



**YÜKSEK HIZLI HAT DEMİRYOLLARINDA GRANÜLER ALT BALAST
TABAKASI YERİNE BİTÜMLÜ KARIŞIM KULLANIMININ SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tugçe AKILLI TÖRER

Danışman

Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK HIZLI HAT DEMİRYOLLARINDA GRANÜLER ALT
BALAST TABAKASI YERİNE BİTÜMLÜ KARIŞIM
KULLANIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ARAŞTIRILMASI**

Tugçe AKILLI TÖRER

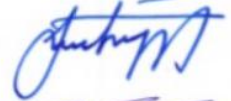
Danışman
Doç. Dr. Cahit GÜNER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Tugçe AKILLI TÖRER tarafından hazırlanan “**Yüksek Hızlı Hat Demiryollarında Altbalast Tabakası Yerine Bitümlü Karışım Kullanımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Araştırılması** ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 26 /06 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	: Doç. Dr. Cahit GÜRER	imza
Başkan	: Dr. Öğr. Üyesi Şengül Figen KALYONCUOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Mesut TİĞDEMİR	
Üye	: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ	
Üye	: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT	
Üye	: Doç. Dr. Cahit GÜRER	

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/06/2019

Tuğçe AKILLI TÖRER

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**YÜKSEK HIZLI HAT DEMİRYOLLARINDA ALT BALAST TABAKASI YERİNE
BİTÜMLÜ KARIŞIM KULLANIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ARAŞTIRILMASI**

Tugçe AKILLI TÖRER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Cahit GÜRER

Demiryolu; toplu taşımacılıkta, güvenilir ve ekonomik bir yöntem olarak geçmişten günümüze kadar özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın kullanılan bir ulaşım türüdür. Seyahat süresinin kısalması ihtiyacına, yüksek hızlı trenler iyi bir alternatif olmuştur. Artan dingil yükü ve işletme hızları demiryolu üstyapısında da iyileştirmeleri zorunlu kılmıştır. Daha büyük kesitli raylar; bu raylara uygun traversler, tabakalar arasında daha esnek bir geçiş için kullanılan bağlantı malzemeleri ve son zamanlarda klasik yapıya göre daha agrega kaynaklarının sınırlı olması, bakım onarım ihtiyacını azaltmak vb. mühendisleri klasik demiryolu tabakalarındaki granüler malzemelere alternatif malzeme arayışına yönlendirmiştir. Yapılan çalışmalar, bitümlü karışım malzemelerin granüler malzeme yerine tercih edilebileceği fikrini desteklemiştir. çok tercih edilen yüksek dayanımlı sabit hatlar teknolojisi bu sektörün kazanımları arasında sayılmaktadır. Üstyapı ile altyapı arasında bir geçiş tabakası olan altbalast tabakası ise yükleri doğal zemine iletme, yapıyı suya ve donara karşı korumak, taşıma gücünü arttırmak vb. gibi çok önemli görevleri üstlenmektedir. Değişen şartlar, nitelikli agrega kaynaklarının sınırlı olması, bakım onarım ihtiyacını azaltmak vb. mühendisleri klasik demiryolu tabakalarındaki granüler malzemelere alternatif malzeme arayışına yönlendirmiştir. Yapılan çalışmalar, bitümlü karışım malzemelerin granüler malzeme yerine tercih edilebileceği fikrini desteklemiştir.

Bu çalışmada; yüksek hızlı hatlarda albalast tabaksında kullanılan granüler malzemeye alternatif olarak bitümlü sıcak karışım malzemelerin kullanılabilirliği durumu ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Albalast tabakasının kalınlığı, bitümlü karışım özellikleri (iklime bağlı), dingil yükleri ve taban zemini malzemesinin özellikleri değiştirildikçe albalast tabakası altında meydana gelen deformasyon, gerilme gibi parametrelerin değişimi değerlendirilmiştir. Yapılan analizler bitümlü karışımdan oluşan tabakaların granüler malzemeye göre daha az deforme olduğunu göstermiştir. Kullanılan parametreler arasında en büyük değişim, taban zemini özellikleri değiştirildiği zaman görülmüştür. Bu durum taban zemini kalitesinin diğer tabakaları etkilediğini göstermektedir. Ancak altyapı güçlendirme yöntemlerinin yüksek maliyetli olması, albalast tabakasında granüler malzeme yerine bitümlü karışım tabakaların kullanımının iyi bir fikir olduğunu, düşündürmektedir.

2019, xiii+ 103 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yüksek hızlı Demiryolu, Albalast tabakası, Bitümlü karışım alt balast tabakası, Sonlu elemanlar yöntemi, ANSYS.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF USING BITUMINOUS MIXTURE INSTEAD OF
GRANULER SUB BALLAST LAYER IN HIGH SPEED RAIL TRACKS WITH
FINITE ELEMENT METHOD

Tugçe AKILLI TÖRER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Cahit GÜRER

Railway; It is a type of transportation which is widely used in developed countries from past to present, as a reliable and economical method in public transportation. High speed trains have been a good alternative to the need to shorten travel time. Increased axle load and operating speeds also compulsory the improvements in the railway tracks. Rails with larger cross-section; sleepers that suitable to these rails, the connection materials for more flexible transition and recently preferred high-strength fixed-line technology are considered among the gains of this sector. The subballast layer, which is a transition layer between the superstructure and the infrastructure, carries the loads to the subbase layer, protect the structure against water and frost action, increase the carrying power etc. undertakes very important tasks such as. Changing conditions, limited availability of qualified aggregates sources, reducing the maintenance repairs needs cause the engineers were directed the search for alternative materials to granular materials in the classical railway layers. Studies have supported the idea that bituminous mixture materials may be preferred instead of granular material.

In this study; the using of bituminous hot mixture materials instead of to the granular material used in the subballast layer of high speed lines was modeled by ANSYS finite element program. How the parameters such as deformation and stress occurring under the subballast layer are affected were investigated with the change of subballast layer thickness, bituminous mixture's characteristics (depending on the climate), axle loads

and the properties of the subbase layer material. The analysis showed that the layers composed of bituminous mixture were less deformed than granular materials. The largest change in the parameters used was seen when the subbase layer's properties were changed. This indicates that the quality of the subbase layer affects the other layers. However, the high cost of infrastructure reinforcement methods suggests that the use of bituminous mixture layers instead of granular material is a good idea.

2019, xiii + 103 pages

Keywords: High Speed Railway, Subballast layer, Bituminous mixtured subballast layer, Finite element method, ANSYS.

TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmamda ve Yüksek Lisans eğitim hayatım boyunca benden desteğini, bilgi paylaşımını ve anlayışını eksik etmeyen çok sevdiğim hocam Sayın Doç. Dr. Cahit GÜRER' e, ANSYS programı ile ilgili her danışmamda güler yüzlü yaklaşımı ve yardımları için Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ' a ve programla ilgili yardımlarını esirgemeyen kıymetli arkadaşım Gökhan ÇOBAN' a, her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen çok sevgili eşim H. Eren TÖRER' e, bazen zamanından çalmak zorunda kaldığım canım kızım Deniz' e, bana kattığı her şey için aileme ve hayatımın bir noktasına bir şekilde dokunup aydınlatan herkese teşekkür ederim.

Tugçe AKILLI TÖRER
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Temel Kavramlar.....	4
2.1.1 Balastlı Demiryolu Hatları.....	4
2.1.2 Balastsız Demiryolu Hatları.....	5
2.1.3 Üstyapı Elemanları	5
2.1.3.1 Raylar	5
2.1.3.2 Bağlantı Elemanları	7
2.1.3.3 Traversler.....	9
2.1.3.4 Balast	11
2.1.3.5 Altbalast	11
2.1.4 Demiryolu Üstyapılarındaki Gerilmeler	13
2.2 Demiryolu Üstyapılarında Bitümlü Karışım Kullanımı.....	16
2.2.1 Demiryolu Altbalast Tabakasında Kullanılacak Olan Bitümlü Karışım Özellikleri.....	25
2.3 Konu ile İlgili Önceki Yapılmış Çalışmalar.....	26
3.MATERYAL VE METOD	49
3.1 Problemin Tanımı.....	50
3.2 Yöntem	53
3.2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	52
3.2.2 ANSYS	62
3.1.2.1 Tasarım ve Analiz.....	62
4. BULGULAR	69

4.1 Tabaka Kalınlığının Deformasyona Etkisi	69
4.2 Dingil Yükünün Deformasyona Etkisi	74
4.3 Taban Zemin Türünün Deformasyona ve Gerilmelere Etkisi	77
4.4 Maliyet Analizi	93
5. SONUÇLAR.....	95
6. KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	103



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad derece
Cm	Santimetre
Cu	Uniformluk katsayısı
E	Elastiste Modülü
°F	Fahrenheit
I	Atalet Momenti
gr	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
km/sa	Kilometre/saat
kN	Kilo Newton
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
m/sn	Metre/saniye
mm	Milimetre
Mpa	Mega Paskal
km/sa	Kilometre/saat
kPa	Kilo Paskal
psi	Pounds per square inch
t	Ton
v	Poisson oranı

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BK	Bitümlü Karışım
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DOF	Serbestlik Derecesi
FE	Sonlu Eleman
FF	Feste Fahrbahn
HMA	Yüksek Elastiste Modüllü Asfalt
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LAD	Los Angeles Dayanımı
NFS	Uyumsuz Düz Kabuk
RAC	Demiryolu Asfalt Betonu
SKA	Sıcak Karışım Asfalt
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SNCF	Fransız Ulusal Demiryolu İdaresi
SS	Slab Track
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	Uluslararası Demiryolları Birliği
VSD	Voie Sur Dalle
YHT	Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Balastlı üstyapı kesiti.....	4
Şekil 2.2 Ray Profili ve düzlemleri.....	6
Şekil 2.3 Oluklu ray tip kesiti.....	6
Şekil 2.4 Rayın maruz kaldığı etkenler.....	7
Şekil 2.5 Ray ve bağlantı sistemi üzerindeki etkiler.....	8
Şekil 2.6 Demiryolu üstyapısında meydana gelen gerilmeler	16
Şekil 2.7 Tamamen granüler tabakadan oluşan demiryolu üstyapısı	18
Şekil 2.8 Altbalast tabakasında Asfalt kombinasyonu kullanılmış demiryolu üstyapısı	19
Şekil 2.9 Asfalt betonu ile güçlendirilmiş demiryolu üstyapısı	20
Şekil 2.10 İtalyan yüksek hızlı hattına ait enkesit profili	20
Şekil 2.11 Fransa'da granüler ve BSK altbalast tabakasının kullanımının karşılaştırılması	24
Şekil 2.12 Tamamen granüler tabakadan oluşan ve BSK altbalast tabakalı demiryolu üstyapısı	27
Şekil 2.13 BSK tabakalı üstyapıda dingil yükü ve taban zemini modülünün düşey basınç gerilmeleri üzerine etkisi	29
Şekil 2.14 Tamamen granüler tabakalı üstyapıda dingil yükü ve taban zemini modülünün düşey basınç gerilmeleri üzerine etkisi	30
Şekil 2.15 Dikey ivmelenmeler: Balastta $v = 300$ km/sa (solda) süre ile zaman sinyalleri ve 300 ve 350 km/sa'te (sağda) iki özdeş HS Parçasını karşılaştırarak demiryolu üstyapısında farklı seviyelerde maksimum değerler.....	32
Şekil 2.16 Karşılaştırmalı düşey gerilme ve yer değiştirme sonuçları	33
Şekil 2.17 Altbalast tipinin oturma ve rijitlik modülü üzerindeki etkileri	37
Şekil 2.18 Demiryolu üstyapı sistemi ve balast-zemin sistemi	40
Şekil 2.19 Modellemede kullanılan şematik demiryolu enkesiti, temsili nümerik model ve ilgili FEM modeli	40
Şekil 2.20 Alfa Pendular' ın aks düzeninin (m cinsinden) şematik gösterimi	40

Şekil 2.21	Seçilen elemanların konumu, trenin (a) 225 km/sa ve (b) 350 km/sa hızlardaki geçişlerinde A elemanı içerisindeki gerilme zaman geçmişi	41
Şekil 2.22	Modellenen balastlı demiryolu üstyapısının geometrik boyutları ve fiziksel bileşenleri (Li et al. 2018)	43
Şekil 2.23	Hareketli yükler altında oluşan düşey gerilmeler (Li et al. 2018)	43
Şekil 2.24	Pekin-Şangay çift hatlı düşük dolgulu yüksek hızlı balastsız döşeme raylı demiryolu üstyapı kesiti	44
Şekil 2.25	Üstyapı ve taban zemininde ağırlık ve dingil yükünden kaynaklı gerilme dağılımları	45
Şekil 2.26	Elastik yatağa oturmuş kiriş model	47
Şekil 2.27	SEM için kullanılan modeller	48
Şekil 3.1	Tekerlek yükü baskısının hattaki elemanlara dağılımı	50
Şekil 3.2	TCDD standartına uygun modellenen Demiryolu kesiti	51
Şekil 3.3	Eşdeğer üçgen elemanlarına ayrılmış daire	54
Şekil 3.4	Altı yüzlü bir modeldeki gerilmeler	56
Şekil 3.5	Dört düğümlü üçgen prizma eleman	58
Şekil 3.6	Demiryolu kesiti autocad çizimi	62
Şekil 3.7	Pull komutu ile hacim verilen model	63
Şekil 3.8	Modelin sonlu elemanlara ayrılması	64
Şekil 3.9	Path (analiz yapılacak yatay hat) belirlenmesi	64
Şekil 3.10	Tüm sistemde şekil değiştirme analizi	66
Şekil 3.11	Alt tabakada oluşan deformasyonlar	66
Şekil 3.12	Yükün uygulandığı bölgede oluşan eşdeğer gerilmeler	67
Şekil 3.13	225 kN dingil yükü, kötü zemin ve bitümlü karışım malzemeli altbalast tabakalı yapı için elemanların şekil değişimi	68

Şekil 3.14	225 kN dingil yükü, kötü zemin ve granüler malzemeli altbalast tabakalı yapı için elemanların değişimi.....	68
Şekil 4.1	680 mm derinlikteki (150 mm altbalast tabakası) düşey yer değiştirme grafiği.....	69
Şekil 4.2	690 mm derinlikteki (160 mm altbalast tabakası) düşey yer değiştirme grafiği.....	70
Şekil 4.3	700 mm derinlikteki (170 mm altbalast tabakası) düşey yer değiştirme grafiği	
Şekil 4.4	710 mm derinlik (360 mm subbalast tabakası) için deformasyon grafiği.....	71
Şekil 4.5	720 mm derinlik (190 mm subbalast tabakası) için deformasyon grafiği.....	72
Şekil 4.6	730 mm derinlik (200 mm subbalast tabakası) için deformasyon grafiği.....	73
Şekil 4.7	225 kN Dingil yükü ve Taban Zemini Z1 (E=35 Mpa) için maksimum yer değişimi grafiği	74
Şekil 4.8	105 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	74
Şekil 4.9	200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	75
Şekil 4.10	225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	76
Şekil 4.11	360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	76
Şekil 4.12	Taban Zemini 1 (E=35 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	77
Şekil 4.13	Taban Zemini 2 (E=80 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	78
Şekil 4.14	Taban Zemini 3 (E=140 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	79
Şekil 4.15	Taban Zemini 4 (E=200 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	79
Şekil 4.16	Taban Zemini 1 (E=35 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.....	80
Şekil 4.17	Taban Zemini 2 (E=80 MPa) 200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	81
Şekil 4.18	Taban Zemini 3 (E=140 MPa) 200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	81
Şekil 4.19	Taban Zemini 4 (E=200 MPa) 200 kN Dingil yükü için düşey yer	

değiştirme grafiği	82
Şekil 4.20 Taban Zemini 1 (E=35 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	83
Şekil 4.21 Taban Zemini 2 (E=80 MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	83
Şekil 4.22 Taban Zemini 3 (E=140MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	85
Şekil 4.23 Taban Zemini 4 (E=200 MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	85
Şekil 4.24 Taban Zemini 1 (E=35 MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	85
Şekil 4.25 Taban Zemini 2 (E=80 MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	86
Şekil 4.26 Taban Zemini 3 (E=140 MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	87
Şekil 4.27 Taban Zemini 4 (E=200 MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	87
Şekil 4.28 Farklı zemin türü ve dingil yükleri için yer değişim grafiği	88
Şekil 4.29 Modelde düşey hat boyunca tanımlanan	90
Şekil 4.30 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki granüler altbalast altında farklı taban zemini arasında oluşan gerilmeler	90
Şekil 4.31 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki bitümlü karışım altbalast altında farklı taban zeminleri arasında oluşan gerilmeler	90
Şekil 4.32 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki altbalast altında oluşan kayma gerilmelerine ait grafik	91
Şekil 4.33 150 mm kalınlığındaki altbalast ve E=140 Mpa taban zemini için M noktasındaki gerilme grafiği	92
Şekil 4.34 225 kN 150 mm kalınlıkta altbalast tabakası altındaki gerilme grafiği	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Demiryolu üstyapılarında asfalt kaplama kullanımıyla ilgili uluslararası dizayn uygulamalarına ait özet (Seghal <i>et al.</i> 2016).....	24
Çizelge 2.2	Ahşap traversten oluşan tamamen granüler malzemeden oluşan ve BSK tabakalı demiryolu üstyapısına ait çıktılar.....	28
Çizelge 2.3	FAST Demiryolu üstyapı modeli detayları.....	33
Çizelge 2.4	Parametrik çalışmada kullanılan nominal üstyapı özellikleri.....	33
Çizelge 2.5	Parametrik çalışmada kullanılan değişken üstyapı özellikleri.....	34
Çizelge 2.6	Malzeme özellikleri ve boyutları.....	46
Çizelge 2.7	Demiryolu üstyapı modellerine ait çökme ve moment değerleri.....	48
Çizelge 3.1	Malzemelerin mekanik özellikleri.....	52
Çizelge 3.2	Modelde kullanılan yükler ve referans alınan kaynaklar.....	52
Çizelge 3.3	Model kombinasyon detayları	53
Çizelge 4.1	Granüler Malzemeye Göre Yer Değişimindeki Azalmalar (%).....	89
Çizelge 4.2	Maliyet analiz tablosu.....	94

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Rayı raya bağlayan malzemeler8	
Resim 2.2 Travers bağlantı elemanları9	
Resim 2.3 Travers çeşitleri10	
Resim 2.4 Taşıt ve demiryolu üstyapı sistemindeki etkileşim.....14	
Resim 2.5 İtalya yüksek hızlı demiryolu hattına sıcak karışım asfalt kaplama tabakasının serilmesi22	
Resim 2.6 SNCF test kesimine ait asfalt tabakanın serimi ve test bölgesindeki enstrüman yerleşim planı.23	

1. GİRİŞ

Ulaştırma; ülke kalkınmasının ekonomik ve sosyal hedeflerinin gerektirdiği hizmeti; kullanıcıya en uygun nitelikte, ulusal güvenlik gereklerini yerine getirecek biçimde, güvenli ve çevre dostu olmak koşuluyla, en ucuza, çağın teknolojilerini kullanarak, uluslararası kurallarla ve uluslararası politikalarla uyum içinde aksama olmaksızın ve kesintisiz sağlamayı hedefleyen sistemdir (İnt. Kyn.1).

Ulaştırma sistemleri ve hizmetleri modern ekonomilerin ve toplumsal gelişmenin temel ögesidir. Devletin temel görevi ise; ekonomik ve toplumsal gelişmelerin yarattığı ihtiyaçları karşılayabilecek şekilde ulaşım kapasitesini yaratan, ülke ve toplum çıkarlarına uygun ulaşım sistemlerini kurmak ve koordine etmektir. Son yıllarda ülkemizde yapılan yüksek hızlı hatlar ile Türkiye 14 hızlı tren işletmecisi ülkeden biri haline gelmiştir. Halen inşaat halinde olan birçok yüksek hızlı demiryolu güzergahı bulunmaktadır.

Konvansiyonel hatlarda olduğu gibi yüksek hızlı demiryolu hatlarında da balastlı üstyapı tüm Dünya’da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte yüksek hızlı hatların gelişmesi ve trenlerin yükleme kapasitelerinin artması demiryolu üstyapısındaki balast ve taban zemini arasındaki granüler tabakalara daha farklı malzemelerden yapılmış alt tabakaların (altbalast) eklenerek projelendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sayede demiryolu üstyapısının servis ömrü uzatıldığı gibi bakım maliyetlerinin de düşürülmesi sağlanmış olacaktır. Yüksek hızlı hatlarda hızın etkisinden kaynaklanan titreşim vb. nedenlerden ve artan yükleme kapasitelerinden dolayı geleneksel granüler tabakalardan daha kalın granüler tabaka kullanımı gerekebilir. Bu durumda önemli miktarlarda yüksek kaliteli agregaya gereksinim durulur. Genellikle balast agregası olarak bazalt, granit, diyorit, dolomit ve andezit gibi sert kayalar tercih edilir (Gürer 2018). Tüm dünyadaki kayaç rezervlerinin yalnızca %8’nin volkanik kökenli olduğu göz önüne alınırsa, yüksek hızlı hatlarda alt balast tabakalarında niçin asfalt kaplama gibi daha rijit tabakalarının kullanılması gerekliliği daha iyi anlaşılabilir (İnt. Kyn.2). Yük trenlerinde 217 km/sa ve yolcu trenlerinde 270 km/sa üzerindeki hızlar (kritik hızlar), statik yüklere göre daha büyük deformasyonlara neden olan rezonans belirtilerine neden olur. Yapılan araştırmalar, altyapıda kritik tren hızları yüzünden yol

yatağında ve dolgularında kuvvetli titreşimler oluşabileceğini ve bunun da kritik şekil değiştirmelere yol açabileceğini göstermiştir. Tren hızı “kritik hız” a ulaştığında büyük şekil değiştirmeler oluşabilir. Bu hareketler tren ve yapının bütünlüğü için tehlikeli olabilir, yol bakım maliyetlerini yükseltir. Dolayısıyla yoldaki şekil değiştirmeleri kabul edilebilir düzeylerde sınırlandıracak dinamik bir rijitlik sağlayacak demiryolu üstyapı tasarımının hayati önemi vardır (Yalçın ve Erel 2007). Bu nedenle, alt katmanların kalınlığının azaltılması ve yol geometrisinin bozulmasının asgariye indirilmesi için alternatif bir çözüm, yol kaplamaları gibi diğer altyapılarda yaygın olarak kullanılan malzeme olan sıcak karışım asfaltının uygulanmasından oluşur. Balast ve alt-tabaka, bitümlü alt balast olarak bilinen bir malzeme olan geleneksel granüler tabakaların bir kısmını değiştirmek için kullanılır.

Bitümlü alt balast, birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. ABD, İtalya, Japonya, Avusturya, Fransa ve İspanya gibi ülkelerin yüksek hızlı demiryolu hatlarında kullanılmaktadır. Alt balast tabakalarında asfalt tabaka genellikle 12–15 cm kalınlıkta uygulanır ve maksimum agrega büyüklüğü 22-25 mm olan yoğun dereceli bitümlü bir karışımdan oluşur (Rose and Bryson 2009). Bitümlü karışım genellikle karayollarında kullanılanla aynı özellikte tasarlanır, ancak alt balast uygulaması için bitüm içeriği karayolları için kullanılan optimum değere göre % 0,5 oranında arttırılır. Ayrıca, hava boşluğu yüzdesi, balast boyunca geniş bir alana basınç uygulandığından, tekerlek izi deformasyonu problemlerini önleyebilecek geçirimsiz bir tabaka olarak kullanılmak üzere %1-3'e düşürmektedir (Rose *et al.* 2011).

Genel olarak coğrafi yapı, ekonomik şartlar, kullanım ve bakım ömrü gibi faktörler demiryolu ulaşımının sık tercih edildiği gelişmiş ülkelerde alternatif taşıyıcı tabaka ihtiyacı doğurmuştur. Bu hususta yapılan araştırmalar bitümlü karışımların taşıyıcı tabaka olarak kullanılabileceği fikrini desteklemektedir. Örneğin; Almanya’da yüksek hızlı demiryolu hatlarında seyir esnasındaki savrulma ve yüksek hız etkisiyle oluşan kırılma aşınma gibi problemleri çözmek adına çeşitli araştırmalar yapılmış ve ülkede asfalt taşıyıcı tabaka kullanımı yaygınlaşmıştır. İtalya’da da özellikle yolculuk konforunu arttırmak amacıyla 2250 km den fazla YHT hattında bitümlü karışım taşıyıcı tabaka olarak kullanılmıştır. Yüksek hızlı demiryolu hattı teknolojisinde ilk sıralarda yer alan

Japonya’da ise gerek hattaki düzensizlikleri gerekse alt tabakalara iletilen yüklerin etkisini azaltmak için sağlam bir temel oluşturmak amacıyla bitümlü karışım kullanımı tercih edilirken, ABD, Fransa, İspanya gibi gelişmiş ülkelerde de mevcut hattı iyileştirmek, hattaki tabaka kalınlığını azaltmak gibi sebeplerden dolayı bitümlü karışım malzemelerinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizde ise yapım maliyetleri, alt yapı yetersizliği, bilgi ve tecrübe eksikliği vb. nedenlerden dolayı, demiryolunda bitümlü karışımların taşıyıcı tabaka olarak kullanımı henüz uygulanmaya başlamamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında alt balast tabakası yerine asfalt tabaka kullanımı Türkiye’de uygulanan bir tip kesit üzerinde, farklı dingil yükleri, tabaka kalınlıkları ve malzeme özelliklerine göre sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlar asfalt kaplamalardan oluşan alt balast tabakalarının yüksek hızlı hatlarda kullanılmasının taban zeminindeki deformasyonları ve gerilmeleri azaltacağı ve yol güvenliğinin artmasını sağlayacağı ve her bölgede bulunması güç olan kaliteli balast malzemesine olan ihtiyacı da azaltacağı gibi sonuçlara ulaşılmıştır.

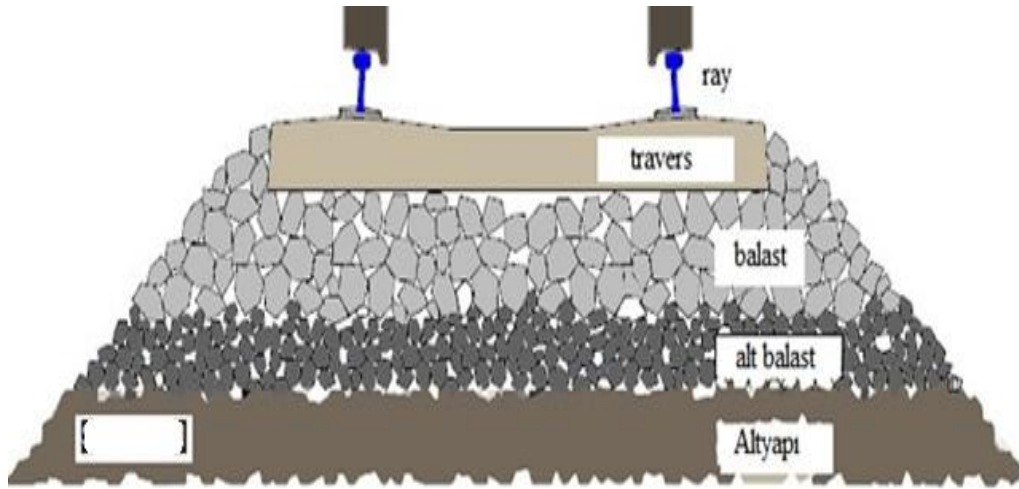
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Temel Kavramlar

Bir raylı sistem hattı tasarlanırken öncelikli amaç; hareket halindeki aracın, merkezciil kuvvetlerine karşı direnen kuvvetlerinin dengesinde, ivmelenme durumundan yolculuk konforu faktörünün olumsuz etkilenmesini önlemeye çalışmaktır. Bu sebeple hattın geometrisi; hat eğimi, eğrilik yarıçapı, dever, azami hız gibi parametreler, sınır değerlere sadık kalmak şartıyla belirlenir (Lichtberger 2011). Demiryolu hattı, yükleri kademeli olarak alt tabakalara aktaran üst yapı ile koruyucu ve taşıyıcı özelliklere sahip alt yapı kısımlarından oluşmaktadır.

2.1.1 Balastlı Demiryolu Hatları

Klasik demiryolu hatlarında üstyapıdaki ray, bağlantı elemanları, travers, balast yatağı sırasıyla üzerindeki yükü alt tabakaya ve nihayetinde zemine dağıtmaktadır (Şekil 2.1). Bu sistem yükleri aktarırken esnek bir davranış göstermektedir. Balastın ray ve travers gibi sabit elemanlarla esnek çalışması avantaj sağlasa da istenilen kalitede hat yerleşimi yapılmadığı takdirde (balastın köşeli olmaması, balast kirliliği, rastgele dağılımı, vs.) balast elastikiyetini kaybedecek ve avantajlı olmaktan çıkacaktır. Yapım maliyetinin düşük olması da bu hat kullanımını cazip hale getiren faktörlerdendir.



Şekil 2.1 Balastlı demiryolu üstyapı kesiti.

2.1.2 Balastsız Demiryolu Hatları

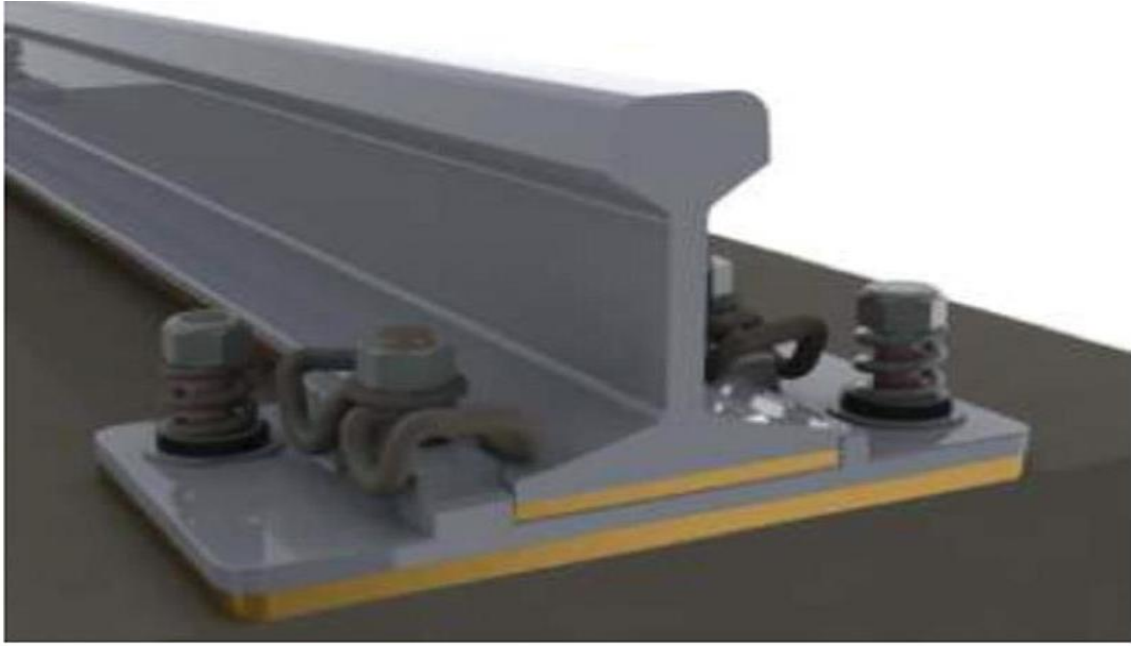
Almancada FF (Feste Fahrbahn) Fransızcada VSD (Voie sur Dalle) ve İngilizcede SS- (Slab Track) olarak anılan bu sabit hatta, yükü dağıtma görevini balast yerine dayanıklılığı yüksek beton ve asfalt gibi bir malzeme üstlenmektedir. Bu malzemelerin rijitliği daha fazla olduğu için istenilen elastikiyet ray ve travers altına yerleştirilecek elastik elemanlarla sağlanır. Sabit hat, balastlı üst yapıya göre daha dayanıklıdır ancak daha yüksek ses dalgası yayılımı gösterir ve bu duruma karşı alınacak tedbirler de oldukça maliyetlidir.

Sabit hattın balastlı hatta göre yapım maliyeti yüksek olmasına rağmen bakım onarım masraflarının daha düşük olması ve daha dayanıklı olması uzun vadede daha ekonomik olduğunu gösterse de, sabit hattın kullanım ömrü dolduğu zaman tamamen değişmesi gerektiğinde yapılacak masraflar da göz önünde bulundurulmalıdır (Lichtberger 2011). Özellikle yüksek hızlı trenlerde hızın etkisiyle balastın sıçraması durumuna karşı bu sistem daha avantajlıdır ve hat yüksekliğinin azalması, daha büyük dingil yüklerine ve yanal kuvvetlere karşı daha dayanıklı olması bu hattı esnek hatta oranla üstün kılmaktadır. Özellikle tünel, köprü gibi yapılarda balastsız hat hem yüksek dayanımı hem de hat yüksekliğini azaltması yönüyle daha caziptir (Öztürk vd. 2011).

2.1.3 Üstyapı Elemanları

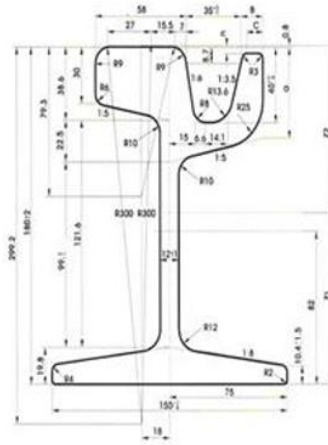
2.1.3.1 Raylar

Raylar yükün ilk temas ettiği elemanlardır. Statik ve dinamik etkilere doğrudan maruz kalan rayların, üzerlerine gelen bu etkileri alt tabakadaki traverse gönderirken aşınmaya ve ezilmelere karşı dayanıklı olması ve düzgün bir yüzeye sahip olması beklenir. Genel olarak S49 ve UIC 60EI olmak üzere iki tip ray tercih edilmektedir. Demiryolları konusunda gelişmiş Avrupa ve Dünya Ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de S49 tipi ray çeliği yerine UIC 60 EI tipi ray çeliği kullanımına geçilmiştir (Şekil 2.2).



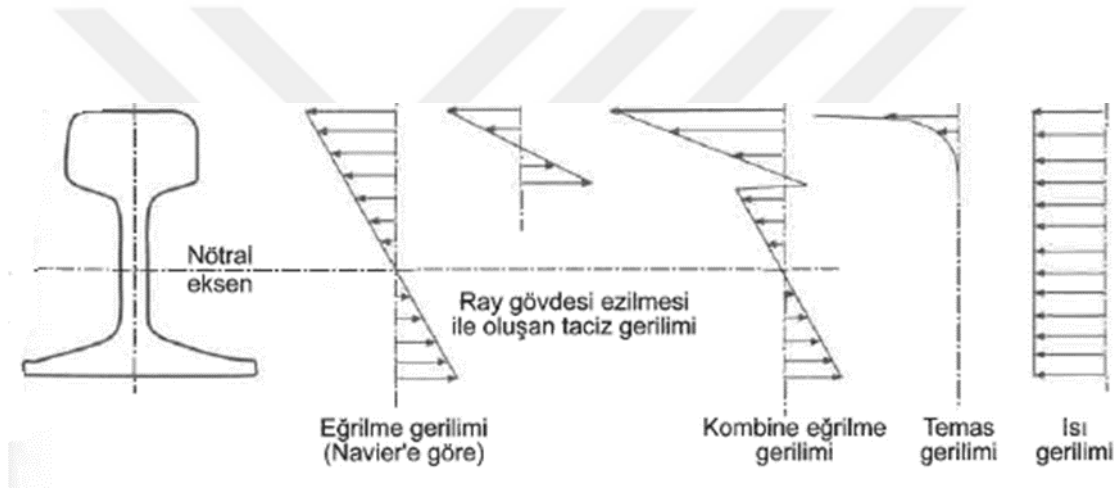
Şekil 2.2 Ray Profili (İnt. Kyn.3).

Klasik demiryolu hattı inşasında Vinyol (standart) demiryolu rayları kullanılırken makas rayları, vinç rayları, tramvay hatları için kullanılan Şekil 2.3’ deki oluklu raylar ve geçmişte kullanılan çift mantarlı raylar tercih edilebilen çeşitli formlardaki ray profillerinden sayılabilir.



Şekil 2.3 Oluklu ray ve tip kesiti (Eroğlu 2014).

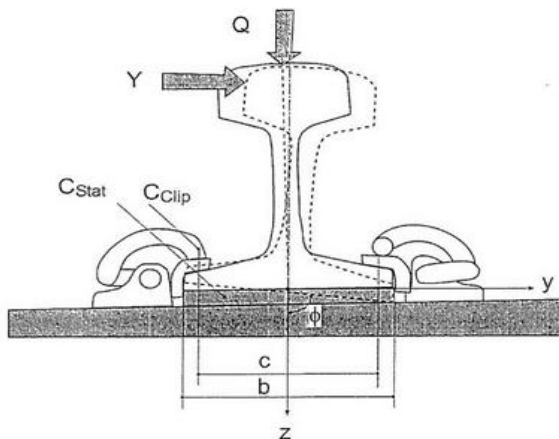
Ray profili özel bir geometriye sahiptir. Bu yapı belirlenirken; seyir yüzeyinin yeterince geniş ve yüzey baskısını karşılayabilecek formda, mantarın yıllar içinde oluşabilecek aşınmalara karşı yeter yükseklikte, gövdenin gelen yükü karşılarken oluşacak deformasyonlara karşı yeterince kalın olması ve traverse dağıtılan basınç etkisini azaltmak için tabanın yeterince geniş olması gereklidir. Bunlarla beraber statik olarak ağırlık merkezi, yarı ray yüksekliğine yakın olmalıdır. Rayın maruz kaldığı etkenler Şekil 2.4’ de verilmiştir. Tasarımda; yapım ve kullanım esnasında rayların maruz kaldığı dingil yükleri, hatalı geometriden kaynaklanabilecek dinamik kuvvetler, ısı değişiminden kaynaklanan ve ivme – fren etkisinde oluşan boyuna kuvvetler gibi etkenler dikkate alınır (Lichtberger, 2011).



