



**DEMİRYOLU ÜSTYAPI TASARIMLARINDA GEOGRİD
KULLANIMI VE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buğra CANPOLAT

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEMİRYOLU ÜSTYAPI TASARIMLARINDA GEOGRİD
KULLANIMI VE ETKİSİ

Buğra CANPOLAT

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Buğra CANPOLAT tarafından hazırlanan “Demiryolu Üstyapı Tasarımlarında Geogrid Kullanımı ve Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 19 / 01 / 2023 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 : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

Başkan : Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Konya Teknik Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Cahit GÜRER
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

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.

19 / 01 / 2023

Buğra CANPOLAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEMİRYOLU ÜSTYAPI TASARIMLARINDA GEOGRİD KULLANIMI VE ETKİSİ

Buğra CANPOLAT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT

Geoteknik problemlerin çözümünde, hızlı ve ekonomik bir seçenek olması sebebiyle geosentetik malzemelerin kullanımı dünyada ve ülkemizde son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Bir geosentetik malzeme türü olan geogridlerin ise ulaştırma altyapı ve üstyapı projelerinde zayıf zeminlerin güçlendirilmesi, tabaka kalınlıklarının azaltılması, yapı hizmet ömrünün uzatılması ve bakım sıklıkları ile maliyetlerinin azaltılmasında etkili olduğu öne sürülmektedir. Bir demiryolu üstyapısında; uygulanan yükler altında demiryolu hattı ve bu demiryolunu oluşturan tabakalarda meydana gelen gerilme ve deformasyonların tespiti, laboratuvar koşulları veya saha uygulamaları yardımıyla uzun uğraşlar neticesinde elde edilmektedir. Tasarım için gerekli olan gerilme ve deformasyonların belirlenmesinde, sonlu elemanlar yönteminin kullanımı son dönemlerde önemli ölçüde artmaktadır.

Bu çalışmada; demiryolu üstyapısında altbalast tabakası ile taban zemini arasına yerleştirilen tek sıra geogridin yapıya olan muhtemel etkileri araştırılmıştır. Bu araştırma boyunca analizlerin tamamı sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS 2020 R2 programı ile yapılmıştır. Farklı dingil yükleri, farklı özelliklere sahip geogridler, farklı altbalast tabaka kalınlıkları ve farklı özelliklere sahip taban zeminleri için hem geogrid kullanılmadan hem de geogrid kullanılarak 96 adet farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda taban zemini üst sınırında oluşturulan yatay hat üzerinde meydana gelen gerilme ve deformasyon değerleri ölçülmüştür. Elde edilen bulgular; altbalast tabakası ile taban zemini arasında geogrid malzeme kullanımının, meydana gelen deformasyonların

azaltılmasına ve altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Taban zemini özelliklerinin zayıf olduğu tasarımlarda geogrid malzemesi daha etkili olurken, taban zemini özellikleri iyileştikçe geogridin etkisi de azalmaktadır. Altyapı iyileştirme yöntemlerinin maliyetli olması nedeniyle, zayıf zeminlerde geogrid kullanımının kümülatif anlamda avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan maliyet analizleri neticesinde geogrid kullanımı ile elde edilen inşaat yapım süresinde meydana gelecek kısalma, yapı hizmet ömrünün uzaması, uygulama kolaylığı ve bakım sıklıklarının azaltılması gibi kazanımlar kullanılabilirliği desteklemektedir.

Sonuç olarak tasarımı yapılacak bir üstyapı için, uygulanan bu yöntem ve elde edilen verilerin; gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıması, atmosfer koşullarına direnebilmesi ve ekonomik olarak daha avantajlı tasarım parametrelerinin oluşturulması konusunda yol gösterici olarak kullanılabileceği görülmektedir.

2023, xv + 141 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geogrid, Altbalast, Sonlu elemanlar metodu, ANSYS, Demiryolu, Taban zemini.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF GEOGRID USAGE ON RAILWAY PAVEMENT DESIGN

Buğra CANPOLAT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Hüseyin AKBULUT

The use of geosynthetic materials has become widespread in the world and in our country in recent years, as it is a fast and economical option in solving geotechnical problem on railway pavement sub-structure. It is claimed that geogrids, which is a type of geosynthetic material, are effective in strengthening weak soils, reducing layer thicknesses, extending the service life of the structure, cost of maintenance in transportation infrastructure and pavement projects. In a railway pavement; the determination of the stress and deformations occurring in the railway line, forming of the layers and the loads applied on the railway line is obtained as a result of long efforts with the help of laboratory conditions or field applications. The use of finite element method in determining the stresses and deformations required for design has been increasing significantly in recent periods.

In this study; the possible effects of a single row geogrid placed between the sub-ballast layer and the subgrade on the railway pavement structure were investigated. All of the analyzes throughout this research were made with the finite element software ANSYS 2020 R2. For different axle loads, geogrids with different properties, different sub-ballast layer thicknesses and subgrades with different properties, 96 different analyzes were carried out both without geogrids and with geogrids. As a result of these analyses, the stress and deformation values occurring on the horizontal line formed at the upper boundary of the subgrade were measured. The results obtained have shown that the use of geogrid material between the sub-balist layer and the subgrade could significantly

contribute to reducing the deformations and reducing the thickness of the sub-ballast layer. While the geogrid material is more effective in designs with weak subgrade properties, the effect of the geogrid decreases as the subgrade properties improve. Due to the cost of infrastructure improvement methods, it is thought that the use of geogrids on weak soils will provide cumulative advantages. In addition, as a result of the cost analyzes made makes a great contribution on the use of geogrid, such as shortening the construction period, extending the service life of the structure, ease of application and reducing the frequency of maintenance, support usability.

As a result, it is seen that this applied method and the obtained data could be used as a guide for a pavement to be designed to safely carrying the applide load ont the structure, resisting atmospheric conditions and creating more economically advantageous design parameters.

2023, xv + 141 pages

Keywords: Geogrid, Sub-ballast, Finite element method, ANSYS, Railway, Subgrade.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında beni her zaman motive eden, her türlü destek ve yardımı esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. ANSYS programı ile ilgili çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan, zaman saat fark etmeksizin yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında ilgilerini esirgemeyen mesai arkadaşlarıma, her zaman yanımda olup beni motive eden, sevgi ve destek veren çok sevgili eşim Selin CANPOLAT'a, çalışmalarım sırasında bazen kendisine vakit ayıramamış olmam sebebiyle çok sevdiğim oğlum Atlas Kaan CANPOLAT'a, bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan babam Ali CANPOLAT, annem Belma CANPOLAT ve ablam Banu YILDIRIM'a destekleri için sonsuz teşekkür ederim.

Buğra CANPOLAT
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GEOSENTETİKLER	3
2.1 Geosentetiklerin Kullanım Alanları ve Fonksiyonları.....	5
2.1.1 Koruma Fonksiyonu.....	6
2.1.2 Güçlendirme Fonksiyonu	7
2.1.3 Ayırma Fonksiyonu.....	7
2.1.4 Drenaj Fonksiyonu	9
2.1.5 Yalıtım Fonksiyonu.....	10
2.1.6 Filtrasyon Fonksiyonu.....	11
2.2 Geosentetiklerin Çeşitleri	12
2.2.1 Geotekstil	12
2.2.1.1 Örgülü Geotekstil	13
2.2.1.2 Örgüsüz Geotekstil	14
2.2.2 Geomembran	14
2.2.2.1 Malzeme Cinsine Göre Geomembran	16
2.2.2.2 Üretim Şekline Göre Geomembran	16
2.2.3 Geonet	18
2.2.4 Geocell	18
2.2.5 Geokompozit	20
3. GEOGRİD	21
3.1 Üretim Yöntemine Göre Geogridler	22
3.1.1 Ekstrüde Yöntemi ile Üretilen Geogridler	22

3.1.2 Yapıştırma Yöntemi ile Üretilen Geogridler	23
3.1.3 Dokuma Yöntemi ile Üretilen Geogridler.....	24
3.2 Göz Açıklığına Göre Geogridler.....	25
3.2.1 Tek Eksenli Geogridler	25
3.2.2 Çift Eksenli Geogridler	25
3.2.3 Üç Eksenli Geogridler.....	26
3.3 Geogridlerin Görevi, Amacı ve Kullanımının Sağladığı Avantajlar	27
3.4 Geogridlerin Kullanım Alanları.....	30
3.4.1 Zayıf Zeminlerin Geogrid ile Güçlendirilmesi	30
3.4.1.1 Zayıf Zeminlerde Dolgu İmalatının Güçlendirilmesi Tasarım Kriterleri	31
3.4.2 Şevlerde Geogrid Kullanımı	38
3.4.3 Kaplamalı ve Kaplamasız Yollarda Geogrid Kullanımı	40
3.4.4 Demiryollarında Geogrid Kullanımı	41
3.4.4.1 Demiryolu Balast Tabakasında Geogrid Kullanımı	43
3.4.4.2 Demiryolu Altbalast Tabakasında Geogrid Kullanımı.....	45
3.4.4.3 Demiryolu Projelerinde Geogrid Kullanım Örnekleri.....	46
3.4.5 Geogrid Kullanımı Hakkında Yapılmış Akademik Çalışmalar	52
4. DEMİRYOLU	61
4.1 Demiryolunun Tarihsel Gelişimi	61
4.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları	62
4.2.1 Balast.....	62
4.2.2 Travers.....	64
4.2.3 Raylar	68
4.2.4 Bağlantı Elemanları.....	70
4.3 Demiryoluna Etki Eden Kuvvetler	72
4.3.1 Dikey Kuvvetler	73
4.3.2 Yatay (Enine) Kuvvetler	73
4.3.3 Yatay (Boyuna) Kuvvetler	74
4.4 Demiryolunda Meydana Gelen Bozulmalar	75
4.4.1 Mekanik Arızalar	75
4.4.1.1 Raylarda Görülen Arızalar	75

4.4.1.2 Traverslerde Görülen Arızalar.....	77
4.4.2 Geometrik Arızalar.....	77
4.4.2.1 Düşey Geometrinin Bozulması	78
4.4.2.2 Yatay Geometrinin Bozulması	82
5. MATERYAL ve METOT	85
5.1 Problemin Tanımı	85
5.2 Yöntem.....	89
5.3 Tasarım ve Analiz.....	90
6. BULGULAR	99
6.1 Dingil Yüğü Değışimine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi	99
6.2 Altbalast Tabaka Kalınlığı Değışimine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi	105
6.3 Farklı Elastisite Modülüne Sahip Taban Zemini Türlerine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi	111
6.4 Maliyet Analizi	128
7. SONUÇLAR.....	130
8. KAYNAKLAR.....	132
ÖZGEÇMİş.....	141

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad derece
cm	Santimetre
E	Elastisite modülü
gr	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
kN	Kilo newton
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
MPa	Mega pascal
kPa	Kilo pascal
t	Ton
σ_y	Y yönlü gerilme
σ_x	X yönlü gerilme
ν	Poisson oranı

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Kurumu)
BS	British Standard (İngiliz Standardı)
GCL	Geosentetik kil kaplamaları
FWD	Düşen ağırlık deflektometrisi
HBW	Brinell sertlik birimi
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HSTRC	Yüksek hızlı iz kayıt aracı
HT	Hızlı tren
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
PE	Polietilen
PVC	Polivinil Klorür
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer (Uluslararası Demiryolları Birliği)
ULS	Ultimate Limit States (Nihai sınır durumu)
YHT	Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Kaplamalı ve kaplamasız yollarda geogrid kullanımı	41
Şekil 3.2 Demiryolu inşaatlarında geogrid kullanımı	43
Şekil 3.3 Demiryolu balast tabakasında geogrid kullanımı.....	44
Şekil 3.4 Demiryolu altbalast tabakasında geogrid kullanımı.....	45
Şekil 3.5 Hochstadt ve Probstzella arası demiryolu hattı güçlendirme yapılmış ve geogrid ile güçlendirme yapılmamış balast yüksekliklerine ait deformasyon modülü değerleri	50
Şekil 3.6 Geogridlerin 18 sene sonunda çekme dayanımı değişim grafiği	51
Şekil 3.7 Güçlendirme yapılmamış ve güçlendirme yapılmış dizayn kıyaslaması	52
Şekil 3.8 Geogrid kullanımının balast ve altbalast tabaka kalınlıklarına olan etkisi	57
Şekil 3.9 Dingil yükü 4,5 ton için temel ve alt temel tabaka kalınlıklarında oluşan gerilme değerleri	58
Şekil 3.10 Dingil yükü 5,5 ton için temel ve alt temel tabaka kalınlıklarında oluşan gerilme değerleri	58
Şekil 4.1 Tek hatlı yollarda balast enkesiti	64
Şekil 4.2 Demiryollarında kullanılan mono blok beton travers	67
Şekil 4.3 Vinyol tipi ray profili 60 E1.....	69
Şekil 4.4 Demiryolu hattına etki eden kuvvetler	74
Şekil 4.5 Nivelman bozukluğu	79
Şekil 4.6 Burulma bozukluğu.....	80
Şekil 4.7 Dever bozukluğu	81
Şekil 4.8 Hat genişliğinin bozulması.....	82
Şekil 4.9 Fleş bozulması.....	83
Şekil 5.1 Analiz için modellenmiş demiryolu kesitinin autocad çizimi.....	86
Şekil 5.2 ANSYS Spaceclaim uygulaması ile tren tekerinin 3 boyutlu modeli	91
Şekil 5.3 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile UIC60 E1 ray çizimi.....	91
Şekil 5.4 (a) Elastik ped görseli; (b) analiz tasarımı için sadeleştirilerek çizilmiş elastik ped görseli	92
Şekil 5.5 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile B70 travers çizimi.....	92
Şekil 5.6 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile çift eksenli geogrid tasarımı ...	93

