde ray, travers ve balastlar belli uzunlukta sonlu parçalara ayrılırlar ve düğüm noktalarından birbirlerine birleştirilir.

Klasik (analitik – Winkler) yöntem ile çözüm metodu detaylıca 2.1.’ nci başlık altında açıklanırken,

demiryolu üstyapı hesabına ait tüm yöntemler model numaralarına göre aşağıda sıralanmıştır. Nümerik yöntemlerde demiryolu sistemi enine ve boyuna yönde olmak üzere modellenmiştir. Böylelikle her iki yönde de oluşan ray çökmeleri ile momentleri kendi içinde karşılaştırılmıştır. Daha sonra sistemin geneli klasik yöntem ile bulunan sonuçlarla irdelenmiştir.

Demiryolu üstyapı analizlerde kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

- Model-1: Winkler (Klasik, analitik) yöntemi,
- Model-2: Elastik yatağa oturan kiriş eleman (FEM),
- Model-3: Balast tabakası boyuna düzlem, ray ve travers kiriş eleman (FEM),
- Model-4: Balast tabakası enine düzlem, ray ve travers kısa kiriş eleman (FEM),
- Model-5: Elastik yatağa oturan ızgara kiriş eleman (FEM),
- Model-6: Üç boyutlu demiryolu üstyapı model sistemi (FEM),
- Model-7: Balastlı demiryolu üstyapısının zemin tabakalı iki boyutlu modeli (FEM).

Demiryolu hattının tipine bağlı olarak (geleneksel, hızlı, şehiriçi vb.) kullanılan üstyapı ve altyapı malzemelerinin özellikleri değişmektedir. Analitik ve nümerik modellerin analizlerinde kullanılmak üzere bu çalışmada kullanılan ray, travers ve balast malzemelerin özellikleri ve boyutları Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri ve boyutları

Malzeme	Özellik	Malzeme	Özellik
Ray tipi	S49	Travers kenar uzunluğu	50 cm
Ray atalet momenti	1,816 cm ⁴	Travers aralığı	65 cm
Ray elastisite modülü	210,000 MPa	Travers elastisite modülü	10,000 MPa
Ray Poisson oranı	0.3	Balast derinliği	40 cm
Travers boyu	240 cm	Balast yatak katsayısı	70 N/cm ³
Travers genişliği	25 cm	Balast Poisson oranı	0.35
Travers yüksekliği	25 cm	Teker yükü	100 kN

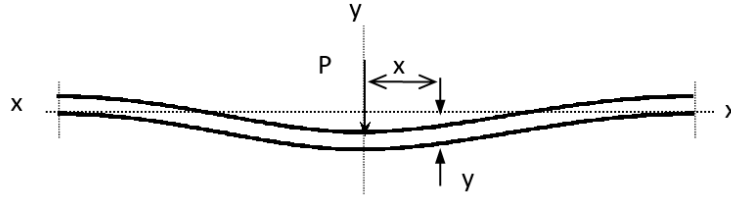
Üstyapıyı oluşturan malzemelerin yukarıda verilen özellikleri dikkate alınarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Balast tabakasının doğal zemine oturduğu kesimler sabit mesnet olarak alınmıştır. Sistemin sol ve sağ tarafları düşeyde kayıcı mesnet olarak alınmıştır. Ray ve traverslerin beraber düşünüldüğü fiktif kiriş genişliği Winkler formülü yardımıyla belirlenmiştir.

2.1.Elastik Yatağa Oturan Kirişlerin Klasik Yöntemle Çözümü

Herhangi bir yükleme altında, b genişliğinde elastik bir kirişin Winkler yarı uzayı üzerine mesnetlenmesi durumunda, eğilme eğrisinin diferansiyel denklemi ile eğilme momentinin diferansiyel denklemi birbirine bağlıdır. Bu iki bağıntıdan σ_s taban basıncına bağlı olarak y çökmesi için, dördüncü dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir. Winkler uzayı üzerine oturan tekil bir yük ile yüklenmiş elastik bir temel kirişi Şekil 2 de gösterilmiştir. Tekil bir yük etkisindeki elastik bir kiriş için denklemin sabit teriminin dördüncü dereceden kökü elastik uzunluk L olarak bilinir. Uzunluğu l olan bir elastik kirişte $l/L \geq 2\pi$ ise elastik kiriş, sonsuz uzunlukta kiriş olarak yorumlanır. Elastik zemine oturan kirişlerin elastik uzunlukları Eşitlik 1 ile hesaplanır [1].