Şekil 2.4 Rayın maruz kaldığı etkenler (Lichtberger 2011).

2.1.3.2 Bağlantı Elemanları

Ray ile travers arasında esnek bir yay görevi gören bağlantı malzemeleri, Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi bu sayede yukarıdan gelen kuvvetlerin ve aşağıdan yukarı etkiyen tepkilerin sönümlenmesini sağlarlar. En önemli görevlerinden biri de rayı elektrik akımına karşı izole etmektir.



Q: Dikey Kuvvet [kN/cm]

Y: Yatay Kuvvet [kN/cm]

Cstat: Pedin sertliği [kN/cm]

Cclip: Gergi kısıkcı sertliği [kN/cm]

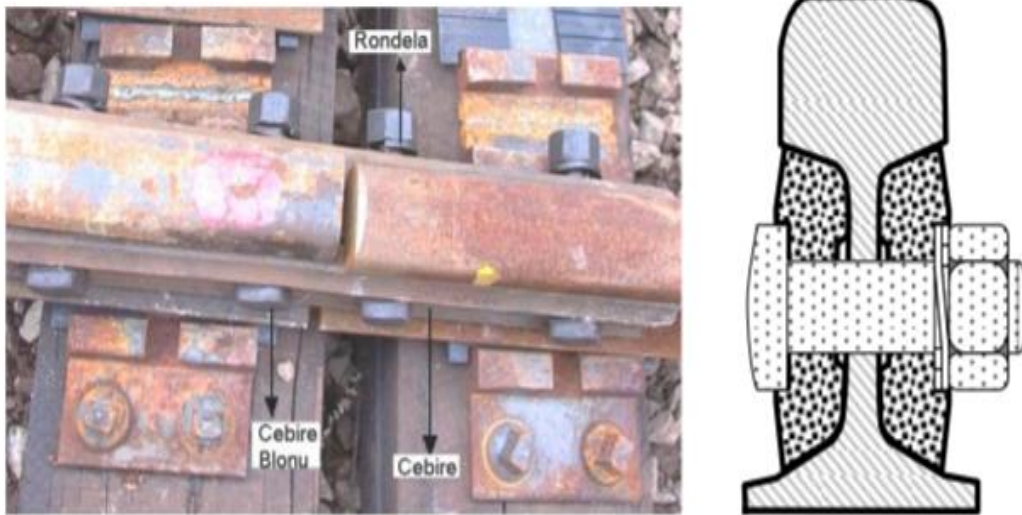
b: Ray temas genişliği (cm)

c: Gergi kısıkcı genişliği (cm)

z: Rayın merkezi

Şekil 2.5 Ray ve bağlantı sistemi üzerindeki etkiler.

Rayı raya bağlayan malzemeler; cebire, cebire bulonu ve rondeladan oluşur. Cebire; Rayları iki ucundan birbirlerine bağlamak için kullanılan demir çubuklara denir Resim 2. 1' de rayı raya bağlayan malzemeler görölmektedir.



Resim 2.1 Rayı raya bağlayan malzemeler.

Rayı traverse bağlayan malzemeler travers çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Günümüzde en çok tercih edilen beton travers en çok Resim 2.2 deki HM tipi malzeme kullanılmaktadır. Bu tip bağlantı elemanları travers henüz fabrikadan çıkmadan ön montajla raya bağlanabilir. Rayın gerdirme kısıkcı başına 13 mm yaylanma boyu ve 10 kN gerdirme kuvvetiyle bağlanması boşta olan iki yay kolu ile sağlanır. Rayın devrilme hareketleri gergi kısıkcının ortasındaki boyun kısmı yumuşatılarak sağlanır.



Resim 2.2 Travers bağlantı elemanları.

2.1.3.3 Traversler

Raydan gelen kuvvetleri karşılayıp yayarak balast tabakasına aktaran, yol genişliğini koruyan ve raylara içe doğru eğim veren üst yapı elemanıdır. Demiryolunda ilk yıllarda tercih edilen ahşap traversler özellikle esnek olmasının avantajıyla raylardan gelen yükleri yaylanarak karşılamasına rağmen dış etkenlere karşı yeterince dayanıklı olmadığı için alternatif olarak çelik traversler üretilmiştir.

Ahşap traverslere göre daha hafif, rijit ve yanmaya karşı dayanıklı olan bu tür, rutubete karşı dayanıksız olması, gürültülü bir yolculuğa neden olması ve hafif olması sebebiyle yerini ağır dingil yükünü karşılayabilecek Beton traverslere bırakmıştır. İkiz bloklu ve mono blok olmak üzere iki temel beton travers türü geliştirilmiştir.

Çift Bloklu traversler; özellikle Fransa'da ortaya çıkan ön germesiz donatılı çelikle güçlendirilmiş iki bloklu 30 x 70 x 25 cm ebatlarındaki beton traverslerdir. İspanya, Belçika, Fransa, Yunanistan, Portekiz de kullanılmıştır. Mono blok beton traversler; özel çimento ve çakıl ile içindeki çelik gergi çubuklarının ön ya da art germe usulüyle gerilmesi sonucu oluşturulur. Bu traverslerin üretimi kolay maliyeti de düşüktür.

Mekanik dayanımı ile ikiz bloklu, geometrik yapıları ile de ahşap traverslere benzerler. İkiz bloklu traverse göre daha az donatı barındırır ve daha hafiftir. Çin, ABD, İngiltere Japonya, Türkiye gibi birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır.

Plastik Traversler özellikle Avrupa Birliği tarafından kreozot kullanımının yasaklanması ile ahşap traverslere alternatif olarak üretilmiştir. Genellikle köprüler, makaslar ve normal yollarda kullanılan tiplerine rastlamak mümkündür. Bu traversler, belli bir kalıbın içine erimiş plastiğin dökülmesi suretiyle oluşturulur. Fransa, Hollanda ve Almanya'da yapılan çeşitli testler sonucu 2010 yılından itibaren Hollanda'da sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Resim 2.3 de travers türleri gösterilmiştir.



Ahşap travers



Demir travers



Beton travers



Plastik travers

Resim 2.3 Travers çeşitleri.

Raydan traverse aktarılan yükün fazla olması üstyapının elastiki yapısından kaynaklanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, klasik esnek bir demiryolu üstyapısında traverslerin yükün en fazla % 50 sini karşılayacağı tespit edilmiş olup tasarımlar buna göre yapılmaktadır.

2.1.3.4 Balast

Traversten gelen yükleri geniş bir yatağa yayan balast tabakası genellikle 30mm ile 60mm arasında keskin köşeli sağlam taşlardan oluşur. Balast yatağını oluşturan malzemelerin hava şartlarına, özellikle donma çözölmeye karşı mukavemetinin yüksek olması gerekmektedir. Su ve hava geçirgenliğinin fazla olması ve nebatiye karşı yapıyı koruması çok önemlidir. Yolun esnekliğini sağlarken traversten aktarılan etkiden kaynaklanan kaymalara karşı da dirençli olması beklenmektedir. Kullanılacak olan malzemenin yüksek dayanım, dayanıklılık gibi özelliklerinin yanında kimyası, şekli ve boyutu da çok önemlidir. Özellikle köşeli ve belli boyutlar arasında (30-60 mm) sınırlanan balast için en yaygın kullanılan malzeme bazalttır. Porfir, Kireçtaşı ve kumtaşı da balast malzemesi olarak tercih edilebilmektedir. Demiryolları balast malzemesi kabulü yaparken kullanılacak numuneyi Los Angeles Deneyi (kırılma dayanıklılığı), Agregada Darbe Dayanıklılığı Deneyi ve Deval (aşınma) Deneyi gibi bazı deneylere tabi tutmaktadır. Birçok açıdan önemli görevler üstlenen balast malzemesinin zamanla kirlenmesi yani dış etkenlerle malzemenin performansının düşmesi gözlemlenmektedir. Bu durum belli zaman aralıklarında yapılan muayenelerle tespit edilebilmektedir.

2.1.3.5 Altbalast

Altbalast tabakası; balast ile alt yapı arasında balastın altyapıya gömölmesine engel olan bir geçiş tabakasıdır. Üst yapıdan gelen yükleri alt yapıya yayarak aktarır. 15 ila 35 cm arası uygulanabilmektedir (Gürer 2018).

Alt balast tabakasının görevleri arasında;

- Yolun dinamik performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmak,
- Rijitliği ayarlayarak yolun taşıma kapasitesini arttırmak ve yukarıdan iletilen yüklerin altyapıya daha iyi dağılımını sağlamak,
- Yolu erozyona ve dona karşı korumak,
- Balast ve altyapı arasında bir filtre görevi yapmak,
- Yüzeysel suları uzaklaştırmak sayılabilir.

Balast altı tabakası olarak kullanılan granüler malzemenin aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

Los Angeles aşınma dayanımı $LA \leq 25$ (ASTM C 535-89).

- Maksimum dane çapı 25 mm,
- İnce malzeme oranı (< 0.075 mm) %12 den az,
- Malzeme iyi derecelenmiş olacaktır (uniformluk katsayısı $C_u > 6$).
- Don kaybı % 25 den az olacaktır. (ASTM-C 88)
- Geçirgenlik katsayısı 5×10^{-5} m/sn den küçük olmalıdır.

Altbalast malzemesi balast ve hazırlanmış tabanı ayırıcı özellikte olmalıdır. Altbalast malzemesinin gradasyonu, Terzaghi tarafından tarif edilen aşağıdaki filtre kriterini sağlamalıdır (Yalçın ve Erel 2007).

$D_{15} (\text{filtre}) \leq 5 \times D_{85} (\text{korunacak malzeme})$

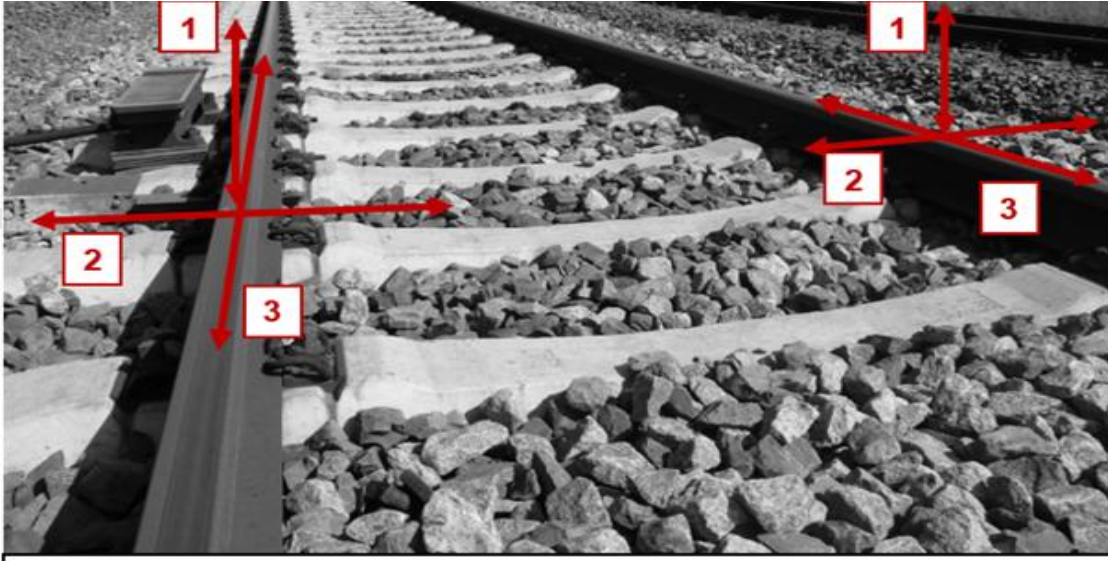
$D_{50} (\text{filtre}) \leq 25 \times D_{50} (\text{korunacak malzeme})$

Son zamanlarda artan yük ve yolcu taşımacılığı paralelinde dingil yükü artışına sebep olmuş bu da daha dayanıklı bir demiryolu yapısını zorunlu kılmıştır. Yine teknolojinin gelişmesi, birçok şeye daha kısa sürede ulaşabilme rahatlığı tren taşımacılığında da daha hızlı ulaşımı gerektirirken bu artış titreşim, frekans, şekil değişimi ve yolculuk konforu gibi faktörleri de etkilediği görülmüştür. Yine altyapıda en önemli unsurlardan biri geçirimsizliği sağlayabilmektir. Bu gibi problemler demiryolu yapısında granüler malzemeye alternatif kullanılabilecek bir malzeme arayışına yönlendirmiş ve yapılan araştırmalar bitümlü karışımın granüler malzemeye göre birçok açıdan avantajlı bir

alternatif olabileceğini göstermiştir. Bitümlü karışım malzemelerinin dayanıklı ve kullanım ömrünün daha uzun olması ve dolayısıyla oluşacak bakım ihtiyacı ve getirdiği maliyeti azaltacağı öngörülmektedir. Yine en büyük sıkıntılardan biri granüler malzeme için uygun kayaç rezerv kaynağı kullanılabilirliği ve ortaya çıkacak nakliye masrafıdır. AGÜP bu konu ile ilgili yurdumuzda agrega olabilecek maden rezervlerinin oldukça yaygın ve büyük olduğunu ancak kullanım alanı nedeniyle birim maliyetlerin düşük tutulması gerekliliğinin faydalanılabilir rezervi kısıtladığını belirtmiştir. Nakliye maliyetleri birim maliyetler içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca arazi kullanımındaki sınırlamalar ve çevre sorunları da mevcut rezervlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu durumlar agreganın eski cazibesini kaybetmesine sebep olmuştur. Bitümlü karışımın elastisite modülünün ve homojenliğinin artması nedeniyle yapısal güvenilirliği yüksektir ve güvenli bir yapı oluşturur ayrıca tabanda oluşacak yorulmaları azalttığından, altyapının ömür boyu maliyetini düşürür. Bu gibi sebeplerden, altbalast tabakasında, granüler malzemeye alternatif olarak son zamanlarda dünyada kullanımı tercih edilen bitümlü karışım malzemesi ve granüler malzeme ile oluşturulan asfalt kombinasyonlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır.

2.1.4 Demiryolu Üstyapılarındaki Gerilmeler

Demiryolları, trenlerdeki statik ve dinamik yüklere ve yağmur, kar, don ve güneş ışığı gibi farklı hava koşullarına maruz kalan doğrusal yapılardır. Trenlerden gelen yükler araçlar tarafından raydaki raylara uygulanır. Tekerlek ve ray arasında taşınan, yönlendirilen ve hareket eden ve ayrıca sıcaklıktan kaynaklanan dikey, yan ve uzunlamasına kuvvetler, Resim 2.4 te gösterilmiştir.



1) Düşey Kuvvetler

- Tekerlek Kuvvetleri
- Kurplarda hareketten kaynaklanan ilave kuvvetler, demiryolunda süreksizlik, kötü sürüş

2) Yatay Kuvvetler (Enine Kuvvetler)

- Sinüzoidal hareketten kaynaklanan yönlendirme kuvveti
- Kurplarda merkezkaç kuvveti
- Rüzgar kuvveti
- Raydaki süreksizliklerden kaynaklanan ilave kuvvetler

3) Yatay Kuvvetler (Boyuna Kuvvetler)

- Aderans kuvveti (Sürme / Frenleme)
- Tekerlek hareketinden kaynaklanan aderans kuvveti
- Kaynaklı (Contasız) uzun raylı yollarda sıcaklık değişiminden kaynaklanan yükler

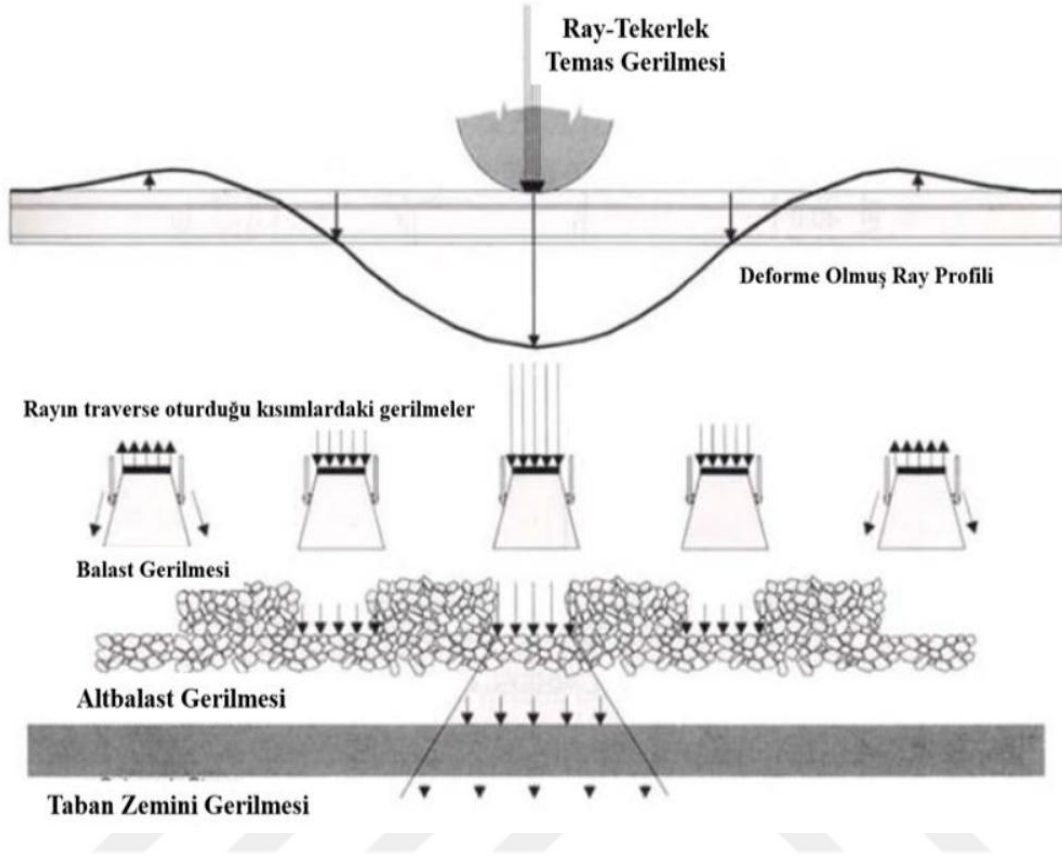
Resim 2.4 Taşıt ve demiryolu üstyapı sistemindeki etkileşim (İnt. Kyn. 4).

Her zaman yüksek düzeyde konforla güvenli operasyonları garanti altına almak için, yükler, çevreye zarar vermeden, demiryolu taban zeminine (genişletilmiş altyapı) taşıyıcı sistemine aktarılmalı ve dağıtılmalıdır.

Ray ızgarası ve balast yatağı veya destek plakasından oluşan kalıcı yol üstyapısı, enine ve boyuna kuvvetleri güvenle alabilmesi için kayma, boyuna ve enine yer değiştirmeye karşı dayanıklılığının yanı sıra uygun bir çerçeve sertliği sağlar. Düşey kuvvetler raylara ve traverslere balast basıncı σ_B olarak çok katmanlı sistemde balast-altbalast-taban zemini boyunca taşınır ve bunun içinde dağıtılır.

Düşey tekerlek kuvveti veya tekerlek kuvveti $P = P_{stat} + P_{dyn}$ altında ray elastik bir deformasyon s (yay sarması) yaşar. Bu, rayların eğilme dayanımı elastik olarak monte edilmiş bir taşıyıcı kiriş olarak hareket eder, böylece tekerlek kuvveti birkaç traverse (yük dağılımı) aktarılabilir ve destekleme noktası kuvvetinde ve balast basıncında bir azalma meydana gelir (İnt. Kyn. 4).

Dikey tekerlek kuvveti, travers sayısına bağlı olarak dağıtılır. Travers sayısı, travers aralığı ve ray atalet momentine büyük ölçüde bağlıdır. Ray tekerleği temas noktalarındaki düşey aşağı doğru kuvvet, ray'ı kaldırmaya ve Şekil 2.6' da gösterildiği gibi temas noktasından bir miktar hareket ettirmeye meyillidir. Kaldırma kuvveti, tekerlek yüklerine ve üst yapının kendi ağırlığına bağlıdır. Tekerlek ilerledikçe, kaldırılmış travers aşağıya doğru zorlanır ve artan tren hızı ile artan bir darbe yüküne neden olur. Bu hareket, balastta pompalama hareketine neden olur, bu da balast üzerine daha yüksek bir kuvvet uygulayarak balast yerleşimini artırarak ve su varlığında altta yatan malzemelerden kirlenici malzemelerin “pompalanmasına” neden olur. Ayrıca darbe yükünün, ray düzensizliği veya diferansiyel yerleşimdeki artışla arttığı (yani, darbe yükünün, traversin altındaki boşluğun büyüklüğüyle birlikte arttığı) arttığı da belirtilmiştir. Darbe yükünün artması balast yerleşiminde bir artışa ve traversin altında daha büyük bir boşluğa yol açacaktır. Böylece, üstyapı geometrisi hızlanan bir şekilde degrade olma eğilimindedir. Demiryolu üstyapısının elastik tepkisini belirlemek için üç boyutlu, çok katmanlı bir model olan GEOTRACK bilgisayar programını kullanarak parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Travers aralığının 250 mm' den 910 mm' ye yükselmesiyle, tekerleğin altındaki traverse uygulanan yükün yaklaşık 4 kat arttığı bulunmuştur. Ayrıca rayların atalet momentinin 1610 cm⁴ ten 6240 cm⁴ e yükselmesiyle, tekerleğin altındaki traverse uygulanan yükün% 40 oranında azaldığı rapor edilmiştir (Hadi Abed Ali *et al.* 2013).



Şekil 2.6 Demiryolu üstyapısında meydana gelen gerilmeler (Selig and Waters 1994).

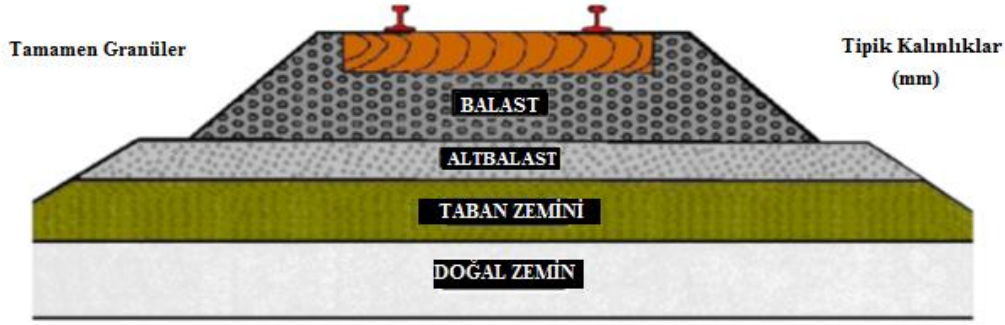
2.2 Demiryolu Üstyapılarında Bitümlü Karışım Kullanımı

Doğal zemin üzerinde, ahşap çapraz traversler üzerine yerleştirilmiş iki paralel raydan oluşan demiryolu üstyapı tekniği ilk kez 1830'larda geliştirilmiştir. Bir müddet sonra, traversler altındaki desteğin kalitesinin iyileştirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Doğal taş agreganın (daha sonra balast olarak bilinir), aşırı yatay ve düşey hareketleri ve yer değiştirmeleri sınırlamak için traverslerin etrafına ve altına yerleştirilmesi gerekli görülmüş ve gelişmiş bir demiryolu üstyapısı sağlanmıştır. Böylece tamamen granüler malzeme destekli demiryolu üstyapısı tanımlanmış ve sonrada balastlı demiryolu üstyapısı olarak terim haline gelmiştir (Rose and Souleyrette 2015).

Tekerlek yükleri, tren frekansları ve hızları arttıkça, daha büyük ray boyutlarının belirlenmesine, daha yakın mesafeli daha büyük boyuttaki traverslerin seçilmesine ve traverslerin etrafında ve altındaki balastın belirli bir kalite ve kalınlığının belirlenmesine

dikkat edilmiştir. Nihai hedef, uygulanan yükleri doğal taban zemini malzemesinin taşıma kapasitesine indirmek, böylece eşit derecede güçlü destek sağlamaktır. Drenajın çok önemli olduğunun farkına varıldı, çünkü çoğu taban zemini malzemesi, ıslak ya da doymuş olduklarında kayda değer taşıma kapasitesi kaybetme eğilimindeydi. Bu nedenle, yüzey suyunu üstyapı içinden uzaklaştırmak ve suyu üstyapıdan olabildiğince hızlı bir şekilde direne etmek en önemli konulardı.

Destek yapısının daha da iyileştirilmesi, balast ve taban zemini arasına belirli bir tane çapında "altbalast" malzemesinin eklenmesidir. Tipik olarak bu, geleneksel balast malzemesinde daha küçük üst boyuta sahip ve önemli ölçüde daha ince boyutlu parçacıklar içeren yerel olarak mevcut bir agrega malzemesidir. Çok düşük bir boşluk içeriğine göre çok kompakt düşük geçirgenlik ve otoyol yapımında yaygın olarak kullanılan agrega taban malzemesine benzeyen bir malzemedir. Başlıca görevleri, balasta destek sağlamak, yükleri daha da dağıtmak ve altta taban zemini için için belirli bir su geçirmezlik düzeyi sağlamaktır. Bu, demiryolu üstyapısının kalitesini ve yük taşıma kapasitesini artırır. Bu demiryolu üstyapı tasarımı, çeşitli destek malzemeleri ve katmanlarına ilave çimentolama veya bağlayıcı malzeme dahil edilmediğinden, "Tümü Granül" olarak bilinir. Şekil 2.7, klasik veya geleneksel "Tamamen Granüler" demiryolu üstyapı tasarımını göstermektedir. Yüksek hızlı hatlardaki demiryolu üstyapılarında, malzemelerin kalitesi, malzemelerin ve katmanların ilişkili boyutları özel olarak seçilir ve belirlenir. Ray yapısına sızan suyun olasılığını en aza indirmek için yüzey drenajı sağlanmasına ve böylece altbalast veya taban zeminin zayıflatılmasının minimize edildiği varsayılmaktadır. Yüksek trafikli ana hat üstyapıları, yüklere direnmek ve yükleri alttaki taban zemini katmanına etkin bir şekilde dağıtmak için daha yüksek kalitede ve daha kalın balast ve alt balast katmanları gerektirir. Bu tasarımın varyasyonları, 3600'lerin sonlarından beri demiryolu üstyapıların çoğunda yaygın olarak görülmüştür ve şu anda dünya çapında demiryolu üstyapılarının en belirgin tasarımıdır. Geçilen 30 yıl boyunca, asfalt tabakaları içeren ilave tasarımlar, klasik tüm granüler tasarım yerine, özel uygulamalar için tasarımcıların dikkatini çekmektedir.



Şekil 2.7 Tamamen granüler tabakadan oluşan demiryolu üstyapısı.

1980'lerin başından beri, ABD demiryolu endüstrisi, demiryolu üstyapısında destek katmanını olarak sıcak karışım asfaltı seçici bir şekilde kullanmaktadır. Uygulamalar diğer ülkelerde de giderek artmaktadır. Genel olarak karayolu yapımı için kullanılabenzer şekilde asfalt tabakası, demiryolu üstyapısını klasik tüm granüler demiryolu üstyapılarından ayırır. Bu gelişme, demiryolu trafik hacimlerinde, ton-mil kapasitelerinde, dingil yüklemelerinde ve dünya genelinde yaşanmakta olan tonajlarda benzeri görülmemiş bir büyümeye uyum sağlamak için daha yüksek kalitede ve daha dayanıklı demiryolu üstyapı ve destek yapılarını sağlama konusundaki zorluklara cevap vermektedir. ABD'deki ağır tonajlı demiryolları ve diğer ülkelerdeki yüksek hızlı yolcu taşıyan demiryolları hatları için asfalt üstyapı teknolojisinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesine öncelik verilmektedir.

Üç temel tip asfalt palet kullanılmaktadır. Bunlardan ikisi, geleneksel balast katmanını desteğin bir parçası olarak birleştirir. “Asfalt Döşeme” üstyapı tabakası, klasik granüler üstyapı tabakasına benzer; tek fark, granül alt balast tabakası için asfalt tabakanın kullanılmasıdır. Tipik kesit Şekil 2.8’ de gösterilmektedir. “Asfalt Kombinasyonlu” üstyapı hem asfalt tabakasını hem de granüler alt balast tabakasını içerir. Asfalt tabaka kalınlığı, nispeten kalın bir alt balast tabakası aşağıda bulunduğundan bir miktar azaltılabilir.

Asfalt Alt Tabaka

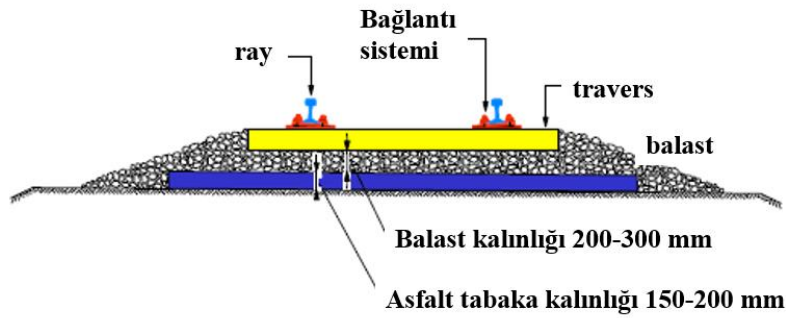


Asfalt Kombinasyonu



Şekil 2.8 Altbalast tabakasında Asfalt kombinasyonu kullanılmış demiryolu üstyapısı.

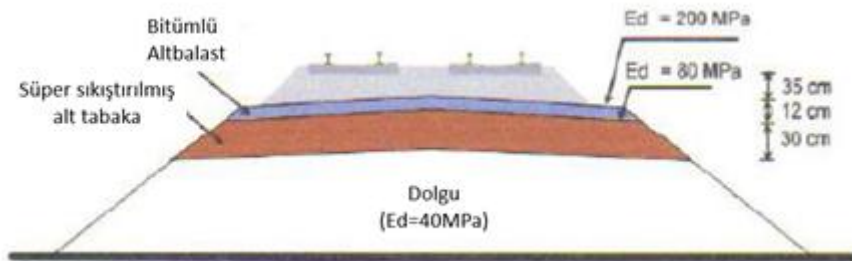
“Balastsız Asfalt Kombinasyonu” demiryolu üstyapı yatağı, nispeten kalın bir asfalt tabakası ve alt tabakadaki granüler altbalast üzerine yerleştirilmiş travers veya döşeme şeklindeki traverslerden oluşur. Bu kalınlaştırılmış bölümler, balast katmanının yokluğunu telafi eder. Traverslerin, monoblok veya iki bloklu, kullanılan döşeme şeklindeki traverslerin ve asfalt yüzey profilinin tam tasarım ve konfigürasyonu, tercih edilen özelliklerin bir fonksiyonu olarak önemli ölçüde değişmektedir. Esveld’ e göre taban zemininin yumuşaması, özellikle titreşimle birlikte, büyük sorunlara neden olabilir. Bu nedenle Japonya ve İtalya'daki yüksek hızlı hatlarda, taban zemini üzerinde, 5 ila 8 cm kalınlığındaki su geçirmez asfalt tabakası kullanılmaktadır. Taban zemini üzerindeki gerilimleri dağıtmak ve dolayısıyla azaltmak için asfalt betonu katman 15-20 cm'ye kadar yükseltilebilir (Şekil 2.9) (İnt. Kyn. 5). Bu tip asfalt tabaka uygulamalarıyla üstyapının ağır bakımı da geciktirilmiş olur.



Şekil 2.9 Asfalt betonu ile güçlendirilmiş demiryolu üstyapısı (Esveld 1997).

Asfalt tabakaları, nispeten yüksek dingil yükleri ve yüksek brüt tonajlar için tasarlanan yeni demiryolu üstyapılarının yapımında büyük avantajlar sunabilir. Ek olarak, yolcu hizmetleri için tasarlanmış geleneksel demiryolu üstyapılarında takviye katmanlarının kullanılması, yol geometrisinin korunmasını sağladığı gibi bakımlarda da azalma sağlar.

İtalyan Yüksek Hızlı Demiryolu, bir dolgu, süper sıkıştırılmış alt tabaka, asfalt altbalast, balast, bağlantı elemanları, travers ve raydan oluşan çok katmanlı bir sistemdir. Kesitsel profili, Şekil 2.10 'te gösterilmiştir.



Şekil 2.10 İtalyan yüksek hızlı hattına ait enkesit profili (Rose *et al.* 2015).

Yüksek hızlı hat operasyonlarında uygun geometrik hizalamayı korumak için inşaat uygulamaları bu katmanların yerleştirilmesine ağır bir vurgu yapar. Dolgunun alt bölümü, asgari 40 MPa (5.800 psi) taşıma kapasitesi sağlamalıdır ve kalınlığı 50 cm'yi (20 inç) aşmayan su içermeyen bir malzemeden yapılmıştır. Malzeme statik ve titreşimli sıkıştırma yöntemleri kullanılarak sıkıştırılır. Düzgün sıkıştırma sağlamak için İtalyan kalite kontrolü, setin 2.000 m² (2.390 yd²) 'nin test edilmesi gerektiğini zorunlu kılar. Dolgu üzerine minimum 80 MPa (11,600 psi) taban zemini modül katsayılı 30 cm (12

inç) süper sıkıştırılmış katman yerleştirilir. Süper sıkıştırılmış katman, kum / çakıl karışımından oluşur ve %3,5'lik bir eğim ile inşa edilir. Bu katman, yüksek hızlı trenlerin tekrarlanan yüklerine dayanma kabiliyetine sahiptir ve yüzey suyunun yönlendirilmesine yardımcı olmak için geçirimsiz bir katman görevi görür. Asfalt altbalast tabakası, süper sıkıştırılmış tabakanın üzerine yerleştirilir. Maksimum agrega boyutu 25 mm (1 inç) olan bir bitümlü karışımdan oluşur. Bu katman 12 cm'lik (5 inç) bir kalınlığa sahiptir ve tüm üstyapı enkesitine toplam 14 m (46 ft) boyunca uygulanır. Asfalt altbalast tabakası tekrarlanan tekerlek yüklerine dayanabilmek ve dolguya gelen gerilmeyi azaltmak için minimum 200 MPa (29.000 psi) elastisite modülünü sağlamalıdır. Ferrovie dello Stato, asfaltın geleneksel granül alt balast üzerinde sağladığı çoklu avantajlardan yararlanmıştır.

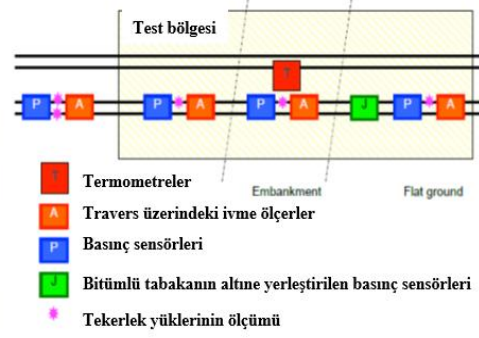
- azaltılmış titreşim ve gürültü seviyeleri,
- azaltılmış kesitsel kalınlık,
- azaltılmış taban zemini yorulmasından dolayı altyapıda azaltılmış kullanım ömrü maliyeti,
- üstyapı taşıma kapasitesinin homojenizasyonu ve daha iyi balast tutma,
- iyileştirilmiş drenaj nedeniyle daha az balast kirlenmesi ve
- artan modül ve homojenlik nedeniyle artan yapısal güvenilirlik ve güvenlik.

Asfalt altbalastını yerleştirmek için standart asfalt serme makineleri kullanılır (Resim 2.5). Daha sonra titreşimli silindirler kullanarak maksimum yoğunluğunun %98' ine sıkıştırılır. Asfalt karışımları tüm Marshall tasarım standartlarına uygundur. Karışımların şartnamelere uymasını sağlamak için doğrulama testleri her 10.000 m³'de (13.000 y3) yapılır. Her 100 m (330 ft) yol kesimi için üç testle dinamik yanıtı doğrulamak amacıyla düşen ağırlık deformasyon ölçer kullanılır. Son 20 yıl boyunca, tüm İtalyan demiryolları bu yöntem kullanılarak inşa edilmiştir. Kuzey-Güney ve Doğu-Batı yüksek hızlı yolcu hatlarının tamamlanmasının ardından, İtalya Yüksek Hızlı demiryolu ağı 1.200 km'den (745 mil) fazla asfalt alt balast içeren üstyapıdan oluşmaktadır.



Resim 2.5 İtalya yüksek hızlı demiryolu hattına BSK kaplama tabakasının serilmesi (Rose *et al.* 2015).