Şekil 5.7 (a) Tek eksenli geogrid saha uygulama örneği; (b) tek eksenli geogrid kesiti;	
(c) analiz tasarımında kullanılan tek eksenli geogrid çizimi.....	93
Şekil 5.8 ANSYS Workbench 2020 R2 uygulamasına aktarılmış model	94
Şekil 5.9 ANSYS Workbench analiz için mesh optimizasyon grafiği.....	95
Şekil 5.10 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş modelin son hali	96
Şekil 5.11 Analiz sonuçlarının okunduğu yatay hat (path)	97
Şekil 5.12 225 kN dingil yükü altında geogridsiz üst yapı tasarımı için yer değiştirme	98
Şekil 5.13 225 kN dingil yükü altında 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogridli	
üstyapı tasarımı için yer değiştirme	98
Şekil 6.1 120 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	100
Şekil 6.2 225 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	101
Şekil 6.3 350 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği	102
Şekil 6.4 120 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.....	103
Şekil 6.5 225 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.....	104
Şekil 6.6 350 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.....	105
Şekil 6.7 120 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi	
grafiği	106
Şekil 6.8 225 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi	
grafiği	107
Şekil 6.9 350 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi	
grafiği	108
Şekil 6.10 120 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme	
grafiği.....	109
Şekil 6.11 225 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme	
grafiği.....	110
Şekil 6.12 350 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme	
grafiği	111
Şekil 6.13 120 kN dingil yükü ve taban zemini 1 ($E=35$ MPa) için düşey yer değiştirme	
grafiği.....	112
Şekil 6.14 120 kN dingil yükü ve taban zemini 2 ($E=80$ MPa) için düşey yer değiştirme	
grafiği.....	113

Şekil 6.15 120 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	114
Şekil 6.16 120 kN dingil yükü ve taban zemini 4 ($E=200$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	115
Şekil 6.17 225 kN dingil yükü ve taban zemini 1 ($E=35$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	116
Şekil 6.18 225 kN dingil yükü ve taban zemini 2 ($E=80$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	117
Şekil 6.19 225 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	118
Şekil 6.20 225 kN dingil yükü ve taban zemini 4 ($E=200$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	119
Şekil 6.21 350 kN dingil yükü ve taban zemini 1 ($E=35$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	120
Şekil 6.22 350 kN dingil yükü ve taban zemini 2 ($E=80$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	121
Şekil 6.23 350 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	122
Şekil 6.24 350 kN dingil yükü ve taban zemini 4 ($E=200$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği	123
Şekil 6.25 200 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değiştirme grafiği	124
Şekil 6.26 200 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için Y yönlü gerilme grafiği.....	125
Şekil 6.27 200 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için X yönlü gerilme grafiği.....	125
Şekil 6.28 150 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değiştirme grafiği	126
Şekil 6.29 150 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için Y yönlü gerilme grafiği.....	127
Şekil 6.30 150 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için X yönlü gerilme grafiği.....	127

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Geosentetik çeşitleri	4
Çizelge 2.2 Geosentetiklerin fonksiyonları	5
Çizelge 3.1 Zemin uygulamalarında geogrid malzemelerin kullanım amaçları	28
Çizelge 3.2 BS 8006:2010 yönetmeliğine göre kısmi güvenlik katsayıları	32
Çizelge 4.1 Balast malzemesi gradasyon sınır değerleri	63
Çizelge 4.2 Balast profili dizayn değerleri	64
Çizelge 4.3 Rayların profillerine göre sınıflandırılması	69
Çizelge 4.4 Rayların çelik kalitelerine göre sınıflandırılması	70
Çizelge 4.5 Demiryolunda uygulanan dingil yükleri	73
Çizelge 5.1 Modellemede kullanılacak malzemelere ait mekanik özellikler	86
Çizelge 5.2 Modellemede kullanılacak geogrid malzeme bilgileri	88
Çizelge 5.3 Modellemede kullanılacak olan dingil yükleri	88
Çizelge 5.4 Model kombinasyon detayları	89
Çizelge 6.1 Maliyet analiz tablosu	129

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Gosentetik ürün ile koruma fonksiyonunun uygulanması	6
Resim 2.2 Geosentetik ürün (geogrid) ile güçlendirme fonksiyonunun uygulanması.....	7
Resim 2.3 Ayırma fonksiyonunun kullanılmadığı tabakaların zaman içinde davranışı ..	8
Resim 2.4 Geosentetik ürün ile ayırma fonksiyonunun uygulanması.....	8
Resim 2.5 Drenaj amacıyla kullanılan bir geodrenaj malzeme.....	9
Resim 2.6 Yeraltı tünel yapısında geomembran uygulama örnekleri	10
Resim 2.7 Filtrasyon fonksiyonu uygulaması.....	11
Resim 2.8 Örgülü geotekstil örnekleri: sırası ile tek lifli, çok lifli ve şerit tip geotekstil malzeme	13
Resim 2.9 Örgüsüz geotekstil	14
Resim 2.10 Geomembran hava basınç testi uygulaması.....	15
Resim 2.11 Üretim şekline göre geomembran çeşitleri: sırası ile düz, kaburgalı ve kenetli geomembran	17
Resim 2.12 Geonet ürün örnekleri	18
Resim 2.13 Geocell uygulaması.....	19
Resim 2.14 Geocell genel görünüşü ve gelen yüklerin komşu hücrelere aktarılması ...	19
Resim 2.15 Geokompozit ürün (geotekstil-geonet-geotekstil)	20
Resim 3.1 Geogrid – zemin kenetlenmesi.....	21
Resim 3.2 Çift eksenli ekstrüde yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği.....	23
Resim 3.3 Tek eksenli ekstrüde yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği.....	23
Resim 3.4 Yapıştırma yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği	24
Resim 3.5 Dokuma yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği	24
Resim 3.6 Üç eksenli geogrid ve agrega kenetlenmesi örneği.....	26
Resim 3.7 Üç eksenli geogridin 3 eksenli ve 360 derecelik yük dağıtımı	26
Resim 3.8 Kanada’da zemin iyileştirme amacıyla geogrid uygulamasının ara dolgu gerekmeden uygulanması örneği	31
Resim 3.9 Temel kabarması ve yanal kaymaya karşı gerekli donatı boyu	37
Resim 3.10 Kabarma tahkiki.....	38
Resim 3.11 Şevlerde kademeli olarak tabakalar halinde bitkilendirilmiş geogrid uygulaması	39

Resim 3.12 Tayvan Taichung şehri Chung-Hsin kasabası geogridli şev uygulaması ...	40
Resim 3.13 Demiryolu balast ile ince malzeme karışımı sonrası taşıma gücünün azalması sorunları ile karşılaşılan bir örnek	44
Resim 3.14 Demiryolu altbalast tabakasında geogrid ve geotekstil ürünün birlikte kullanımı (Bratislava – Slovakya).....	46
Resim 3.15 Polatlı – Afyon YHT projesi geogrid uygulama görselleri.....	46
Resim 3.16 Yenileme çalışmalarının yapıldığı örnek bir güzergâh	47
Resim 3.17 Hochstadt ve Probstzella arası demiryolu hattı güçlendirme çalışması.....	50
Resim 3.18 British Rail Research tarafından yapılan araştırmaya ait test düzeneği.....	59
Resim 3.19 Nottingham Üniversitesi Rail Test simüle edilen tren yükü düzeneği	60
Resim 4.1 Oluklu granit yollar.....	61
Resim 4.2 Fransa Alsace madenleri ve İngiltere ahşap yolda kullanılan vagonlar.....	62
Resim 4.3 Ahşap travers	65
Resim 4.4 Çelik travers	66
Resim 4.5 Mono blok beton travers	67
Resim 4.6 Plastik travers.....	68
Resim 4.7 Rayı raya bağlayan cebire bağlantı elemanı ve ray kaynağı örneği.....	71
Resim 4.8 Rayı traverse bağlayan “HM” tipi bağlantı.....	71
Resim 4.9 Pandrol ve nabla tipi rayı traverse bağlayan bağlantı sistemleri	72
Resim 4.10 Ray aşınması (ondülasyon) örnekleri.....	76
Resim 4.11 Dresaj arızası.....	83
Resim 4.12 Flambaj arızası.....	84
Resim 4.13 Dirsek arızası	84

1. GİRİŞ

Demiryolu ulaştırma sistemi; sağlıklı bir ekonominin sürdürölmesinde önemli bir rol oynamakla beraber, bir ülkenin ulaşım altyapısının ayrılmaz bir parçasını oluşturur. Bu nedenle sürekli olarak dünya genelinde birçok yeni demiryolu projeleri planlanmakta ve inşa edilmektedir. Demiryolu hattının ömrü üstyapıyı oluşturan tabakaların kalınlığı, kullanılan malzemelerin özellikleri, çevresel ve iklimsel faktörler gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Hattın ömrünü ve mukavemetini arttırmak için taban zemininden başlayarak demiryolu hattını oluşturan tabakaları güçlendirmek çok önemlidir.

Bir demiryolu hattını güçlendirmek için geosentetik malzemelerin kullanılması; dünyada hızla azalan doğal kaynaklara karşı alternatif oluşturmak ve bu tür malzemelerin daha az miktarını içeren tasarım yöntemlerini geliştirmek, zayıf taban zeminine sahip hat kesimlerini güçlendirmek ve yapının dayanımını arttırmak için umut vaat eden yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Geosentetikler 1970'li yıllardan günümüze geoteknik problemlerin çözümünde yardımcı bir eleman olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geosentetik malzemeler; koruma, zemin güçlendirme, ayırma, drenaj, yalıtım, filtrasyon, asfalt ve beton donatısı, erozyon kontrolü amaçlı kullanılmaktadır. Bir üstyapı sisteminde kullanılan geogridler ise geosentetiklerin iki temel işlevi olan ayırma ve güçlendirme fonksiyonlarını yerine getirmektedir. Geogridlerin temel işlevi üstyapı sisteminin mühendislik özelliklerini mekanik olarak iyileştirmek ve güçlendirmek olup ayırma işlevi ikincil bir görev olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan literatür araştırmasına göre bir üstyapı sisteminde geogridlerden beklenen; zayıf zeminlerde yardımcı görev üstlenerek zemini güçlendirmek, üstyapının öngörölen hizmet ömrünü iyileştirmek ve uzatmak, belirli bir hizmet ömrü için yapısal kesitin yani tabaka kalınlıklarının azaltılmasında rol almak olmalıdır.

Bu tez çalışmasında; ülkemiz standartlarına uygun olarak tasarlanan bir demiryolu üstyapı dizaynı için, altbalast tabakası ile taban zemini arasına yerleştirilen tek sıra geogrid malzemenin yapıya olan etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek çözümlenmiştir. Gerekli mukayeselerin yapılabilmesi için oluşturulan tasarımda farklı

dingil yükleri uygulanmış, farklı altbalast tabaka kalınlığı seçilmiş, geogrid için farklı mekanik özellikler belirlenmiş ve farklı özelliklere sahip taban zemini tercih edilmiştir. Geogrid malzemesi kullanılarak ve geogrid malzemesi kullanılmadan ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla 96 adet analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maliyet analizi de yapılmıştır.

Yapılan analizler neticesine yüksek elastisite modülüne sahip geogrid malzeme kullanımının taban zeminine tesir eden gerilme ve deformasyonları azalttığı, altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasında etkili olduğu ve bu sayede de altbalast tabakasını oluşturan granüler malzemeye olan ihtiyacı azaltacağı sonuçlarına ulaşılmıştır. Geogrid malzemesinin uygulama kolaylığı sayesinde inşaat yapım sürelerinde meydana gelen kısalma, yapı hizmet ömrünün uzaması ve bakım sıklıkları ile bakım maliyetlerinin azalması dolaylı faydaları olarak karşımıza çıkmaktadır.