$$L = 4 \sqrt{\frac{4EI}{k_s b}} \quad (1)$$

Burada; L: Elastik uzunluk (m), E: Kirişin elastisite modülü (kN/cm²), k_s: Yatak katsayısı (kN/cm³), b: Kiriş genişliği (cm).



Şekil 2. Elastik yatağa oturmuş kiriş

Tablo 2. Elastik Yatağa Oturmuş Sonsuz Uzunluktaki Bir Kirişte Bazı Yük Durumları İçin Çözüm Denklemler

Kiriş ortasında tekil yük	Kiriş ortasında moment
$y = \frac{P\lambda}{2k_s b} A$	$y = \frac{M_0\lambda^2}{k_s b} B$
$\theta = \frac{-P\lambda^2}{k_s b} B$	$\theta = \frac{M_0\lambda^3}{k_s b} C$
$M = \frac{P}{4\lambda} C$	$M = \frac{M_0}{2} D$
$Q = \frac{-P}{2} D$	$Q = \frac{-M_0}{2} A$

Tablo 2’de; y: Çökme (cm), θ : Dönme (Derece), M: Moment (kNcm), Q: Kesme kuvveti (kN).

Yukarıdaki çözüm denklemlerinde kullanılan λ , A, B, C ve D katsayılarına ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_s b}{4EI}} \quad (2)$$

$$A = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (3)$$

$$B = e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (4)$$

$$C = e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \quad (5)$$

$$D = e^{-\lambda x} \cos \lambda x \quad (6)$$

2.2.Elastik Yatağa Oturan Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellendirilmesi

Elastik bir yapının başka bir elastik yapı ile desteklendiği durumlarda, gerilme analizinin sadece bir tek yapı için hesaplanması yeterlidir. Bu durumda ilk yapının üzerinde bulunan ikinci yapının etkisi modellendirilir. Balast tabakası üzerinde bulunan bir ray, temel tabakası üzerine oturmuş yol kaplaması bu tür yapılara örnek olarak verilebilir. Bu gibi problemlerde ray ve yol kaplaması analiz edilmeli, alt yapılarının ise sadece etkileri incelenmelidir. Demiryolunun boyuna yönündeki analizlerinde, travers ve rayların birlikte düşünüldüğü elastik yatak üzerine oturan sonsuz kiriş bağıntıları kullanılmaktadır [1].

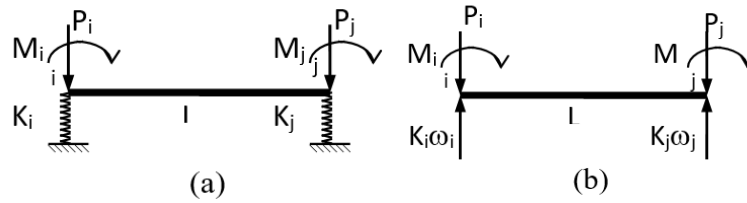
Travers ve raydan oluşan sonsuz uzunluktaki demiryolu üstyapısı, aşağıdaki bağıntı ile genişliği b olan sonsuz uzunluktaki bir fiktif kirişe dönüştürülür [1]:

$$b = \frac{2tb_t}{a} \quad (7)$$

Sonlu elemanlar yöntem analizlerinde, elastik yatağa oturan bir kirişin sonlu eleman analizinden faydalanılır. Elastik yatak üzerine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş düğüm noktalarından yaylar üzerine oturtulur. Yay katsayılarını hesaplamak için, elastik yatağın yatak katsayısı ve fiktif kiriş genişliğinden hesap yapılır. Yay katsayılarının tesbit edilmesinde aşağıdaki bağıntıdan yararlanılmaktadır [1]:

$$K_i = k_s b \frac{(L_i + L_j)}{2} \quad (8)$$

Balast tabakası yerine kabul edilen ve yaylar üzerine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş, düğüm noktalarına etki eden kuvvet ve momentlerin etkisiyle düşey yönde ω kadar yer değiştirme yapar. Kiriş altında bulunan yaylar, yer değiştirmelere bağlı olarak zıt yönde ωk kadar bir kuvvet uygularlar (Şekil 3) [1].