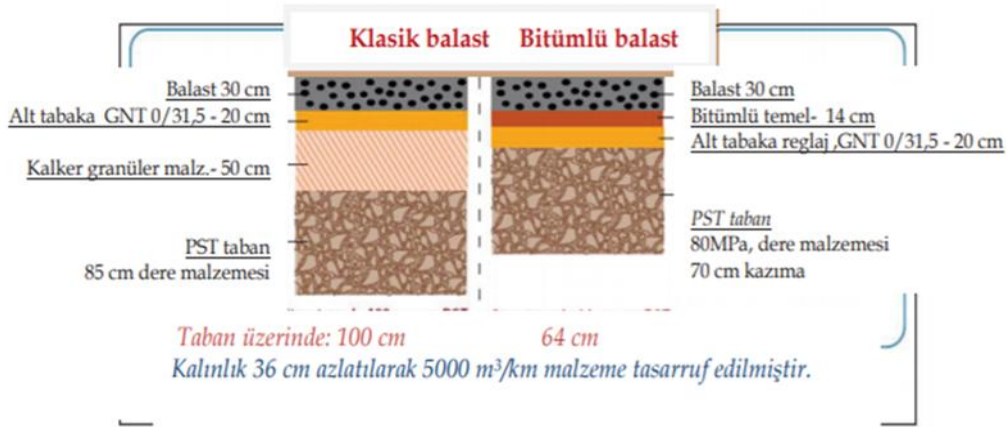
Fransız Ulusal Demiryolu İdaresi (SNCF), demiryolu üstyapı yapımında asfalt kullanımının araştırılmasıyla ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Asfalt, çekici bir yapı malzemesi olarak görülür çünkü balast katmanlarının kalınlığını azaltabilir, üstyapı ve demiryolu ekipmanlarının kolay yerleştirilmesini sağlar ve bakım maliyetlerini optimize eder. 2000 yılında, asfalt kullanımının yüksek hızlı bir hatlarda etkisini ölçmek için SNCF & Colas tarafından bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Paris ve Strazburg arasındaki Avrupa Yüksek Hızlı hattının 3 km uzunluğundaki bir şeridi test bölgesi olarak seçilmiştir. Bu yol kesimi, birçok durumda asfalt performansının ayrıntılı bir şekilde görüntülenmesini sağlayan kesimler, köprüler dahil olmak üzere çeşitli üstyapı özelliklerinden oluşmaktadır. Geleneksel bir granüler demiryolu üstyapısı enine kesiti, 20 cm (8 inç) kalınlıkta çakıl altbalast üzerinde duran 35 cm (14 inç) kalınlığında bir balasttan oluşur. Her ikisi de 50 cm (20 inç) kalınlığında bir capping tabakası üzerinde durmaktadır. Çalışmalar için SNCF, hepsi 35 cm (14 inç) kalınlıkta bir capping tabakası üzerine oturan 15 cm (6 inç) bitümlü bir karışım tabakası üzerinde 35 cm (14 inç) kalınlığında bir balast tabakası kullanılmıştır. Bu, toplam kesit kalınlığını 20 cm (8 inç) azaltır, bu da demiryolu üstyapısı oluşturmak için gereken malzeme miktarını önemli ölçüde azaltır. Bu asfalt testi bölümü 2004 yılında yol yapımı için tasarlanmış makineler kullanılarak inşa edilmiştir (Resim 2.6). Sürekli veri toplamak için test bölgesine termometreler, traverslere ivmeölçerler, basınç sensörleri ve bitümlü tabakanın tabanına genleşme ölçen göstergeler yerleştirilmiştir. Resim 2.2 'de test bölgesindeki enstrüman yerleşimini göstermektedir.



Resim 2.6 SNCF test kesimine ait asfalt tabakanın serimi ve test bölgesindeki enstrüman yerleşim planı.

Şekil 2.11'deki gibi geleneksel granüler demiryolu üstyapısı yerine asfalt tabaka kullanımı çalışmasının karşılaştırmalı sonuçlarına göre;

- ortalama kesit kalınlığı 36 cm (14 inç) azaltılabilir,
- dolgu malzemesi miktarı $5.000 \text{ m}^3 / \text{km}$ ($10.500 \text{ y}^3 / \text{mil}$) azaltılabilir,
- üstyapıda asfalt tabakanın altındaki basınçlar, geleneksel üstyapıda granüler tabaka altında ölçülen basıncın yarısına ulaşır,
- asfalt yolun deformasyonları, izin verilen azami sapmaların sadece üçte birine ulaşır.
- hem geleneksel hem de asfalt tabakalı üstyapıdaki traverslerde, ivmelerde belirgin bir farklılık görülmemiştir.
- üstyapı rijitliğindeki değişiklikler % 40 daha düşüktür,
- üstyapı bozulma oranı yüzey belirleme gereksinimlerine bağlı olarak daha düşüktür ve
- asfalt demiryolu üstyapısı daha az bakım gerekir, asfalt demiryolu üstyapısını üstün performansına bağlı olarak birkaç tabaka daha planlanabilir.



Şekil 2.11 Fransa’da granüler ve BSK altbalast tabakasının kullanımının karşılaştırılması (Rose *et al.* 2015).

Demiryolu üstyapılarında asfalt kaplama kullanımıyla ilgili uluslararası dizayn uygulamalarına ait özet Çizelge 2.1 ’de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Demiryolu üstyapılarında asfalt kaplama kullanımıyla ilgili uluslararası dizayn uygulamalarına ait özet (Seghal *et al.* 2016).

Ülke	Döşemeli/Balastlı	Tabaka 1	Tabaka 2	Tabaka 3	Tabaka 4
Japonya	Döşemeli ve Balastlı	Döşeme kalınlığı (19 cm), balast (30 cm)	Asfalt kaplama döşeme (15 cm), Asfalt betonu (5 cm)	İyi derecelenmiş kırma taş (15 cm), kırmataş tabaka (15-60 cm)	Taban zemini
İtalya	Balastlı	Balast (35 cm)	Asfalt Karışımı, 12 cm, 200MPa)	Süpersıkıştırılmış Tabaka (30 cm, 80 MPa)	Taban Zemini (40 MPa)
İspanya	Balastlı	Balast (35 cm)	Asfalt Betonu (12-14 cm)	Don koruma tabakası (30-40 cm)	Taban Zemini (80 MPa)
Almanya	Balastlı döşeme	Temel (20 cm)	Asfalt	Çoklu tabaka asfalt temel	Taban zemini (50-95 cm)

Çizelge 2.1 (Devam) Demiryolu üstyapılarında asfalt kaplama kullanımıyla ilgili uluslararası dizayn uygulamalarına ait özet (Seghal *et al.* 2016).

Fransa	Balastlı	Balast (30 cm)	Asfalt Betonu (14 cm)	Tesviye tabakası (20 cm)	Taban zemini
ABD	Balastlı	Balast (20-30 cm)	Asfalt Tabakası (12,5-15 cm)	Alt balast yok	Taban zemini
	Balastlı	Balast (20-30 cm)	Asfalt Tabakası (12,5-15 cm)	Alt balast	Taban zemini
Hindistan	Balastlı	Balast (30 cm)	Blanket tabakası (100 cm ye kadar)	Alt balast	Taban zemini

2.2.1 Demiryolu Alt balast Tabakasında Kullanılacak Bitümlü Karışım Özellikleri

Bitümlü alt balast, karayolu üstyapılarındaki temel tabakasına benzer şekilde maksimum agrega boyutu 22-25 mm olan yoğun dereceli bitümlü karışımdan oluşur. Oysa, alt balasttaki bitüm miktarı normal olarak temel tabakasına göre % 0,5 artırılır ve hava boşlukları tabakanın geçirgenliğini önlemek için % 1-3'e düşürülür. Bu orta düzeyde kalıcı deformasyon direnci ile karakterize edilen bir karışım ile sonuçlanır. Karayolu kaplamalarının aksine tekerlek izi deformasyonu demiryolu yatağındaki önemli bir bozulma türünü temsil etmemektedir, çünkü balastın varlığı dingil yüklerinin daha geniş bir alana basınç uygulamasına izin vermektedir. Benzer şekilde, kuma ve bitüm yükselmesi de herhangi bir sorun teşkil etmez, çünkü tekerlekler bitümlü karışım alt balast tabakasıyla doğrudan temas etmez ve demiryolu yatağının derinliğinde aşırı sıcaklıklar en aza indirilmiş olur. Alt balast tabakası kompozisyonunun, yol üstyapılarında kullanılan bitümlü temel tabakası karışımına benzer olmasına rağmen, sistemin gereksinimi ve sıcaklık profili açısından konfigürasyonu farklıdır. Bu nedenle,

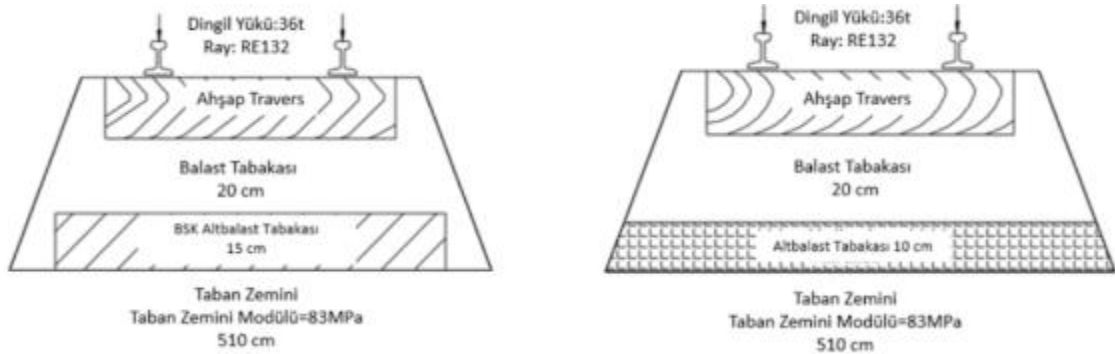
demiryolu alt balast tabakalarında kullanıldığında bitümlü karışımlarının optimizasyonu için farklı karışım tasarım sistemleri ve yaklaşımları benimsenmelidir (Fernando and Gaetano 2017). Önerilen BSK şartnameleri, demiryolu tabaka dizaynları ve uygulamaları yıllar içinde gelişmiştir. Demiryolu üstyapısı için en iyi özelliklere sahip olan BSK karışımı,% 1 ila 3 arası tasarım boşluğuna sahip olan bir karışımdır. Karışım, yerinde yüzde 5'ten daha az hava boşluğuna kolayca sıkıştırılır. Genellikle minimum agrega büyüklüğü 25 ila 37 mm arasında olan yerel yoğun gradasyonlu karayolu temel tabakası karışımı kullanılır. Demiryolu altbalast uygulamalarında tekerlek izi ve kuma bozulması olmadığından, bitümlü bağlayıcı içeriği, karayolu uygulamaları için optimum seviyenin yaklaşık % 0.5 üzerine yükseltilebilir. Bitümlü alt balast tabaksından oluşan demiryolu üstyapılarının uzun süreli izleme ve deney sonuçları, bu düşük boşluklardan dolayı, karışımın geçirimsiz olduğunu, hava ve suyun etkilerinden minimum düzeyde olumsuz etkilendiğini göstermiştir. Karışım, sıcak havalarda makul derecede sabit rijitliğe sahip bir tabaka sağlar, ancak soğuk havalarda biraz esnektir. Ayrıca, karışımın sıcak havada tekerlek izi deformasyonu, kuma ve soğuk hava koşullarında çatlama eğilimleri önemli ölçüde azalır, böylece karışım için uzun bir yorulma ömrü sağlanmış olur. Doğrudan BSK tabakası altında elde edilen taban zemini / yol yatağı örnekleri üzerinde yapılan deneyler, yerinde nem içeriğinin, malzemelerin maksimum yoğunluğunda, optimum değerlere çok yakın olduğunu göstermiştir (İnt. Kyn.5).

2.3 Konu ile İlgili Önceki Yapılmış Çalışmalar

Rose vd. (2006) demiryolu üstyapısı dizaynı için KENTRACK programını kullanarak bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişler ve tek tabakalı elastik sistem sonlu elemanlar bilgisayar programı olan KENTRACK' ı tanıtmışlardır. Program özellikle ağır aks yükünün olduğu ve yüksek hızlı demiryolu üstyapılarının yapısal tasarımı için geçerlidir. Demiryolu yapısı balast, altbalast ve taban zemininden oluşan üç tabakalı bir elastik sistem olarak kabul edilir. Alt tabaka tamamen granül malzemeden veya Sıcak Karışım Asfalttan (HMA) oluşabilir. Tekerlek yükleri, tabakalı sisteme raylar, bağlantı plakaları ve bağlar vasıtasıyla iletilir. Kalınlık tasarımı, kalıcı deformasyonu azaltmak için alt tabanın üstündeki dikey basınç gerilmeleri sınırlandırılarak yönetilir. HMA alt katmanı bir alt katman olarak içeren tasarımlar için ek bir sınırlama kriteri belirlenebilir;

HMA katmanının altındaki yatay çekme gerilmeleri yorulma çatlaklarına neden olmamalıdır. Alt tabanın aşırı deformasyonu arzu edilmez, çünkü yolun bozulmasına neden olur ve sık bakım gerektirir. HMA tabakasında yorulma çatlama da istenmez, çünkü su sızmasına ve bunun ardından taban zemininin zayıflamasına neden olabilir. Yapılan çalışmada değişken malzeme özelliklerinin ve katman kalınlığının hesaplanan gerilme ve şekil değiştirme seviyeleri ve demiryolu üstyapısının öngörülen ömrü üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Taban zemini modülü, balast / HMA kalınlığı ve dingil yükü, öngörülen demiryolu üstyapısı servis ömrü üzerinde önemli etkileri olan üç değişkeni temsil eder. Yapılan çalışmada, zemin basınç hücreleri kullanılarak demiryolu üstyapı yatağındaki çeşitli yerlerde dikey basınçların ölçülmesine yönelik yöntem tarif edilmiş ve tipik değerler verilmiştir ve ağır dingil yükleri için sunulmuştur. KENTRACK programından tahmin edilen değerler ve benzer koşullar için ölçülen izlenen değerler oldukça uyumludur. KENTRACK programı, tasarımcıya çeşitli yükleme ve üstyapı malzemesi, tabaka kalınlığı kombinasyonları ve demiryolu üstyapı tabakalarının tasarlanması için rasyonel bir yöntem sunar. Bu program ile değişken yüklerin ve demiryolu üstyapı malzemelerinin ve tabaka kalınlıklarının nispi etkileri de belirlenebilir.

Demiryolu üstyapıları için rasyonel bir yapısal tasarım yöntemi geliştirmek için, çeşitli üstyapı bileşenlerinin üstyapı performansına etkilerini anlamak gerekir. Şekil 2.12' de gösterilen tipik bir BSK üstyapı tabakası kullanılır. Aynı zamanda, Şekil 2.12' de gösterilen geleneksel tamamen granüler bir demiryolu demiryolu üstyapısı, BSK tabakanın performans karşılaştırması için değerlendirilmiştir. Her iki modelde de kullanılan bileşenler ve faktörler, tipik bir demiryolu üstyapısı değerleridir.



Şekil 2.12 Tamamen granüler tabakadan oluşan ve BSK altbalast tabakalı demiryolu üstyapısı

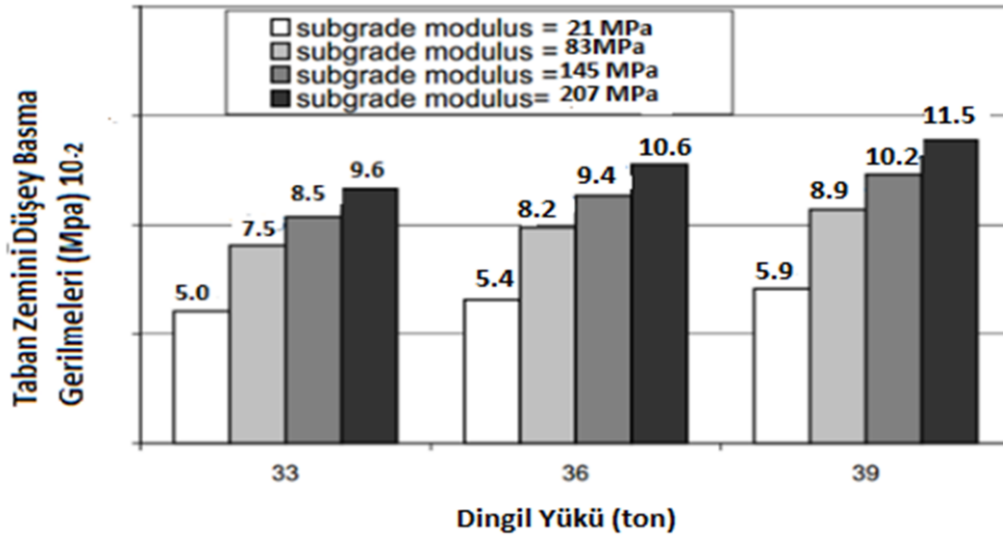
(Rose *et al.* 2003).

Çizelge 2.2 Ahşap traversten oluşan tamamen granüler malzemeden oluşan ve BSK tabakalı demiryolu üstyapısına ait çıktılar (Rose *et al.* 2006).

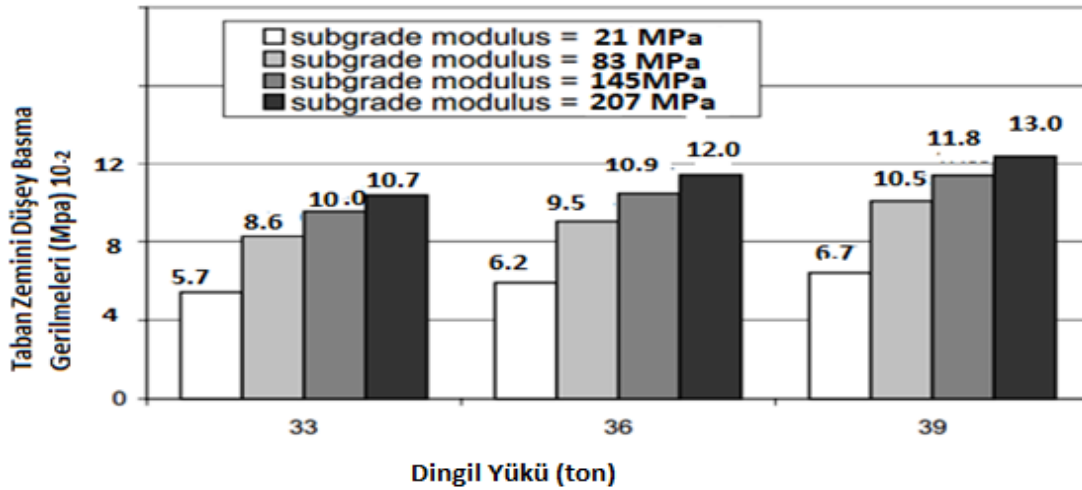
	<i>Standart BSK albalastlı Demiryolu Üstyapısı</i>	<i>Standart Balastlı Üstyapı</i>
Taban zemini dikey basınç gerilmeleri (psi)	11.8	13.6
BSK Çekme gerilmeleri (inç)	1.58×10^{-4}	-
Taban zeminin tahmin edilen servis ömrü (yıl)	14	6
BSK tabakanın tahmin edilen servis ömrü (yıl)	29	-

Bir BSK tabakalı demiryolu üstyapısı için gerçek taban zemini servis ömrü, iki nedenden dolayı Çizelge 2.2' de belirtilen tahmini servis ömründen çok daha büyük olabilir. İlk neden, BSK tabakalı üstyapıdaki doğal olarak daha düşük gerilme seviyesinden kaynaklanır. Bu gerçek, kısmen BSK ve tamamen granüler tabakadan oluşan üstyapılar için Çizelge 2.2.' de öngörülen servis ömründe yansıtılmaktadır. Taban zemini için KENTRACK bozulma mekanizması, tekrarlı yüklemelerden ve taban zemininin yorulmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, BSK tabakalı üstyapı üzerindeki düşük alt kademe gerilme seviyesi, BSK' lı üstyapı için servis ömründe öngörülen bir artışı ifade eder. Bununla birlikte, bir demiryolu taban zeminindeki oturma bir karayolu taban zeminine kıyasla çok önemli olmadığı için, demiryolu taban zemininin gerçek hizmet ömrünün, önemli bir bakım veya rehabilitasyona ihtiyaç duymadan önce çok daha uzun olması muhtemeldir. Bu nedenle, Çizelge 2.2' de öngörülen hizmet ömürleri, demiryolu uygulamaları için göze çarpmayan değerlerdir. Normal olarak bir demiryolu üstyapı yatağının yerleşmesi, yapının içine sızan su nedeniyle, taban zemininin zayıflaması ya da yumuşamasından kaynaklanmaktadır. Bu, tamamen granüler tabakadan oluşan üstyapılar için çok yaygındır. Bununla birlikte, BSK tabakalı üstyapılar taban zeminini üstten sızan sudan korumak için geçirimsiz bir tabaka sağlar. Bu tip üstyapı yataklarının zayıf veya yumuşak taban zeminlerinden etkilenme olasılıkları daha düşüktür. Önceki çalışmalar, BSK albalastlı üstyapıların taban zemini nem içeriğinin optimum seviyeye çok yakın kaldığını ortaya koymuştur. Bu, albalast tabakasına ömrü boyunca maksimum güç ve yük taşıma kapasitesi sağlar. Bu nedenle, bir BSK tabakalı üstyapının, alt tabandaki değişken nem içeriğine maruz kalan tamamen granüler bir üstyapıdan daha uzun bir gerçek hizmet ömrüne sahip olması muhtemeldir. Değişken nemin kaynağı granüler malzeme tabakadan sızan yağışlar veya yer altı suyu tablosundaki dalgalanmalar olabilir. Tüm bunlara ilaveten

değişken dingil yükleri (33t ve 39t) altında iki farklı üstyapının performansı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, taban zemini modülün, hem BSK tabakalı hem de tamamen granüler üstyapının öngörülen performansları üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğuna inanıldığından, dört farklı taban zemini modülünün etkileri de değerlendirilmiştir. Modüller zayıf taban zemini için 3000 psi (20.6 MPa), normal taban zemini için 22500 psi (82.7 MPa), iyi taban zemini için 21000 psi (144.8 MPa) ve mükemmel taban zemini için 30000 psi (206.8 MPa) alınmıştır. Sırasıyla BSK tabakalı ve tamamen granüler tabakadan oluşan demiryolu üstyapısı için düşey basınç gerilmeleri Şekil 2.13 ve 2.14’de görülmektedir.



Şekil 2.13 BSK tabakalı üstyapıda dingil yükü ve taban zemini modülünün düşey basınç gerilmeleri üzerine etkisi (Rose *et al.*2006).



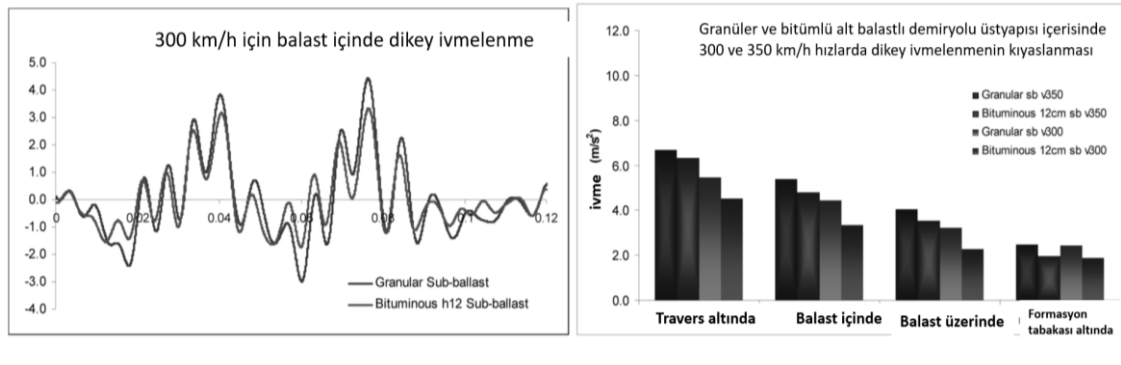
Şekil 2.14 Tamamen granüler tabakalı üstyapıda dingil yükü ve taban zemini modülünün düşey (basma) gerilmeleri üzerine etkisi (Rose *et al.* 2003).

Daha ağır dingil yükünün, hem BSK tabakalı hem de tamamen granüler balast tabakalı altbalast tabakaları için daha büyük alt-dereceli dikey basınç gerilmesi ile sonuçlandığı açıktır. Belirli bir taban zemini modülü için dingil yükü 33'ten 39 tona yükseldikçe, gerilme yaklaşık % 19 artar. Şekil 2.13 ve 2.14' e göre, taban zemini modülünün, hem BSK hem de tamamen granüler tabakadan oluşan üstyapılar için taban zemini dikey basınç gerilmeleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu not edilebilir. Yüksek taban zemini modülü, güçlü taban zemini temsil eder ve yüksek taban zemini basınç gerilmeleriyle sonuçlanır. Örneğin, BSK' lı üstyapıda, dingil yükü sırasıyla 33 ton ve 39 ton olduğunda, taban zemini dikey basınç gerilmeleri, taban zemini modülü 3000 psi'den 30000' e yükselirken, sırasıyla % 92 ve % 96 artar (Rose *et al.* 2003).

Song vd. (2003) yapmış oldukları çalışmada, demiryolu köprüsünün yapısal bileşenlerini modellemek için çeşitli gelişmiş sonlu elemanların kullanıldığı, yüksek hızlı tren köprüsü etkileşimlerinin üç boyutlu FE analizi için yeni bir sonlu eleman modeli önermişlerdir. Spesifik olarak, bir demiryolu köprüsünün üst kısmı, önceki araştırmaların sayısal örneklerinde yüksek performans sergileyen 6 DOF' lu uyumsuz düz kabuk (NFS) elemanları ile modellenmiştir. Demiryolu üstyapıları, kiriş düğümlerinin kayması ile kiriş sonlu elemanlar kullanılarak idealleştirilir ve iki parametrelili bir elastik temel üzerindeki kirişler olduğu varsayılır. Ayrıca, eklemli bir boji sistemine sahip olan yüksek hızlı bir tren için geliştirilen araç modeli kullanılmıştır.

Lagrange' in denklemini kullanarak araç-köprü sisteminin hareket denklemleri formüle edilebilir. Ek olarak, taşıt-köprü etkileşim kuvvetleri dikkate alınarak köprü üzerinde etkiyen kuvvetlerin denklemlerini türetmek suretiyle, toplam taşıt-köprü sisteminin tüm sistem matrisleri oluşturulabilir. Bu çalışmanın nümerik örnekleri olarak, basit bir şekilde desteklenen çelik-beton kompozit köprü ve iki açıklıklı bir PC kirişli köprü analiz edilmiş ve sonuçlar önceki araştırma ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneydeki birçok belirsizliğe rağmen, analiz sonuçları deneyin sonuçlarıyla iyi bir uyum içindedir. Noktasal yer değiştirmeler ve tren geçişinin dinamik yüklerinden kaynaklanan desteklerde reaksiyon kuvvetleri de elde edilebilir. Elde edilen sonuçların, tren geçişinden kaynaklanan dinamik etkiyi değerlendirmek ve demiryolu köprülerinin yapısal elemanlarının yorulma ömrünü tahmin etmek için sayısal girdi verileri olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Teixeira vd.'ne göre (2009), sistemin toplam yaşam döngüsü maliyetlerini en aza indiren yüksek hızlı veya çok hızlı güzergahlar için yapısal çözümlerin geliştirilmesi, yeni yatırımların operasyonel karlılığını arttırmada kilit bir konudur. Geleneksel balastlı demiryollarına zıt olarak, döşemeli demiryolu çözümleri uygun maliyetli bir çözüm olabilir, ancak yalnızca demiryolu kullanılabilirliğindeki artış ve bakımının azaltılmasından kaynaklanan faydaların çok daha yüksek inşaat maliyetlerini telafi edebildiği durumlarda geçerlidir. Böyle bir yatırımın mümkün olmadığı durumlarda, inşaat maliyetlerini çok fazla arttırmadan bakım ihtiyaçlarını azaltmaya olanak tanıyan balastlı demiryolu üstyapılarında olası yapısal iyileştirmeleri değerlendirmek faydalı olabilir. Yazarlar çalışmalarında gereksinimlerini ve konvansiyonel yüksek hızlı balastlı demiryolu üstyapılarının bitümlü bir altbalast katmanı kullanarak iyileştirilmesinin etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır; birincisi, bitümlü altbalastlı yapısal çözümlerin tasarım gereklilikleri ve yüksek hızlı demiryolu üstyapı bozulması üzerindeki olası faydaları ve ikincisi, bu yapısal çözümün kullanımı ve inşaat maliyetleri açısından ekonomik etkinin değerlendirilmesi ve gelecekteki İspanyol yüksek hızlı hatlarında kullanılabilirliğidir. Şekil 2.15 'de görülebileceği gibi, bitümlü bir subballast kullanımı tamamen balastlı bir üstyapıdan oluşan yola göre 300 ve 350 km/sa'lık hızlar için üstyapı içindeki titreşim hızlanma seviyelerini azaltabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

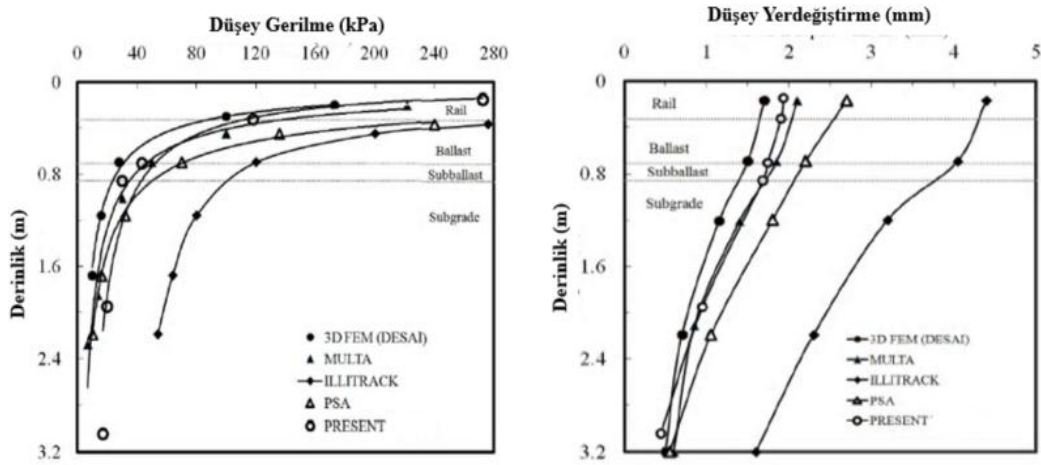


Şekil 2.15 Dikey ivmelenmeler: Balastta $v = 300$ km /sa (solda) süre ile zaman sinyalleri ve 300 ve 350 km /sa 'de (sağda) iki özdeş HS Parçasını karşılaştırarak demiryolu üstyapısında farklı seviyelerde maksimum değerler.

Sadeghi ve Askarinejad'a (2010) göre balast ve alt tabaka katmanlarının davranışının demiryolu ray performansına katkısı mevcut demiryolu ray modellerinde yeterli seviyede göz önüne alınmamaktadır. Özellikle, gerilme ve trafiğe bağlı özelliklerin analize dahil edilmesi gerekir. Bu araştırmada, ilk kez üstyapı alt tabakalarının gerilme ve trafiğe bağlı özelliklerinin birleştirilmesiyle, geri kazanılamayan şekil değiştirme ve esneklik modülü gibi demiryolu altyapısının nonlineer karakteristiklerini içeren, yeni bir teorik model geliştirilmiştir. Yeni model, iki aşamalı iki boyutlu bir modelle üç boyutlu bir yükün yayılmasını simüle eden değiştirilmiş sonlu elemanlar düzlem gerilimi tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik hesaplama süresini ve maliyetini minimumda tutar. Modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için kapsamlı saha testleri yapılmıştır. Demiryolu üstyapı sistemlerinin analiz ve tasarımındaki mevcut varsayımlara meydan okuyarak, balast ve taban zemini malzemelerin nonlineer özelliklerinin dikkate alınmasının teorik sonuçların doğruluğu üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Araştırmacılar önerilen tekniğin demiryolu üstyapı analizi için doğru ve kolay uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Sowmiya vd. (2010) demiryolu üstyapısında üç boyutlu bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Sıkıştırılmış bir taban zemininin (formasyon toprağı) üzerine yerleştirilen bir balast ve bir alt balast tabakası, tipik bir demiryolu üst yapısını oluşturur. Demiryolu üstyapılarını mevcut trafik koşullarına göre revize etmek, demiryolu üstyapısı üzerindeki etkisini araştırmak yeni tasarım metodolojilerini ve parametrik çalışmaları gerektirir. Bu amaçla, MIDAS (GTS) adı verilen jeoteknik ve

tünel yazılımı, üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturmak için kullanılmıştır. Bu sonlu elemanlar modeli ile üstyapı bileşenleri boyunca yer değiştirme ve dikey gerilmeler tahmin edilmiştir. Modeli doğrulamak için sonuçlar diğer sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Her üstyapı bileşen modülünün etkisi parametrik bir çalışma ile değerlendirilmiştir. Taban zemini modülünün etkisinin, balast ve alt balast modülüne göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Üstyapı modelinde 144.5 kN tren yükü uygulanmıştır. FAST demiryolu üstyapısındaki düşey gerilme ve yer değiştirmeler Şekil 2.16 'de ve FAST demiryolu üstyapısına ait detaylar Çizelge 2.3, 2.4 ve 2.5' de verilmiştir.



Şekil 2.16 Karşılaştırmalı düşey gerilme ve yer değiştirme sonuçları (Sowmiya et al. 2010)

Çizelge 2.3 FAST Demiryolu üstyapı modeli detayları.

Parametre	Ray	Travers	Balast	Altbalast	Taban Zemini
Elastisite Modülü, E (MPa)	222500	10349	207	138	34
Poisson Oranı (ν)	0.33	0.37	0.37	0.37	0.33
Eylemsizlik Momenti, $I \times 10^4$ (mm ⁴)	3950	-	-	-	-
Kalınlık (mm)	-	360	380	150	3276*
Uzunluk (m)	-	2.74	-	-	-

*Tahmin edilen değer

Çizelge 2.4 Parametrik çalışmada kullanılan nominal üstyapı özellikleri.

Parametre	Ray	Travers	Balast	Altbalast	Taban Zemini
Elastisite Modülü, E (MPa)	200000	30000	150	80	40
Poisson Oranı (ν)	0.30	0.33	0.35	0.34	0.40
Kalınlık (mm)	135	210	300	150	2700
Uzunluk (m)	6	2.75	-	-	-

Çizelge 2.5 Parametrik çalışmada kullanılan değişken üstyapı özellikleri.

<i>Parametre</i>	<i>Nominal Değer</i>	<i>Tüm Diğer Parametrelerin Nominal Değerde Tutulması için Kullanılan Değerler</i>
<i>Elastisite Modülü, E (MPa)</i>		
<i>Balast, E_b</i>	150	100, 200, 300
<i>Altbalast (E_{sb})</i>	80	40, 60, 100
<i>Taban Zemini (E_{sq})</i>	40	10, 20, 60, 80

44 kPa ve 1.65 mm'lik ray yuvasının altındaki alt taban yüzeyindeki (0,856 m derinlik) dikey gerilme ve yer değiştirme ölçülen değeri, MULTA ve MIDAS modelleri ile 43.4 kPa ve 1.68 mm olarak öngörülen değerle oldukça yakındır.

Yüksek hızlı trenlerin artan kullanımıyla, balastsız üstyapı, balastlı üstyapıya kıyasla daha yüksek inşaat maliyeti olmasına rağmen daha popüler hale gelmiştir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir döşeme şeklindeki demiryolu üstyapısının yorulma davranışını incelemektedir. Tayabji ve Bilow' a göre, döşeme ray sistemini iki plaka katman sistemi olarak sınıflandırılabilir: bir prekast betonarme plaka ve bir çimento-asfalt harç sandviç katmanı ile ayrılmış bir beton taban. Tüm döşeme yolu yapısı ve toprak alt tabanı 3D katı elemanlar olarak modellenmiştir, kafes elemanları olarak temsil edilen UIC60 rayı, sabitleme cihazları vasıtasıyla yüzey plakasına tutturulur. Üçlü bir döşeme sistemi sınır etkilerini azaltacak şekilde modellenmiştir, bununla birlikte sadece merkezi döşemenin tepkisine odaklanılmıştır. Sistemin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için modal analiz yapılır. Geçici analizi yapmak için raya gerçek yüksek hızlı tren darbeleri uygulanır. Çoğu olumsuz düğüm veya bölge, döngü sayımı için tanımlanırken, her stres seviyesinde yorulma arızasına neden olan döngülerin sayısı, yeni FIB Model Koduna göre tahmin edilir. Farklı geometrik ve mekanik faktörlerin birikmiş hasar üzerindeki etkisini değerlendirmek için parametrik analizler yapılır. Mevcut çalışmaya göre malzeme mukavemeti ve döşeme kalınlığı için minimum gereksinim önerilmiştir (Paveda *et al.* 2013).