2. GEOSENTETİKLER

Günümüzde teknoloji; mühendislik ve inşaat alanlarında da diğer alanlarda olduğu gibi gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Bu gelişmelerin mühendislik uygulamalarına olumlu yansımaları her geçen gün kendisini göstermekte; yenilikçi malzemelerin üretim ve kullanım alanlarının genişlemesi konusunda artışa yol açmaktadır. Bir yol altyapısının kilometrelerce uzunluğa ulaşması zaman zaman malzeme sıkıntılarına da yol açmaktadır. İşte bu malzeme problemlerini en aza indirgeyebilmek, dolgu malzemesi kullanımını azaltmak için teknolojinin faydalarından yararlanma ihtiyacı doğmuştur.

ASTM (American Society for Testing and Materials), geosentetiği “bir inşaat projesi, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan, polimerik malzemelerden üretilen düzlemsel ürünlerdir” olarak tanımlamaktadır (Yılmaz ve Eskişar 2007).

Geosentetikler sahip oldukları özelliklere göre farklı amaçlar için farklı kullanım alanlarına sahiptir. Bu malzemeler 1970’lerden günümüze yumuşak zeminlerin ve stabilize yolların performansını arttırmak amacıyla 5-6 farklı geosentetik ürün seçeneği ile kullanılmaya başlanmış, 1980’lerden sonra ise asfalt kaplamalarda yansıma çatlaklarını en aza indirmek ve altyapıyı oluşturan katmanların performansını iyileştirmek amacıyla tercih edilmiştir. Günümüzde ise 600 adetten fazla geosentetik ürün seçeneği piyasada mevcuttur (Maccaferri SpA 2016, Zornberg 2017, Holtz 2009).

Geosentetiklerin inşaat sektöründe kullanım amacı genel anlamda ve ağırlıklı olarak;

- Mevcut zemini güçlendirerek yaşanacak oturmaları en aza indirmek,
- Uygulanan alanda taşıma kapasitesini arttırmak,
- Demiryolu, karayolu gibi maliyeti yüksek yolların ekonomik ömrünü uzatmak,
- Dolgu zeminlerini güçlendirmek,
- Çevre kirliliğine yol açan sızıntı sularını engellemek,
- Erozyonu engellemek vb. gibi sayısız uygulamalarda kullanılabilir.

Ayrıca yapılan çalışmaya uygun olarak geosentetiklerin demiryollarında sağladığı faydalar ise;

- Taşıma gücünün artırılması,
- Boşluk suyu basıncının sönümlenmesi,
- Oturmaların daha kısa sürede sönümlenmesinin sağlanması,
- Yapım sürelerinin azaltılması,
- Granüler dolgu malzeme ihtiyacının azaltılması,
- Yapı ömrünün daha uzun olmasının sağlanması,
- Taşıma gücünü etkileyecek ve tabakalara zarar verebilecek kirlenmelerin azaltılması,
- Dona karşı dayanımın gözle görülür bir şekilde artırılması şeklinde sıralamak mümkündür (Yılmaz ve Eskişar 2007).

Geosentetik ürünler, üretim tiplerine göre örgülü, örgüsüz, ısıtılma işlemi ile üretilmiş, dokuma, yapıştırma ve iğneleme ile üretilmiş şekilde farklılıklar gösterebilirler. En sık tercih edilen geosentetikler ise; geogrid, geotekstil, geomembran, geonet, geokompozit ve geohücre vb. tipleridir. Ağırlıklı olarak kullanılan geosentetik ürün yelpazesi Tablo 2.1’de görülmektedir.

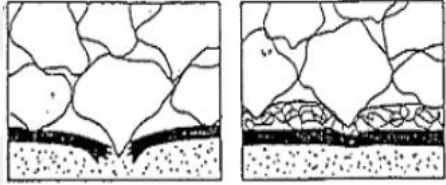
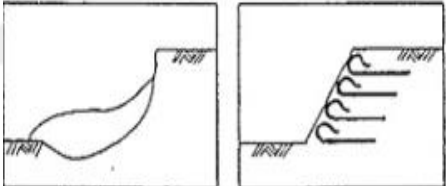
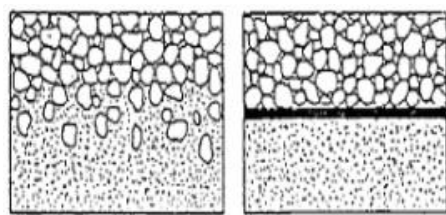
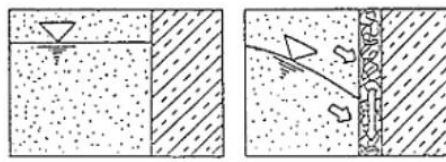
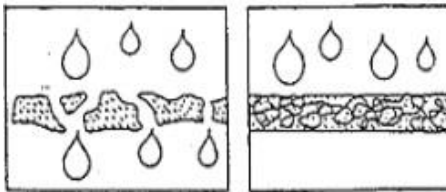
Çizelge 2.1 Geosentetik çeşitleri (Karagül 2007).

Geogrid	Ekstürüde Geogrid Dokuma Geogrid Yapıştırma Geogrid
Geotekstil	Örgülü Örgüsüz
Geomembran	Sentetik (HDPE, PE, PVC, EPDM gibi)
Geonet	
Geokompozit	
Geohücre	
Geomat	

2.1 Geosentetiklerin Kullanım Alanları ve Fonksiyonları

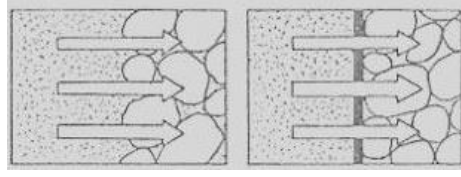
Geosentetikler; karayolu ulaştırma yapıları, demiryolları, tüneller, havaalanları, barajlar, binalar, çökeltme ve havalandırma havuzları, su rezervuarları, yapay göletler, zehirli atık ve sanayi atıkları depolama sahaları, atık su arıtma tesisleri, çöp ve katı atık depolama sahaları, petrol sahaları, kanal ve nehirler, kıyı ve liman yapıları, set inşaatları, spor sahaları, park alanları, hidrolik santraller, endüstriyel yapılar gibi mühendislik yapılarında kullanılmaktadır (Kocaer 2011).

Çizelge 2.2 Geosentetiklerin fonksiyonları (İnt. Kyn. 2).

Fonksiyon	Geosentetik Çeşitleri	
Koruma		Örgüsüz geotekstil, Geokompozit, Geonet
Güçlendirme		Geogrid Geotekstil, Geocell
Ayırma		Geokompozit, Geotekstil
Drenaj		Geonet, Geokompozit
Yalıtım		Geomembran

Çizelge 2.2 (Devam) Geosentetiklerin fonksiyonları.

Filtrasyon



Geotekstil

2.1.1 Koruma Fonksiyonu

Geotekstil ürünlerin kullanımı ile gerilmeler azaltılarak, oluşan gerilmelerin yayılımı sağlanarak ve oluşacak deformasyonlar en aza indirgenerek; muhafaza edilmesi istenen malzeme ya da ürüne gelebilecek zararın önlenmesi sağlanır.

Atık depolama ve sıvı muhafaza sistemlerinde geomembran delinmelerinin önüne geçebilmek, koruma sağlamak amacıyla geotekstil kullanımı ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. Geriye dönük uygulamalar incelendiğinde; koruma amacıyla kullanılan geotekstil ürünlerin, geomembranın zarar görmesine karşı tampon görevi gördüğü, delinmesine ve oluşabilecek diğer hasarlara karşı önemli bir rol aldığı görülmektedir. Zeminde mevcut keskin kenarlı kaya malzemelerin geomembrana zarar vermesi istenmiyor ise; geomembran ile zemin arasında ya da atık depolama tesislerinde drenaj malzemesi ve atık malzeme ile oluşacak yükün zarar vermesi istenmiyor ise geomembran üstüne uygulanması koruma fonksiyonunu ön plana çıkarmaktadır.

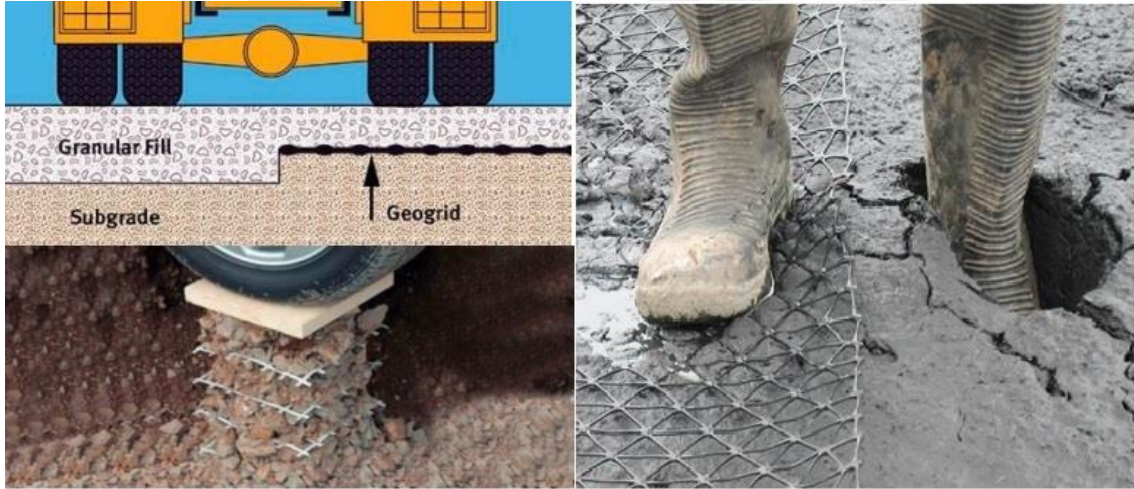


Resim 2.1 Geosentetik ürün ile koruma fonksiyonunun uygulaması (İnt. Kyn. 1).

2.1.2 Güçlendirme Fonksiyonu

Geosentetikler zemin güçlendirmesi için uygun ürünlerdir. Geogridler, örgülü ve örgüsüz geotekstilller, geoceller güçlendirme amacıyla kullanılan geosentetik ürünlere birer örnektir. Zeminlerin aksine, geotekstillerin çekme direnci yüksektir. Çekme direnci ve oluşacak deformasyonlara karşı kullanılan geosentetik ürün ile zeminin mekanik özellikleri iyileştirilerek, zeminin güçlendirilmesi sağlanmaktadır. Geosentetik ürünün zeminlerde uygulanması neticesinde; geosentetik ürün zemin ile sürtünme, kenetlenme, yapışma veya hapsetme yoluyla gerilmiş bir eleman gibi davranır, bu sayede de stabiliteyi koruması şeklinde çalışma prensibini açıklamak mümkün olur.

Güçlendirme sayesinde zayıf zeminlerde, önemli derecede agrega tasarrufu sağlanmakta, yapım maliyetleri açısından bakıldığında daha tasarruflu olmakta ve karbon salınımı azaltılarak daha çevreci yapılar oluşturulmaktadır.

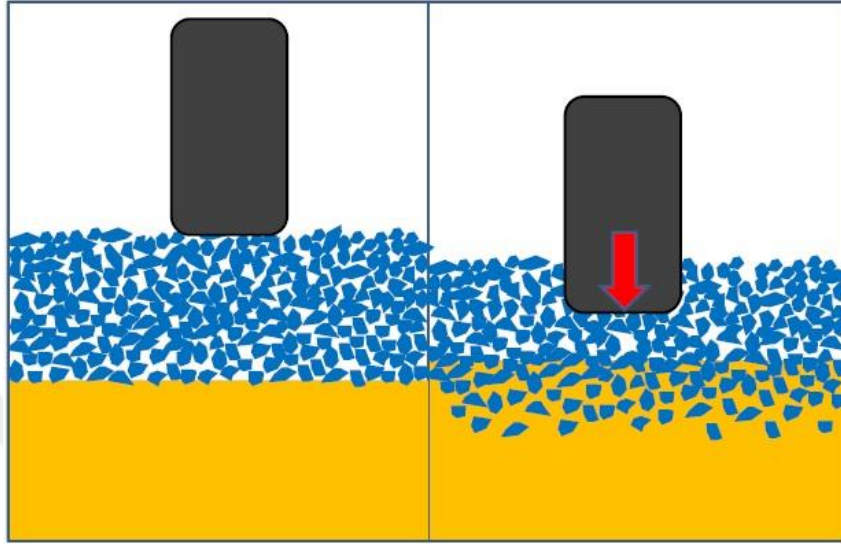


Resim 2.2 Geosentetik ürün (geogrid) ile güçlendirme fonksiyonunun uygulaması (İnt. Kyn. 3).