Şekil 3. (a) Yaylar üzerine oturmuş elastik basit bir kiriş. (b) Elastik basit bir kirişin düğüm noktalarına etki eden kuvvetler.

Demiryolu üstyapısına ait balastın düzlem eleman olarak hesapları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilebilmektedir. Sonlu elemanlar modelinde balast tabakası düzlem eleman, balast tabakasının üzerindeki ray ve traversler ise kiriş eleman olarak alınmıştır. Düzlem eleman olarak modellenen balast tabakasının yatak katsayısı Vesic tarafından geliştirilen bir bağıntı ile elastisite modülüne dönüştürülür [1].

$$c = \frac{E_b}{b(1-\mu^2)} \quad (9)$$

Yukarıda eşitlikler kullanılarak fiktif kiriş genişliği ve balastın elastisite modülü hesaplanarak Tablo 2' deki Winkler formülleri yardımı ile analitik hesap yapılmaktadır.

3. Sayısal Uygulama

Demiryolu üstyapısının analitik yöntemi, Winkler'in elastik yatağa oturan kiriş metodu kullanılarak sayısal uygulaması yapılmıştır. Uygulamada elastik yatağa oturan basit kiriş eleman üzerinden klasik yöntemle hesaplama yapılmıştır. Balast tabakası elastik yatak olarak kabul edilmiş, ray ve traversler ise basit kiriş olarak ele alınmıştır. Sonlu eleman (nümerik yöntemi) modelinde zemin ile balastın yay olarak çalıştığı sisteme ray ve traversin oluşturduğu kiriş eleman mesnetler aracılığı ile bağlanmıştır. Klasik yöntem ile bulunan sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ardından nümerik yöntemler geliştirilerek farklı modeller oluşturulmuştur. Daha sonra tüm modellerdeki çökme ve moment değerleri hesaplanmıştır.

3.1. Winkler yöntemi ile analitik hesap

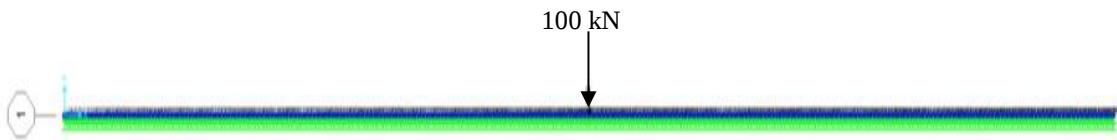
Elastik zemine oturan basit kiriş modeli olarak demiryolu üstyapı hesabında Tablo 1’deki malzeme parametreleri kullanılmıştır. Klasik yöntem (Winkler) ile hesaplamada öncelikle ray ve traversin etkileşimde olduğu fiktif kiriş genişliği Eşitlik 7 ile hesaplanmıştır. Daha sonra elastik zemine oturan kirişin elastik uzunluğu Eşitlik 1 ile bulunmuştur. Tablo 2’deki Winkler’e ait eşitlikler ile sisteme ait çökme ve moment değerleri hesaplanmıştır. Analitik hesap sonuçlarına göre yük altındaki çökme değeri 0.1734 cm, moment değeri ise 2,677.78 kNcm olarak elde edilmiştir.