Yang vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada Çin'de Yüksek hızlı hatlarda asfalt betonu uygulamasından bahsetmişlerdir. Asfalt betonu, iyi taşıma kapasitesi, su geçirmezlik,

şok emilimi ve gürültü azaltma avantajlarına sahip karayolu ve havaalanı kaplamalarının yapımında kullanılan geleneksel bir malzemedir. Çin'deki hızlı tren yollarının hızla gelişmesiyle birlikte, yüksek hızlı tren yollarını destekleyen yük taşıma altyapısı drenaj, yerleşim ve yapısal yorulma gibi problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Son yıllarda, Çin yüksek hızlı demiryolunun demiryolu altyapısını inşa etmek için asfalt betonu kullanılmaktadır. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada, laboratuvar deneylerine dayanarak Demiryolu Asfalt Betonu (RAC) malzeme bileşimi üzerinde durmuştur. RAC malzemesi ve performans parametreleri, otoyol asfalt kaplamalarının modifiye geleneksel deneyleri kullanılarak ölçülmüştür. Malzeme deney sonuçlarına dayanarak, demiryolu altyapısı için kullanılan RAC-25 malzemesinin hava boşluğunun % 1 ila % 3 arasında kalması sağlanmalıdır. Optimum bitümlü bağlayıcı içeriği, hacimsel parametre, Marshall Stabilité, TSR, geçirgenlik katsayısı ve eğilme çekme dayanımı gibi parametre testlerinden uygun şekilde elde edilmelidir. Araştırmacılara göre önerilen bitüm içeriği % 5.8'den az olmalıdır. RAC-25 ile yük taşıma altyapısı, daha iyi bir performans sağlamak ve onu yüksek hızlı demiryolu altyapısı için uygun bir yapı haline getirmek için, taban zemininin üstünde stabilize bir katman olan taban zemini yüzey katmanı ile kısmen yer değiştirilir.

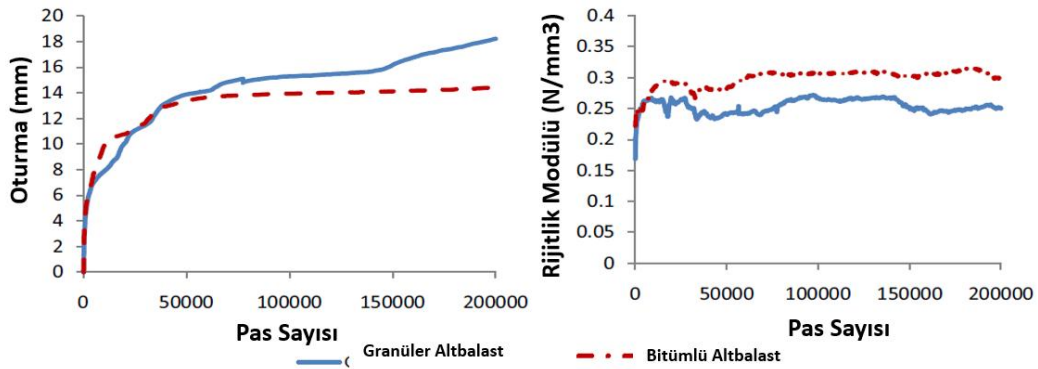
Varandas *et.al* (2014) demiryolu köprü yaklaşımlarındaki demiryolu nonlineerlik etkisini modellemişlerdir. Demiryolu köprüsü yaklaşımlarında üstyapı rijitliği hızla değişebilir ve çoğu zaman sert yapı ile pistin yaklaşma kesimi arasında farklı oturmalar meydana gelir. Bu farklı yerleşimler eşit olmayan ray profillerine ve traverslerin temeli ile yaklaşma bölümündeki balast arasındaki boşlukların ortaya çıkmasına neden olur. Balast ve alt balast, demiryolu üstyapısını taşıyan, non-lineer gerilmelere bağlı bir davranış sergileyen ve geçişlerde çok defa daha hızlı degrade olan bağlayıcısız granüler malzemelerdir. Araştırmacıların yaptığı çalışma, demiryolu geçişinin dinamik simülasyonu için bu non-lineer yönlerin sonlu elemanlar algoritmasında uygulanmasına odaklanmıştır. Üstyapıyı oluşturan bağlayıcısız agregaların lineer ve non-lineer kurucu yasaları, asılı traversli düz ve düz olmayan üstyapı profilleri, bir demiryolu köprüsü yaklaşımının davranışını yeniden üretmek için kullanılır. Gerilme ve deformasyon sonuçları hem lineer hem de non-lineer senaryolar için sunulmuş ve tartışılmıştır. Demiryolu üstyapısının balast zemin desteğindeki farklı yerleşimlerin olası görünümü

ve gelişimi, ardışık traversler altındaki azami yük arasındaki farkları büyük ölçüde artırır. Bu etki, daha sonra, balast tabakasının bozulmasına ve muhtemelen traverslerin altındaki boşlukların gelişmesine olmaktadır. Sonuçlar, non-lineer yönlerin dikkate alınmasının demiryolu geçişlerinin modellenmesi açısından önemli olduğunu göstermiştir. Balast ve alt balastın nonlinear kurucu davranışlarının dikkate alınması, bu tabakaların gerilme-şekil değiştirme tepkisi hakkında bir içgörü amaçlandığında özellikle önemli hale gelmektedir. Eşdeğer lineer modelin yer değiştirmeler ve travers-balast kuvvetleri bakımından yaklaşık olarak aynı sonucu verdiği kanıtlanmıştır. Balast ve balast altı tabakalarındaki gerilmelere ve şekil değiştirmelere de bağlı olacak geçişin uzun vadeli değerlendirilmesi için, nonlinear bir modelin uygulanması esastır.

Asfalt betonu, iyi taşıma kapasitesi, su geçirmezlik, şok Emilimi ve gürültü azaltma gibi avantajları olan, karayolu ve havaalanı kaplamalarının yapımında kullanılan geleneksel bir malzemedir. Çin'deki hızlı tren yollarının hızla gelişmesiyle birlikte, yüksek hızlı tren yollarını destekleyen yük taşıma altyapısı drenaj, yerleşim ve yapısal yorulma gibi problemlerle karşı karşıyadır. Son yıllarda, Çin yüksek hızlı demiryolunun demiryolu altyapısını inşa etmek için asfalt betonu kullanılmaktadır. Araştırmacılar çalışmalarında laboratuvar deneylerine dayanarak Demiryolu Asfalt Betonu (RAC) malzeme bileşimi üzerinde durmuşlardır. RAC malzemesi ve performans parametreleri, karayolu asfalt kaplamalarının değiştirilmiş geleneksel deneyleri kullanılarak ölçülmüştür. Malzeme test sonuçlarına dayanarak, demiryolu altyapısı için kullanılan RAC-25 malzemesinin hava boşluğu içeriği % 1 ila % 3 arasında kontrol edilmelidir. Optimum bitüm içeriği, hacimsel parametre, Marshall Stabilite, TSR, geçirgenlik katsayısı ve eğilme çekme dayanımı gibi parametre testlerinden uygun şekilde elde edilmelidir. Önerilen bitüm içeriği % 5.8' den az olmalıdır. RAC-25 ile yük taşıma altyapısı, daha iyi bir performans sağlamak ve onu yüksek hızlı demiryolu altyapısı için uygun bir yapı haline getirmek için taban zemini üzerinde stabilize bir katman olan taban zemini yüzey katmanını kısmen değiştirir. (Yang et.al 2015).

Sol-Sánchez *et.al*'a (2015) göre demiryolu üstyapılarında bitümlü alt balast kullanımı, kesimin dayanımını artırmak için uygun bir çözüm olarak kabul edilir. Bununla birlikte, yaygın olarak uygulanması için, bu malzemenin çeşitli servis koşulları altında yerine

getirmesi gereken ana gerekliliklere göre etkinliğini değerlendirmek için daha derinlemesine çalışmalara ihtiyaç vardır. Araştırmacıların yaptıkları çalışmada bitümlü malzemenin (aşırı iklimlerde demiryolu hatlarında beklenen rutin ve olumsuz sıcaklıklar altındaki) mekanik davranışını, geleneksel granüler alt balast tabakalarla kıyaslanarak değerlendirmeye odaklanılmıştır. Özellikle, bu malzemelerin demiryolu hatlarında kullanımları için karşılanması gereken temel gereksinimler (plastik ve delme deformasyonlarına direnç, taşıma kapasitesi, gerilme dağılımı, çatlama direnci ve su geçirmez özellikler) açısından performansları incelenir. Aynı zamanda, global üstyapı kesit performansı üzerindeki etkileri, her iki altbalast türü için tam ölçekli bir deney aracılığıyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bitümlü alt balast kullanımının hem demiryolu üstyapısının mekanik tepkisini hem de üstyapı yatağı katmanlarının geri kalanının korunmasını iyileştirebileceğini göstermiştir, çünkü bu malzeme geçen trenlerde uygulanan yüklere karşı daha yüksek mukavemete, düşük geçirgenliğe sahiptir ve aynı zamanda balast tarafından altyapıya iletilen gerilmeleri dağıtma kapasitesi de daha yüksektir (Şekil 2.17). Bununla birlikte, sıcaklığın bitümlü alt balastın plastik ve delme deformasyonlarına karşı direncinde de önemli bir rol oynadığı düşünülürken, çatlamaya karşı direnci daha yüksek sıcaklıklarda belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bu durum bu parametre değerlerinin bu katman için genel olarak kaydedilenlerden daha yüksek olması beklenen bölgelerde demiryolu hatlarındaki uygulamasını sınırlayabilir.



Şekil 2.17 Altbalast tipinin oturma ve rijitlik modülü üzerindeki etkileri (Sol-Sánchez et.al. 2015).

İyi taşıma kapasitesi, düşük su geçirgenliği, şok emilimi, mükemmel dayanıklılık, gürültü azaltma ve kolay inşaat özelliklerine sahip asfalt beton karışımı, yüksek hızlı

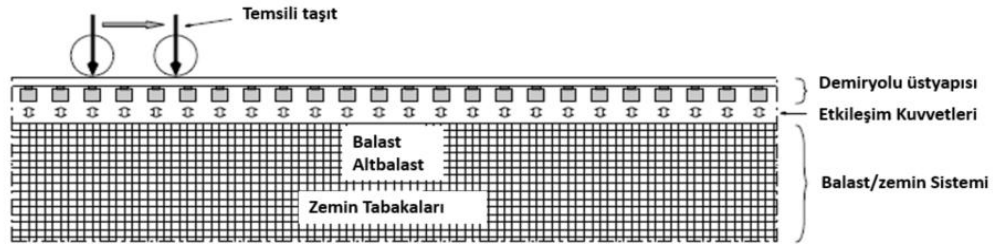
demiryolu alt yapılarının önemli bir alternatifidir. Son yıllarda, Çin, yüksek hızlı demiryolu sektöründe hızlı bir büyümeye tanıklık etmekte ve rayların yük taşıma altyapısında demiryolu yorulması, drenaj ve oturma problemlerine neden olmaktadır. Çin yüksek hızlı demiryolunun demiryolu altyapısında asfalt betonu kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemine dayanarak, asfalt beton alt döşemesinin mekanik tepkileri (ACRS-1 tipi) ve mekanik modellere dayalı sıradan bir döşeme yapısı hem statik hem de dinamik yükler kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, ACRS-1 yapısı altındaki asfalt beton temelinin altındaki gerilmenin çok küçük olduğunu ve müsaade edilen asfalt betonu taşıma kapasitesini aşmayacağını göstermektedir. İki çeşit demiryolu altyapısının karşılaştırılması, asfalt betonunun (ACRS-1), dikey dinamik, demiryolu üstyapısının deformasyonunu bir dereceye kadar azaltabileceğini göstermektedir. Asfalt betonarme alt taban yatak yapısı, ray yapısının düşey titreşimini azaltabilir. İvme genliğinin azalması, gürültü yeteneğini azaltabilir.

Han et.al'a (2015) göre yüksek hızlı trenlerin yağmurlu bölgelerde çalıştığı durumlarda, su-toprak bağlantısı dinamik problemini göz önünde bulundurarak yüksek hızlı demiryollarının taban zemini özelliklerini incelemek önemlidir. Yapılan çalışmanın amacı araç-demiryolu üstyapısı birleştirme dinamiğine dayanan yüksek hızlı bir tren yükü altında, taban zemini ile döşemeli demiryolunun nonlinear bir su-zemin etkileşim dinamik modelini geliştirmektedir. Bu model kullanılarak su olmaksızın ve su-zemin etkileşimini içeren yüksek hızlı tren yüklerinin neden olduğu temel dinamik karakteristikler incelenmiştir. Temel faktörler olarak permeabilite katsayısı ve taban zemini deformasyonunu etkileyen porozite incelenmiştir. Geliştirilen modelin özellikle su bakımından zengin toprağın etkisi göz önüne alındığında, toprağın dinamik davranışını daha gerçekçi bir şekilde karakterize edebileceği belirlenmiştir.

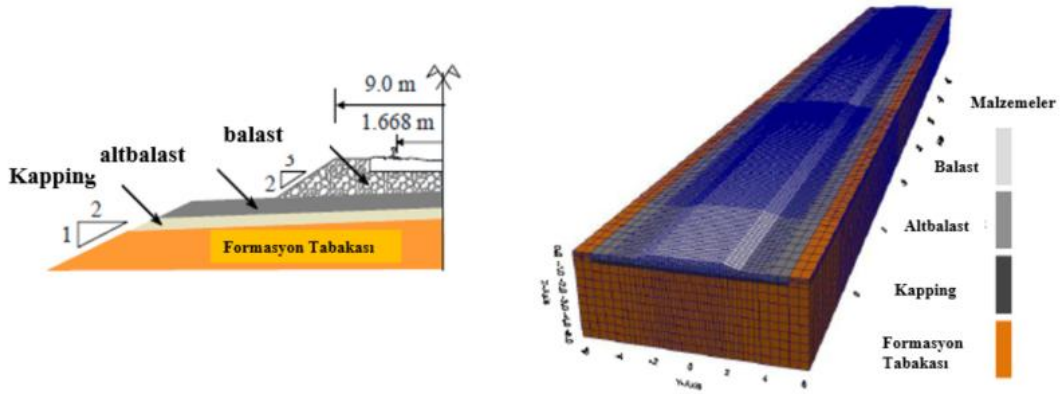
Paixão et.al (2016), farklı yükleme koşulları altındaki ve demiryolu üstyapılarında kullanılan geo malzemelerin nonlinear davranışları üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Demiryolu üstyapılarında kullanılan geo malzemelerin, özellikle balast tabakasının esneklik modülü davranışı çoğunlukla lineer değildir ve esas olarak yükleme gerilme şekline bağlıdır. Bununla birlikte, geo malzemeler, belirli bir yük genliği için nonlinear modellerin sonuçlarını biraz ürettiği varsayılarak yapılan yapısal

analizlerde sıklıkla lineer elastik olarak kabul edilir. Yapılan çalışma da bu değerlendirmenin simülasyon için yeterli olup olmadığına, sadece genel demiryolu üstyapı davranışını değil, aynı zamanda farklı yükleme koşulları da dikkate alınarak odaklanılmıştır. Araştırmacılar, deneysel verilerle doğrulanmış üç boyutlu tren-yol-zemin sistemi modellerini kullanmış ve lineer-elastik modellerin sonuçları nonlinear modellerle karşılaştırmışlardır. Lineer elastik modeller önemli ölçüde daha düşük hesaplama çabası gerektirse de ve toplam üstyapı tepkisinin doğru tahminlerini sağlayabilseler de, balast tabakası içindeki gerilme seviyelerini önemli bir şekilde azaltırlar. Sonuç olarak, bu özellik, balast tabakasının demiryolu üstyapılarındaki esnek ve plastik deformasyonlarını analiz etmek için lineer elastik modellerin kullanıldığı çalışmalar için önemli bir engel teşkil edebilir.

Varandas vd.'a (2016) göre demiryolu üstyapılarının uzun vadeli oturmaları, üstyapı granüler tabakalarında ve taban zemininde meydana gelen kalıcı deformasyonların bir sonucudur. Tren geçişleri sırasında en yüksek gerilme genliklerini deneyimleyen balast katmanında, bu kalıcı deformasyonlar yükleme koşullarına büyük ölçüde bağlıdır; bu sırada tren hızı ve dingil yükleri, travers balast başlangıç basıncı veya yol geometrik koşullarının kalitesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Buna ilaveten, trenden gelen hareketli yüklerin etkisi altında, dikey gerilmelerdeki önemli artışlara ek olarak balast tabakası asal gerilmelerin rotasyonunu deneyimlemektedir; bu uzun vadeli yapısal davranışı önemli ölçüde etkileyen başka bir özelliktir. Araştırmacıların yaptığı bu çalışmada tren geçişlerinden dolayı balasttaki gerilme değişikliklerini sayısal olarak analiz edilmesi ve bu gerilmelerin yükleme koşullarına bağlı olarak nasıl değişebileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Balastın nonlinear esnek davranışını gözönünde bulundurmak için üstyapı-balast-zemin sistemini üç boyutlu temsil eden bir FEM modeli kullanılmıştır. Üç boyutlu model 151 travers, 90.9 m uzunluğa tekabül eder ve ray sistemini modellemek için 3618 çerçeve elemanı ve 3469 düğümden oluşan 151 ağ kullanılarak balast-zemin sistemini temsil etmek için 260 864 katı eleman ve 280 098 ağdan oluşmaktadır (Şekil 2.18).

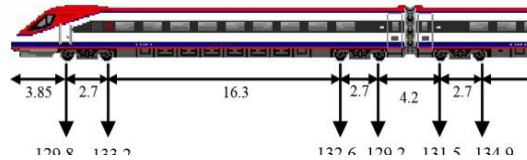


Şekil 2.18 Demiryolu üstyapı sistemi ve balast-zemin sistemi (Varandas 2016).



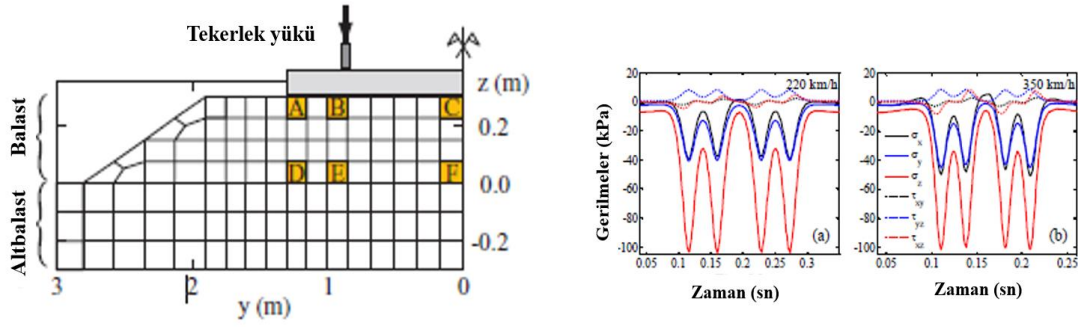
Şekil 2.19 Modellemede kullanılan şematik demiryolu enkesiti, temsili nümerik model ve ilgili FEM modeli (Varandas 2016).

Analizlerde, Şekil 2.20' de gösterilen iki bitişik bojiye ait dört ardışık aksa göre, 132 kN'lık dört sabit hareketli yük aracılığıyla uygulanan Alfa Pendular yolcu treninin yüklenmesi düşünülmüştür.



Şekil 2.20 Alfa Pendular'ın aks düzeninin (m cinsinden) şematik gösterimi (Varandas 2016).

Şekil 2.21, 225 ve 350 km/sa'lik tren hızları için, eleman A'daki altı farklı gerilme bileşeninin zaman geçmişlerini göstermektedir. Dikey gerilmelerin hız artışı ile hafifçe azaldığı, ancak yatay gerilmelerin arttığı görülmektedir.



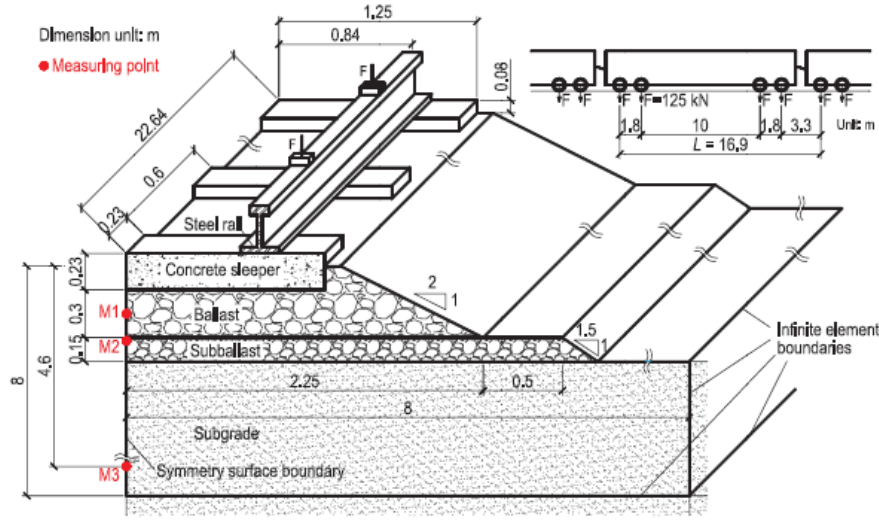
Şekil 2.21 Seçilen elemanların konumu, trenin (a) 225 km/sa ve (b) 350 km/sa hızlardaki geçişlerinde A elemanı içerisindeki gerilme zaman geçmişi (Varandas 2016).

Çalışma, çok yüksek hızlarda seyahat eden trenlerin neden olduğu dinamik etkilerin, yükleme sırasında izlenen gerilme yolunu önemli ölçüde etkileyebileceğini aynı zamanda ana gerilmenin yolun üst katmanları içindeki dönüşünü etkileyebileceğini göstermektedir. Bu makalede ayrıca, balastın nonlinear davranışının, asal gerilmelerin rotasyonunda dikkate alınmasının önemine değinilmektedir.

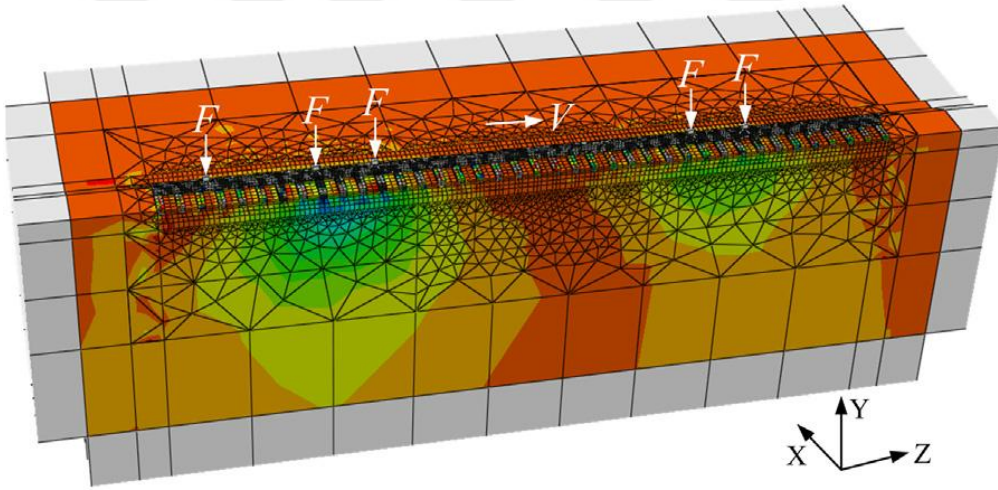
İyi taşıma kapasitesi, düşük su geçirgenliği, şok emilimi, mükemmel dayanıklılık, gürültü azaltma ve kolay inşaat özelliklerine sahip asfalt beton karışımı, yüksek hızlı demiryolu alt yapılarının önemli bir seçeneğidir. Son yıllarda Çin, yüksek hızlı demiryolu sektöründe hızlı bir büyümeye tanıklık etmekte ve rayların yük taşıma altyapısında demiryolu yorulması, drenaj ve oturma sorunlarına neden olmaktadır. Çin yüksek hızlı demiryolunun demiryolu altyapısında asfalt betonu kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, sonlu elemanlar yöntemine dayanarak, asfalt beton alt döşemesinin mekanik tepkileri (ACRS-1 tipi) ve mekanik modellere dayalı sıradan bir döşeme yapısı hem statik hem de dinamik yükler kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, ACRS-1 yapısı altındaki asfalt beton temelinin altındaki gerilmenin çok küçük olduğunu ve izin verilen dayanıklılık olan asfalt betonunun taşıma kapasitesini aşmayacağını göstermiştir. İki çeşit palet altyapısının karşılaştırılması, asfalt betonunun (ACRS-1) demiryolu üst yapısının dikey dinamik deformasyonunu bir dereceye kadar azaltabileceğini göstermektedir. Asfalt betonu ile güçlendirilmiş taban zemini yatağı ray yapısının düşey titreşimini azaltabilir. Ayrıca ivme genliğinin azalmasını, gürültünün de azalmasını sağlayacağı sonuçlarına ulaşılmıştır (Bouraima *et.al* 2017).

30.000 km uzunluğundaki Fransız konvansiyonel demiryolu hatları için (tüm ağın% 94'ü), tren hızı şu anda 225 km /sa ile sınırlıdır, 3600 km uzunluğundaki yüksek hatlar için ise hız 320 km/sa'dir. Günümüzde, konvansiyonel hatlar için hız sınırını artırarak hizmetleri iyileştirmek için artan bir ihtiyaç vardır. Yapılan çalışmada, tren hızının saha izleme verilerine dayanarak demiryolu üstyapı yatağı malzemelerinin mekanik davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ara tabakalar ve taban zemini davranışlarına vurgu yapılmıştır. Araştırmacılara göre farklı üstyapı derinliklerine monte edilen ivmeölçer kayıtları birleştirilerek farklı katmanların dikey şekil değiştirmeleri elde edilebilir. Deney, 60 km / sa' den 200 km / sa' ye kadar farklı hızlarda çalışan şehirlerarası bir test treni kullanılarak yapılmıştır. Bu test treni bir lokomotif (22.5 Mg/aks) ve 7 “Corail” vagonundan (10.5 Mg / aks) oluşuyordu. Tren hızı yükseltildiğinde, üstyapı yatağına iletilen yüklerin arttığı görülmüştür. Dahası, üstyapı yatağı malzemelerinin tepkisi farklı derinliklerdeki hız artışı ile birlikte artmaktadır: tren hızı 60 km /sa' den 200 km /sa' ye yükseltildiğinde lokomotif yüklemesi için dikey dinamik gerilme yaklaşık % 10 artmıştır ve sıg katmanlardaki dikey statik gerilmeler iki katına çıkmıştır. Ayrıca, gerilme-şekil değiştirme şekilleri, her tren hızı için dikey gerilme ve şekil değiştirmeler kullanılarak hesaplanmıştır. Bu şekiller, esnek modülün (M_r) belirlenmesine izin vermiştir. Tren hızının 100 km/sa'den 200km/sa 'e çıktığında esneklik modülünün de (M_r) %10 azaldığı bulunmuştur (Lamas-Lopez *et al.* 2017).

Li vd. (2018) yaptıkları çalışmada balastlı demiryolları için sonsuz eleman (IE) sınırları olan sonlu elemanlar (FE) ağırları içeren üç boyutlu bir model önermişlerdir. Hareketli tren yükleri, destek rayları ile arayüzde sert temas özelliğine sahip hareketli elemanların kayma hareketleri ile simüle edilir. Balastlı demiryolunun farklı tren hızları altındaki dinamik tepkileri, baskın frekansı ve kritik hızı tanımlamak için zaman bölgesi ve frekans bölgesinde incelenmiştir. Rayleigh dalgası (R-Wave) yayılımı, tabakalı set modelinde R-Wave hızını ve balastlı demiryolunun kritik hızı ile olan ilişkisini belirlemek için kombine FE-IE modeli kullanılarak simüle edilir. Önerilen model, Euler-Bernoulli Elastik Kiriş (E-BEB) modelinin sonuçlarıyla kıyaslanarak başarıyla doğrulanmıştır.



Şekil 2.22 Modellenen balastlı demiryolu üstyapısının geometrik boyutları ve fiziksel bileşenleri (Li *et al.* 2018).



Şekil 2.23 Hareketli yükler altında oluşan düşey gerilmeler (Li *et al.* 2018).

Dünyanın dört bir yanındaki yüksek hızlı tren yollarının çoğunluğu Çin'dedir ve Çin'deki yüksek hızlı tren yollarının %90' ından fazlası çift hatlıdır. Çift hatlı yüksek hızlı demiryolu altındaki alt seviyenin dinamik tepkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu demiryollarının karmaşıklığı nedeniyle oldukça sınırlıdır. Chen ve Zhou (2018) 8 hareket edebilen hareketli sabit yüklere maruz kalan çift hatlı bir balastsız demiryolu üstyapı sistemi için ABAQUS yazılımı kullanılarak üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. Farklı hatlardaki dinamik tepkiler ve hat desenleri (özellikle dikey gerilme, yer değiştirme, hız ve ivme), farklı hızlarda seyahat eden (250, 300 ve 360 km /

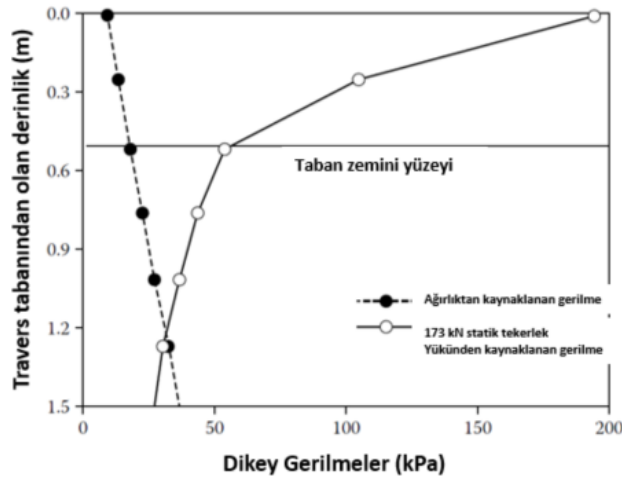
sa) trenler için Şekil 2.24’ de taban zemini yüzeyindeki üç noktada belirlenmiştir (Nokta A, Nokta B ve Nokta C) (tek yönlü ve çift yönlü hatlarda). Bu tren hızlarında taban zemini yüzeyinde seçilen noktalardaki dikey gerilme dağılımları ve çizgi desenleri gösterilmiş ve A noktasındaki ve B noktasındaki alt tabanın zemin derinliği boyunca düşey gerilme dağılımları ele alınmıştır. Yapılan çalışmanın temel bulguları şu şekildedir: Bu çalışmanın temel bulguları aşağıdaki gibidir. Maksimum üç gözlem noktasında dikey yer değiştirme, tren hızı arttıkça düşer, oysa mutlak maksimum dikey hız tren hızı arttıkça hafifçe artar. Çift yönlü hatlarda, maksimum dikey gerilmeler alt zemin yüzeyindeki rayların altında meydana gelir ve gerilme dağılımları asimetriktrir. A Noktasında (sol çizgideki sol rayın altındaki alt taban yüzeyindeki nokta), dikey gerilme zemin derinliği boyunca azalır ve dikey gerilme zayıflaması çift yönlü çalışan hatlar için daha belirgindir. Bununla birlikte, B noktasında (alt taban yüzeyinin ortasındaki nokta), dikey gerilme toprak derinliği boyunca artar. A Noktası ve B Noktasındaki düşey gerilmeler zemin derinliğinin artmasıyla birlikte birbirine yakın olma eğilimindedir, böylece bu çalışmada incelenen tren hızları aralığında dolgu tabakasında değerlerin neredeyse çakışması sağlanır (Chen and Zhou 2018).



Şekil 2.24 Pekin-Şangay çift hatlı düşük dolgulu yüksek hızlı balastsız döşeme raylı demiryolu üstyapı kesiti (Chen and Zhou 2018).

Demiryolu alt yapısının ağırlığı (balast, alt balast ve alt tabaka) malzeme türüne (birim ağırlık) bağlıdır. Demiryolu altyapı malzemesinin birim ağırlığı değişkendir. Örneğin, tipik birbirim hacim ağırlığı, balast için 1.760 kg/m^3 (225 lb / ft^3), zemin için 1.920 kg /

m^3 (225 lb / ft^3) ve ana kaya için 2.240 kg/m^3 tür (140 lb / ft^3). Balastın taban zemininden daha düşük birim ağırlığa sahip olmasının sebebi, balastta daha fazla boşluğun olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.25 sırasıyla bir statik tekerlek yüküne (173 kN) bağlı olarak, üstyapı ve taban zemini ağırlığına bağlı olarak hesaplanmış dikey gerilmelerin bir örneğini göstermektedir. Hesaplama, GEOTRACK kullanılarak beton traversi olan tipik bir demiryolu üstyapısı için yapılmıştır.



Şekil 2.25 Üstyapı ve taban zemininde ağırlık ve tekerlek yükünden kaynaklı gerilme dağılımları.

Gösterildiği gibi, ölü yükten kaynaklanan gerilmeler derinlikle artarken, hareketli tekerlek yükünden kaynaklanan gerilmeler derinlikle azalır. Sığ derinlikte, hareketli yük gerilmesi ölü yük gerilmesinden çok daha büyüktür. Ancak, daha derinlerde, eğilim tersine döner. 1.3 m'den daha büyük bir derinlikte, üstyapı ve taban zemini ağırlığından kaynaklanan gerilmeler (ölü yük) daha belirgin hale gelir (Li *et al.* 2016).

Aksop ve Güler (2017) yaptıkları çalışmada, balast tabakası veya beton plak üzerine oturan ray ve traverslerden oluşan yapıyı elastik yatağa oturan kiriş olarak sonlu elemanlar yöntemiyle iki (2D) ve üç (3D) boyutlu modellendirilerek analiz etmişlerdir. SAP2000 ve PLAXIS programları ile elde edilen sonuçlar Winkler Elastik Yatak Modeli ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan yöntemler;

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),

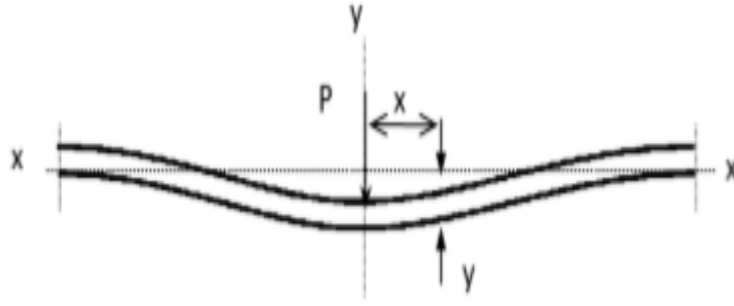
Model-7: Balastlı demiryolu üstyapısının zemin tabakalı iki boyutlu modeli (FEM)' dir.

Analiz yapılan her bir elemana ait özellikler Çizelge 2.6' da verilmiştir. Balast tabakasının doğal zemine oturduğu kesimler sabit mesnet olarak, sistemin sağ ve sol tarafları düşeyde kayıcı mesnet olarak alınmıştır.

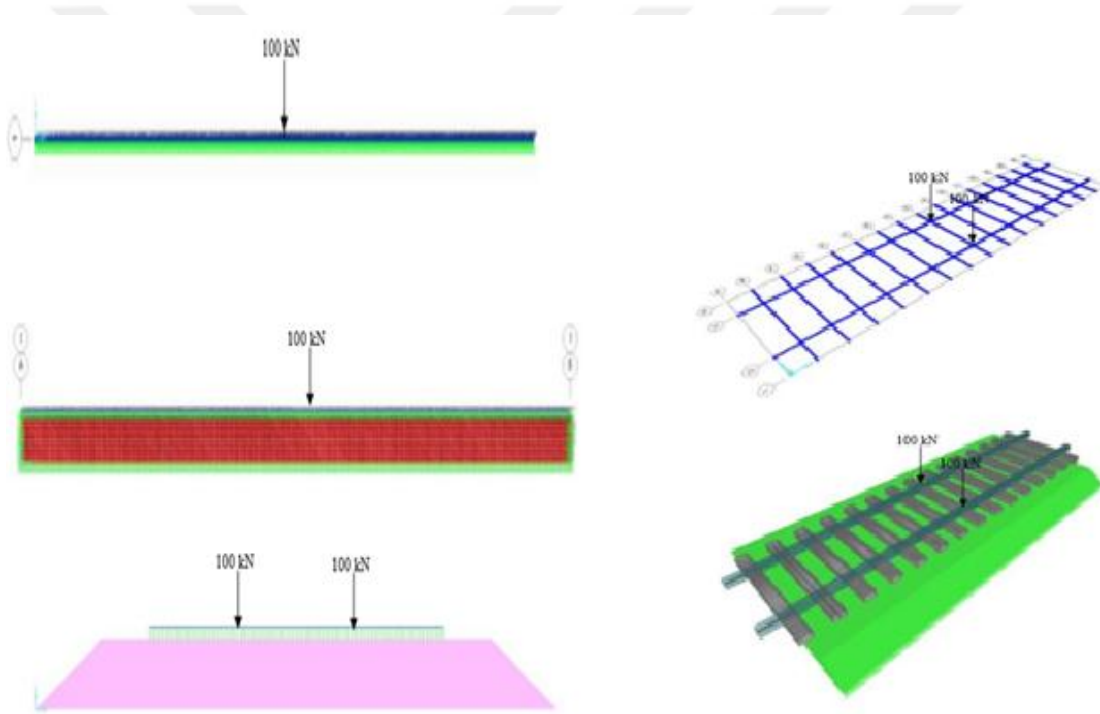
Çizelge 2.6 Malzeme özellikleri ve boyutları.

Malzeme	Özellik	Malzeme	Özellik
Ray Tipi	S49	Travers Kenar Uzunluğu	50 cm
Ray Atalet Momenti	1.816 cm ⁴	Travers aralığı	65 cm
Ray Elastite Modülü	210.000 Mpa	Travers Elastite 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 Yüğü	100 kN

Şekil 2.26' da elastik yatağa oturmuş kiriş, klasik yöntem için modellenmişken, Şekil 2.27' de sonlu elemanlar yönteminde kullanılan modeller verilmiştir.



Şekil 2.26 Elastik yatağa oturmuş kiriş model (Aksop and Güler 2017).