2.1.3 Ayırma Fonksiyonu

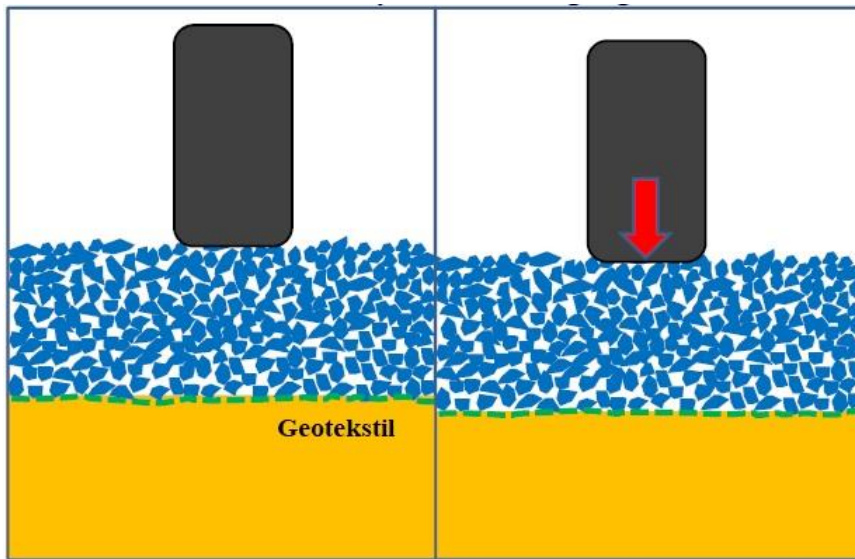
Trafik yüklerine maruz kalan temel katmanları için temel katmanının kalınlığı, temelin taşıma kapasitesine göre boyutlandırılmaktadır. Toprak dolgu, alt temel ve temel malzemesinin özelliklerine göre değişkenlik göstermekle birlikte; zemine etkiyen statik ve dinamik yükler zamanla iki farklı özellik ve tane büyüklüğüne sahip temel

tabakalarının birbiri ile karışmasıyla sonuçlanmaktadır (Resim 2.3). Tekrar eden trafik yüklerinin sonucunda ise gelen yükler daha geniş bir alana dağıtılamaz hale gelmektedir (Zanzinger 2019).



Resim 2.3 Ayrırma fonksiyonunun kullanılmadığı tabakaların zaman içinde davranışı (Zanzinger 2019).

Geosentetik ürün, ince daneli zemin ile kaba daneli zemin ara yüzüne yerleştirildiğinde ayırma fonksiyonu devreye girmektedir. Bu sayede oluşacak malzeme karışımının önüne geçilmiş olur ve karışımın neticesinde zeminin gevşemesi önlenmiş olur. Toprak dolgu ne kadar yumuşaksa ayırma fonksiyonundan beklenen sonuç bir o kadar etkili olmaktadır.



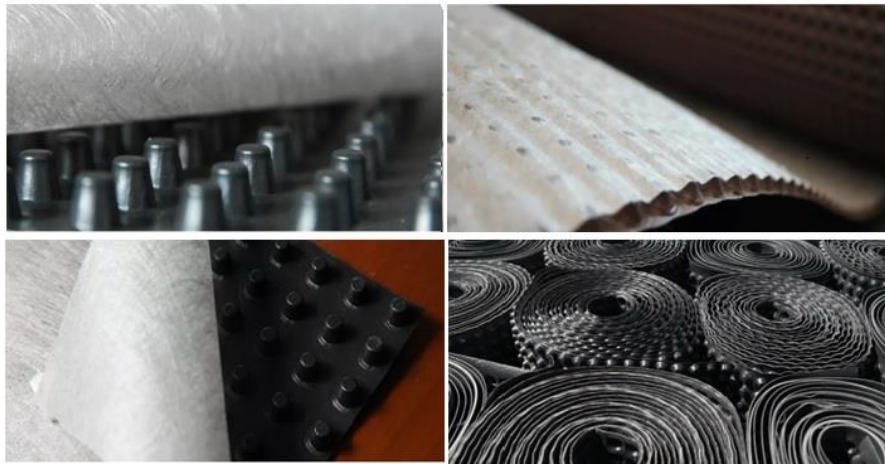
Resim 2.4 Geosentetik ürün ile ayırma fonksiyonunun uygulaması (Zanzinger 2019).

Geotekstiller, süreklilik, esneklik, deforme olabilme, permeabilite ve yüksek çekme dayanımı özelliklerinin sonucu olarak suyun doğal sirkülasyonuna engel olmadan değişik geoteknik özelliklere sahip iki zemini birbirinden ayırır. Bu da ayırma fonksiyonunun yanında ikincil bir etki olarak; inşa edilen yolların servis ömrünün ve taşıma kapasitesinin artması ile sonuçlanmaktadır. Yol yapım aşamasında tabakaların birbiri ile karışmasının engellenmesiyle daha az granüler malzeme kullanılarak, zeminlerin daha çabuk ve daha kaliteli sıkıştırıldığı da görülmektedir (Yılmaz ve Eskişar 2007, Ay 2014).

2.1.4 Drenaj Fonksiyonu

Zemin içerisinde aşırı miktarda bulunan ve/veya kontrol edilemeyen su, zemini zayıflatarak çeşitli sorunlara yol açabilir. İstinat duvarları ve inşaat yapılarının arkasındaki, otoyolların ve demiryollarının altındaki, tünellerin içindeki veya şevler içerisindeki suyun drenajı, yapının uzun vadeli performansına etki etmede en önemli unsurlardan bir tanesidir (Maccaferri SpA 2016).

Geosentetik ürünler kendi yapı düzlemleri içerisinde sıvıları ileterek, dren fonksiyonu sağlarlar. Drenaj amacı ile genellikle kullanılan ürünler; geokompozitler, geonetler, geotekstiller ve son dönemde kullanılmaya başlanılan geodrenajlardır. Drenaj amacı ile kullanılacak olan geotekstiller, iletimi sağlanacak olan sıvı ya da gazı öncelikle malzemenin kendi bünyesinde toplar ve sistemden uzaklaştırılmak amacıyla istenen çıkışa doğru kendi düzlemi boyunca taşımaktadırlar.



Resim 2.5 Drenaj amacıyla kullanılan bir geodrenaj malzeme (İnt. Kyn. 5).

Geotekstiller zemine göre daha geçirgendirler. Özellikle gözenekli olduklarında ve yeterli eğim sağlandığında, kendi düzlemlerinde su akımı sağlanabilir. Drenaj amacı ile kullanılacak olan malzemeler, kendi düzleminde yüksek geçirgenlik, basınca karşı yüksek dayanım ve iyi filtreleme özelliklerine sahip olmalıdır (Ay 2014).

2.1.5 Yalıtım Fonksiyonu

Geotekstil malzeme, bitüm veya plastik yalıtım malzemesi ile doygun hale getirilerek geçirimsiz bir tabaka oluşturmak için kullanılır. Bu şekilde geotekstil ürünün geomembran görevi görecektir yapıya kavuşması sağlanır. Geotekstil malzemeler yalıtım fonksiyonu ile özellikle kaplaması yenilenecek karayollarında eski yol kaplamasının üzerine serilerek kullanılmaktadır. Bunun dışında tünel gibi yer altı yapılarında da geomembran malzeme kullanımı ile sıklıkla karşılaşılmaktadır (Ay 2014).

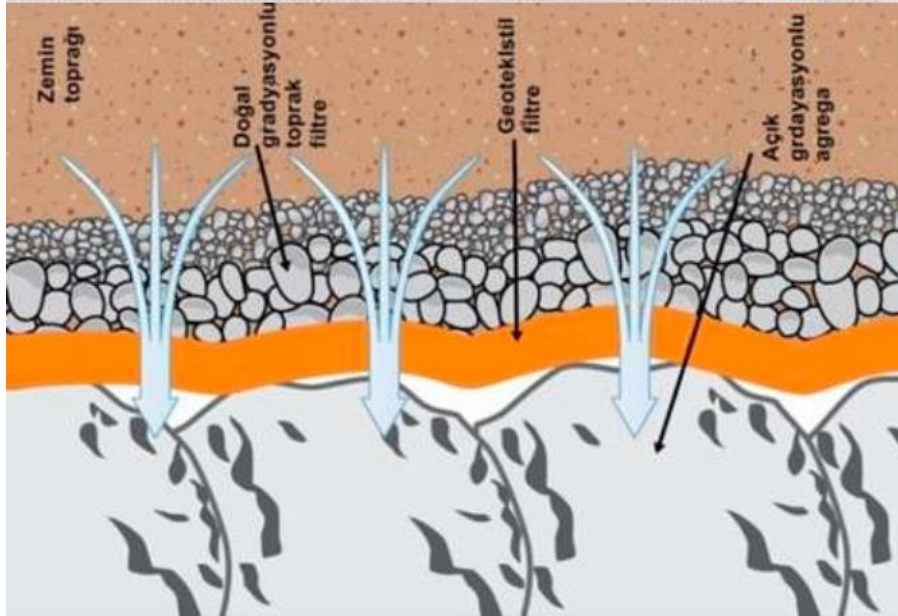


Resim 2.6 Yeraltı tünel yapısında geomembran uygulama örnekleri.

Yer altı yapılarında geomembran ile su yalıtımının yapılmasındaki amaç; yer altı sularının tünel içerisine sızmasını önlemek ve nihai beton kaplamasını zararlı olabilecek kimyasal madde etkilerine karşı korumaktır. Yalıtım fonksiyonu membran tarafından sağlanan yer altı yapılarında keçe kullanımı da şartnamelerde belirtilmektedir. Keçe tabakası kullanımıyla ise; geomembran ürünün püskürtme beton yüzeyi ile teması halinde hasar görmesinin önlenmesi, püskürtme beton ile nihai beton arasında oluşabilecek farklı hareketler neticesinde kilitlenmenin önlenmesi, bir drenaj tabakasının oluşması sağlanarak yer altı suyunun boyuna yan drenaj borularına tahliyesinin sağlanması hedeflenmektedir. Böylece tünel kaplama tabakasının arkasında oluşabilecek hidrostatik basınç ve etkilerinin önüne geçilmektedir.

2.1.6 Filtrasyon Fonksiyonu

Bir geosentetik ürünün filtrasyon görevini yerine getirmesi ve doğal kum granüler malzemenin yerine kullanılabilmesi için sahip olması gereken en önemli özellik zemine karşı geçirimsiz suya karşı geçirimli olmasıdır.



Resim 2.7 Filtrasyon fonksiyonu uygulaması (İnt. Kyn. 4).

Seçilen geosentetik malzemenin; su akışı esnasında zemin danelerinin de beraberinde taşınmasına izin vermeyecek şekilde boşluklarının az olması; yine bu geosentetik

malzemenin serbest su akışına izin verebilmesi için de maksimum geçirgenliğe sahip olması gereklidir. Yüksek poroziteye (gözeneklilik) sahip olması ve minimum kalınlıkta olması geosentetik malzemedan filtreleme özelliği için istenen ilave önemli ölçütlerdir. Filtrasyon için kullanılacak olan geosentetik malzemenin sahip olması gereken kriterler, sahada geosentetik malzeme ile kullanılan granüler doğal kum malzeme kriterlerine göre değişiklik göstereceği bilinmelidir.

Geotekstil malzemenin filtrasyon amacıyla kullanıldığı ilk baraj Fransa’ da 1970 yılında yapımı tamamlanan Valcros barajıdır. Valcros barajında uygulanan geotekstil üründen 6. ve 22. yıllar sonunda alınan numunelere bazı testler uygulanmış; hidrolik geçirgenlik testi sonuçlarının neredeyse birbiri ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Yine çekme dayanımı testlerinin sonuçları da benzer neticeler vermiştir. Geotekstil malzemenin filtrasyon amacıyla kullanıldığı diğer baraj örnekleri ise; 1980 yılında yapımı tamamlanan Güney Afrika’ da ki Mogol Barajı, 2001 yılında yapımı tamamlanan Fransa’ da ki Montaubry Barajı ve Nijerya’ da ki Samira Barajı, son olarak 2003 yılında yapımı tamamlanan Cezayir’ de ki Sidi Ben Taiba Barajıdır (Gül ve Huvaj 2019).

2.2 Geosentetiklerin Çeşitleri

2.2.1 Geotekstil

Geotekstiller, örgülü ve örgüsüz olmak üzere iki farklı tipte incelenmekte olup geçirgen tekstil tipi ürünlerdir. Genellikle polyester, polietilen, polipropolin, poliamid ve polivinil klorid hammaddelerinden üretilmektedir. Geotekstil ürünlerin kullanım amacı ve ana görevi; ilk olarak tabaka ve zemini ayırma olup; gerilmelerin ve şekil bozukluğunun önüne geçerek, tabakaların yapı ömrünü uzatmak ve taşıma kapasitesini arttırmaktır (Sağlam 2009).