3.2. Sap2000 programı ile nümerik hesap

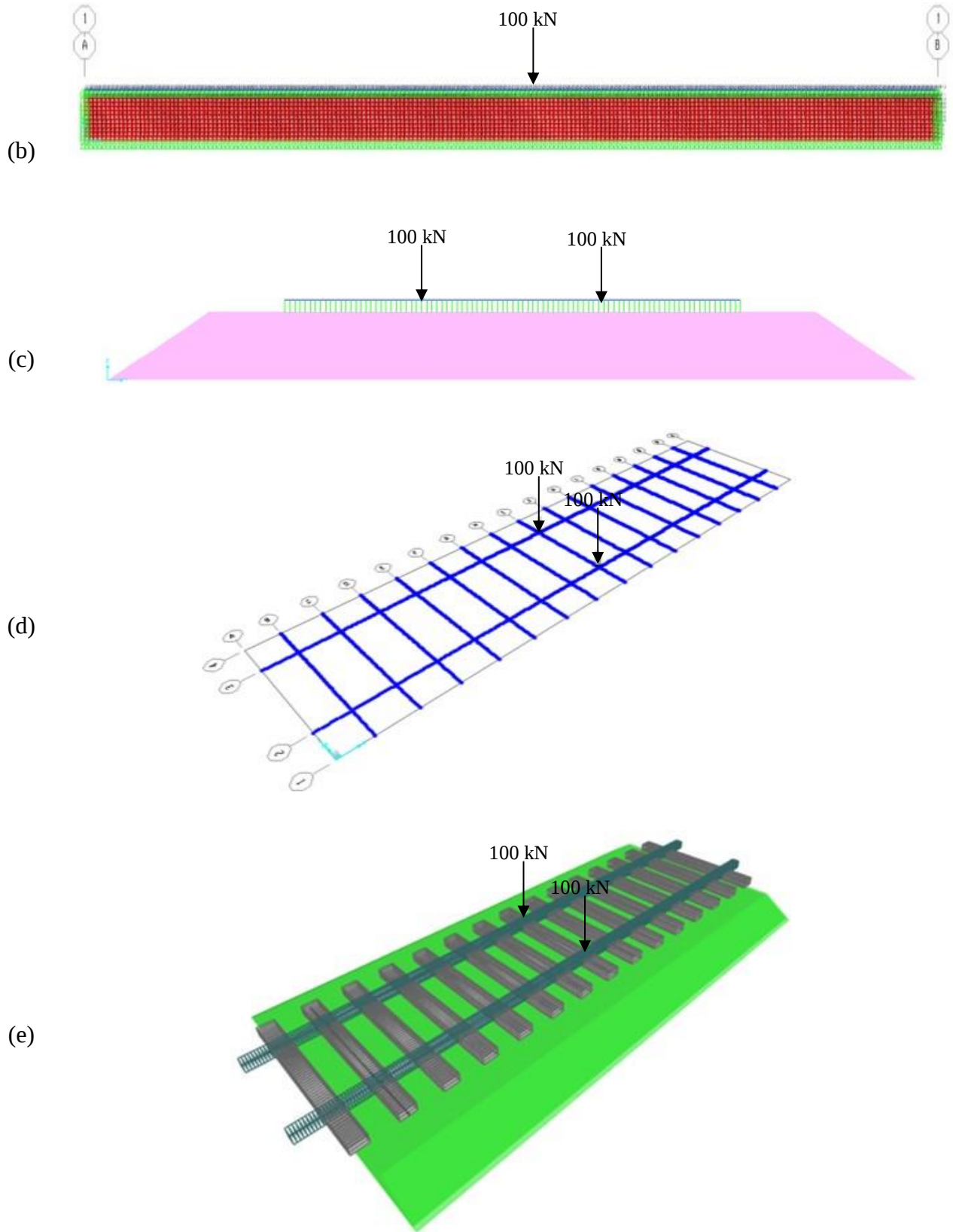
Winkler yönteminin nümerik olarak modellenmesi Şekil 4a’da elastik yatağa oturan kiriş modeli olarak gösterilmektedir. Hesaplarda S49 rayın kesit özellikleri sonlu elemanlar yönteminde tanımlanmıştır. Kiriş genişliği için Eşitlik 7 ile hesaplanan fiktif genişlik değeri, kiriş elemanın boyu ise 1,000 cm alınmıştır. Kiriş elemanı boyu 2 cm uzunluğunda olacak şekilde 500 sonlu eleman parçalarına bölünmüştür. Her parçada oluşan düğüm noktaları elastik zemine oturduğu için bu düğüm noktalarından kiriş eleman, yay elemanlar aracılığı ile bağlanmıştır. Balast tabakasına ait yatak katsayısı, fiktif kiriş genişliğine bağlı olarak yay katsayısına dönüştürülmüştür. Kirişin başı ve sonundaki düğüm noktalarına bu yay katsayısının yarısı değeri etki ettirilmiş, geri kalan noktalara yay katsayısı olduğu gibi aktarılmıştır.