Şekil 2.27 SEM için kullanılan modeller (Aksop and Güler 2017).

Yapılan analizler sonucu Çizelge 2.7’ de da görüldüğü gibi genelde birbirine yakın değerler çıkmıştır. Yalnız Model-4’ de balast tabakasındaki çökme miktarının diğerlerine göre fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda Model 7 de sistemin zemin tabakası dahil edilerek çözümü ile diğer sonuçlara yaklaşılmıştır.

Çizelge 2.7 Demiryolu üstyapı modellerine ait çökme ve moment değerleri

Demiryolu	Üstyapı Modelleri	Çökme (cm)	Moment (kNcm)
Model-1	Winkler yöntemi	0.1734	2677.78
Model-2	Elastik yatağa oturan kiriş eleman	0.1747	2671.24
Model-3	Balast tabakası boyuna düzlem	0.1746	2664.60
Model-4	Balast tabakası enine düzlem	0.4296	1613.64
Model-5	Elastik yatağa oturan ızgara kiriş eleman	0.1277	2265.19
Model-6	Üç boyutlu demiryolu üstyapı model sistemi	0.1032	1897.44
Model-7	Balastlı demiryolu üstyapısının zemin tabakalı modeli	0.0306	-

Analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin, üstyapıya etki eden teker yükü altındaki momentler ve çökmelerle doğrudan etkileşimde olduğu görülmüştür. En fazla çökme ve moment değerleri tekerlek yükü altında olmuştur. Travers aralığının azaltılması ve travers alanının arttırılması balast sıkışmasını azaltmıştır. Klasik balastlı yapıda, statik ray çökmesini en çok etkileyen ray parametresi balast-zemin rijitliğidir. Alman demiryollarında, yüksek hızlı demiryolu hatlarında optimum ray çökmesi 0.12-0.15 cm' dir. Modeller incelendiğinde Sap2000'de en gerçekçi sonuçların iki boyutlu elastik yatağa oturan ızgara kiriş modeli ile balast, travers ve rayın üç boyutlu olarak modellenen sistem olduğu, zemin tabakasının dahil olduğu Plaxis modeli için bulunan deformasyon değeri ise kabul edilebilir sınırlar içinde kalsa dahi, zemin özelliklerinin balast çökmesine olan etkisinin ayrı bir konu olarak incelenmesi gerekliliği sonucuna varılmıştır.

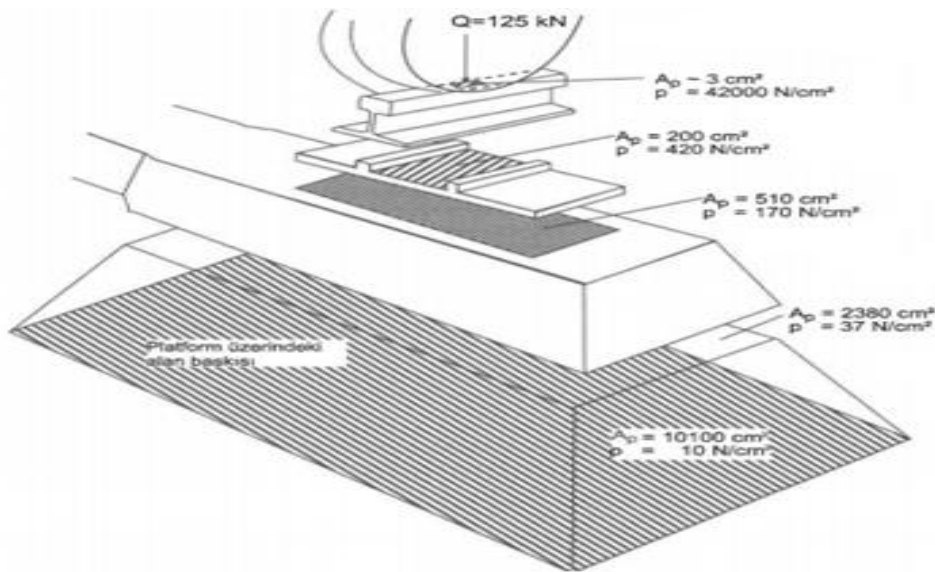
Yapılan literatür taramasından da görüleceği üzere, ülkemizde bu tip bir çalışma daha önce yapılmamıştır. Bu tez çalışması ile altbalast tabakasında granüler malzeme yerine bitümlü karışım kullanılmasının faydaları yapılan sonlu elemanlar modeli ile ortaya konmuştur.

3.MATERYAL VE METOD

3.1 Problemin Tanımı

Bu çalışmada demiryolu yapısında farklı özellikte malzemeler kullanarak katmanlarda meydana gelen şekil değiştirme ve gerilme analizlerini karşılaştırmak amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

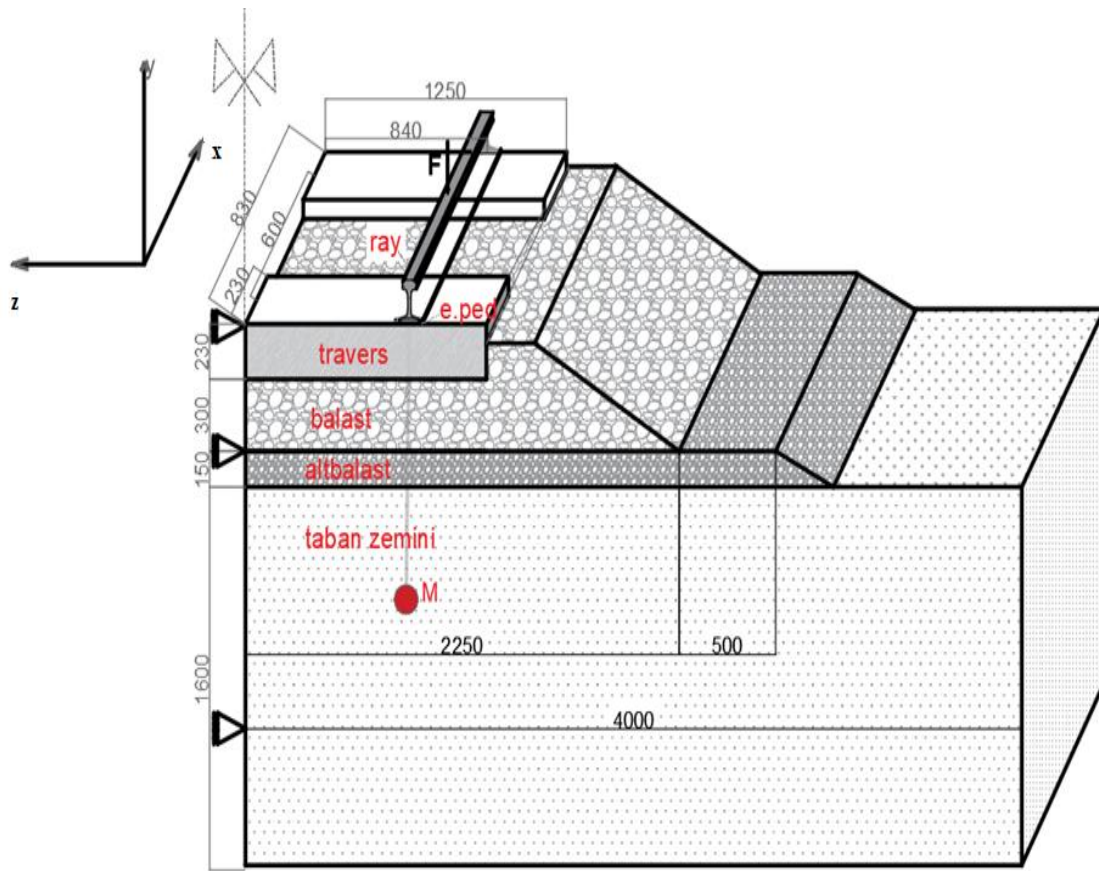
Malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için belirli bir yük altındaki davranışları yorumlanır. Belli bir sınırdan sonra yük, malzemede kalıcı (plastik) ya da geçici (elastik) deformasyonlara sebep olabilmektedir. Uygulanan yükler statik ya da dinamik olmak üzere temelde iki çeşittir. Dinamik yük deneyleri malzemenin yorulma dayanımının, statik yükleme deneyleri ise çekme, basma, kayma, burulma, eğme, sertlik gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Gerilme ve gerinim arasındaki oran olarak tanımlanabilen elastite modülü ise malzemenin deformasyona direncidir. Elastite modülü arttıkça cismin rijitliği artacak, şekil değişimi ise azalacaktır. Demiryolu hattında sistem, teker yükünün raya teması ile kendisine etkiyen yüke karşı direnç gösterir. Şekil 3.1’ de her alt tabakada genişleyen alana sahip sistem elemanları olabildiğince bu baskıya karşı koyup oluşturduğu dirençlerle baskıyı yutmaya çalışırlar.



Şekil 3.1 Tekerlek yükü baskısının hattaki elemanlara dağılımı (Lichtberger 2011).

Bu çalışmada, Şekil 3.2 deki, statik yükün etkidiği TCDD standartlarına uygun, klasik bir demiryolu yapısındaki normal gerilmeler, kayma gerilmeleri ve şekil değişimleri incelenmiştir.

Bu yöntemin uygulanması için de ANSYS bilgisayar programı tercih edilmiştir. Demiryolu üstyapısı AutoCAD programında iki boyutlu olarak modellenip ANSYS programına aktarılarak üç boyutlu analiz edilmiştir.



Şekil 3.2 TCDD standardına uygun modellenen demiryolu kesiti.

Klasik bir raylı sistem kesitinin altbalast elemanı; balast ve asfalt malzemeleri kullanılarak; farklı iklim şartlarında (Elastiste modülleri farklı), farklı taban zeminleri seçilerek, farklı kalınlıklarda (150, 160, 170, 360, 190 ve 200 mm), Çizelge 3.2’ deki 105 kN, 200 kN, 225 kN, 360 kN farklı dingil yükleri uygulanarak analiz edilmiş olup malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir. Bu malzemelerden ray,

travers, balast ve granüler altbalastın mekanik özellikleri Li vd. (2018), asfalt malzemeler ise Rose vd. (2003)' e göre seçilmiştir. Araştırma için farklı malzeme ve yükleme durumları için Çizelge 3.3 deki gibi kombinasyon yapılmış ve toplamda 288 model analiz edilip yorumlanmıştır. Yükün uygulandığı düşey hat üzerinde tanımlanan “M” ile yeri belirtilen nokta, gerilmeler için referans alınmıştır. Üstyapı elemanları TCDD standartlarına uygun seçilen modelin taban zemininin kalınlığı belirlenirken farklı kalınlıkta taban zeminleri için analiz yapılmış, seçtiğimiz kalınlıktaki zeminde tabana doğru gerilmelerin sıfıra yaklaştığı tespit edilmiştir. Sistem, bir YHT hat kesitinin düşeyde simetri eksenini ile ayrıldığı varsayımı ile modellenmiştir. Ayrıca, Li et al. (2018) yaptıkları çalışmadaki balastlı demiryolları için sonlu elemanlar (FE) ağları içeren üç boyutlu model referans alınmış olup statik yük için çözümlenmiştir.

Çizelge 3.1 Malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Elastik Modülü E (Mpa)	Poisson Oranı (ν)	Referans
Ray	2060000	0.30	Li et al. (2018)
Elastik ped	1000	0.45	Eroğlu (2014)
Travers	25500	0.20	Li et al. (2018)
Balast	200	0.25	Li et al. (2018)
Alt Balast (Balast)	115	0.30	Rose et al. (2003)
Alt Balast (Asfalt Standart)	9600	0.45	Rose et al. (2003)
Alt Balast (Asfalt yaz)	2564	0.45	Rose et al. (2003)
Alt Balast (Asfalt İlkbahar)	4812	0.45	Rose et al. (2003)
Alt Balast (Asfalt Sonbahar)	8618	0.45	Rose et al. (2003)
Alt Balast (Asfalt Kış)	15582	0.45	Rose et al. (2003)
Zemin 1 (Kötü)	35	0.40	Gürer (2018)
Zemin 2 (Orta)	80	0.40	Gürer (2018)
Zemin 3 (İyi)	140	0.40	Gürer (2018)
Zemin 4 (Çok İyi)	200	0.40	Gürer (2018)

Çizelge 3.2 Modelde kullanılan yükler ve referans alınan kaynaklar.

Dingil Yüğü (kN)	Teker Yüğü (kN)	Referans
105	52.5	Vagon Yüğü (TCDD)
200	100	Aksop ve Güler (2017)
225	112.5	YHT Dingil Yüğü (TCDD)
360	180	Ağır Yüğü (Rose et al. 2003)

Çizelge 3.3 Model kombinasyon detayları.

Dingil Yüğü (kN)	Tekerlek Yüğü (kN)	Altbalast Tabaka kalınlığı (mm)	Altbalast için kullanılan malzeme türü	Taban (Elastite Modülüne göre) (MPa)	Zemin Cinsi	Toplam Model Sayısı (Adet)	
105	52.5	150	Granüler Malzeme	Taban Zimini 1 (E=35)	48		
			Bitümlü Karışım (Standart)	Taban Zimini 2 (E=80)			
			Bitümlü Karışım (Yaz)	Taban Zimini 3 (E=140)			
			Bitümlü Karışım (İlkbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Sonbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Kış)				
			Granüler Malzeme	Taban Zimini 1 (E=35)	48		
			Bitümlü Karışım (Standart)	Taban Zimini 2 (E=80)			
			Bitümlü Karışım (Yaz)	Taban Zimini 3 (E=140)			
			Bitümlü Karışım (İlkbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Sonbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Kış)				
			Granüler Malzeme	Taban Zimini 1 (E=35)	144		
			Bitümlü Karışım (Standart)	Taban Zimini 2 (E=80)			
			Bitümlü Karışım (Yaz)	Taban Zimini 3 (E=140)			
Bitümlü Karışım (İlkbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)						
			Bitümlü Karışım (Sonbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Kış)				
			Granüler Malzeme	Taban Zimini 1 (E=35)	48		
			Bitümlü Karışım (Standart)	Taban Zimini 2 (E=80)			
			Bitümlü Karışım (Yaz)	Taban Zimini 3 (E=140)			
			Bitümlü Karışım (İlkbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Sonbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)			
			Bitümlü Karışım (Kış)				
			Granüler Malzeme	Taban Zimini 1 (E=35)	288		
			Bitümlü Karışım (Standart)	Taban Zimini 2 (E=80)			
Bitümlü Karışım (Yaz)	Taban Zimini 3 (E=140)						
Bitümlü Karışım (İlkbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)						
Bitümlü Karışım (Sonbahar)	Taban Zimini 4 (E=200)						
			Bitümlü Karışım (Kış)				
			Toplam Model Sayısı :				

3.2 Yöntem

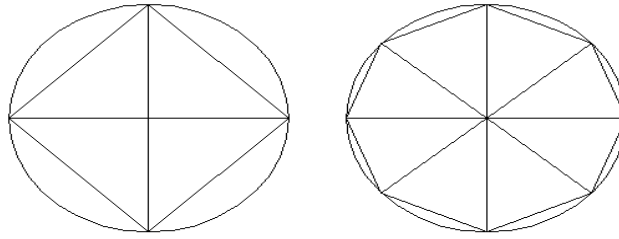
3.2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Doğada var olan her problemin mutlak bir çözümü vardır. Mühendislik bilimi, bu problemi oluşturan olayların çözümüne matematiksel bir dille ve fizik kanunlarıyla yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Hedefe ulaşmak amacıyla problemin kendi içinde karmaşıklık derecesine bağlı olarak çeşitli sayı ve yöntemde denklemlerle çözüme yaklaşılır ya da varılır. Bu bağlamda, özellikle kompleks yapıları problemleri çözmek adına çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Çok basit olarak, tasarlanan bir

merdiven modeli için bile uygun tasarım ve dayanımda modeli bulabilmek için çeşitli tekrarlar, deneyler gereklidir. Bu durum daha kapsamlı projeler için düşünüldüğünde fazlasıyla zaman, maliyet ve insan gücü gerektirecektir. Bunun gibi durumlarda sonlu elemanlar metoduna dayanan bir programda çözümleme yapmak fazlasıyla karlı bir seçenek olacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi, bu karmaşık yapıli problemlerin doğrudan çözülemediği durumlarda, daha basit alt problemlere ayrılarak, her birinin kendi içinde çözümüyile elde edilen bir yaklaşım metodudur. Matematikte çözümüne ulaşıl原因an problemleri sonsuz sayıda elemana ayırıp çözümlemek en doğru sonuca yaklaştıracığı için, elemanları olabildiğince küçük geometriye ayırmak gerçek çözüme o kadar yakınlık sağlayacaktır.

Şekil 3.3'deki gibi bir daire alanı, üçgen elemanlara bölünerek hesaplanmaya çalışılırsa, üçgen sayısının artışı oranında doğru sonuca yaklaştığımız gözlemlenir.



Şekil 3.3 Eşdeğer üçgen elemanlarına ayrılmış daire.

Yöntemin ilk aşaması, eleman tipinin tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ya da dönel eleman olduğunun belirlenmesidir. Uzayda bir noktanın en fazla 6 serbestlik derecesi olduğu için sonlu elemanlarda da maksimum 6 serbestlik derecesi tanımlanır. Çoğu elemanı tanımlamak için maksimum serbestlik derecesine ihtiyaç yoktur. Serbestlik derecesi sonlu sayıda olan sistemlere ayrık sistem; sonsuz sayıda olanlara ise sürekli sistem denmektedir. Ayrık sistemler, adi diferansiyel denklemlerle çözümlenebilirken sürekli sistemler için kısmi diferansiyel denklemler kullanılır. Bu metot; ilk olarak 1950 yıllarında, uçak yapı elemanlarının geliştirilmesi üzerine yapılan dizayn çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin de gelişimiyle

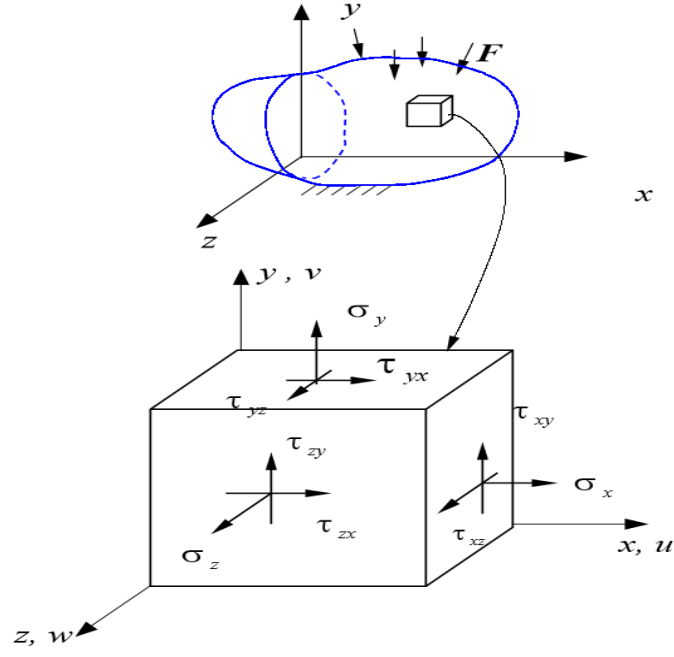
Havacılık, Otomotiv, İnşaat, hatta Biyomedikal gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Sonlu Elemanlar yöntemini kullanarak geliştirilen analiz programlarında, sistemi tanıtmadan önce problemin ve beklentilerin belirlenmesi gerekir. Uygulama aşamasına ise analiz tipi (statik, dinamik, lineer, non-lineer vs.) seçilerek başlanır. Daha sonra seçilen tipe malzeme tanımlaması yapılır. Akabinde model seçilir veya oluşturulur. Sınır şartları uygulandıktan sonra yük tipi ve uygulanışı seçilir. Son olarak da çözüm analiz edilir.

ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS gibi birçok yazılım sonlu eleman analizi mantığında yazılmıştır. Son zamanlarda özellikle yapı analizlerinde sonlu elemanlar yöntemiyle yazılmış CAD programları sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntem, sonlu sayıda geometriye ayrılabilen elemanların her birinin geometrisi kendi içinde çözümlenebildiği, farklı malzeme özellikleri atanabildiği ve boşluklu yapıları tanımlarken kolaylıkla çözümlene yapılabildiği için birçok numerik yöntemle göre daha avantajlıdır.

Programa başlamadan önce neler beklendiği ve nasıl bir modele ulaşmak istendiği belirlenmelidir. Uygulama aşamasında ise geometrinin, kullanılacak malzeme ve sınır şartlarının girilmesi gereklidir. Sonrasında yükleme durumu ve tipi uygulanır. Son olarak; analiz sonuçları yorumlanır.

Genellikle bir yapıdaki gerinim ve gerilmeler altı bileşenden oluşur. Şekil 3.4'te 6 yüzlü bir modelde her yüzey için kayma ve normal gerilmeler oluşacaktır. Toplamda 6 gerilme buna bağlı olarak da 6 gerinim değeri oluşur.



Şekil 3.4 Altı yüzlü bir modeldeki gerilmeler.

Mühendislik problemlerinin çoğu üç boyutludur. Ancak bir ya da iki boyutlu çözümler genel olarak yeterli doğrulukta sonuç vermektedir. Üç boyutlu analiz konusu temel olarak dört düğümlü üçgen prizma eleman üzerinden izah edilebilir.

Üç boyutlu elemanın deplasman bileşenleri,

$$\{u\} = [u, v, w]^T \quad (3.1)$$

dir. Burada u, v ve w sırasıyla x, y ve z doğrultularındaki bileşenleri göstermektedir.

Gerilme ve şekil değiştirmeler ise,

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \\ \{\epsilon\} &= [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \end{aligned} \quad (3.2)$$

olmaktadır. Gerilme ile şekil değiştirmeler arasındaki ilişki,

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (3.3)$$

ile verilir. Burada [D] 6x6 boyutlarında elastisite matrisidir.

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Şekil değiştirmelerle yer değiştirmeler arasındaki ilişki ise,

$$\{\varepsilon\} = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad (3.5)$$

şeklindedir. Kütle ve yüzey kuvvet vektörleri üç bileşenli olarak sırasıyla,

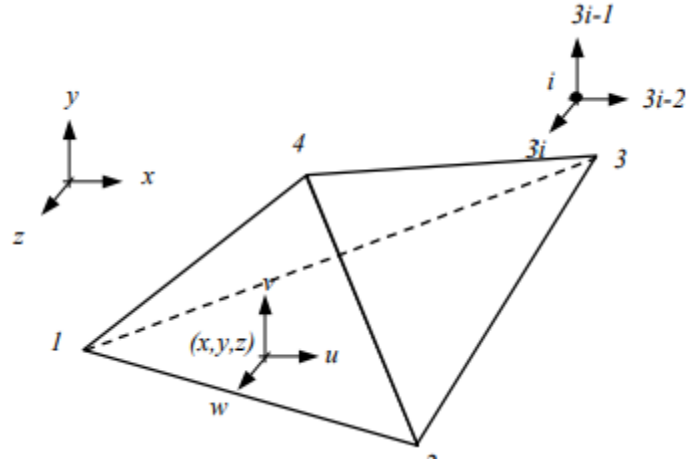
$$\begin{aligned} \{f\} &= [f_x, f_y, f_z]^T \\ \{T\} &= [T_x, T_y, T_z]^T \end{aligned} \quad (3.6)$$

olur. Şekil 3.5'teki prizmatik eleman için, her düğümde üç adet serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu durumda eleman deplasman vektörü,

$$\{q\} = [q_1, q_2, q_3, q_4, \dots, q_{12}]^T \quad (3.7)$$

dir. i düğümüne ait deplasmanlar ise $3i-2$, $3i-1$ ve $3i$ olarak numaralandırılır. Genel deplasman vektörü ise, toplam serbestlik derecesi N olmak üzere aşağıdaki gibidir;

$$\{Q\} = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_N]^T \quad (3.8)$$



Şekil 3.5 Dört düğümlü üçgen prizma eleman.

$$N_1 = r, N_2 = s, N_3 = t, N_4 = l - r - s \quad (3.9)$$

olur. Herhangi bir noktadaki deplasmanlar şekil fonksiyonları yardımıyla,

$$\{u\} = [N] \{q\} \quad (3.10)$$

olarak yazılır. Burada şekil fonksiyonları matrisi,

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \\ z &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + N_3 z_3 + N_4 z_4 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$x_{ij} = x_i - x_j$ olarak tanımlanarak;

$$\begin{aligned} x &= x_4 + x_{14}r + x_{24}s + x_{34}t \\ y &= y_4 + y_{14}r + y_{24}s + y_{34}t \\ z &= z_4 + z_{14}r + z_{24}s + z_{34}t \end{aligned} \quad (3.13)$$

denklemleri elde edilir. Kısmi türevler için zincir kuralı kullanılarak örneğin u deplasman bileşeni için aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial u}{\partial t} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad [J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Alınan türevler ile jakobean matrisi aşağıdaki gibi olur;

$$[J] = \begin{bmatrix} x_{14} & y_{14} & z_{14} \\ x_{24} & y_{24} & z_{24} \\ x_{34} & y_{34} & z_{34} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Jakobean matrisinin determinanı;

$$\det J = x_{14}(y_{24}z_{34} - y_{34}z_{24}) - x_{24}(y_{14}z_{34} - y_{34}z_{14}) + x_{34}(y_{14}z_{24} - y_{24}z_{14}), \quad (3.16)$$

Elemanın hacmi ise;

$$V_e = \left| \int_0^1 \int_0^{1-r} \int_0^{1-r-s} \det J \, drdsdt \right| = |\det J| \int_0^1 \int_0^{1-r} \int_0^{1-r-s} drdsdt \quad (3.17)$$

İntegrasyon formülü;

$$\int_0^1 \int_0^{1-r} \int_0^{1-r-s} r^m s^n t^k \, drdsdt = \frac{m!+n!+k!}{(m+n+k+3)!} \quad (3.18)$$

olduğundan hacim;

$$V_e = \frac{1}{6} |\det J| \quad (3.19)$$

şeklinde elde edilir. $[A]=[J]^{-1}$ için; (3.14),

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial s}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial s}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

şeklindedir. Burada,

$$[A] = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} y_{24}z_{34} - z_{24}y_{34} & y_{34}z_{14} - z_{34}y_{14} & y_{14}z_{24} - z_{14}y_{24} \\ z_{24}x_{34} - x_{24}z_{34} & z_{24}x_{14} - x_{24}z_{14} & z_{14}x_{24} - x_{14}z_{24} \\ x_{24}y_{34} - y_{24}x_{34} & x_{34}y_{14} - y_{34}x_{14} & x_{14}y_{24} - y_{14}x_{24} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

olur. Yer değiştirme – şekil değiştirme ilişkisi, türevler matrisi [B] ile gösterilirse,

$$\{\epsilon\} = [B]\{q\} \quad (3.22)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda [B] nin bütün elemanları sabit olacağından elemana ait şekil değiştirmelerde sabit olacaktır.

Toplam potansiyel enerji ifadesinde eleman şekil değiştirme enerjisi terimi,

$$U_e = \frac{1}{2} \int_e \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dV = \frac{1}{2} \{q\}^T [B]^T [D] [B] \{q\} \int_e dV = \frac{1}{2} \{q\}^T V_e [B]^T [D] [B] \{q\} \quad (3.23)$$

şeklindedir. Buradan eleman rijitlik matrisi,

$$[k]_e = V_e [B]^T [D] [B] \quad (3.24)$$

olarak tanımlanır. Kütle kuvvetleri,

$$\int_e \{u\}^T \{f\} dV = \{q\}^T \iiint [N]^T \{f\} \det J dr ds dt = \{q\}^T \{f\}_e \quad (3.25)$$

şeklindedir.

$$\{f\}_e = \frac{V_e}{4} [f_x, f_y, f_z, f_x, \dots, f_z]^T \quad (3.26)$$

Ağırlık kuvvetinin x bileşeni olan yük vektörü $V_e f_x$ olarak hesaplanır ve q_1, q_4, q_7 ve q_{10} serbestlik derecelerine eşit olarak dağıtılmıştır. Yüzey kuvvetleri ise, kuvvetlerin uygulandığı yüzey üzerinde hesaplanacaktır. Örneğin; 123 düğümlerinin oluşturduğu yüzey üzerine uygulanan kuvveti ele alalım. Yüzey bir üçgen olup alanı da A_e ise, yüzey yük vektörü,

$$\int_e \{u\}^T \{f\} dV = \{q\}^T \int_{A_e} [N]^T \{T\} dA = \{q\}^T \{T\}_e \quad (3.27)$$

şeklindedir. İntegrasyon yapıldıktan sonra bağıntı (29) elde edilir.

$$\{T\}_e = \frac{A_e}{3} [T_x, T_y, T_z, T_x, T_y, T_z, T_x, T_y, T_z, 0, 0, 0]^T \quad (3.28)$$

Tekil yükler ilgili serbestlik derecesine göre sistem yük vektörüne ilave edildikten sonra genel denklem oluşturularak sistemin sınır şartları altında deplasmanlar elde edilir.

Gerilme hesabında ise, $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$ ve $\{\varepsilon\} = [B]\{q\}$ olduğundan gerilmeler,

$$\{\sigma\} = [D][B]\{q\} \quad (3.29)$$

şeklindedir. Üç boyutlu durumda asal gerilmelerin hesaplanması için (3x3) lük gerilme tensörünün invaryantlarından faydalanılır. Gerilme tensörünün invaryantları ;

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \\ I_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{xz}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

olur. Asal gerilmeler,

$$\sigma_1 = I_1/3 + c \cos \theta, \quad \sigma_2 = I_1/3 + c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}), \quad \sigma_3 = I_1/3 + c \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}), \quad (3.31)$$

elde edilir. Altı yüzlü eleman için gerekli işlemler yapıldığında eleman rijitlik matrisi,

$$[k]_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det J dr ds dt \quad (3.32)$$

şeklinde elde edilir.

Üç boyutlu problemlerin analizi için sonlu eleman ağı oluşturulurken başlangıçta bir temel eleman alınarak bunun tekrarı şeklinde bir ağ oluşturma yoluna gidilmesi tavsiye edilir. Özellikle basit geometriler için 6 yüzlü 8 düğümlü elemanın temel alınıp bunun tekrarlanması kolaylık sağlayacaktır. Problem modellenirken; düğüm koordinatları, eleman düğüm numaraları, malzeme bilgileri ve sınır şartları gibi bilgilere ihtiyaç vardır. Öncelikle kaba bir ağ oluşturulurken, başlangıç çözümü yapıldıktan sonra daha hassas ağ yapısı oluşturulabilir.

Üç boyutlu problemlerde sınır şartları belirlenirken düzlem için bir tanımlama gerekebilir. Bir düğümün her yönde hareketi sınırlanmış ise burada tam nokta sınır şartı vardır denilir. Eğer düğümün bir doğrultuda hareketine izin verilmiş ise bu durumda da çizgisel sınır şartı vardır. Düğümün bir düzlem içinde hareketi söz konusu olursa burada düzlemsel sınırlamada söz konusudur.

3.2.2 ANSYS

Gelişen teknoloji dünyasında mühendislik yapılarının tasarımı ve inşasında beklenti de artmaktadır. Problem geometrisini belirleyen düğüm noktalarının tek tek belirlenip elemanlar oluşturulması esasına dayanan eski tip yazılımlarda hata yapma ihtimali yüksekken, son zamanlarda geliştirilen CAD modelleri ile hata oranları minimal düzeye indirilmiştir.

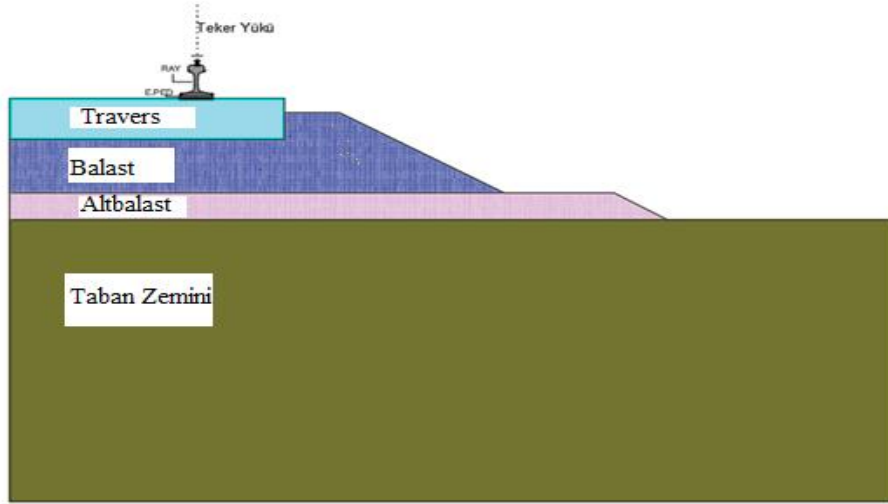
1971'de çalışmalara başlayan ANSYS programı SAS (Swanson Analysis Systems) firmasının markasıdır. ANSYS sonlu eleman programı, sistem elemanının sonlu eleman modelinin oluşturulması, analizlerinin yapılarak davranışının elde edilmesi esasına dayanır. Bu sisteme ait işlem adımları sırasıyla;

- 1.) Sistem modelinin oluşturulması
- 2.) Malzeme özelliklerinin tanımlanması
- 3.) Kesit özelliklerinin belirlenmesi
- 4.) Eleman tipi, malzeme ve kesit özelliklerinin atanması
- 5.) Sonlu elemanlara ayırma
- 6.) Mesnet şartları ve analiz tipinin belirlenmesi
- 7.) Yüklerin tanımlanması
- 8.) Analiz
- 9.) Sonuçların yorumlanması

ANSYS programında Kartezyen, küresel, silindirik olmak üzere 3 tip global koordinat sistemi bulunmaktadır. Bazı durumlarda lokal koordinat sistemlerine de ihtiyaç duyulabilir. Bu sistemler model geometrisinin oluşturulmasında kullanılır. Bunların dışında düğüm noktalarının serbestlik derecelerinin yönlerini belirlemek amacıyla nodal koordinat sistemi, elemana ait tanımlama ve sonuç görüntülemek için eleman koordinat sistemi, sonuç verilerinin belli bir sistemde sunulması için sonuç koordinat sistemi kullanılır.

3.2.2.1 Tasarım ve Analiz

Raylı sistem yapı elemanlarının bilgisayar programları yardımıyla iki ya da üç boyutlu olarak modellenmesi mümkündür. Bu modelleme analiz programları yardımıyla oluşturulabileceği gibi uyumlu tabanda çalışan bir çizim programında modellenip analiz programına aktarmak suretiyle de oluşturulabilmektedir. Modelleme yapılırken oluşturulan çizimde kullanılan ölçülerin standartlara uygun oranlarda olması sonuçların daha gerçeğe yakın çıkmasını sağlayacaktır. Şekil 3.6' da tasarlanan bu çalışma için modellenen kesitin detayları verilmiştir. Değişkenlik gösteren altbalast katmanının yüksekliği değişecektir. Dingil yükü sistemde ray yüzey alanına dik uygulanmıştır. Sistem yatayda sabitlenirken düşeyde harekete izin verilmektedir. Taban zemini tabakası tabandan sabitlenmiştir. Uygulanan dingil yükü tekil yük olup y ekseninde boyunca (basınç kuvveti) düşey doğrultudadır.

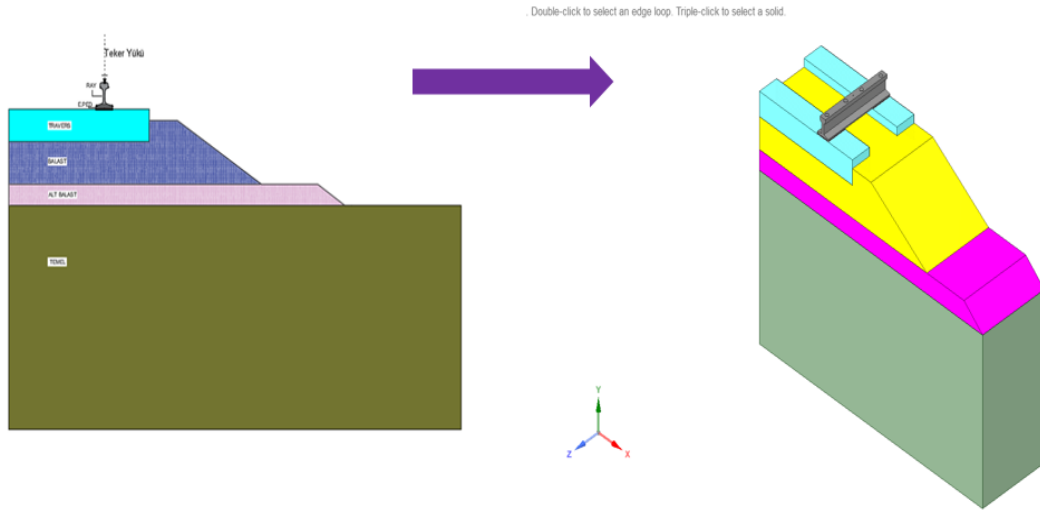


Şekil 3.6 Demiryolu kesiti autocad çizimi.

ANSYS Workbench programı açıldığında ilk olarak çalışılacak olan modeli çözme yöntemi seçilir. Daha sonra analiz tipi seçilerek devam edilir. Bu modelde “Static Structural” seçilerek analiz yapılmıştır.