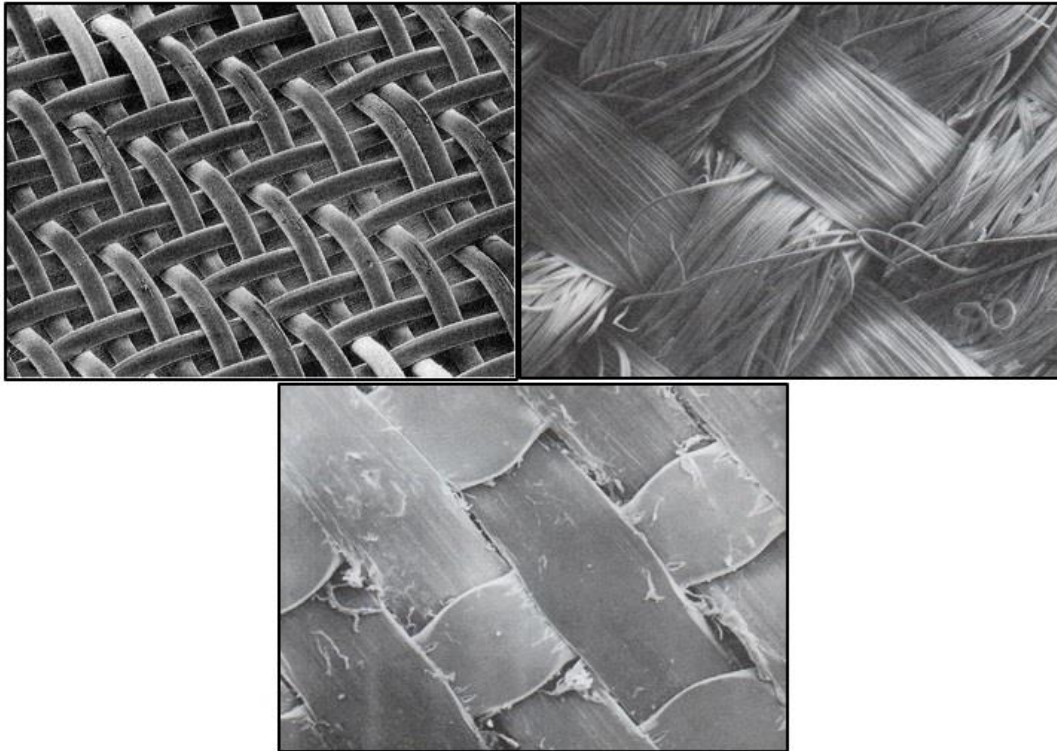
Geotekstiller, bazı önemli ray destek problemlerinin düzeltilmesi amacıyla 1970’li yıllarda Kuzey Amerika demiryolu hatlarında kullanılmıştır. Bu yıllarda demiryolu hatlarında kullanılan geotekstil ürünler, kanıtlanmamış uygulamalara dayanarak rastgele seçimler ile kullanılmaktayken; 1980’ li yıllarda Kanada Ulusal Demiryolu’ nun da içinde olduğu araştırmalar ile deneyimler kazanılmış ve kılavuzlar geliştirilmiştir. 1981 yılından

başlayarak Kanada Ulusal Demiryolunun Denizcilik Bölgesi'nde bu önerilere dayalı olarak çok sayıda kurulum yapılmıştır (Raymond 1999).

2.2.1.1 Örgülü Geotekstil

Örgülü geotekstil ürünler, iki veya daha fazla iplik dizisinin düzgün açılarla, geleneksel dokuma yöntemleri kullanılarak birleştirilmesi sonucunda elde edilirler. Örgülü geotekstil ürünler yüksek çekme dayanımına sahiptirler.

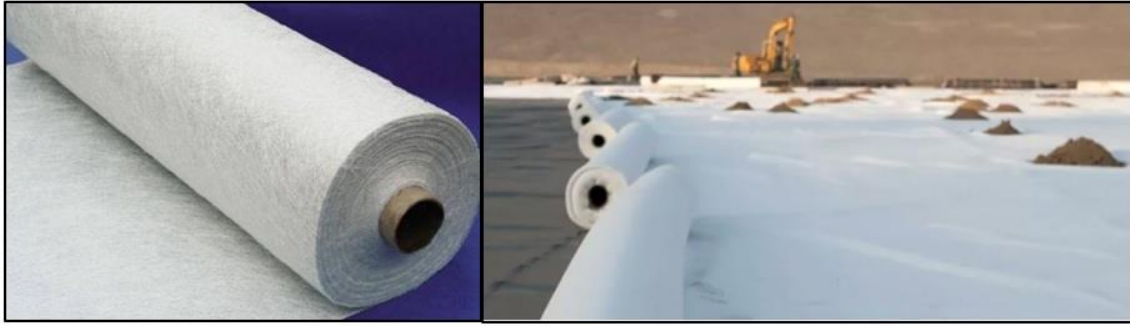
Örgülü geotekstil ürünler üç çeşit olarak sayılabilirler. Örgünün her yönde tek bir iplik kullanılması sonucu oluşturulan geotekstil ürün tek lifli (monofilament) örgülü geotekstil adını almaktadır. Örgü her yönde iplik dizileri kullanılarak oluşturuluyorsa bu kez çok lifli (multifilament) örgülü geotekstil adını almaktadır. Bu iki örgülü geotekstil ürün dışında şerit halinde bulunan malzemenin örülmesi neticesinde oluşan şerit tip örgülü geotekstiller de mevcuttur. Bu geotekstil ürünün gözenek oranı azdır ve buna bağlı olarak düşük geçirimsiliğe sahiptir (Sağlam 2009).



Resim 2.8 Örgülü geotekstil örnekleri: sırası ile tek Lifli, çok Lifli ve şerit tip geotekstil malzeme (Sağlam 2009).

2.2.1.2 Örgüsüz Geotekstil

Örgüsüz geotekstil ürünler, polimer ipliklerin rastgele doğrultuda farklı birleşim yöntemlerinin kullanılması sonucunda elde edilmekte olup keçeye benzetilmektedir. Örgüsüz geotekstiller mekanik (iğneleme), fiziksel (ısı) ve kimyasal yollarla imal edilmektedir. Çekme dayanımı örgülü geotekstil ürünlere göre daha düşük olduğundan daha çok filtrasyon ve ayırma fonksiyonlarına karşılık gelen alanlarda tercih edilmektedir. Filtrasyon fonksiyonunun tercih edildiği çalışma alanı genellikle erozyon kontrolü olurken; ayırma fonksiyonunun tercih edildiği çalışma alanları ise drenaj, yol inşaatları ve zayıf zeminler olarak sıralanabilir. Bunların dışında bitümle emdirilerek izolasyon işlerinde de kullanıldığı görülmektedir. Piyasada genel olarak; mekanik yöntemlerle elde edilen örgüsüz geotekstil tercih edilmektedir (Dağdeviren 2015).



Resim 2.9 Örgüsüz geotekstil (İnt. Kyn. 6).

2.2.2 Geomembran

Yapıların daha uzun ömürlü, sağlıklı, konforlu ve güvenli bir ortam sağlayabilmesi için iç ve dış etkenlere karşı korunaklı olması gerekir. Bu nedenle yapı için gerekli en önemli unsurlardan bir tanesi yalıttır. Yapılarda su yalıtımı; suyun yönü ve şiddeti fark etmeksizin yapıya zarar vermeyecek şekilde teknik özellikleri uygun geomembran ürün ile sağlanmalıdır (Şerefoğlu 2012).

ASTM (American Society for Testing and Materials), geomembranı “geoteknik mühendisliği ile ilgili insan yapısı bir proje, yapı ve sistemde sıvı akışını kontrol altına alabilecek kadar düşük geçirgenliğe sahip asfalt, polimer ve bunların karışımından

meydana gelen membran tipi kaplama ve izolasyon bariyer malzemelerdir” şeklinde tanımlamaktadır (Kocaer 2011).

Geomembran ürünler geçirimsiz özelliğe sahip olduklarından genellikle su ve hava izolasyonu ile su buhar bariyeri amacıyla kullanılırlar. Yine depolama sahalarında da sıklıkla tercih edilmektedir. Geomembranların esnek oluşu farklı oturmalar ve yer değiştirmeler neticesinde fonksiyonlarını kaybetmemesini sağlamaktadır.

Geomembran uygulamasında birleşim ek yerlerinin kaynağı robotlar vasıtasıyla yapılmaktadır. Kaynaklar, çift kaynak şeklinde uygulanmakta olup oluşan deney kanalı adı verilen boşluğa basınçlı hava pompalanarak malzemenin geçirimsizliği teste tabi tutulur. Yapılan testlerde; 2 bar/5 dakika veya 1,5 bar/10 dakika içerisinde en fazla %20 hava basıncı kaybı gözlenmesi istenmektedir. Resim 2.10’ da teste tabi tutulan bir geomembran malzeme örneği mevcuttur.



Resim 2.10 Geomembran hava basınç testi uygulaması.

Geomembran çeşitleri

Geomembran ürünler; üretimi için kullanılan malzemenin cinsine ve üretim şekline göre malzeme özellikleri ve kullanım alanları farklılık göstermektedir. Piyasada malzeme

cinsine göre en çok karşımıza çıkan geomembran çeşitleri; PVC, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) geomembranlardır. Üretim şekline göre ise; düz, kaburgalı (tırnaklı) ve kenetli geomembran gibi farklı türleri mevcuttur.

2.2.2.1 Malzeme Cinsine Göre Geomembran

PVC (Polivinil klorür) Geomembran

Bu geomembran türü düşük yoğunluğa sahip olmakla birlikte daha yumuşak bir geomembran türü olduğundan saha çalışmalarında uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Ekonomik olması da avantaj olarak söylenebilir. Dezavantajı ise dayanıklılığının diğer geomembran türlerine göre daha düşük olması söylenebilir.

LDPE Geomembran

Düşük yoğunluklu polietilen anlamına gelen LDPE Geomembran; PVC Geomembran kadar yumuşak olmamakla birlikte, HDPE Geomembrana göre daha yumuşak bir geomembran türüdür. Tercih edilme sebeplerinden biri yüksek mukavemetli olmasıdır (Sağlam 2009).

HDPE Geomembran

Yüksek yoğunluklu polietilen anlamına gelen HDPE Geomembran ise; yüksek malzeme özelliğine sahiptir. Basınç, yük, darbe ve kimyasallara karşı dayanıklı bir geomembran türüdür. Dezavantajı ise; sert malzeme olması sebebiyle uygulama ve işleme zorlukları ile karşılaşılmasıdır (Sağlam 2009).

2.2.2.2 Üretim Şekline Göre Geomembran

Düz Geomembran

PVC, LDPE ve HDPE Geomembran çeşitlerinin her biri ile üretilen bu geomembran

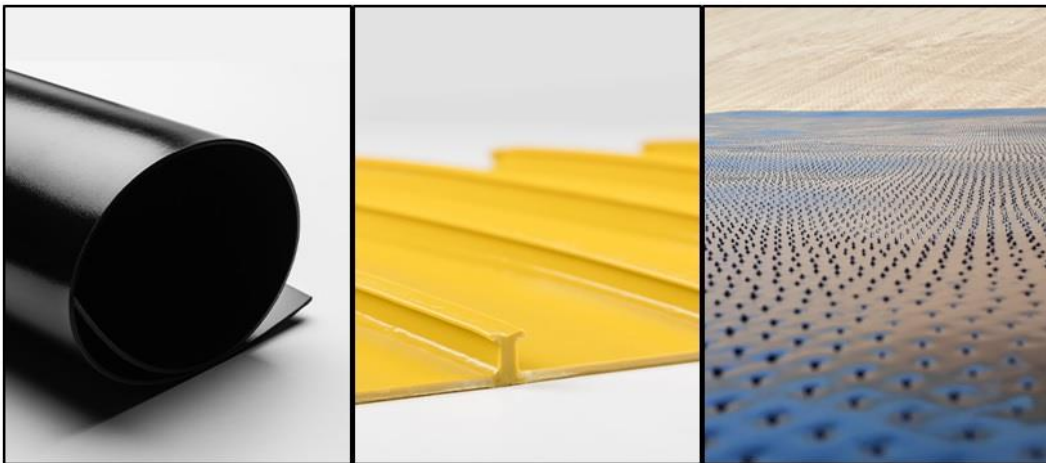
genellikle; atık depolama sahalarında ve yapı inşaatlarında tercih edilen, sıvı ve gaz geçişini engellemesi amacıyla bariyer olarak kullanılan geomembran türüdür.

Kaburgalı Geomembran

PVC, LDPE ve HDPE Geomembran çeşitlerinin her biri ile üretilebilen bu geomembran özel kalıplar kullanılarak üretilmektedir. Şaşırtmalı tırnaklı ve sürekli tırnaklı modelleri mevcuttur. Kalıp yardımı ile oluşturulan tırnaklar; beton dökümü öncesinde kalıp içerisine yerleştirilir ve döküm sonrası geomembranın betona tutunmasını sağlarlar. Yapı ile bütünlük içinde yalıtımı sağlayan bu geomembran; kanalizasyon kolektörleri, kanalizasyon boruları ve temel yalıtım projelerinde kullanılmaktadır (İnt. Kyn. 9).