Günümüzde tipik aks yükleri yüksek hızlı trenlerde 20 ton, karışık hatlarda 22.5 ton ve ağır yük hatlarında 36 ton dolayındadır [2]. Ray ve travers ağırlıklarına göre üstyapının dayanabileceği aks yükleri, Uluslararası Demiryolu Birliği (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 [3]. Bu çalışmada, 20 tonluk aks yük kullanılmıştır. Aks yükünden tekerlere gelen yükler, 10 tonluk yük olarak dağıtılır. Şekil 4a’da gösterildiği gibi demiryolu aracından tekerlere gelen ve raya aktarılan 100 kN’luk yük, kiriş elemanın tam orta noktasına düşey yönde etki ettirilmiştir. Kiriş eleman üzerinde oluşan 501 adet düğüm noktasının orta noktası olan 251’nci düğüm noktasında oluşan çökme değeri 0.1747 cm, moment değeri ise 2,671.24 kNcm olarak hesaplanmıştır.

Elastik yatağa oturan kiriş modeli ile birlikte Sap2000 ile oluşturulan diğer modeller aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekil 4b modelinde balast tabakası düzlem eleman olarak modellendiği için, balast tabakasına ait elastisite değeri Eşitlik 9 kullanılarak bulunmuştur. Şekil 4c’de düzlem balast tabakasının enine yönü modellenmiştir. Şekil 4d ile modellenen ızgara sistem elastik yatağa oturtulmuştur. Şekil 4e’de ise ızgara sistem modeli geliştirilerek balast tabakasına oturtulmuş ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Bulunan çökme ve moment değerleri Bulgular bölümde karşılaştırma tablosunda (Tablo 4) verilmiştir.



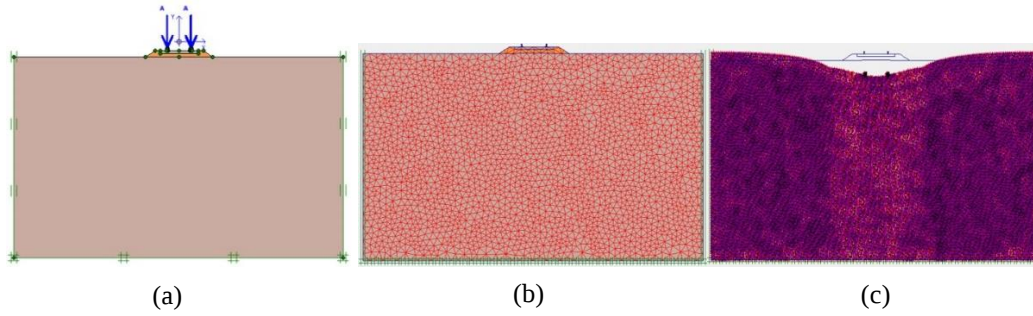
(a)



Şekil 4. (a) Model 2. (b) Model 3. (c) Model 4. (d) Model 5. (e) Model 6.

3.3. Zemin özelliklerinin dikkate alındığı iki boyutlu nümerik hesap

Demiryolu sistemine ait sonlu elemanlar modellerinden enine yöndeki üstyapı kesiti iki boyutlu olarak Plaxis yazılımı ile modellenmiştir. Enine yönde düzlem olarak oluşturulan modelde, balast tabakasının elastisite değeri Eşitlik 9 ile hesaplanmıştır. Balast altındaki zemin yapısına ait model parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Analiz sonucu teker yükünün etki ettiği noktalar altında oluşan çökme değeri 0.0306 cm olarak elde edilmiştir. Plaxis ile oluşturulan demiryolu yapısı modeline ait analiz aşamaları Şekil 5’ de verilmiştir.