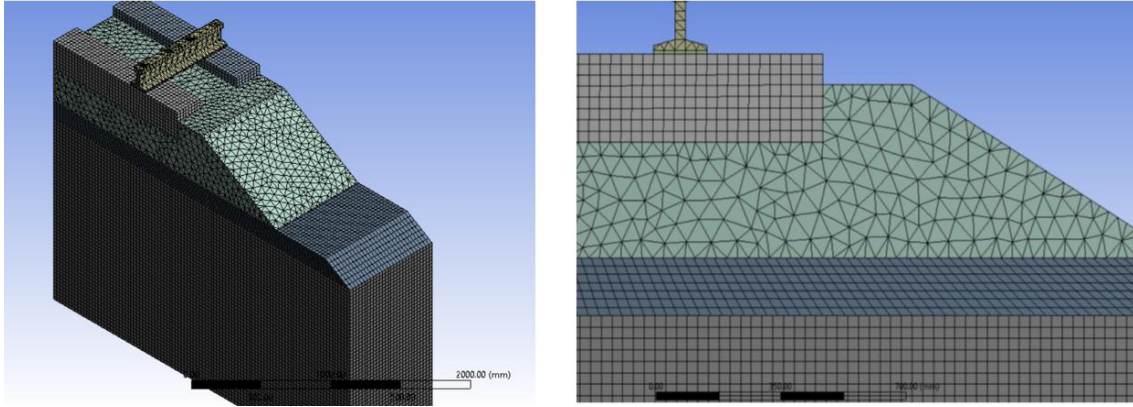
Çalışacağımız modeldeki malzemelere ait bilgileri girmek üzere “Engineering Data” sekmesinden malzeme kütüphanesine erişebiliriz. Kullanacağımız malzemeler kütüphanede olmadığı için tüm malzemeler tek tek tanımlanmıştır. Malzemeleri tanımlarken “Linear Elastic” çözüm seçilerek E (elastite modülü), ve poisson oranları gibi malzemeye ait mekanik özellikleri girilmiştir.

Geometride eksenler yardımıyla bir çalışma düzlemi oluşturup nokta ve çizgi komutu ile seçilen ölçü sisteminde model oluşturulur ya da bir program yardımıyla oluşturulan çizim programa aktarılır. “Geometry” sekmesinden Autocad yardımıyla çizdiğimiz model programa aktarılmıştır. Autocad programından aktarılan çizim iki boyutlu olduğu için Şekil 3.7’ de, “Geometry” sekmesinde “Pull” komutunu kullanarak malzemelere hacim verilmiştir.



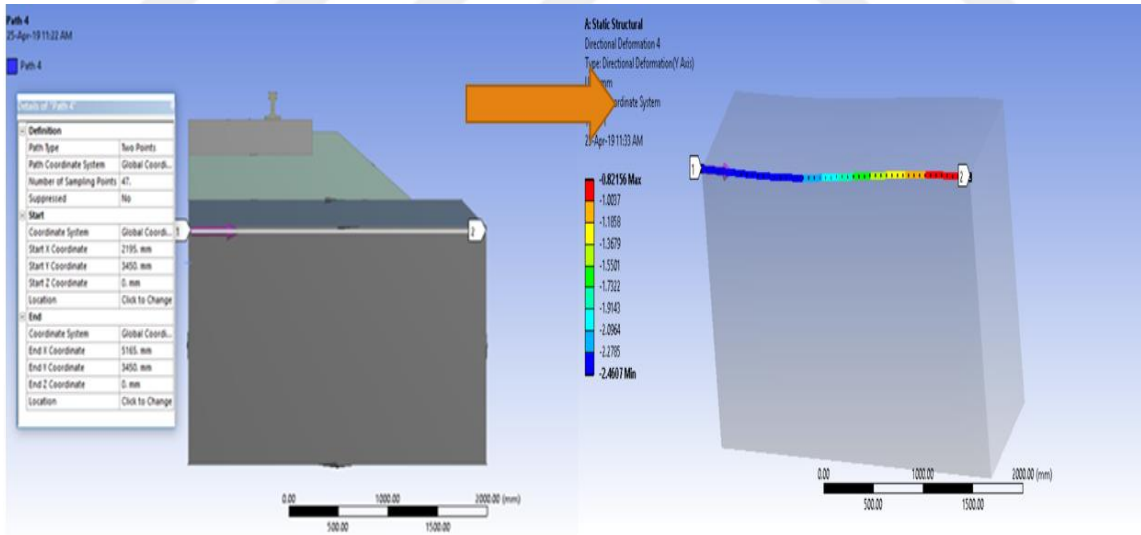
Şekil 3.7 Pull komutu ile hacim verilen model.

Sonlu elemanlar yönteminin esası, sistemi olabildiğince küçük geometrilere ayırıp çözmeye dayanmaktadır. Bir model ne kadar çok elemana ayrılırsa doğru çözüme o kadar yaklaşılır. Ancak çok fazla düğüm noktası ve eleman sayısı oluşturmak analiz süresini uzatacaktır. Bu durum göz önünde bulundurularak 2 travers ve 830 mm ray sistemi ile balast, altbalast ve taban zemininden oluşan model mesh edilmiş ve **770672** düğüm noktası ve **188402** elemana ayrılmıştır. (Kullanılan farklı boyutlardaki elemanlar için çözümlemelerde düğüm sayısı ve eleman sayısı değişebilmektedir.) Varandas vd. yaptıkları üç boyutlu modelde 151 travers, 90900 m uzunlukta ray sistemini modellemek için 3618 çerçeve elemanı ve 3469 düğümden oluşan 151 ağ kullanılarak balast-zemin sistemini temsil etmek için 260 864 katı eleman ve 280 098 ağdan oluşmaktadır. Şekil 3.8’ de modelde her biri **30 mm** boyutlarında elemanlar oluşturulmuştur. Bu değere karar verilmeden önce çeşitli sonlu eleman boyutları denenmiş ancak belli bir aralıktan sonra sonuçların önemsenmeyecek oranda küçük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.8 Modelin sonlu elemanlara ayrılması.

“Construction Geometry” menüsü altında oluşturulan “path” ler, istediğimiz aralıktaki analiz sonuçlarını görmemizi sağlamaktadır. Global eksen takımında “Başlangıç” ve “Bitiş” noktalarının tanımlaması yapılarak kullanılacak path’ in lokasyonu belirlenir (Şekil 3.9). Kullanılan modelde değişken eleman altbalast tabakası ve taban zemini olduğu için tanımlamalar her model için altbalast ile taban zemini tabakasının birleşme yüzeyinde yatay hat boyunca oluşturulmuştur.



Şekil 3.9 Path (analiz yapılacak yatay hat).

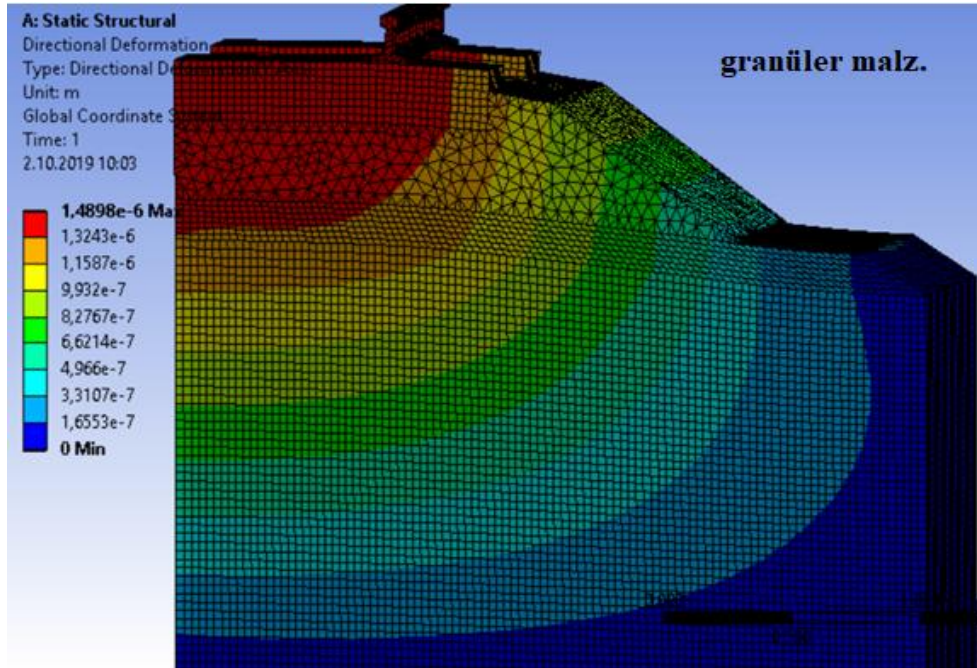
Modeli analiz ederken öncelikle mesnet şartları verilmiştir. Modelde taban zemini tabakasının en alt yüzeyi “Fixed support” komutu ile sabitlenirken yan yüzeyler “Displacement” komutu ile yatayda sabitlenip düşeyde serbest bırakılmıştır. “Force”

komutu ile ray üzerinde bir temas yüzeyi oluşturulup o alan üzerinde bir noktaya tekil yük (dingil yükü) uygulanmıştır.

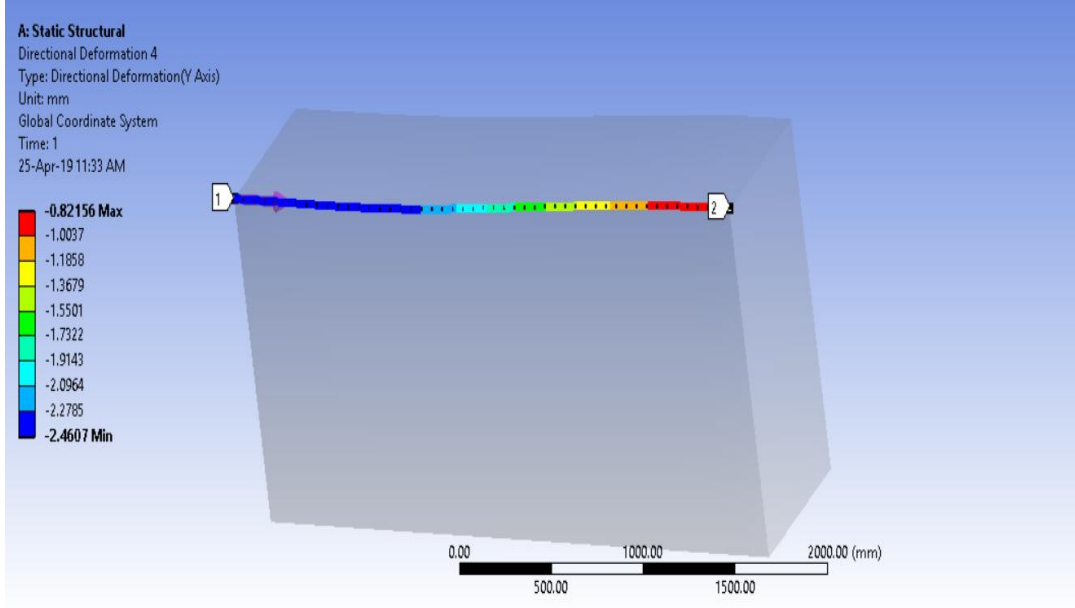
Tüm analiz parametreleri girildikten sonra analiz ayarları kontrol edilir. Analiz ayarlarında adım sayısı, çözüm süresi ve sayısı gibi detaylar girilir. Bu modelde statik analiz yapılacağı için tek adımda çözüm yapılmış olup dinamik etki ihmal edilmiştir.

Kullandığımız modelde değişken eleman altbalast tabakası olduğu için tanımlamalar her model için taban zemini tabakasının üst yüzeyinden oluşturulmuştur. Bu modelde “Direction Deformation” analizi hem tüm sistem için hem de özel aralıklar, yani “path” ler için oluşturulmuştur. Ayrıca Normal gerilmeler, kayma gerilmeleri vb. değerler de sistemle ilgili yorum yapabilmek için dikkate alınmıştır.

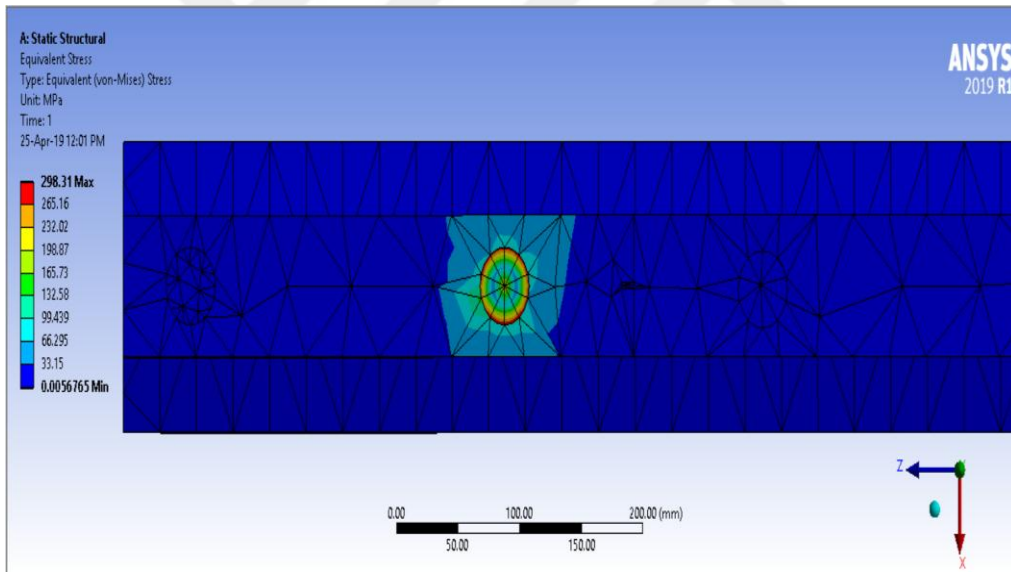
Şekil 3.10’da tüm sistem için şekil değişim analizi verilmiştir. Tabana doğru şekil değişiminin sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Şekil 3.11’ da ise tanımlana yatay hat boyunca şekil değişimleri verilmiş olup yer değişiminin sistemin kenarlarına doğru azaldığı görülmektedir. Şekil 3.12 ise yükün uygulandığı ray üzerindeki eşdeğer gerilmelerin değişimi verilmiştir.



Şekil 3.10 Tüm sistemde şekil değiştirme analizi.



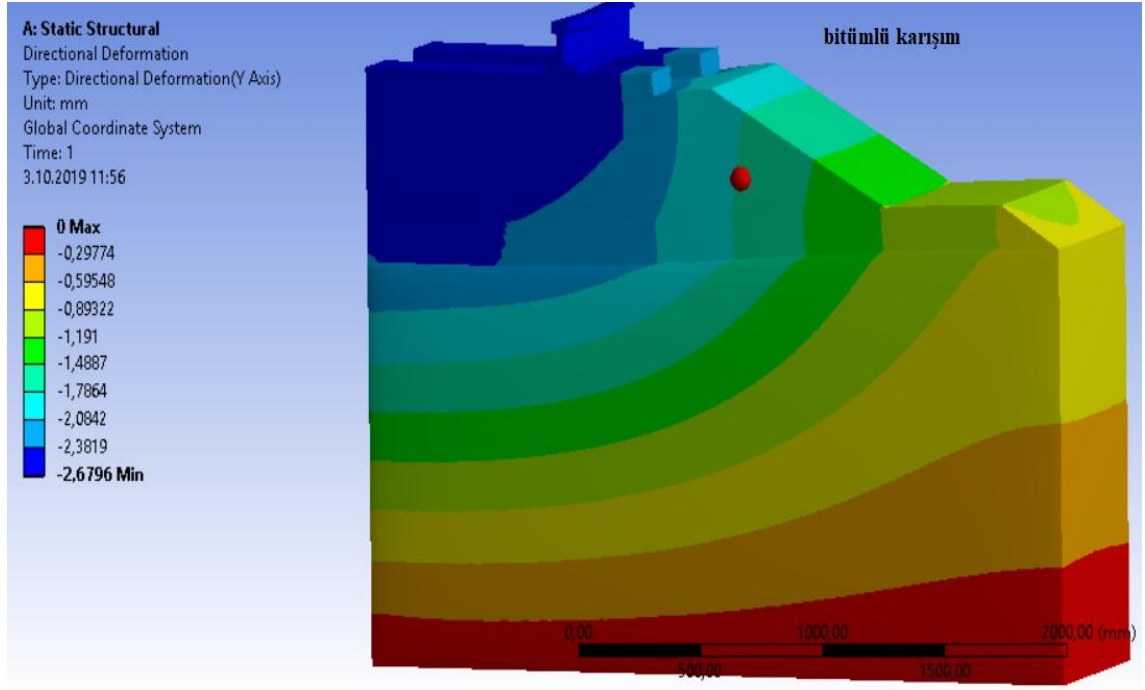
Şekil 3.11 Alt tabakada tanımlanan yatay hat boyunca oluşan deformasyonlar.



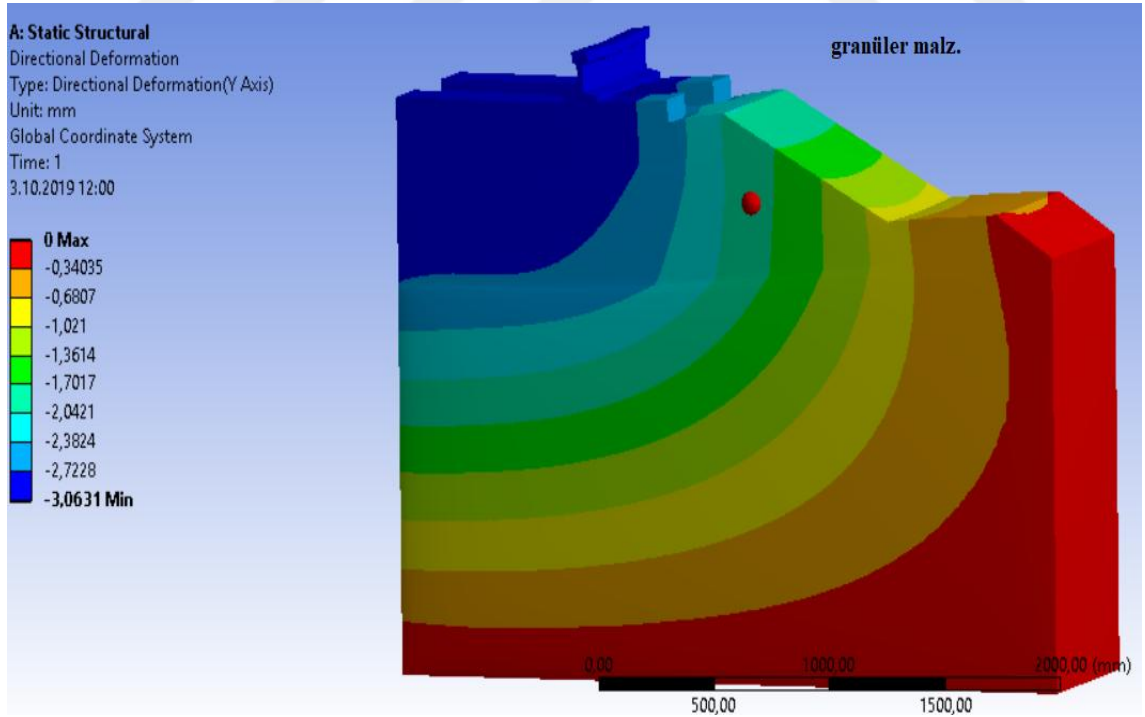
Şekil 3.12 Yükün uygulandığı ray üzerindeki bölgede oluşan eşdeğer gerilmeler

Şekil 3.13’de kötü zemin şartlarında, 225 kN dingil yükü ve bitümlü karışım malzemeli altbalast tabakasına sahip bir yapının elemanlarının yer değişimi, Şekil 3.14’te aynı şartlar altında granüler malzemeli altbalast tabakasına sahip bir yapının elemanlarının yer değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere altbalast tabakasının malzemesinin değişimi şekil değişimini doğrudan etkilemekte, maksimum yer değişimi % 13 civarında

artmaktadır.



Şekil 3.13 225 kN dingil yükü, kötü zemin ve bitümlü karışım malzemeli altbalast tabakalı yapı için elemanların şekil değişimi.



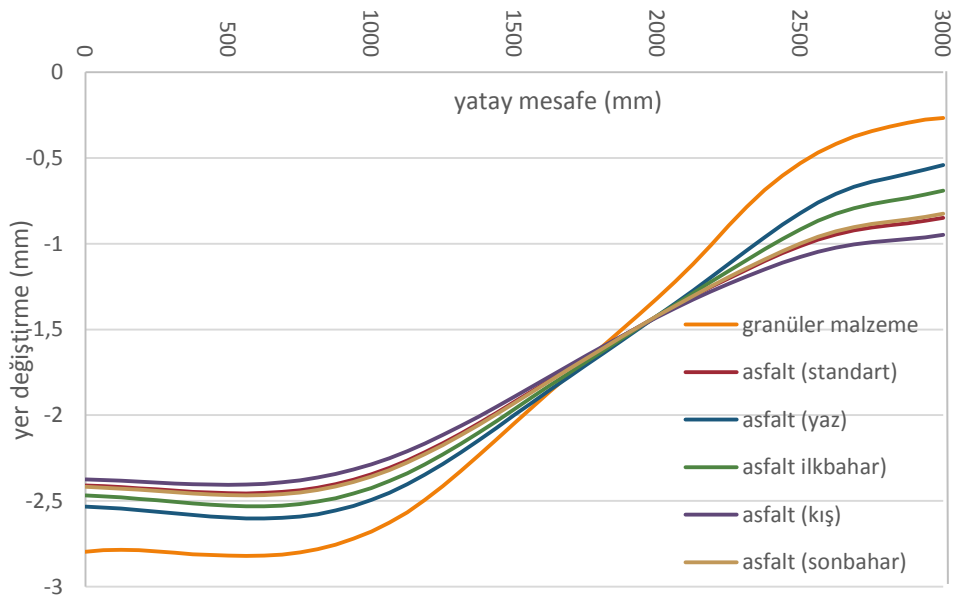
Şekil 3.14 225 kN dingil yükü, kötü zemin ve granüler malzemeli altbalast tabakalı yapı için elemanların şekil değişimi.

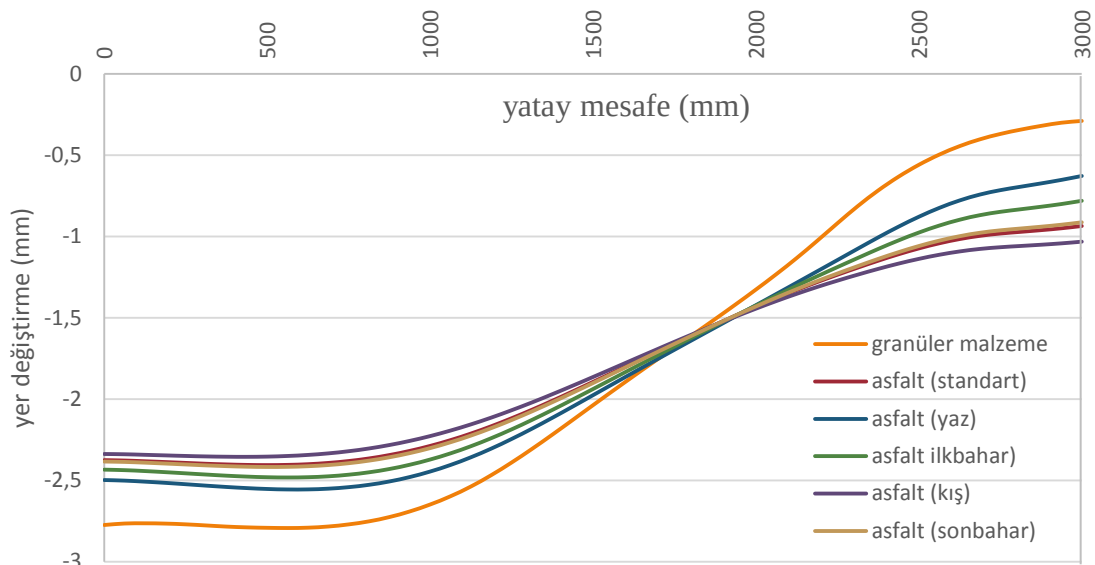
4. BULGULAR

4.1 Tabaka Kalınlığının Deformasyona Etkisi

Altbalast tabakasının malzemesini değiştirdikçe oluşacak farklı yer değiştirme miktarlarını incelemek amacıyla ANSYS programı yardımıyla sistemler analiz edilmiştir. Bunun için kullanılan malzemelerden biri balasttır. Diğer farklı elastiste modülüne sahip olan malzemeler bitümlü karışımın farklı sıcaklıklarda gösterdiği davranış sonucu belirlenmiştir. Alt balast tabakasının kalınlığının 150 mm ile 200 mm arasında her 10 mm artırılmasında (150 mm, 160 mm, 170 mm, 360 mm, 190 mm, 200 mm) malzemelerde ortaya çıkan farklı düşey yer değiştirme miktarları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

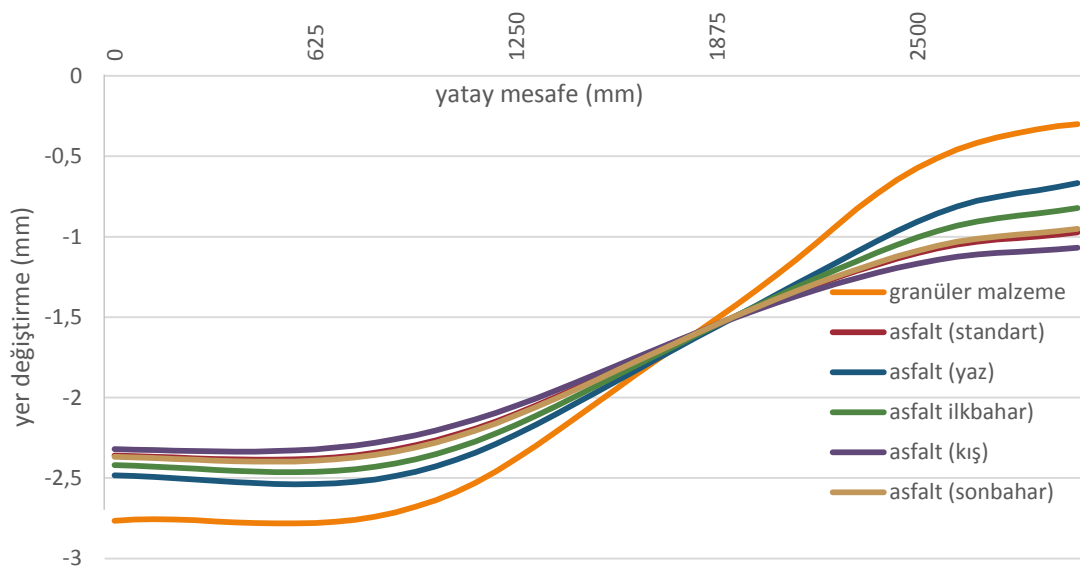
Şekil 4.1 de 150 mm kalınlığındaki altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzemeden oluşan tabakadaki en fazla yer değişimi 2.82 mm iken, asfalt (standart) için 2.46, asfalt (yaz) için 2.60, asfalt (ilkbahar) için 2.53, asfalt (kış) için 2.41 ve asfalt (sonbahar) için ise 2.47 mm’ dir. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 85.46 ile asfalt (kış)’ a aittir.





Şekil 4.3 700 mm kalınlığındaki (170 mm altbalast tabakası) düşey yer değiştirme grafiği.

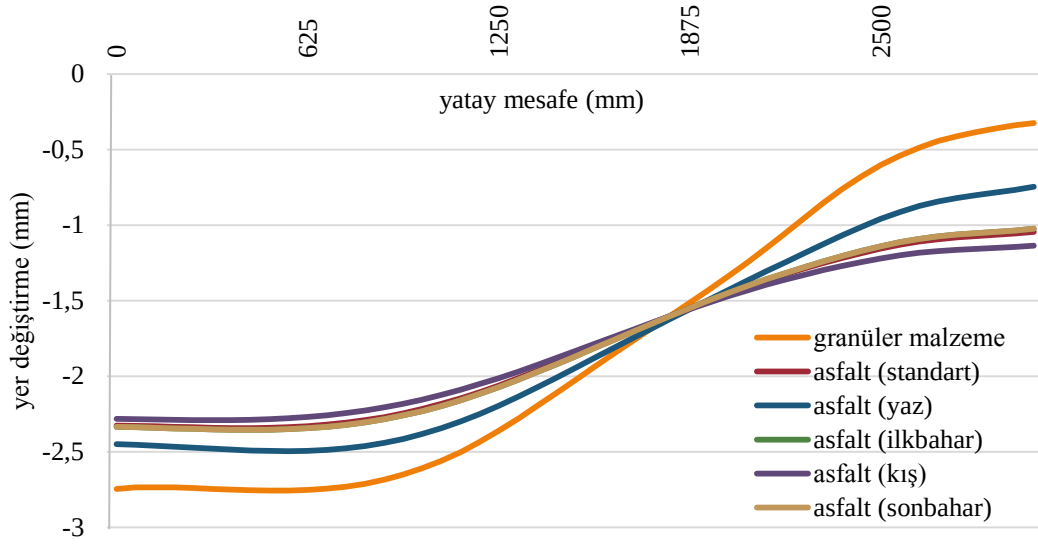
Şekil 4.4 te 180 mm kalınlığındaki altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 2.78 mm iken, asfalt (standart) için 2.39, asfalt (yaz) için 2.54, asfalt (ilkbahar) için 2.46, asfalt (kış) için 2.34 ve asfalt (sonbahar) için ise 2.40 mm' dir. 170 mm kalınlığa göre her malzemede ortalama 0.02 mm yer değiştirme azalmıştır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 84.17 ile asfalt (kış)' a aittir.



Şekil 4.4 710 mm kalınlığındaki (180 mm altbalast tabakası) için yer değiştirme grafiği.

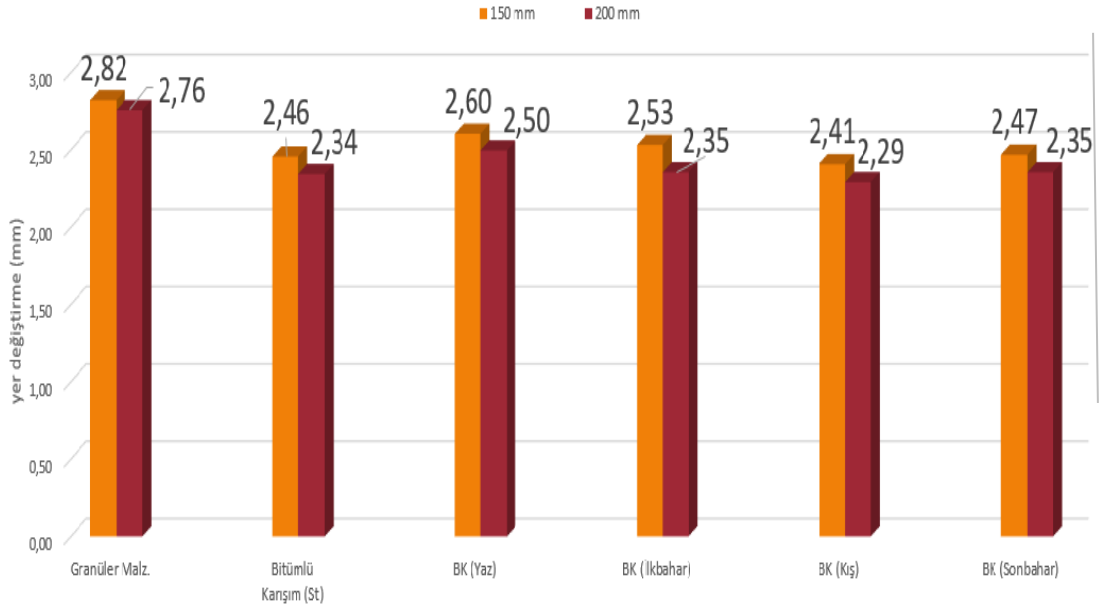
The graph illustrates the vertical displacement (yer değıştirme) in mm as a function of horizontal distance (yatay mesafe) in mm for various materials and seasons. The x-axis ranges from 0 to 350 mm, and the y-axis ranges from 0 to -3 mm. The materials are granüler malzeme (orange), asfalt (standart) (red), asfalt (yaz) (blue), asfalt (ilkbahar) (green), asfalt (kış) (purple), and asfalt (sonbahar) (brown). All materials show a decrease in displacement as the horizontal distance increases, with granüler malzeme showing the most significant displacement at 350 mm.

Yatay Mesafe (mm)	granüler malzeme	asfalt (standart)	asfalt (yaz)	asfalt (ilkbahar)	asfalt (kış)	asfalt (sonbahar)
0	-2.8	-2.3	-2.4	-2.4	-2.3	-2.3
50	-2.8	-2.3	-2.5	-2.4	-2.3	-2.3
100	-2.6	-2.2	-2.4	-2.3	-2.2	-2.2
150	-2.2	-1.9	-2.0	-1.9	-1.8	-1.8
200	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
250	-0.8	-1.2	-1.0	-1.1	-1.2	-1.1
300	-0.5	-1.0	-0.8	-0.9	-1.1	-1.0
350	-0.3	-1.0	-0.7	-0.8	-1.1	-1.0



Şekil 4.6 730 mm kalınlığındaki (200 mm subbalast tabakası) için düşey yer değiştirme grafiği.

Belli bir yük altında (225 kN) aynı taban zemini ($E=35$ MPa) üzerindeki farklı altbalast malzemeleri 150 mm ve 200 mm için kıyaslanmış ve veriler Şekil 4.7 de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere tabaka kalınlığının deformasyon üzerindeki etkisi dikkate alınacak kadar etkilidir.



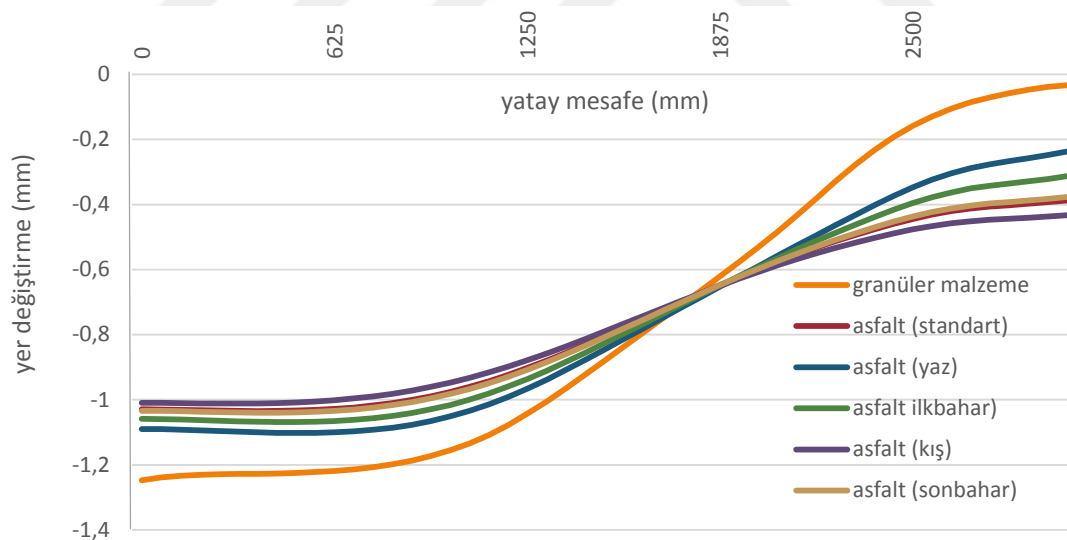
Şekil 4.7 225 kN Dingil yükü ve Taban Zemini Z1 için maksimum yer değişim grafiği .

4.2 Dingil Yükünün Deformasyona Etkisi

UIC- 700’de Maksimum dingil yükleri, demiryolu sınıfına göre; 16 t, 18 t, 20 t, 22.5 t iken Avustralya gibi ağır yük taşımacılığı yapan bazı ülkelerde 36 t’ u civarı, bazı hafif raylı sistemlerde dingil yükü yaklaşık 11 t. civarında olabilmektedir. Dingil yükünün tekerlek yükü yarısıdır (Lichtberger 2011).

Bu çalışmada sırasıyla 105 kN, 200 kN, 225 kN, ve 360 kN dingil yükünün uygulandığı deformasyona etkisi 6 farklı malzeme için analiz edilmiştir.