Kenetli Geomembran

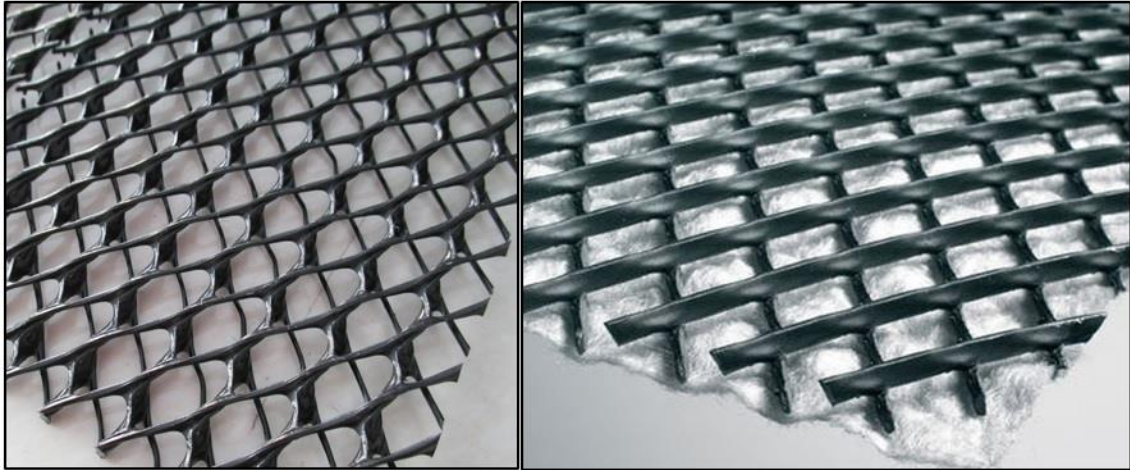
LDPE ve HDPE Geomembran çeşitlerinden üretilebilen bu geomembran tek ve çift taraflı pürüzlü şekilde üretilebilmektedir. Geomembran malzeme üzerinde sık aralıklarla girinti veya çıkıntı isteniyor ise düşük yoğunluğa sahip LDPE Geomembran; daha az sıklıkla girinti ve çıkıntı isteniyor ise yüksek yoğunluğa sahip HDPE Geomembran üretim esnasında tercih edilebilmektedir. Daha çok eğimli yüzeylerde üzerine serilecek malzemenin kaymasını engellemek amacıyla tercih edilmektedir (İnt. Kyn. 9).



Resim 2.11 Üretim şekline göre geomembran çeşitleri: sırası ile düz, kaburgalı ve kenetli geomembran (İnt. Kyn. 9).

2.2.3 Geonet

Geonet ürünler polietilenden üretilmektedir. Geonet şekil olarak geogridlere benzemekle birlikte; birbirine paralel kanallara sahip olması sebebiyle yüksek akış kapasitesine sahiptir. Bu nedenle daha çok drenaj sistemlerinin gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunun dışında geonet ürünlerin zemin ayırma amacıyla da tercih edildiği görülmektedir. Geonet ürünlerin drenaj amacıyla tercih edilmesinde, drenaj görevini üstlenen bir başka yapı elemanı olan beton drenaj kanallarına göre çok daha hafif olması ve saha uygulamasının çok daha kolay olması olarak gösterilebilir. Geonet ürünler; drenaj görevini yerine getirmesi sırasında gözeneklerin tıkanmaması amacıyla, filtrasyon görevi görecektir geotekstil, geomembran gibi geosentetik ürünler ile kompozit bir şekilde tercih edilmektedir.



Resim 2.12 Geonet ürün örnekleri (İnt. Kyn. 10).

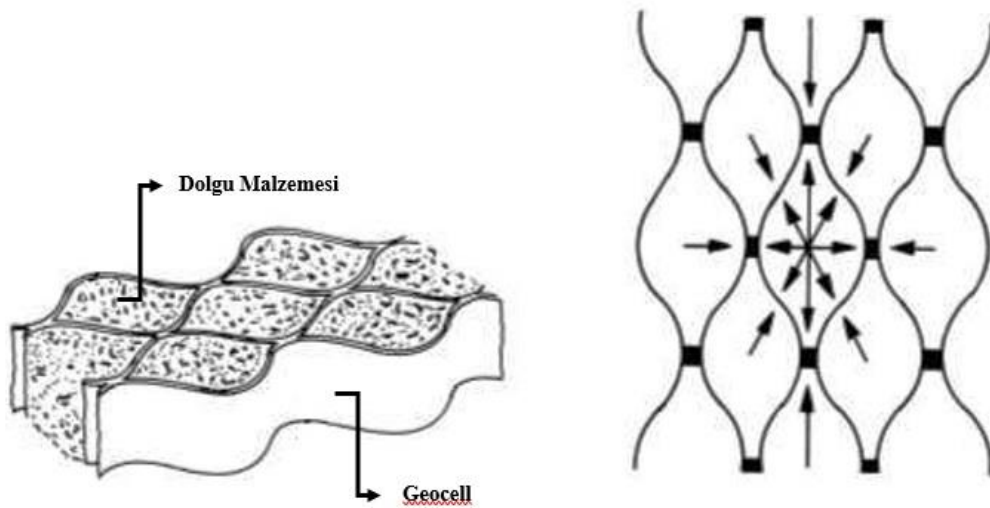
2.2.4 Geocell

Geocell (Geohücre) ürünler polimer levha şeritlerden imal edilmekte olup; dolgu toprak, hücre duvarları ve hücre geometrisi etkileşimi sonucu sınırlandırma sağlayan üç boyutlu hücresel geosentetik ürünlerdir (Tüfekçibaşı vd. 2019). Bazı durumlarda geocell hücre düşey derinliği 0,5 – 1 metreye kadar ulaşabilmektedir. Geocell ürünler genellikle şev, erozyon kontrolü, koruma ve yüzey stabilizasyonu ile kanal ya da zemin stabilizasyonda sınırlama amacıyla kullanılmaktadır (Kocaer 2011).



Resim 2.13 Geocell uygulaması (Zanzinger 2019).

Hücre içine doldurulan malzeme geocell içine hapsedilir, bu sayede zeminin yanal ve düşey yönlü hareketi sınırlandırılmaktadır. Geocell ürünlerin uygulandığı zeminlerde taşıma gücü ve oturma kapasitesinin, diğer geosentetik ürünlerin uygulandığı zeminlere göre daha iyi sonuçlar verdiği yapılan plaka yükleme ve üç eksenli basınç testleri neticesinde görülmüştür. Geocell uygulanmış zeminlerde; hücresel sistem üzerine gelen yoğun yükler oluşturulan hücreler sayesinde komşu hücelere aktarılır ve bu doğal zemine aktarılacak yüklerin azalmasına neden olur. Bu sayede de daha ince tabaka kalınlığının kullanılmasına olanak sağlanır (Tüfekçibaşı vd. 2019).

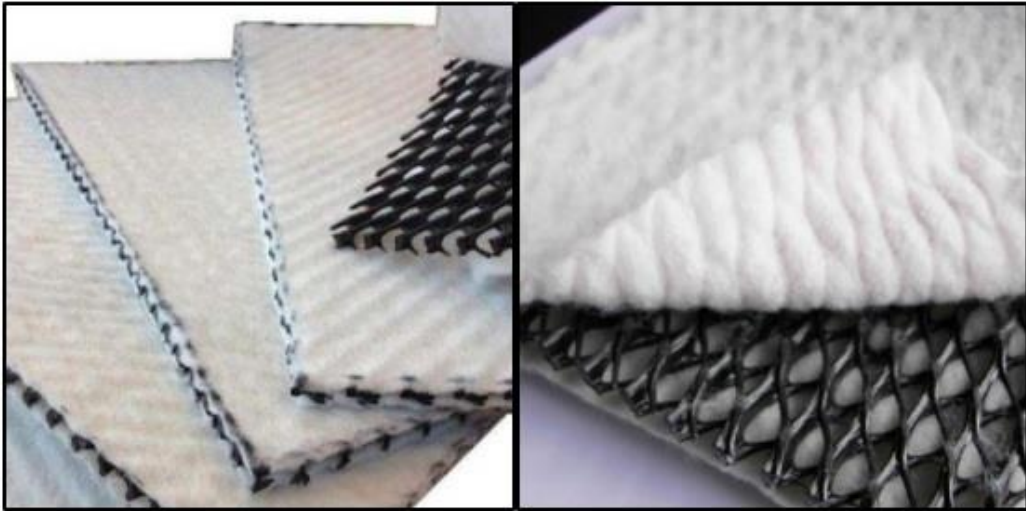


Resim 2.14 Geocell genel görünüşü ve gelen yüklerin komşu hücelere aktarılması (Tüfekçibaşı vd. 2019).

2.2.5 Geokompozit

Geokompozit ürünler, birden fazla geosentetik ürünün kombinasyonu sonucunda oluşturulan geosentetik türüdür. Geokompozit ürünlere; geotekstil-geonet, geotekstil-geomembran, geonet-geomembran, geotekstil-geogrid, geosentetik kil kaplamaları (GCL) örnek olarak verilebilir. Bu şekilde geosentetik ürünlerin kombine kullanılmasında ki amaç kullanım yerine göre daha etkili sonuçlar alınmasının hedeflenmesidir (İnt. Kyn. 7).

Örneğin; geotekstil ile geogridin beraber kullanılması neticesinde, düşük dayanımın önüne geçilirken, geotekstil malzeme ile ayırma ve filtrasyon görevleri yerine getirilmektedir. Geotekstil ile geomembran birlikteliği sonucu su tutma yapılarında, su geçirgenliğinin önlenmesi ve destekleyici taş blokların kaymasının engellenmesi sağlanmış olur. Yine benzer şekilde geotekstil-geomembran birlikte kullanıldığında; geomembran yalıtım fonksiyonunu yerine getirirken, geotekstil geomembranı delinmelere karşı korumaktadır. Geotekstil ile geonetin beraber kullanılması ile ise; daha çok drenaj fonksiyonunun iyi şartlarda yerine getirilmesi amacıyla tercih edildiği görülmektedir. Geonet drenaj fonksiyonunun yerine getirilmesini sağlarken, geotekstil ürün ise drenajı engelleyecek parçacıkların geonet içinde birikmesini önlemektedir. Özetle; geokompozit ürünler koruma, güçlendirme, ayırma, drenaj, yalıtım ve filtrasyon fonksiyonlarının tümünde daha iyi sonuçlar alınması adına kullanıma uygundur.



Resim 2.15 Geokompozit ürün (geotekstil-geonet-geotekstil) (İnt. Kyn. 10).

3. GEOGRİD

Geogrid ürünler, yüksek çekme ve düşün sünme özelliğine sahip ve üzerinde kare, dikdörtgen ya da eşkenar üçgen şeklinde boşluklar yer alan malzemelerdir. Geogridler; yapışma özelliği yüksek olan polyester, polipropolin veya yüksek yoğunluklu polietilen şiltelerinin çekilerek uzatılması sonucunda elde edilmektedir. Geogrid ürünlerin diğer geosentetik ürünlere göre çekme dayanımı, elastisite modülü ve sıyrılma direnci daha yüksek, sünme özelliği ise daha düşüktür. Geogridler ayrıca kimyasal, biyolojik ve UV etkilerine karşı dayanıklı olmakla birlikte, uygulama aşamasındaki olumsuz hava vb. koşullardan da en az etkilenen bir yapı malzemesidir. Geogrid ürünlerin boşlukları granüler zeminle kenetlenecek büyüklükte olup geogrid üzerine dolgu malzemesi serildiğinde, malzeme taneleri geogridin göz aralarına yerleşmeli ve malzeme ile kenetlenmelidir. Yüksek dayanımlı bir yapıya sahip olan geogridin içerisinde kenetlenen dolgu malzemesi, donatılı bir zemin oluşturmaktadır (Kocaer 2011, Sungur 2015).



Resim 3.1 Geogrid – zemin kenetlenmesi (İnt. Kyn. 11).

Geogrid 1950' li yıllarda Dr. Brian Mercer (1927 – 1998), plastiklerin tek aşamada ağ benzeri bir şekilde ekstrüde edildiği süreci geliştirmiştir. Ürünü üretmek için 1959 yılında İngiltere' de Netlon Limited Şirketini kurmuştur. Dr. Mercer'in ekstrüde ağ teknolojisi üzerindeki araştırma ve geliştirme çalışmalarına dayanarak 1970'li yıllarda bazı polimer şeritler ve bu şeritlerden oluşan geogride benzer ızgara şeklinde ürünler haline getirilmiştir. İlk entegre geogridler 1970'li yılların sonlarında geliştirilmiş ve bazı uygulamalarda kullanılmıştır. 1980'li yılların başında ise geogridin geliştirilmesinin

aşamalarında İngiltere’de Leeds, Nottingham, Oxford, Sheffield ve Strath Clyde gibi birkaç üniversite polimer teknolojisini inceleyen kapsamlı bir araştırma programına yoğun bir şekilde dahil olmuştur. Buna paralel olarak yine 1980’li yılların başında Amerika Birleşik Devletleri’nde de geogridler tanıtılmış ve sonrasında da kendilerine özgü benzersiz özellikleri sayesinde inşaat uygulamalarında önemli faydaları beraberinde getirmiştir (Archer 2008, Das 2016).