Şekil 5. (a) Demiryolu modeli. (b) Modelin sonlu parçalara ayrılması. (c) Modelin analizi

Tablo 3. Plaxis modelinde kullanılan zemin özellikleri

Zemin	Veriler
Malzeme Modeli	Mohr - Coulomb
Malzeme Tipi	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlığı	17.00 kN/m ³
Doygun Birim Hacim Ağırlığı	20.00 kN/m ³
Elastisite Modülü	4x10 ⁴ kN/m ²

4. 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 ile ortaya çıkan çökme değerinin, diğer modellere göre bir miktar yüksek olmasına karşın, moment değeri olarak en düşük sonucu vermektedir. Model sistemi daha gerçekçi olarak zemin ile birlikte modellendiğinde (Model-7) ise oluşan deformasyonun oldukça düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Bu modellere analiz sonuçlarının karşılaştırılmış hali Tablo 4’ de verilmiştir.

Tablo 4. 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: Balastlı demiryolu üstyapısının zemin tabakalı modeli	0.0306	-

UIC 60 rayı kullanılarak üstyapı analizi yapılan bir çalışmada [4]; Klasik 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 Klasik yöntemle 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 (Klasik, analitik) yöntemiyle hem de sonlu elemanlar (nümerik) yöntemleriyle çözülebilmektedirler. 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 ve altyapı bileşenlerinin boyutlandırılmasının 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 [2]. 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 [2].

Alman demiryollarında yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi 1.2-1.5 mm olarak belirlenmiştir [5]. 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. Zemin tabakasının dahil olduğu Plaxis modeli için bulunan deformasyon değeri her ne kadar kabul edilebilir değerler içinde olsa da, zemin özelliklerinin balast çökmesine olan etkisi ayrı bir konu olarak incelenmelidir.

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 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 [5].

Karmaşık demiryolu üstyapıları çeşitli yolcu ve yük katarları ile yüklenerek ray üzerinde birkaç noktadan etki ettirilen teker yüklerine göre çökme ve moment değerleri superpoze 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].

Tablo 1' de verilen malzemelerin boyutlarına göre model sonuçları incelendiğinde; demiryolu üstyapısı elemanlarının uygulamada kullanılan özelliklerde olması, bu çalışmada boyutlandırmanın gerçekliğini de ortaya koyulmuştur.

5. Sonuç

Bu çalışmada; tren yükleri altında bulunan tek hatlı ve balastlı demiryolu üstyapısında meydana gelen çökmeler ve ray elemanda oluşan momentler, geleneksel yöntemler 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 ballast uzunluğu ve ballast 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. Üç boyutlu modelde; malzeme özellikleri, tabaka kalınlıkları, enkesit şekli ve yüklemeler çok kolay bir şekilde tanımlanabilir ve analizler gerçekleştirilebilir. Zemin tabakasının tanımlanabildiği iki boyutlu sonlu eleman modelinde (Model 7) deformasyon değeri üç boyutlu modelde bulunan deformasyon değerinden farklı çıkmıştır. Bu farklılığın, boyut farklılığından ve üç boyutlu sonlu eleman modelinde zemin özelliklerinin tam olarak tanımlanamadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve zemin özelliklerini dikkate alan sonlu eleman modelleri arasında ayrıntılı bir çalışma yapılarak doğru bir modellemenin yapılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Güler, H., (1998), “Demiryolu Üstyapı Hesaplarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı Yüksek lisans Tezi, İstanbul.
- [2] Arlı V., Demiryolu Mühendisliği, Genişletilmiş 2.Baskı, ISBN 978-605-60958, pp 29, pp 121, pp 139, (2015).
- [3] PROFILLIDIS, V. A., Railway Engineering, 2nd ed., ISBN 978-0-7546-1279-78, pp 36, (2007).
- [4] Yalçın, N. S., (2006), “Demiryolu Üstyapısının Dinamik Analizi”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı Yüksek lisans Tezi, İstanbul.
- [5] Şahin, O., (2011), “Demiryolunda Hat Rijitliğinin ve Etkilerinin İncelenmesi” İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı Yüksek lisans Tezi, İstanbul.
- [6] ESVELD, C., Modern Railway Track, 2nd ed., MRT Productions, pp 76, (2001).