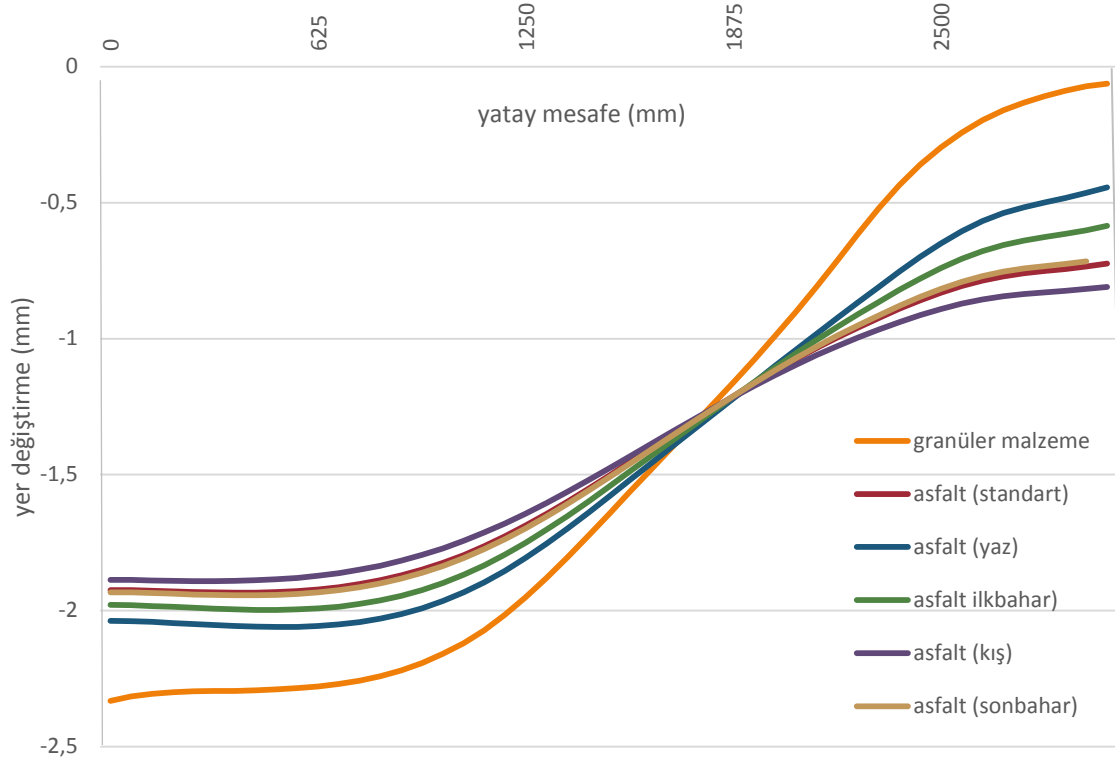
Şekil 4.8’de **105 kN** dingil yükü uygulanan (taban zemini 1) altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 1.25 mm iken, asfalt (standart) için 1.03, asfalt (yaz) için 1.10, asfalt (ilkbahar) için 1.07, asfalt (kış) için 1.01 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.04 mm’ dir. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 83 ile asfalt (kış)’ a aittir.



Şekil 4.8 105 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

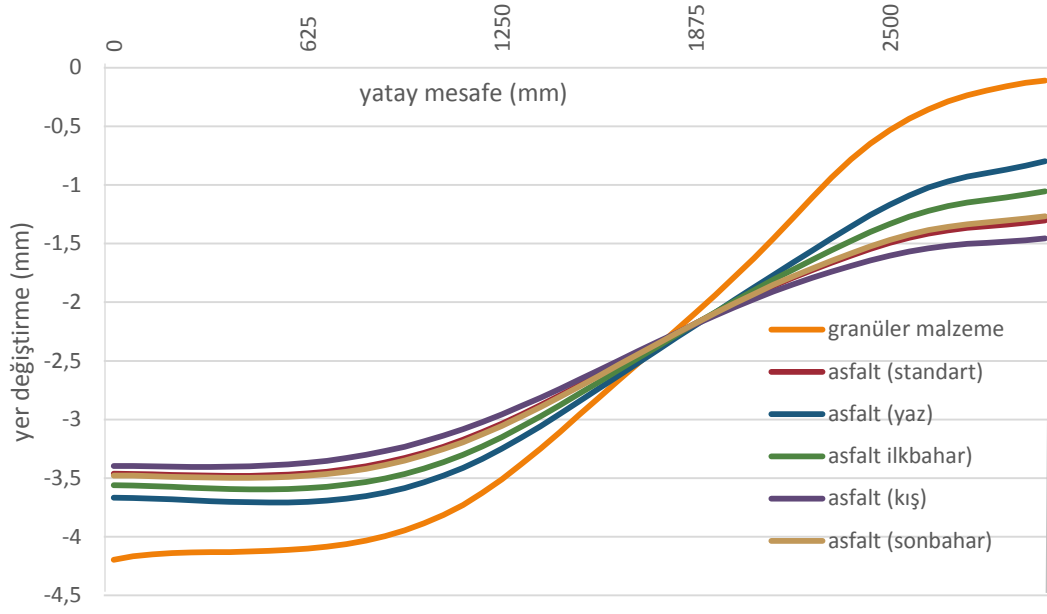
Şekil 4.9’da **200 kN** dingil yükü uygulanan (taban zemini 1) altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 2.33 mm iken, asfalt (standart) için 1.93, asfalt (yaz) için 2.06, asfalt (ilkbahar) için 2.00, asfalt (kış) için 1.89 ve asfalt (sonbahar) için

ise 1.94 mm' dir. 105 kN dingil yüküne göre her malzemede ortalama % 46.5 deformasyon artmıştır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 83 ile asfalt (kış)' a aittir.



Şekil 4.9 200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.10' da **225 kN** dingil yükü uygulanan (taban zemini 1) altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 2.77 mm iken, asfalt (standart) için 2.36, asfalt (yaz) için 2.52, asfalt (ilkbahar) için 2.44, asfalt (kış) için 2.31 ve asfalt (sonbahar) için ise 2.37 mm' dir. 200 kn dingil yüküne göre yaklaşık % 18 civarında daha fazla şekil değişimi görülmüştür. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 83.40 ile asfalt (kış)' a aittir.

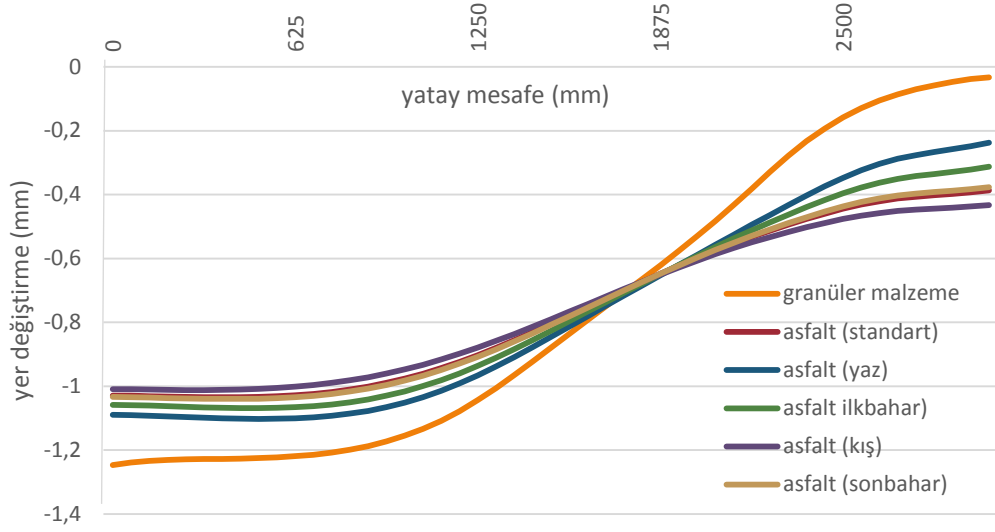


Şekil 4.11 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

4.3 Taban Zemin Türü ve Farklı Dingil Yüklerinin Deformasyona ve Gerilmelere Etkisi

Tez çalışmasının bu aşamasında taban zemin türünün deformasyona etkisini yorumlamak amacıyla belirlenen 4 farklı zemin türü için analiz yapılmıştır. Bu zemin türlerinin ; Taban Zimini 1 ($E=35$ Mpa), Taban Zimini 2 ($E=80$ Mpa), Taban Zimini 3 ($E=140$ Mpa), Taban Zimini 4 ($E=200$ Mpa), farklı dingil yükleri (105 kN, 200 kN, 225 kN, 360 kN) kullanılmıştır. Bu değişkenler Rose vd. nin çalışmaları esas alınarak belirlenmiştir.

Şekil 4.12' de **105 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z1** in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 1.25 mm iken, asfalt (standart) için 1.03, asfalt (yaz) için 1.10, asfalt (ilkbahar) için 1.07, asfalt (kış) için 1.01 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.04 mm' dir. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 82.40 ile asfalt (kış)' a aittir.

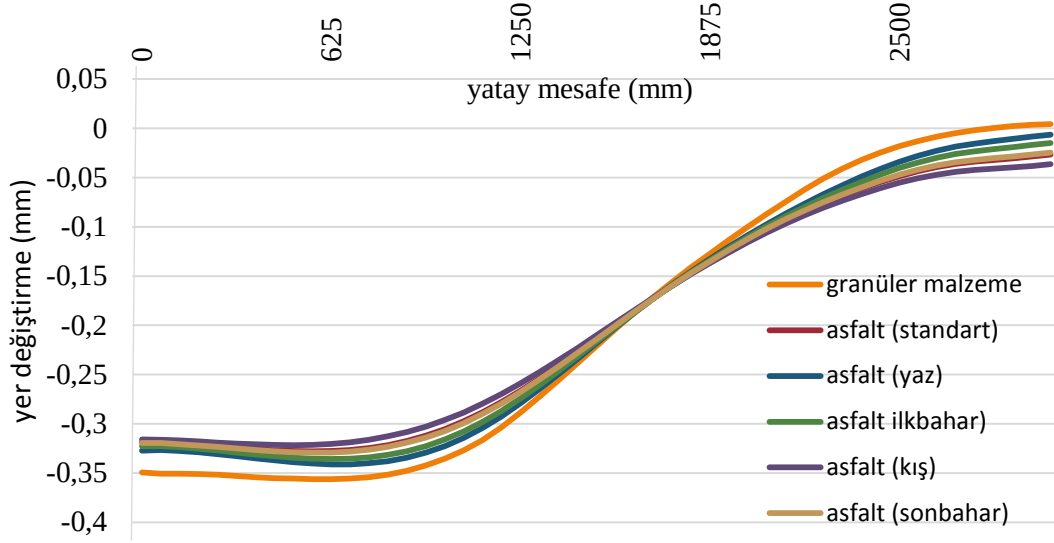


Şekil 4.12 Taban Zemini 1 ($E=35$ MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.13' de **105 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z2** (Taban Zemini 2)' in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 1.25 mm iken, asfalt (standart) için 1.03, asfalt (yaz) için 1.10, asfalt (ilkbahar) için 1.07, asfalt (kış) için 1.01 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.04 mm' dir. Z1 tabakasına göre granüler malzeme deformasyonunda yaklaşık % 53 azalış gözlenirken diğer asfalt malzemelerin deformasyonundaki azalış % 49 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 80.80 ile asfalt (kış)' a aittir.

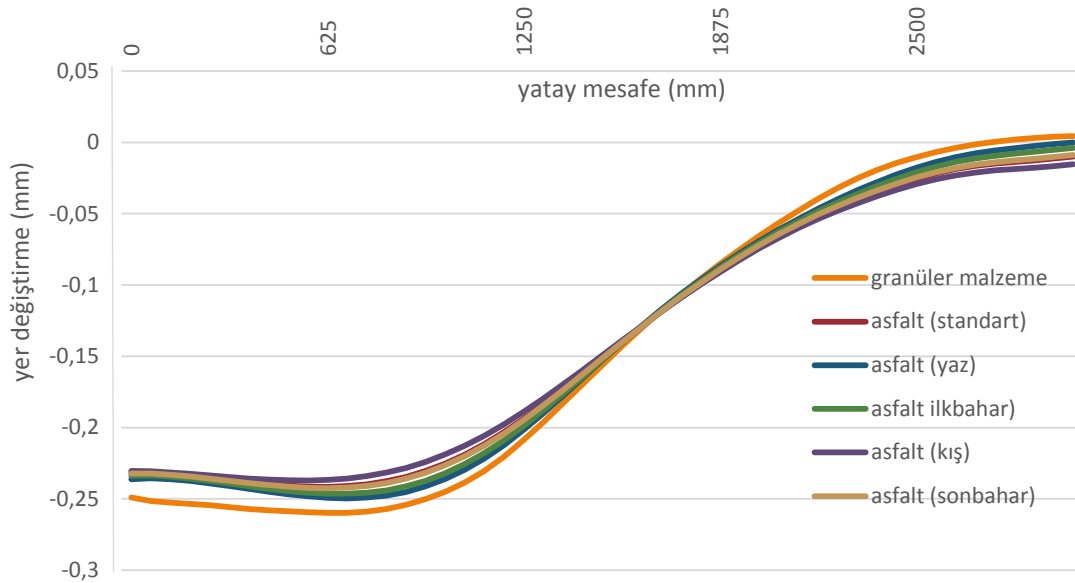


79

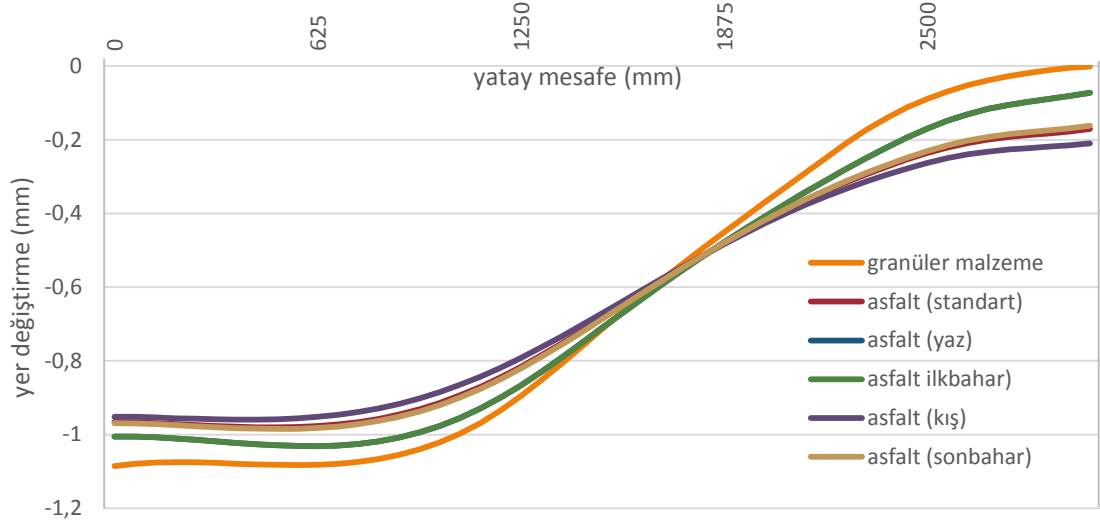


Şekil 4.14 Taban Zemini 3 ($E=140$ MPa) Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.15’ de **105 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z4**’ ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 0.26 mm iken, asfalt (standart) için 0.24, asfalt (yaz) için 0.25, asfalt (ilkbahar) için 0.25, asfalt (kış) için 0.24 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.24 mm’ dir. **Z1** tabakasına göre granüler malzeme deformasyonunda yaklaşık % 65 artış gözlenirken diğer asfalt malzemelerin deformasyonundaki artış % 60 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 88.89 ile asfalt (kış)’ a aittir.

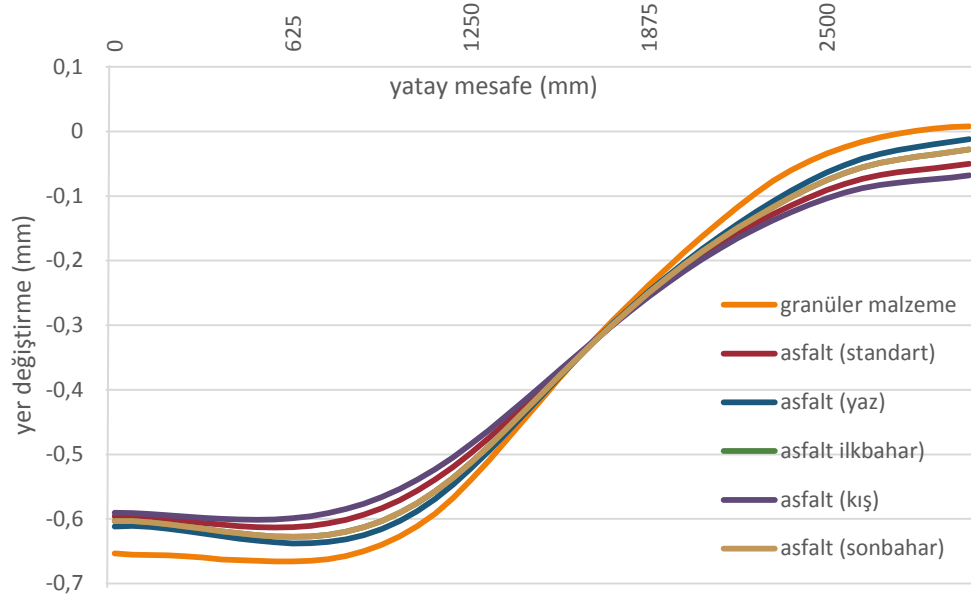


civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 88.07 ile asfalt (kış)' a aittir.



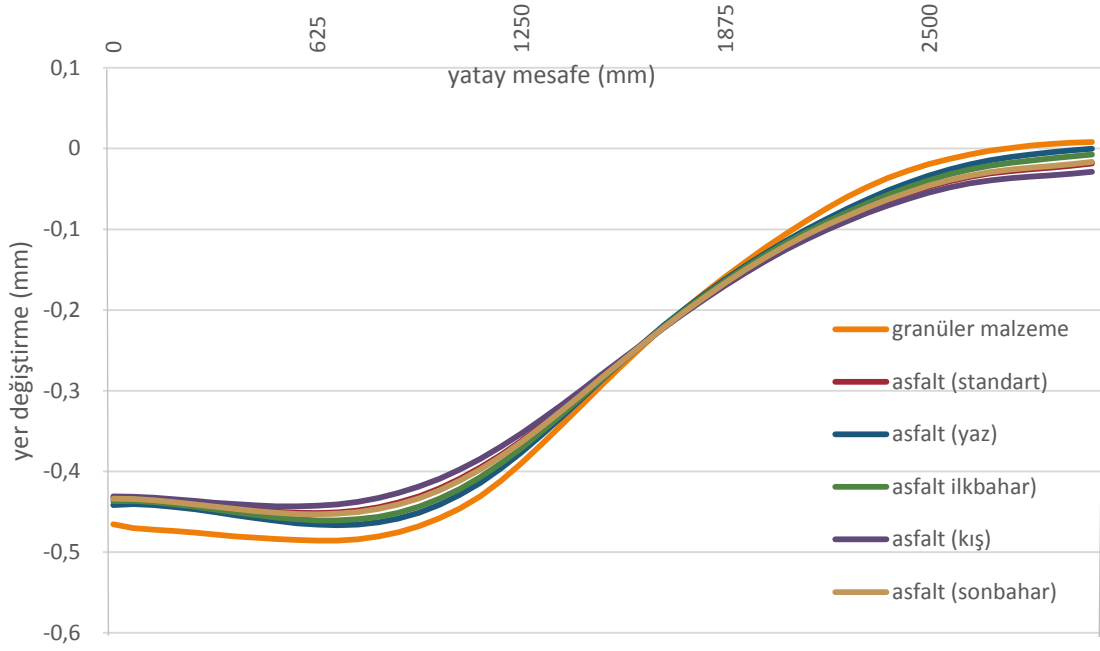
Şekil 4.17 Taban Zemini 2 (E=80 MPa) 200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği

Şekil 4.18' de **200 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z3'** ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 0.67 mm iken, asfalt (standart) için 0.61, asfalt (yaz) için 0.64, asfalt (ilkbahar) için 0.63, asfalt (kış) için 0.60 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.62 mm' dir. Z2 tabakasına göre malzemelerin deformasyonundaki azalış % 38 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 90 ile asfalt (kış)' a aittir.



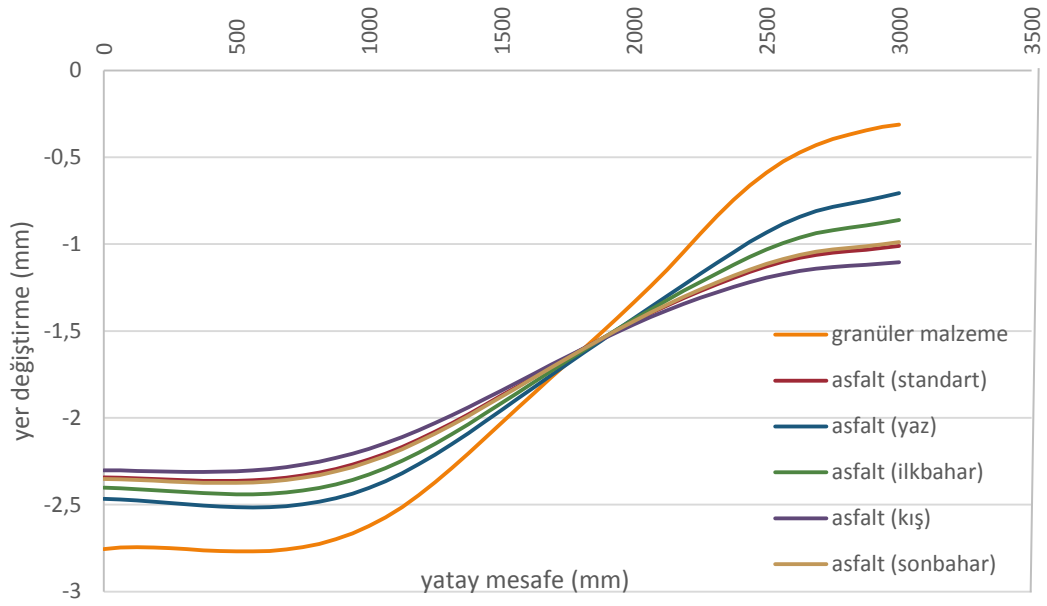
Şekil 4.18 Taban Zemini 3 ($E=140$ MPa) 200 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.19' da **200 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z4**'ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 0.49 mm iken, asfalt (standart) için 0.45, asfalt (yaz) için 0.47, asfalt (ilkbahar) için 0.46, asfalt (kış) için 0.44 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.45 mm' dir. Z3 tabakasına göre malzemelerin deformasyonundaki azalış % 26.5 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 90 ile asfalt (kış)' a aittir.



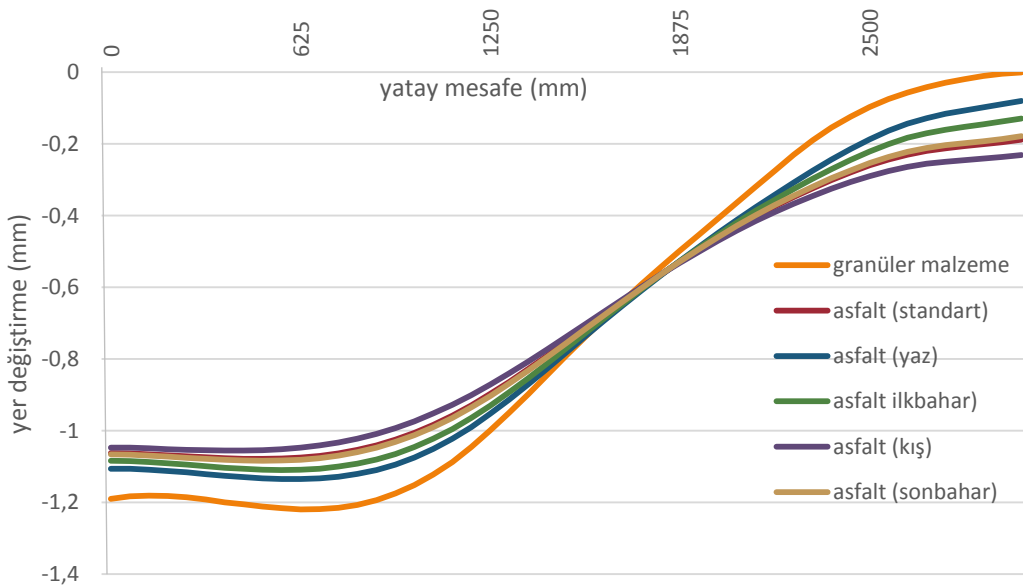
Şekil 4.19 Taban Zemini 4 ($E=200$ MPa) 200 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.20'de **225 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z1**'in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 2.77 mm iken, asfalt (standart) için 2.36, asfalt (yaz) için 2.52, asfalt (ilkbahar) için 2.44, asfalt (kış) için 2.31 ve asfalt (sonbahar) için ise 2.37 mm' dir.. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 83.40 ile asfalt (kış)' a aittir.



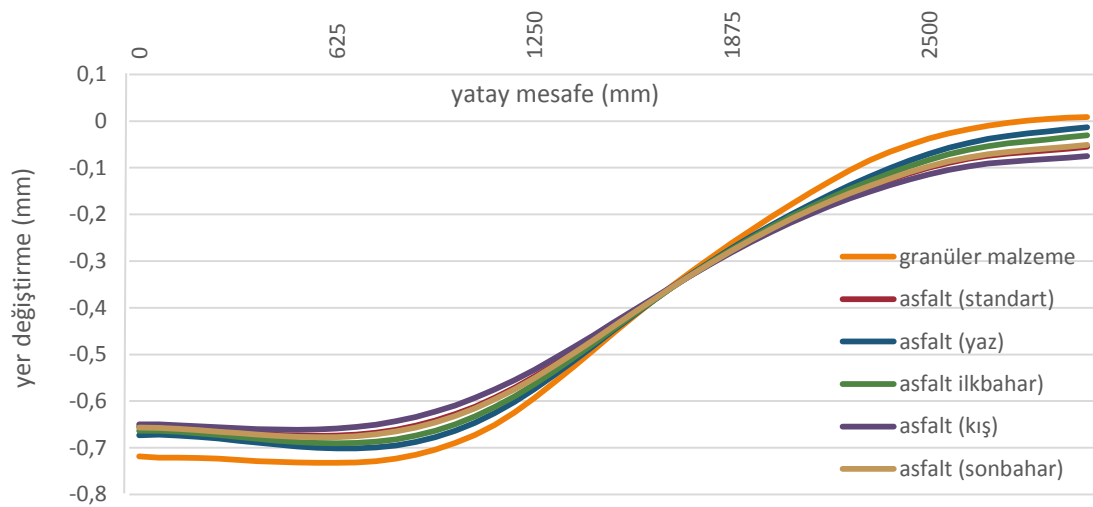
Şekil 4.20 Taban Zemini 1 ($E=35$ MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.21’de 225 kN dingil yükü etkisinde taban zemini Z2’in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişimi 1.22 mm iken, asfalt (standart) için 1.08, asfalt (yaz) için 1.14, asfalt (ilkbahar) için 1.11, asfalt (kış) için 1.06 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.09 mm’ dir. Z1 tabakasına göre malzemelerin deformasyonundaki azalış % 55 civarındadır Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 86.90 ile asfalt (kış)’ a aittir.



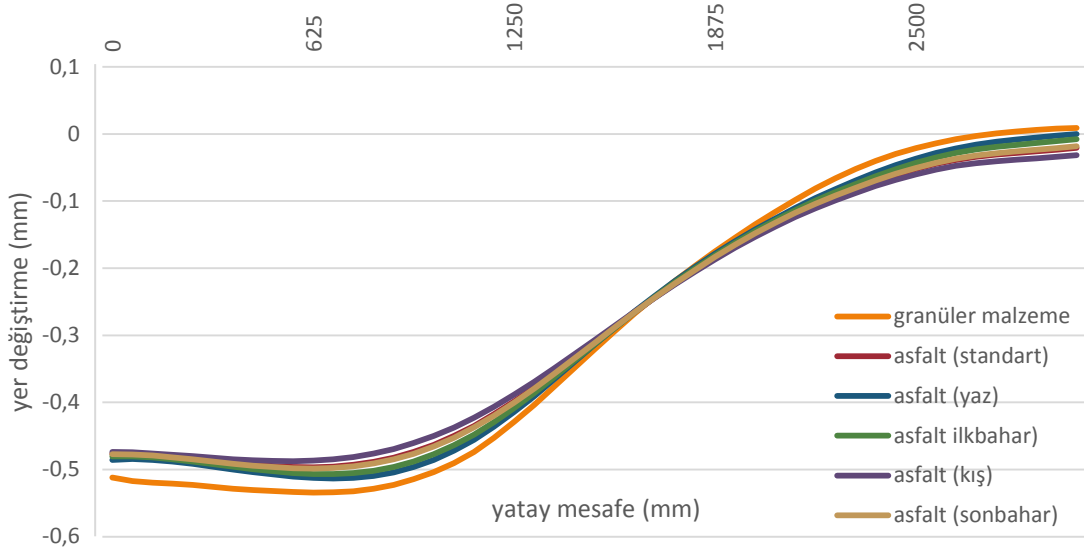
Şekil 4.21 Taban Zeminini 2 ($E=80$ MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.22’de 225 kN dingil yükü etkisinde taban zeminini Z3’ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişimi 0.73 mm iken, asfalt (standart) için 0.67, asfalt (yaz) için 0.70, asfalt (ilkbahar) için 0.69, asfalt (kış) için 0.66 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.68 mm’ dir. Z2 tabakasına göre malzemelerin deformasyonundaki azalış % 38 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 90.40 ile asfalt (kış)’ a aittir.



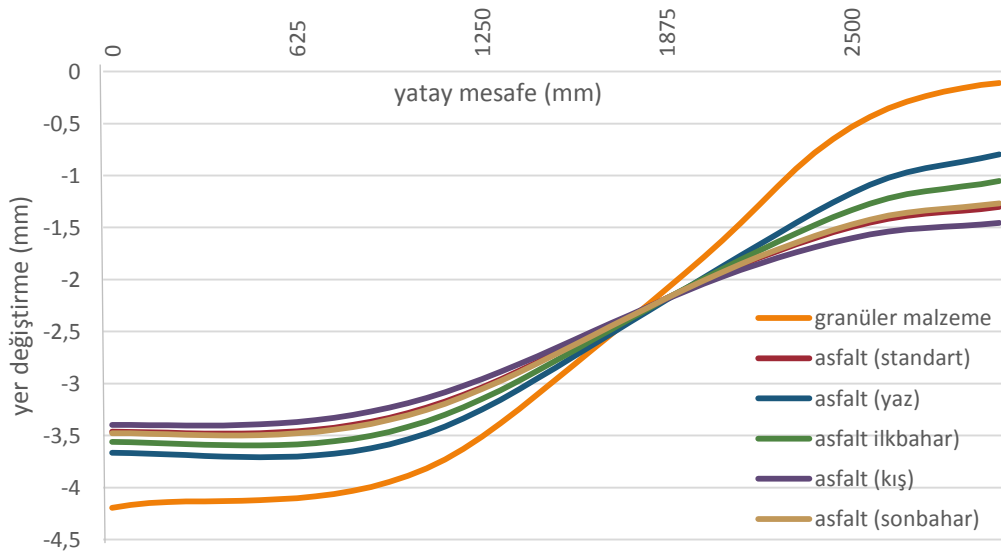
Şekil 4.22 Taban Zemini 3 ($E=140$ MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği

Şekil 4.23 de **225 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z4**' ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişimi 0.53 mm iken, asfalt (standart) için 0.50, asfalt (yaz) için 0.51, asfalt (ilkbahar) için 0.51, asfalt (kış) için 0.49 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.50 mm' dir. Z3 tabakasına göre malzemelerin deformasyonundaki azalış % 26.5 civarındadır. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 92 ile asfalt (kış)' a aittir.



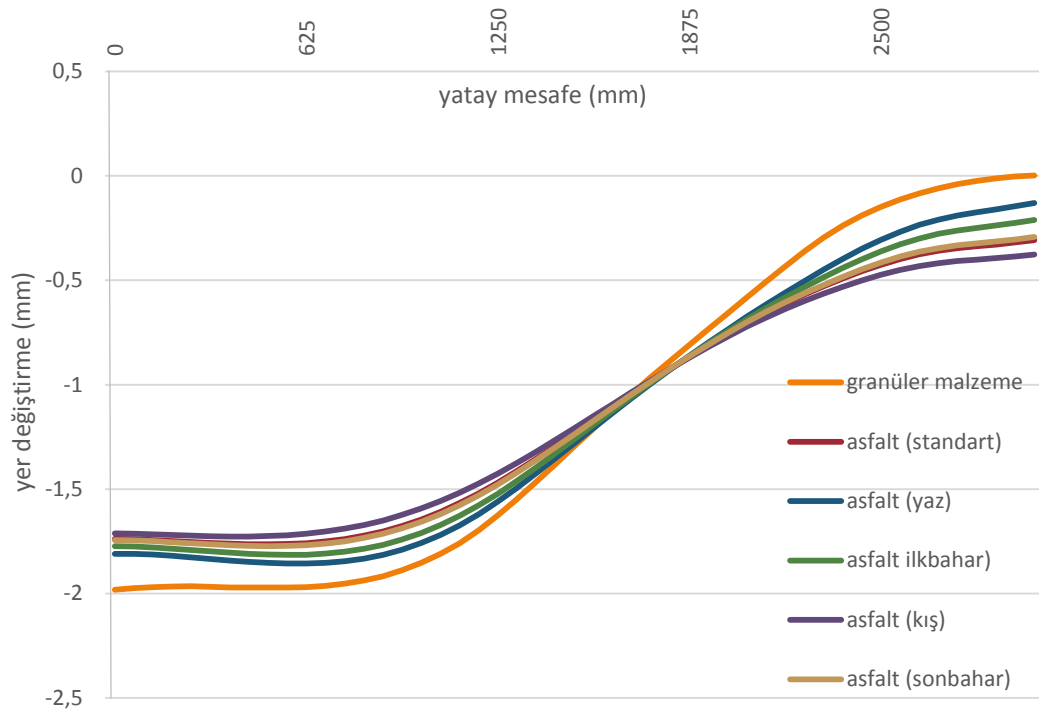
Şekil 4.23 Taban Zimini 4 (E=200 MPa) 225 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.24'de **360 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z1**'in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 4.19 mm iken, asfalt (standart) için 3.48, asfalt (yaz) için 3.71, asfalt (ilkbahar) için 3.60 asfalt (kış) için 3.40 ve asfalt (sonbahar) için ise 3.50 mm' dir. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 81.15 ile asfalt (kış)' a aittir.



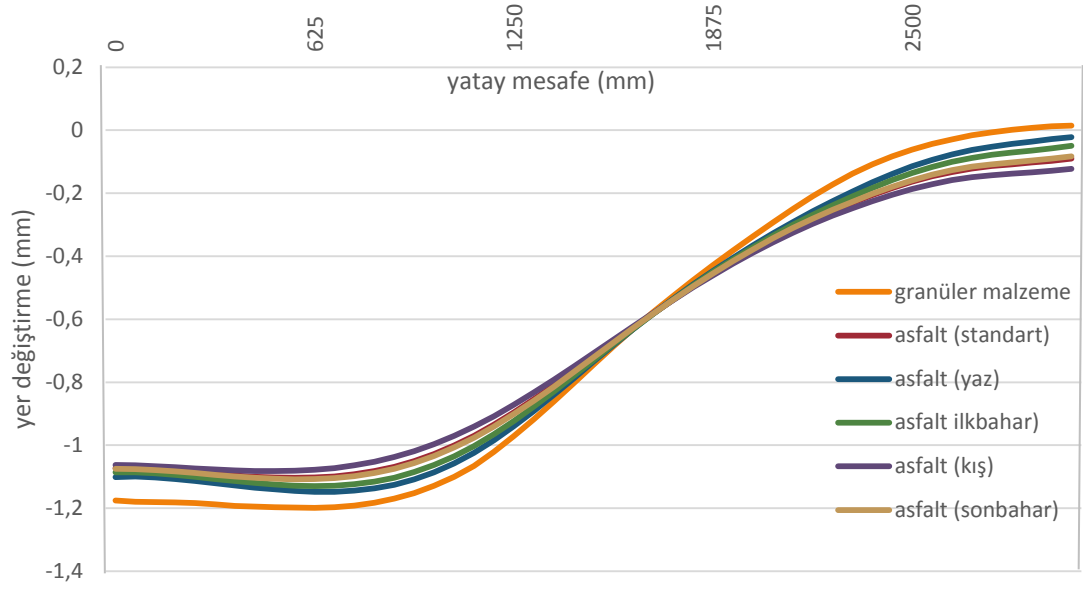
Şekil 4.24 Taban Zemini 1 ($E=35$ MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.25 de **360 kN** dingil yükü etkisinde taban zeminini **Z2**'in altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 1.98 mm iken, asfalt (standart) için 1.76, asfalt (yaz) için 1.86, asfalt (ilkbahar) için 1.82, asfalt (kış) için 1.73 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.77 mm' dir.. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 87.37 ile asfalt (kış)' a aittir.



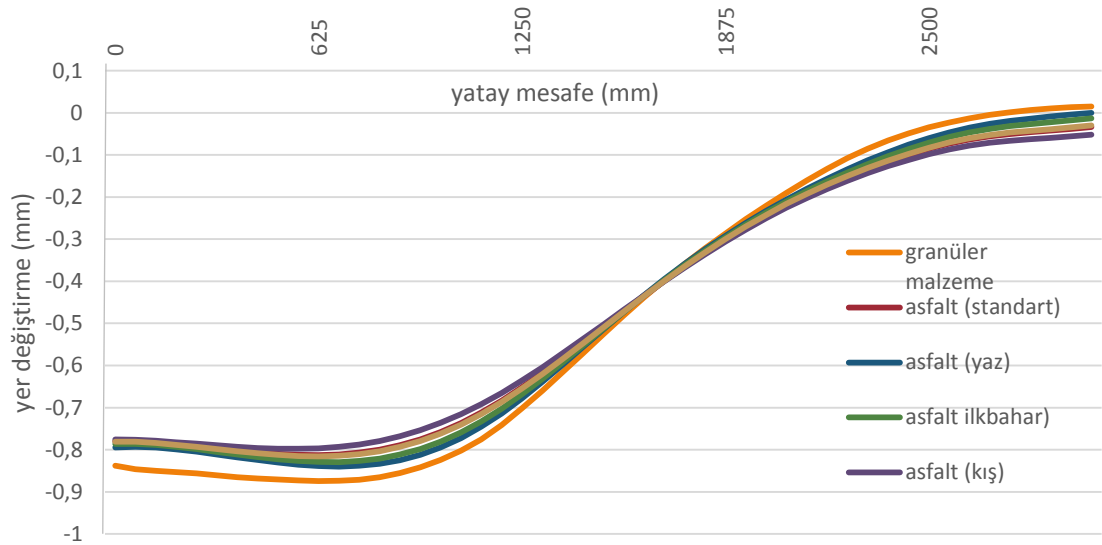
Şekil 4.25 Taban Zemini 2 ($E=80$ MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.26’da **360 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z3**’ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 1.20 mm iken, asfalt (standart) için 1.10, asfalt (yaz) için 1.15, asfalt (ilkbahar) için 1.13, asfalt (kış) için 1.08 ve asfalt (sonbahar) için ise 1.11 mm’ dir.. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 90 ile asfalt (kış)’ a aittir.