İnşaat mühendisliği alanında geogridler; takviye, mevcut yükü dağıtma, donatılı zemin oluşturma ve gabion gibi amaçları yerine getirmek maksadıyla kullanılmaktadır. Böylece kullanıldığı zeminin taşıma gücünü artırır, zeminlerin donatısız yapılarına göre daha ağır yükleri taşıyabilmesini sağlar ve zeminde meydana gelecek oturmaları önler, daha dik açılı şev oluşturulmasını sağlar, öngörülen hizmet ömrünü iyileştirir ve uzatır, dolgu miktarının azaltılmasını sağlarlar (Tunç 2002).

3.1 Üretim Yöntemine Göre Geogridler

Üretim yöntemine göre geogridler ekstrüde yöntemi ile üretilen geogridler, yapıştırma yöntemi ile üretilen geogridler ve dokuma yöntemi ile üretilen geogridler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Geogrid ürünlerin en önemli özelliği olan çekme dayanımı üretim yöntemlerine göre değişkenlik göstermektedir. Kullanılması planlanan geogrid ürünün maksimum çekme dayanımı, geogrid birleşim noktalarının maksimum kopma dayanımından fazla değildir (Gönül 2021).

3.1.1 Ekstrüde Yöntemi ile Üretilen Geogridler

Ekstrüde geogridlerin üretimi, büyük ölçekli polietilen veya polipropolin plakalar üzerine kalıplar yardımı ile düzenli bir şekilde deliklerin açılması ile sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip fırın ya da suyun içinde tek veya çift yönlü çekilerek levhaların mukavemet kazanması sağlanır. Mukavemeti etkileyen ana değişken çekme oranı olsa da molekül ağırlığı, molekülün ayrılma veya bağlanma derecesi ve ağırlık dağılımı da önemlidir (Karagül 2007). Ekstrüde yöntemi ile üretilen geogridlerde bağlantı noktaları kendiliğinden oluştuğu ve ek yerleri bulunmadığı için bu noktalarda çekme mukavemeti

fazla olmakta ve dayanımı diğer üretim yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır.



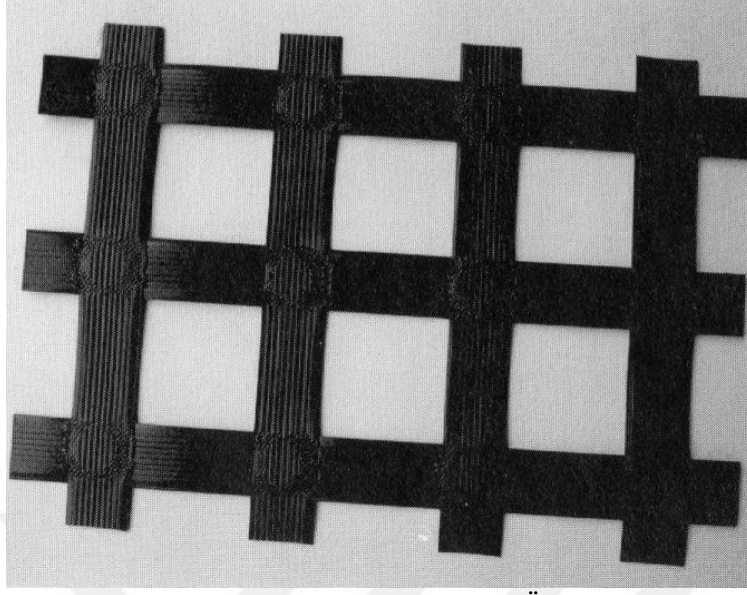
Resim 3.2 Çift eksenli ekstrüde yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği (İnt. Kyn. 12).



Resim 3.3 Tek eksenli ekstrüde yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği (Önal 2020).

3.1.2 Yapıştırma Yöntemi ile Üretilen Geogridler

Belirli ve istenilen genişliğe sahip polimerik şeritlerin her iki doğrultuda da birbirine paralel olacak şekilde dizilerek presleme, yapıştırma ve/veya lazer yöntemi ile birleştirilmesi sonucunda üretimi sağlanmaktadır. Yapıştırma yöntemi ile üretilen geogrid ürünlerin avantajları; istenilen polimer malzeme genişliğine ve istenilen göz açıklığına sahip şekilde üretilebilir olmasıdır. Yapıştırma yöntemi ile üretilen geogrid ürünlerin dezavantajı ise bağlantı noktası mukavemetinin düşük olması ve genel mukavemetinin bağlantı noktası mukavemeti kadar olmasıdır (Gönül 2021, Karagül 2007).



Resim 3.4 Yapıştırma yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği (Önal 2020).

3.1.3 Dokuma Yöntemi ile Üretilen Geogridler

Dokuma yöntemi ile üretilen geogrid ürünlerin hammaddesi genellikle polyesterdir. İstenilen mukavemete göre polyester iplik sayısının artırılması veya azaltılması ile dokuma makinelerinde örülmesi neticesinde bu geogrid türüne ulaşılır. Dokuma yöntemi ile üretilen geogridlerin bağlantı noktası mukavemeti, ekstrüde yöntemi ile üretilen geogridlere göre daha düşüktür (Gönül 2021).



Resim 3.5 Dokuma yöntemi ile üretilmiş geogrid örneği (İnt. Kyn. 13).

3.2 Göz Açıklığına Göre Geogridler

Göz açıklığına göre geogridler; tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Geogrid ürünlerin göz açıklığının geometrik şekli; yük taşıma ve zemine çekme dayanımı kazandırmak adına önemli bir rol üstlenmektedir. Tasarlanan bir proje için zemine hangi yönde çekme dayanımı kazandırılarak güçlendirilmesi isteniyorsa buna uygun olacak şekilde kullanılacak geogrid ürünün de göz açıklığı belirlenmelidir (Aydın 2019).

3.2.1 Tek Eksenli Geogridler

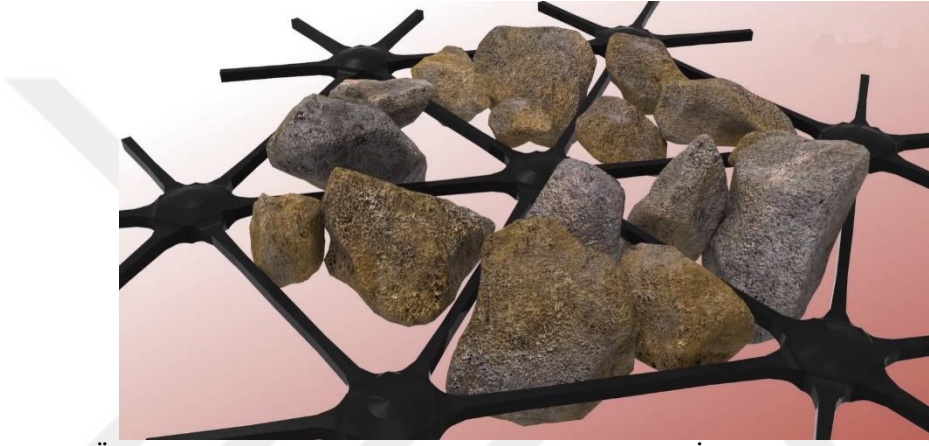
Tek eksenli geogridler, yükün tek doğrultuda tesir ettiği uygulamalar için tercih edilen ve buna uygun olarak boyuna doğrultudaki çekme mukavemetinin, enine doğrultuya oranla çok daha yüksek olduğu geogrid türüdür. Tek eksenli geogridler; ekstrüde yöntemi, yapıştırma yöntemi ve dokuma yöntemi ile üretilebilmektedir. Ekstrüde yöntemi ile üretimi esnasında ekstrüde işlemi tek yönde yapılarak mukavemet kazanması sağlanmaktadır. Yapıştırma yöntemi kullanılarak üretilen tek eksenli geogridler ise; polimer şeritler dikdörtgen göz açıklığına sahip olacak şekilde üretim bandına yerleştirilir ve birleşim sağlanır (Gönül 2021, Aydın 2019).

3.2.2 Çift Eksenli Geogridler

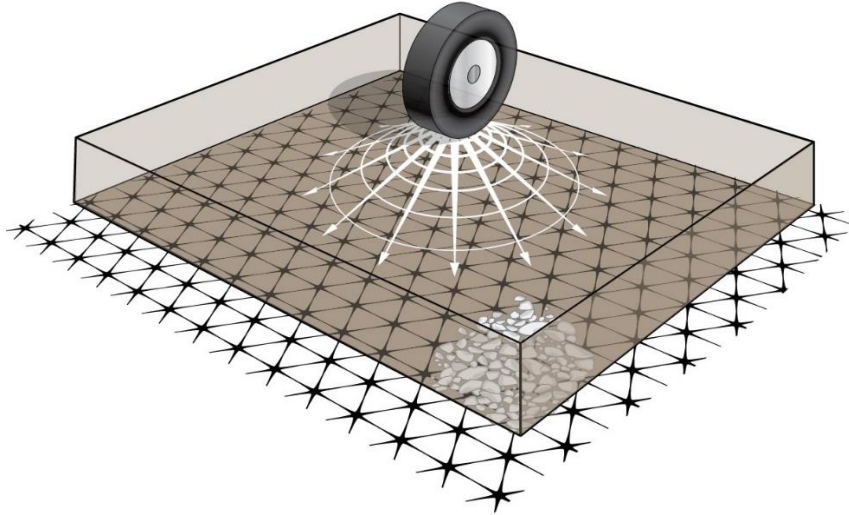
Çift eksenli geogridler; yükün her iki doğrultuda da tesir ettiği ve yük dağılımının düzensiz olduğu durumlarda tercih edilen geogrid türüdür. Çift eksenli geogridlerde üzerindeki enine ve boyuna doğrultuda mevcut boşluklar birbirine eşit kare formasyonundadır. Çift eksenli geogridler; ekstrüde yöntemi, yapıştırma yöntemi ve dokuma yöntemi ile üretilebilmektedir. Ekstrüde yöntemi ile üretimi esnasında ekstrüde işlemi çift yönde de yapılarak mukavemet kazanması sağlanır. Yapıştırma yöntemi kullanılarak üretilen çift eksenli geogridlerde ise; polimer şeritlerin her iki yönde de çekme dayanımı birbirine eşit değerdedir (Sağlam 2009, Aydın 2019).

3.2.3 Üç Eksenli Geogridler

Üç eksenli geogridler; açıklıkları eşkenar üçgen geometrisine sahip olan altıgen bir geogrid yapısıdır. Bu doğrultuda yükün üç yönlü olarak dağıtılmasına olanak sağlayan geogrid türüdür. Yaklaşık olarak 2007 yılı ve sonrasında geliştirilen bu geogrid türü hakkında yapılan çalışmalar göstermiştir ki; yapısı sayesinde uygulandığı zemin taneleri ile üç yönlü kenetlenme sağlanmakta ve optimum performansı sağlamak adına gelen yükü üç boyutlu dağıtma kapasitesine sahip olmaktadır (Tensar 2008).



Resim 3.6 Üç eksenli geogrid ve agrega kenetlenmesi örneği (İnt. Kyn. 14).



Resim 3.7 Üç eksenli geogridin 3 eksenli ve 360 derecelik yük dağıtımı (Tensar 2008).

3.3 Geogridlerin Görevi, Amacı ve Kullanımının Sağladığı Avantajlar

Geogridlerin görevi, zeminde oluşabilecek bozulmaları önlemek için yerleştirildiği zemin ile kenetlenmektir. Bu, zemine iç sertleşme sağlayacak olup, zeminin daha fazla yük taşımasına da olanak sağlar. Geogridler bu nedenle agrega iskeletinin hareketini engellemelidir. Geogridlerin rijitliği önemli bir parametre olarak kabul edilir (Zanzinger 2019).

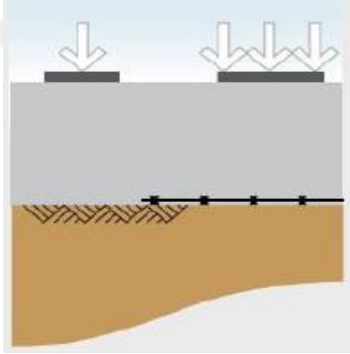
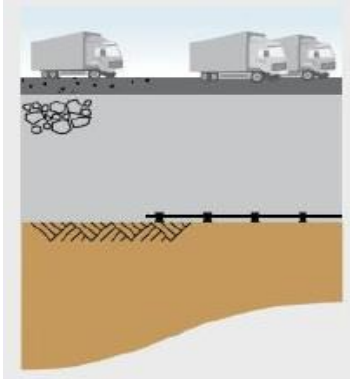
Yol üstyapısı üzerine gelen yükler, alt tabakalarda nispeten dar bir alanda karşılanır; geogrid ile takviye edildiğinde ise, alt tabakalarda meydana gelebilecek bölgesel kayma ve deformasyonlara karşı, geogridin tıpkı bir kar ayakkabısı gibi yükü geniş alanlara yayma yeteneği sayesinde düşey gerilimi önemli ölçüde azaltarak koruma sağlar ve alt zeminin etkin taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırabilir. Burada geogridin kenetlenmesi sonucu oluşan çekme kuvvetlerinin etkisi ile zeminin zar gibi gerilmesi ve böylece gelen yüklere karşı koyan dikey bir karşı basınç oluşması da etkilidir. Bu sonuç taban zeminine iletilecek yükü ve oturmayı azaltır. Geogridler parçacıkların hapsedilmesi yoluyla granüler dolguyu güçlendirir, agregaların yanal hareketini kısıtlar ve iyileştirilmiş yük dağılımı için taban katmanını sertleştirir (Archer 2008, Sert vd. 2020). Geogridlerin takviye edildiği zemin ile birlikte hareket edebilmesi için zeminde meydana gelecek en ufak bir deformasyonda bile geogridlerde karşı kuvvet oluşumu çok önemlidir (Zanzinger 2019).