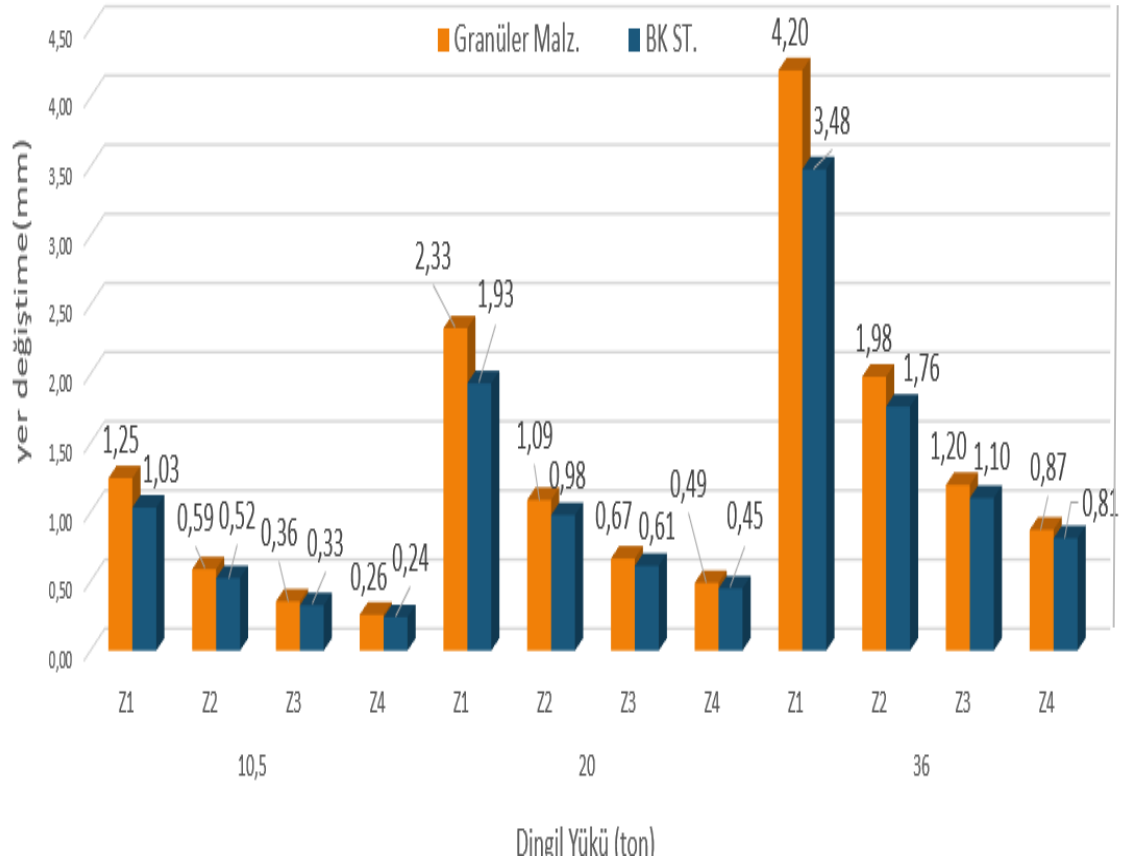
Şekil 4.26 Taban Zemini 3 ($E=140$ MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.27’de **360 kN** dingil yükü etkisinde taban zemini **Z4**’ ün altbalast tabakası için yatay hat boyunca düşey yer değişim grafikleri verilmiştir. Granüler malzeme tabakasının en fazla yer değişiminin 0.87 mm iken, asfalt (standart) için 0.81, asfalt (yaz) için 0.84, asfalt (ilkbahar) için 0.83, asfalt (kış) için 0.80 ve asfalt (sonbahar) için ise 0.82 mm’ dir.. Granüler malzemeye göre en az deformasyon % 91.95 ile asfalt (kış)’ a aittir.



Şekil 4.27 Taban Zemini 4 (E=200 MPa) 360 kN Dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 4.28’de farklı zemin türleri için 10.5, 20, 36 ton dingil yükleri altında bitümlü karışım ve granüler malzeme için yer değişim grafiği verilmiştir. Taban zemin türünün en az dingil yükü kadar etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 Farklı zemin türü ve dingil yükleri için yer değişim grafiği.

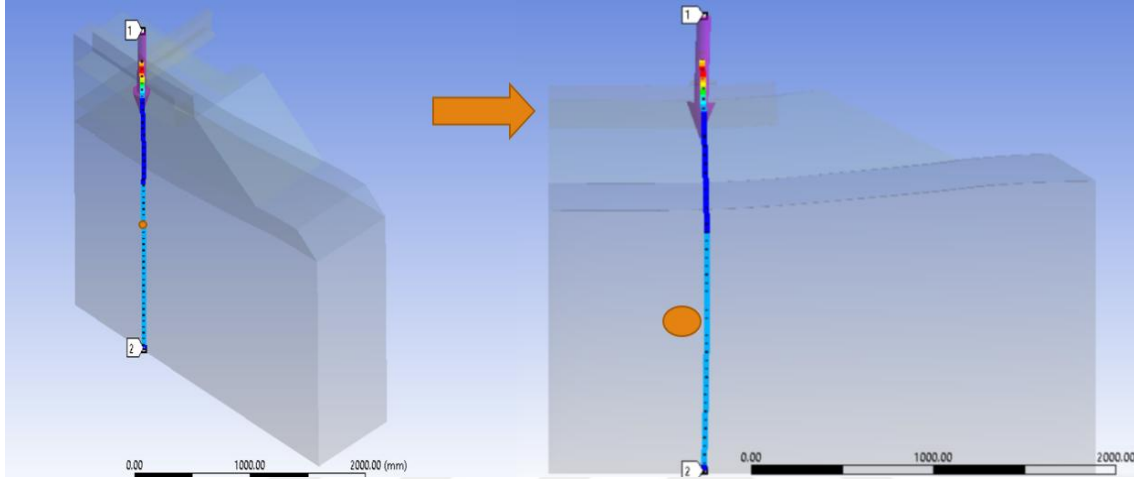
Çizelge 4.1’ de ise bitümlü karışım malzemelerinin granüler malzemeye göre davranışları farklı zemin türleri ve dingil yükleri için kıyaslanmıştır. Özellikle Bitümlü karışım (kış) ve Bitümlü karışım (HMA) için diğerlerine oranla yer değişiminde azalmalar görülmüştür.

Çizelge 4.1 Granüler malzemeye göre yer değişimindeki azalmalar (%).

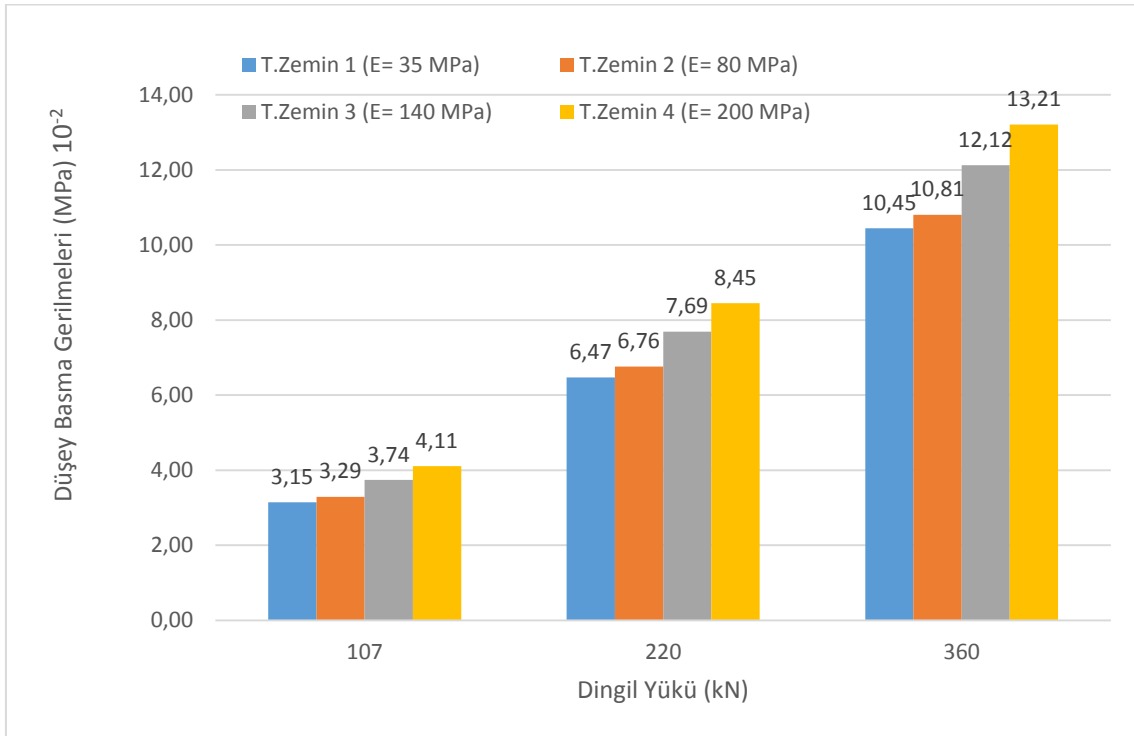
Granüler malzemeye göre yer değişimindeki azalmalar (%)							
Dingil Yükü(ton)	Taban Zemini	Granüler malz için yer d. Değerleri (mm)	BK ST.	BK Yaz	BK İlkbahar	BK Kış	BK Sonbahar
10.5	Z1	1.247	17.0	11.6	14.3	18.9	16.6
	Z2	0.589	10.9	6.3	8.4	12.8	10.5
	Z3	0.356	7.9	4.2	5.7	9.7	7.5
	Z4	0.260	7.0	3.9	5.1	8.7	6.7
22.5	Z1	2.331	17.0	11.6	14.3	18.9	16.6
	Z2	0.486	10.9	6.3	8.4	12.8	10.5
	Z3	0.666	7.9	4.2	5.7	9.7	7.5
	Z4	1.085	7.0	3.9	5.1	8.7	6.7
36	Z1	4.196	17.0	11.6	14.3	18.9	16.6
	Z2	1.981	10.9	6.3	8.4	12.8	10.5
	Z3	1.199	7.9	4.2	5.7	9.7	7.5
	Z4	0.874	7.0	3.9	5.1	8.7	6.7

Taban zemini malzemesinin değişmesi basınç ve çekme gerilmelerini de doğrudan etkilemektedir. Elastite modülü malzemelerin maruz kaldığı kuvvet neticesinde şekil değiştirmeye karşı koymasının oranıdır. Bu oran malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bitümlü karışımlar ve granüler balast malzemesi temelde farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler olduğu için mekanik davranışları da farklılıklar göstermektedir. Şekil 4.30’ da 150 mm granüler malzeme Şekil 4.31’ de ise 150 mm kalınlığında bitümlü karışım malzemesi kullanılan bir demiryolu yapısında farklı elastite modüllerine sahip taban zemini malzemesi ile oluşan basınç ve çekme gerilmeleri verilmiştir. Şekil 4.29’da modelde düşey hat boyunca tanımlanan gerilme eğrisinde altbalast ve taban zemini arasındaki gerilmeler verilmiştir. Şekil 4.30 ve 4.31’

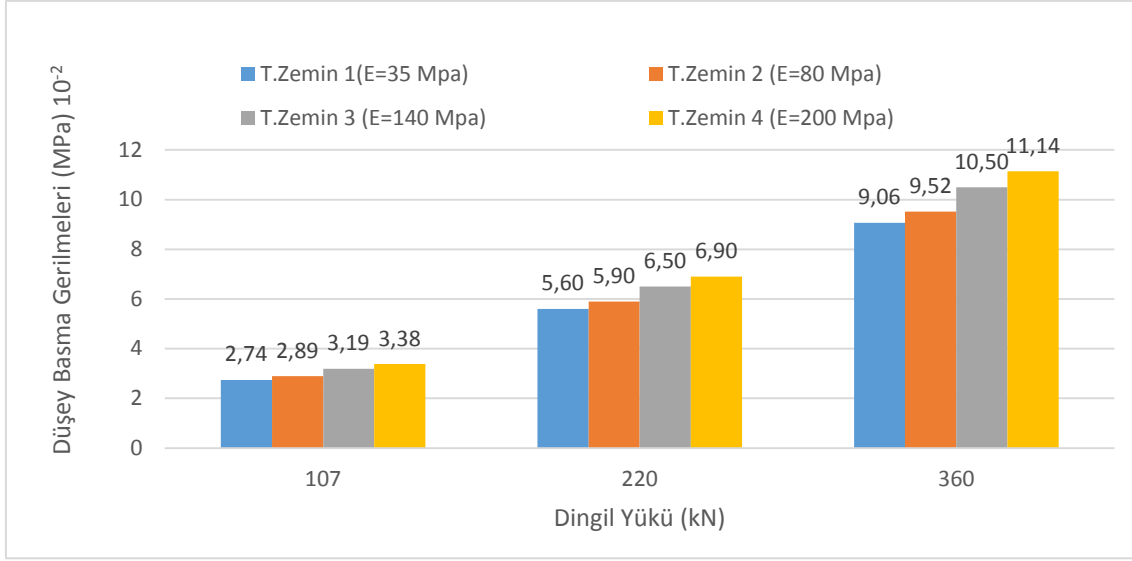
de görüldüğü üzere taban zemini modülü ne kadar yüksekse taban zemininde oluşan dikey gerilmelerde o kadar fazla olmaktadır. Ayrıca uygulanan ile aynı oranda gerilmelerde de artış olduğu gözlenmiştir. Örneğin sırasıyla 105 kN, 225 kN ve 360 kN' luk üç dingil yükü için aynı taban malzemesinde oluşan gerilmeler yük artışlarıyla aynı oranda sırasıyla 1,05 ve 0,63 kat artmıştır.



Şekil 4.29 Modelde düşey hat boyunca tanımlanan mesafe.

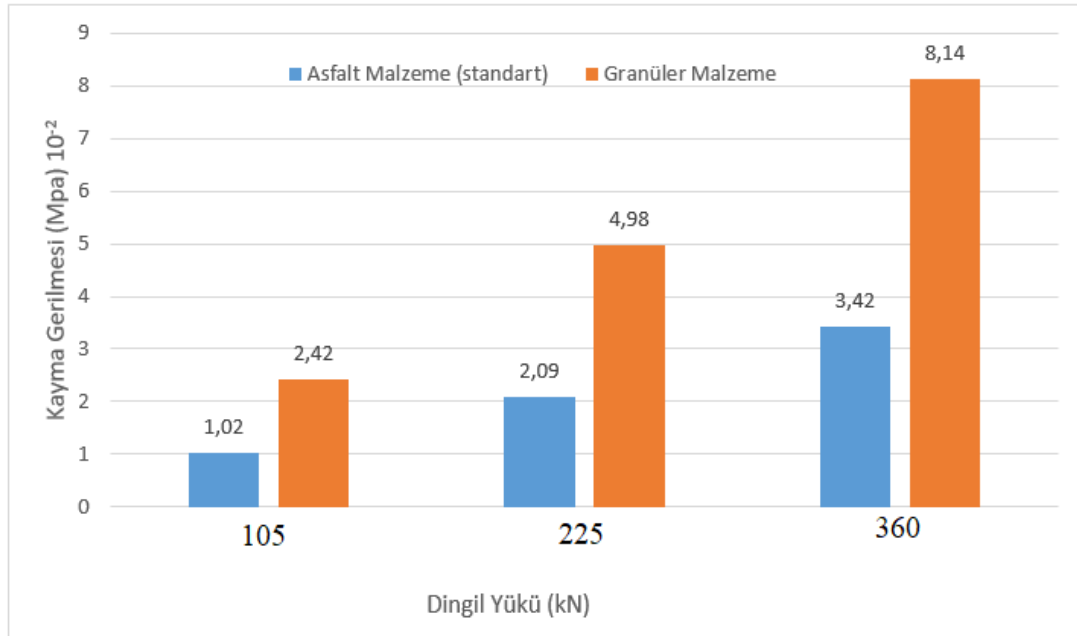


Şekil 4.30 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki granüler altbalast altında farklı taban zemininde oluşan gerilmeler.



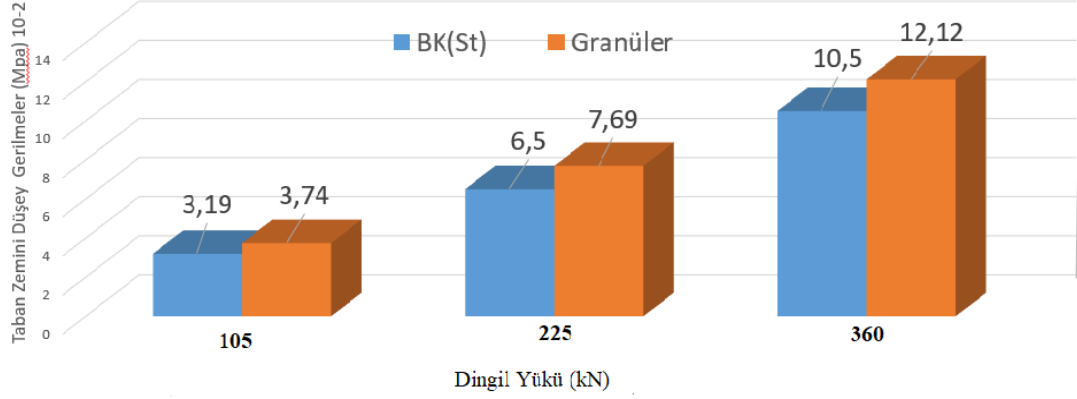
Şekil 4.31 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki bitümlü karışım altbalast altında farklı taban zeminleri arasında oluşan gerilmeler.

Şekil 4.32’ de Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki bitümlü karışım altbalast ve granüler malzeme altında oluşan kayma gerilmelerine ait grafik verilmiştir. Görüldüğü üzere granüler malzemede kayma gerilmeleri bitümlü karışıma göre iki katından fazladır.



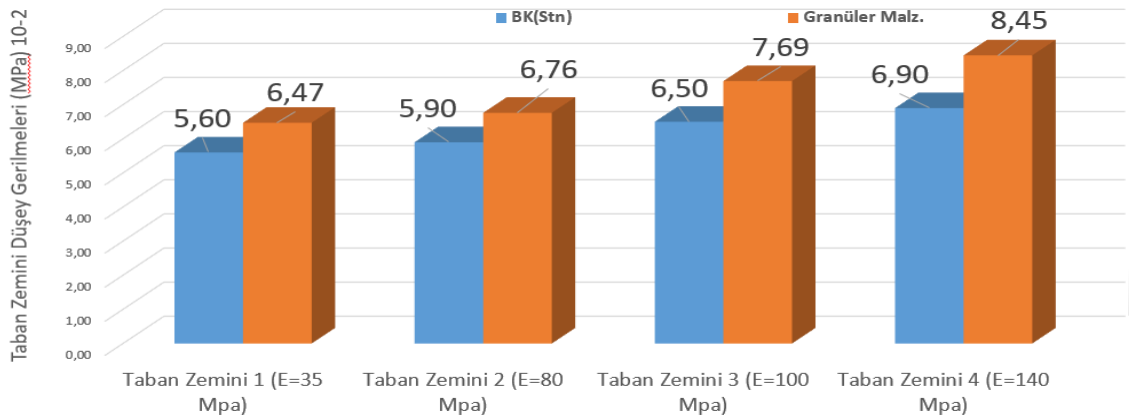
Şekil 4.32 Düşey yük altında 150 mm kalınlığındaki bitümlü karışım ve granüler malzemeli altbalast altında oluşan kayma gerilmelerine ait grafik.

Şekil 4.33’ te 150 mm kalınlığındaki altbalast ve $E=140$ MPa taban zemini için “M” noktasındaki gerilme grafiği verilmiştir. Granüler malzemedeki gerilmelerin bitümlü karışıma göre yaklaşık % 17 daha fazla gerilmeye neden olduğu görülmüştür.



Şekil 4.33 150 mm kalınlığındaki altbalast ve $E=140$ MPa taban zemini için M noktasındaki gerilme grafiği.

Şekil 4.34’ de ise 225 kN dingil yükü ve 150 mm kalınlıkta altbalast tabakası altında tanımlanan bir “M” noktasında, farklı zemin türleri için gerilme grafiği verilmiştir. Yine altbalastta bitümlü karışım malzemesi granüler malzemeye oranla yaklaşık %16 civarında daha düşük gerilmeye sebep olmaktadır. Ayrıca taban zemininin maruz kaldığı gerilmelere karşı davranışı incelendiğinde, zemin türünün elastikliğinin azaldıkça oluşan gerilmelerin de azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.34 225 kN 150 mm kalınlıkta altbalast tabakası altındaki bir M noktasında, farklı zemin türleri için gerilme grafiği.

4.4 Maliyet Analizi

Yüksek hızlı demiryolu hatları, konvansiyonel hatlara oranla daha yüksek frekanslı titreşime maruz kalmaktadırlar. Bu durum hattın kullanım ömrünü azaltır. Bitümlü karışım malzemesinin granüler malzemeye göre titreşimi sönmülmesi hattın kullanım ömrünü arttıran önemli bir faktördür. Yine hattın stabilitesini en çok etkileyen parametrelerden biri de drenajdır. Altbalast tabakasındaki, kısmen geçirimli granüler malzemeye oranla geçirimsiz bitümlü karışım malzemesinin kullanılması, hattın dayanımını arttıracaktır. Yapılan analizler gerilme ve şekil değiştirmelerin bitümlü karışım malzemesinde granüler malzemeye orana daha düşük olduğunu, bu durumda hattın geometrisinin ve yapısının daha uzun süre korunacağını göstermektedir.

Hat geometrisi oluşturulurken belli değerlere göre optimize edilmesi beklenir. Bunlar;

- Rayın oturması en az 1.2 mm olması gerekir. Bu şekilde dayanak noktası kuvveti % 30 oranında azalacaktır.
- Yataklama modülü $< 0.1 \text{ N/mm}^2$
- Yaylanma sayısı $< 30 \text{ kN/mm}$
- Ray tabanı gerilimi $< 60 \text{ kN/mm}^2$ olmasıdır.

Granüler altyapı malzemesine göre daha dayanıklı olan bitümlü karışım malzemesiyle amaçlanan hat yapısına yaklaşmak daha mümkündür. Yine yapılan araştırmalar göstermiştir ki balastlı klasik bir demiryolu hattının ortalama ömrü 30-40 yıl civarında iken bitümlü karışım malzemesi kullanılan bir hattın ömrü ortalama 50-60 yıl civarındadır (Lichtberger, 2011). Bu şartlar altında klasik bir YHT hattı için (tünel, makas vs. olmadan), yapım ve kullanım maliyeti Çizelge 4.2' de karşılaştırılmıştır. Hattın km yapım maliyeti ve altbalast (temini, serilmesi, nakli vs.) için TCDD 2019 yılı üstyapı pozları kullanılırken, bitümlü karışım malzemesi için KGM pozu kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 Maliyet Analiz Tablosu.

	Tanım	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Miktarı	Tutar (TL)	Öngörülen kullanım ömrü (yıl)	Maliyet Analizi (TL/yıl)
Granüler malzemeli altbalast tabakası için	Hat Serilmesi (60E1-60E2 Ray, B70 Beton Travers ile)	Hat-m	1.208,00	1000	1.208.000,00		
	Altbalast serilmesi (herşey dahil)	m ³	101,63	1500	152.445,00	30	45.348,17
	Toplam:				1.360.445,00		
	Tanım	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Miktarı	Tutar (TL)	Öngörülen kullanım ömrü (yıl)	Maliyet Analizi (TL/yıl)
Bitümlü Karışım malzemeli altbalast tabakası için	Hat Serilmesi (60 E1-60 E2 Ray, B70 Beton Travers ile)	Hat-m	1.208,00	1000	1.208.000,00		
	Altbalast serilmesi (herşey dahil)	m ³	172,64	1500	258.960,00	50	29.339,20
	Toplam :				1.466.960,00		

5. SONUÇLAR

Yüksek hızlı hat enkesitinde, altbalast yerine farklı kalınlıklarda asfalt tabakası yerleştirilmiş, ayrıca taban zemini malzemesi ve asfalt tabaka özellikleri mevsime göre değiştirilerek dört farklı statik dingil yükü altında ANSYS programı ile sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Bunun neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Altbalast tabakasında granüler malzeme yerine bitümlü karışım malzemesi kullanımının taban zemini üzerindeki gerilmelerin azalmasını sağladığı görülmüştür.
- Altbalast tabakası diğer tabakalar ile örtülü olacağından mevsim geçişlerindeki elastite modüllerindeki değişimler çok büyük değildir. Dolayısı ile yaz döneminde asfalt taşıma gücündeki değişimlerin sınırlı olduğu yapılan sonlu elemanlar modellemesinde deformasyonlardaki değişimin önemli düzeylerde olmadığı görülmüştür.
- Altbalast yerine bitümlü karışım malzemesi kullanımı taban zeminine su sızması vb. oluşumları önleyerek yüksek hızlı hatlarda oldukça önemli olan deformasyonların azalmasına da önemli katkılar sağlayacaktır. Son zamanlarda, Çorlu'daki tren kazası gibi altyapıdan ve drenaj kusurlarından kaynaklanan sorunların ne tür kazalara yol açtığı göz önünde bulundurulduğunda bu hususun ne kadar önemli olduğu aşıkardır.
- Deformasyonları en çok etkileyen parametre taban zemini malzemesinin değiştirilmesi olmuştur. Bu da altyapıda taşıma gücünün tüm yapı üzerinde ne kadar etkilediğini göstermektedir. Ancak; altyapı güçlendirme çalışmalarının yüksek maliyetli olduğu göz önüne alınırsa, altbalast tabakasında uygun içerik ve kalınlıkta bitümlü karışım kullanılması durumu bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

- Altbalast tabakasında yüksek rijitliğe sahip bitümlü karışım malzemesi gibi bir malzeme kullanıldığında, yük dağılımının daha homojen olacağı, yine rijit malzemenin balasta tabandan herhangi bir malzeme karışmasını engellediği, bunların yapının kullanım ömrünü arttıracacağı söylenebilir.
- Bundan sonraki çalışmalarda dinamik yüklerin de etkisiyle altbalast tabakasının özellikleri değiştirilerek, bitümlü karışım kullanımı durumunun granüler malzemeye göre avantaj ve dezavantajları araştırılabilir.
- Özellikle granüler balast ve altbalast tabakalar için bazalt, granit gibi kayaçların kullanıldığı ve bu tip kayaç rezervlerinin de ülkemizde ve tüm dünyada sınırlı olduğu göz önüne alındığında, altbalast tabakası gibi tabakalarda bitümlü karışım kullanımı hem hattın stabilitesini korumayı sağlayacak hem de bu tip kayaçların yüksek taşıma maliyetlerini ortadan kaldıracaktır.
- Granüler malzemeli altbalast tabakasının yapım maliyeti, bitümlü altbalast tabakasına göre daha düşüktür. Ancak; bitümlü karışım malzemeli altbalast tabakasının, yapının bakım onarım masraflarını azaltıp kullanım ömrünü arttıracacağı göz önünde bulundurulursa; uzun vadede bitümlü altbalast tabakalı yapının, granüler malzemeli altbalast tabakası kullanılan hatta göre daha ekonomik olacağı öngörülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Kutluhan, S. (2005). Karayollarında kış bakımı kar ve buz kontrolü. *TMMOB İMO İstanbul Bülten* **76**:10-16.
- Arlı, V., (2002). Balastlı ve balastsız üstyapıların ekonomik yönden karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Beeken, G., (1994). Railway tracks on asphalt for the rapid and heavy traffic of the future. *Asphalt*.**3**:17-24.
- Bezgin, N.C., (2017). Toprak İşleri ve Demiryolu Mühendisliği Ders Notları. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Bouraima, M.B., Yang, E., Qiu, Y. (2017). Mechanics calculation of asphalt concrete track- substructure layer and comparisons. *American Journal of Engineering Research (AJER)* **6** : 280-287.
- Chen, J., Zhou, Y. (2018). Dynamic responses of subgrade under double-line high-speed railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **225**: 1-12.
- Eroğlu, M., (2014). raylı sistemlerde ray ve teker arasındaki temas analizinin ansys ortamında incelenmesi. Lisans Tezi, Karabük Üni. Makine Mühendisliği bölümü, Karabük.
- Esveld, C. (2001). Modern Railway Track . 2. edition, Delft University of Technology, Netherlands.
- Fernando, M.S., Gaetano, D.M. (2017). Optimization of the Mix-Design System for the Sub-ballast Railroad. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 5, 246-259.
- Gürer, C. (2018). Demiryolu Mühendisliği. Lisans Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Han, J., Zhao, G.-T., Sheng, X-Z., Jin, X.-S., (2015). Study on the subgrade deformation under high-speed train loading and water–soil interaction. *Acta Mechanica Sinica* **32** : 233-243.

- Huang, Y.H., Lin, C., Deng, X. and Rose, J. (1984). KENTRACK, A computer program for hot-mix asphalt and conventional ballast railway trackbeds, Asphalt Institute (Publication RR-84-1) and National Asphalt Pavement Association (Publication QIP-105), 164 pages.
- Jung, W.-Y., Lee, S.-H., Lee, J.-W., Ju, B.-S., (2013). Behavior of concrete slab track on asphalt trackbed subjected to thermal load. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. pages:786-791.
- Köse. H., (2011). Balastsız üstyapıda asfalt ve beton taşıyıcı tabakaların teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye.
- Lamas-Lopez, F., Cui, Y-J., Calon, N., D'Aguiar, S.C. (2017). Impact of train speed on the mechanical behaviours of track-bed materials. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **9**:818-829.
- Lee, S.-H., Lee, J.-W., Park, D.-W., Vo, H.V. (2014). *Evaluation of asphalt concrete mixtures for railway track. Construction and Building Materials* **73**: 13-18.
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., Chrismer, S. (2016). Railway Geotechnics. CRC Press. Taylor & Francis Group. U.S.
- Li, D., Lopresti, J., and Davis, D. (2002). Application and performance of hot-mix asphalt trackbed over soft subgrade. *Railway Track & Structures*, January, pp. 13-15.
- Li, L., Nimbalkar, S., Zhong, R. (2018). Finite element model of ballasted railway with infinite boundaries considering effects of moving train loads and Rayleigh waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **114**: 147-153.
- Lichtberger B. (2011). Demiryolu Cep Kitabı. Eurailpress, Hamburg.
- Lin, X., Edwards, J.R., Dersch, M., Jr, C.R., (2016). Load quantification for light rail, heavy rail, and commuter rail transit infrastructure. Rail Transportation and Engineering Center – RailTEC, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

- Lopresti, J., Davis, D., and Kalay, S. (2002) Strengthening The Track Structure For Heavy Axle Loads, *Railway Track & Structures*, September, pp. 21-26.
- Moderen, O., (2010), Balastsız demiryolu üstyapısının yapısal modellenmesi ve analizi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye.
- Momoya, Y., (2007). New Railway roadbed design. *Railway Technology Avalanche*, No. 20, December 26, 2007, pp. 118.
- Paixão, A., Varandas, J.N., Fortunato, E., Calçada, R. (2016). Non-linear behaviour of geomaterials in railway tracks under different loading conditions. *Procedia Engineering*. **143**:1128-1135.
- Poveda, E., Yu, R.C., Lancha, J.C., Ruiz, G. (2013). Finite element analysis on the fatigue damage under compression of a concrete slab track. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures.
- Rose, J.G., Bryson, L.S. (2009). Hot mix asphalt railway trackbeds: trackbed materials, performance evaluations, and significant implications. International Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio, USA.
- Rose, J.G., Souleyrette, R.R. (2015). Asphalt railway trackbeds: recent designs, applications and performances. AREMA.
- Rose, J.G., Su, B., Long, W.B. (2003). KENTRACK: A railway trackbed structural design and analysis program. AREMA Conferance Proceedings.
- Rose, J.G., Teixeira, P.F. Veit, P., (2011). International design practices, applications, and performances of asphalt/bituminous railway trackbeds. GEORAIL, Paris, France.
- Rose, J.G., Teixeira, P.F., Ridgway. E., (2010). Utilization of asphalt/bituminous layers and coatings in railway trackbeds – a compendium of international applications. Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference ; JCR2010 ; April 27-29, 2010, Urbana, Illinois, USA.
- Rose, J.G., Uzarski, D.-R., (2011). Performance-based trackbed structural design and analysis utilizing kentrack. Urbana, Illinois, USA.

- Rose, J., Agarwal, N., Brown, J., and N. Ilavaia, (2010). Kentrack, a performance-based layered elastic railway trackbed structural design and analysis procedure. A Tutorial,” ASME, IEEE, ASCE, AREMA, & TRB 2010 Joint Rail Conference. Paper JRC 2010-36067, Urbana, IL, 38 pages.
- Rose, J.G. and L.S. Bryson. (2009). Optimally designed hot mix asphalt railway trackbeds – test measurements, trackbed materials, performance evaluations, and significant implications. 2009 International Conference on Perpetual Pavements, Ohio Research Institute for Trans. and Envir., Columbus, 19 page.
- Rose, J., Lees, H., (2008). Long-term assessment of asphalt trackbed component materials. Properties and Performance, Proceedings of the 2008 AREMA Conference, 28 pages.
- Rose, J., Souleyrette, R.-R., (Kentrack4.0: a railway trackbed structural design program. Department of Civil Engineering University of Kentucky Lexington, KY.
- Sadeghi, J., Askarinejad, H., (2010). Development of nonlinear railway track model applying modified plane strain technique. *Journal of Transportation Engineering* **136**: 1068-1054.
- Sol-Sánchez, M., Pirozzolo, L., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C. (2015). Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature. *Construction and Building Materials* **101**:338-346.
- Song, M.K., Noh, H.C., Choi, C.K., (2003). A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train–bridge interactions. *Engineering Structures*. **25**: 1611-1626.
- Sowmiya, L.S., Shahu, J.T., Gupta, K.K., (2010). Three dimensional finite element analysis of railway track. Indian Geotechnical Conference. IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay. P.909-912.
- Teixeira, P.F., Ferreira, P.A., López Pita, A., Casas, C., Bachiller, A., (2009). The use of bituminous subballast on future high-speed lines in Spain: structural design and

economical impact. *IJR International Journal of Railway* **2:1**, 1-7.

- Teixeira, P.F. and Lopez-Pita, A. (2005) viability of using bituminous subballast layer on high-speed ballasted tracks. Proceedings of the BCRA2005 - International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and . Airfields Conference, Trondheim, Norway, 27-29 June 2005.
- Teixeira, P.F., A. López Pita, C. Casas, A. Bachiller and F. Robusté (2006). Improvements in high-speed ballasted track design: benefits of bituminous subballastlayers. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board N° 1943, 2006, pp.43-49, ISSN 0361-1981, ISBN 0-309- 09425.
- Urbanek, M., Blaszkiewicz, D., FEM based improvement of cad for non-conventional railway track. *Special issue of the International Conference on Computational. and Experimental Science and Engineering* **128**: 241-242.
- Varandas, J.N., Paixão, A., Fortunato, E., Hölscher, P. And Calçada, R., (2014). Numerical modelling of railway bridge approaches: Influence of soil non-linearity. *International Journal of Railway Technology* **3**: 888.
- Varandas, J.N., Paixão, A., Fortunato, E., Hölscher, P., (2016). A numerical study on the stress changes in the ballast due to train passages. *Procedia Engineering* **143**: 1169-1176.
- Xiangwu Z.,(2005). Rubber-Modified asphalt concrete for high-speed railway roadbeds. Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 40, 2005, Transportation Resreach Board, USA.
- Yalçın, N. S, ve Erel, A., (2007). Yüksek hızlı demiryollarında altyapının önemi ve tasarım ilkeleri. 7. Ulaştırma Kongresi, 19-21 Eylül, İstanbul.
- Yang, E., Qiu, Y., Luo, Q., Wang, K.C.P., (2015). 6th International conference bituminous mixtures and pavement. Thessaloniki, Greece.

İnternet Kaynakları

- 1) <http://dergipark.gov.tr>, 10.02.2019
- 2) <http://www.wikizero.biz>, 08.03.2019
- 3) <http://esveld.com>, 16.04.2019
- 4) <http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr>, 20.04.2019
- 5) <http://www.asphaltmagazine.com>, 20.04.2019



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tugçe AKILLI TÖRER

Doğum Yeri ve Tarihi : İSTANBUL 27/05/1986

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 05459004457 / tugcetorer@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bahçelievler B. Lisesi, (2000-2003)

Lisans : Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, (2004-2011)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
(2014-2019).

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Akdeniz İnşaat ve Eğitim Hiz. A.Ş. (2012)
İstanbul Yapı Denetim (Şancity Projesi), (2013)
İstanbul Avrupa Yakası Ptt Başmüdürlüğü (2014)
TCDD 7.Bölge Müdürlüğü, Modernizasyon Servis
Müdürlüğü, (2014- Devam Ediyor).