Üstyapı sisteminde kullanılan geogrid ürünler için güçlendirme fonksiyonunun yanında, geosentetik ürünlerin yine temel işlevi olan ayırma fonksiyonu da geogrid ürün kullanımı ile bir miktar yerine getirilir. Geogrid ürünlerin üretiminde genellikle geniş açıklıkların tercih edilmesi neticesinde farklı malzemelerin birbirinden ayrılmasını sağlamak, geogrid ürün kullanımında birinci öncelik değildir. Ancak geogridler teorik olarak sınırlı da olsa bir miktar ayırma sağladığından; ayırma üstyapı çalışmalarında kullanılan geogrid ürünlerin ikincil bir işlevidir. Geogridlerin temel işlevi, üstyapı sisteminin mühendislik özelliklerini mekanik olarak iyileştirmek ve güçlendirmektir (Dhule vd. 2011).

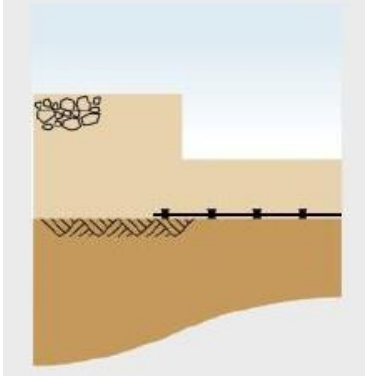
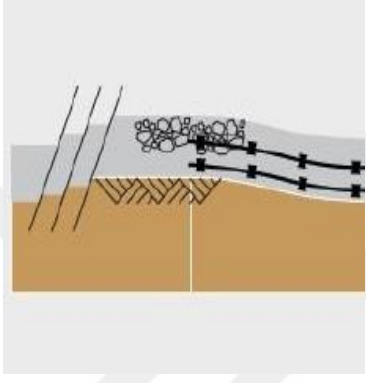
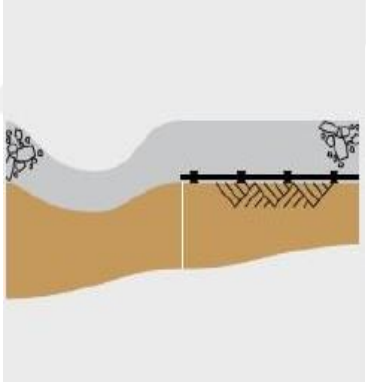
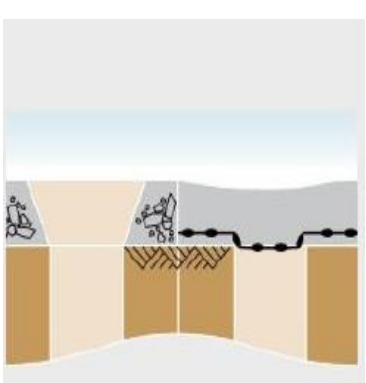
Bir üstyapı sisteminde geogrid ürünün kullanım amaçları özetle;

- Yumuşak zeminlerde yardımcı görev üstlenerek zemini güçlendirmek ve taşıma kapasitesinin arttırılmasını sağlamak,
- Üstyapının öngörülen hizmet ömrünü iyileştirmek veya uzatmak,
- Belirli bir hizmet ömrü için yapısal kesit yani tabaka kalınlıklarının azaltılmasında rol almak,
- Mevcut zeminin güzergâh içinde değişken niteliklere sahip olacağı düşünülecek olursa yüzey profilinin korunması amacıyla diferansiyel – farklı oturmaların önüne geçmek,
- Endüstriyel atık ve balçık, çamur gibi zayıf zeminlerin kapatılması için katman oluşturmak,
- Terk edilmiş maden ocaklarının bulunduğu alanlar gibi ani çöktüşlerin ve taş deliklerinin oluşabileceği ortamlarda kamu güvenliğinin sağlanması adına zaman kazanmak amacıyla da kullanılabilir (Dhule vd. 2011, Tensar 2013).

Çizelge 3.1 Zemin uygulamalarında geogrid malzemelerin kullanım amaçları (Tensar 2013).

Madde	Amaç
a 	Taşıma kapasitesinin arttırılması
b 	Hizmet ömrünün uzatılması

Çizelge 3.1 (Devam) Zemin uygulamalarında geogrid malzemelerin kullanım amaçları.

c		Tabaka kalınlıklarının azaltılması
d		Farklı oturmaların önüne geçilmesi
e		Zayıf zemin oluşmasına neden olacak birikintilerin önüne geçmek
f		Ani çöküşlerin yaşanabileceği zeminlerde uyarı ve güvenlik amacıyla yeterli süre kazanılmasını sağlamak

Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında geogrid kullanılmış çözümler maliyet açısından

tasarruf sağlar. Geogrid ürünlerin imalatının ve montajının kolay olması; hafif, kolay taşınabilen ve katlanabilen bir malzeme olması inşaat yapım hızı açısından da avantaj sağlar. Ayrıca karbon salınımını azaltarak daha çevre dostu yapılar oluşturmaktadır. Hafriyat depolanmış sahalarda, mevcut malzeme geri dolgu malzemesi olarak kullanılarak sürdürülebilirlik sağlanabilmektedir. Böylece çevre kirliliği önemli oranda azaltılabilmektedir. Geogrid ürünlerin -70 ile +70 santigrat dereceye kadar olan çalışma sıcaklığı sayesinde; iklim değişikliği ve şiddetli don olaylarından etkilenmemesi adına önemli bir avantaj sağlamaktadır (Karagül 2007, Maccaferri SpA 2016, İnt. Kyn. 15).

Büyük ölçekli altyapı projelerinde zemin güçlendirme maksadıyla kazık uygulaması yaygın bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında, kazıklarla birlikte geosentetik donatı ürünü olan geogrid ürünlerin kullanılması, projelerde önemli zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilir. Geogrid ürünlerin yardımı ile dolgu yüklerinin kazıklara daha verimli bir şekilde yayılmasına olanak sağlanırken; güçlendirme fonksiyonu sayesinde kazık aralıklarının arttırılarak projede kullanılması planlanan kazık adedinin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır (Maccaferri SpA 2012).

3.4 Geogridlerin Kullanım Alanları

Geogrid malzemelerin kullanım alanı geniştir. Yüksek mukavemetleri nedeniyle kullanıldıkları alandaki stabiliteyi arttırması ve boşlukları sayesinde zeminin bütün halinde çalışmasına yardımcı olması kullanım alanının geniş olmasındaki başlıca sebeplerdir. Kaplamasız yollarda kırmataş altında, demiryolu inşaatı balast ve/veya altbalast altında, yumuşak zemin üzerinde dolgu teşkil edilmesinde gibi zemin güçlendirme uygulamaları; şev stabilizasyonunun arttırılması uygulamaları ve betonarme içinde, dolgu toprak barajlarda, katı atık depoları gibi çalışmalarda donatı olarak kullanılmaktadır.

3.4.1 Zayıf Zeminlerin Geogrid ile Güçlendirilmesi

Dolgu taşıma kapasitesinin düşük olduğu zeminlerde, yeraltı su seviyesinin yukarıda olduğu zeminlerde geogrid kullanımı ile oluşabilecek farklı oturmaların önüne geçmek

ve zeminin taşıma gücünü arttırmak hedeflenmektedir. Zayıf zeminlerin geogrid kullanımı ile güçlendirilmesi sonucunda; taşıma gücünün artması, zeminde oluşacak deformasyonların zamana yayılması ve azaltılması, oluşabilecek farklı oturmaların önlenmesi, zeminde meydana gelecek çatlakların önlenmesi, alt temelin taşıma gücünün artırılması ve son olarak yükün eşit bir şekilde dağılımının sağlanması da beraberinde gerçekleşmiş olur (Maccaferri SpA 2016, Karagül 2007).

Geogrid ürün kullanılacak bölgelerde hesaplamalar sonucu birden fazla geogrid uygulamasının gerektiği yerlerde bazı durumlarda katmanlar arası mühendislik dolgusu gerekli iken; bazen mühendislik dolgusuna gerek kalmadan üst üste uygulamalar da yapılabilmektedir. 2006 yılında çalışmalarına başlayan Kanada’ da bir maden ocağının cevher stok sahasında altyapının yumuşak kil yatağından oluşması sebebiyle geogrid uygulaması yapılmıştır. Uygulama sayesinde platform için gerekli donatı miktarının %60 oranda azaltılması sağlanmış ve takviyedeki azalma aynı zamanda kurulum hızının artmasına neden olmuştur. Böylece platformun toplam maliyeti de düşmüştür (Maccaferri SpA 2015).



Resim 3.8 Kanada’ da zemin iyileştirme amacıyla geogrid uygulamasının ara dolgu gerekmeden uygulanması örneği (Maccaferri SpA 215).

3.4.1.1 Zayıf Zeminlerde Dolgu İmalatının Güçlendirilmesi Tasarım Kriterleri

Zayıf zeminler üzerine inşa edilen dolguların stabilitesi, zemin kayma direncine ve zemin taşıma kapasitesine bağlıdır. Zeminde ve dolguda kayma kuvvetlerinden kaynaklı

stabilite problemlerini önlemek ve güçlendirmek amacıyla geogridler zemin ve dolgu arasına yer düzlemine paralel şekilde yerleştirilir. Bu sayede stabilite problemleri engellenmiş olur ve geosentetik ürünlerin bir fonksiyonu olan güçlendirme fonksiyonu yerine getirilmiş olur. Bu noktada geogrid ürünlerin birincil çalışma prensibi olarak stabilite, ikincil çalışma prensibi olarak ise farklı oturumların engellenmesi gelmektedir.

Bir limit durum yönetmeliği olan BS8006:2010' a göre nihai limit durum (ultimate limit states – ULS);

- Dolgunun lokal stabilitesine,
- Dolgunun devrilme stabilitesine,
- Dolgunun yanal ötelenme stabilitesine,
- Zemin kayma stabilitesine ve
- Global stabiliteye bağlı durumlarıdır.

Zayıf zeminler üzerine inşa edilen dolgulara yönelik; dolguya etkiyen yüklere, dolgu kütlelerine ve dayanım parametrelerine kısmi güvenlik katsayıları etki ettirilerek mukavemet hesaplamalarında yapının güvenli yönde kalması sağlanır. BS 8006:2010 yönetmeliğine göre kısmi güvenlik katsayıları Çizelge 3.2' de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 BS 8006:2010 yönetmeliğine göre kısmi güvenlik katsayıları.

Kısmi katsayılar		ULS	SLS
Yük katsayısı	Dolgu birim ağırlığı	$f_{fs} = 1.3$	$f_{fs} = 1.0$
	Dolguya etkiyen ölü yükler	$f_f = 1.3$	$f_f = 1.0$
	Dolguya etkiyen hareketli yükler	$f_q = 1.3$	$f_q = 1.0$
Dolgu malzemesi katsayısı	$\tan \varphi'_{cv}$	$f_{ms} = 1.0$	$f_{ms} = 1.0$
Dolgu/geogrid etkileşim katsayısı	Geogrid yüzeyi boyunca kayma katsayısı	$f_s = 1.3$	$f_s = 1.0$
	Geogrid sıyrılma katsayısı	$f_p = 1.3$	$f_p = 1.0$

* SLS (serviceability limit state) kullanılabilir limit durum.

Uzun dönem (120 yıl) tasarımlarda geogridin polimer yapısı gereği malzemede oluşacak şekil değiştirmeler sünme etkisi olarak hesaplamalarda kullanılmaktadır. Sünme etkisi katılarak yapılan tasarım hesaplamalarında geogrid içerisinde oluşan gerilmeler sınırlandırılarak tasarım ömrünü tamamladığı nihai çekme dayanımı bulunup hesaplamalara dahil edilmektedir. Böylece sünme etkisinden kaynaklı oluşabilecek geogrid kopmaları engellenmiş olur. Sünme katsayısı f_{cr} simgesi ile anılmaktadır. Farklı tasarım ömrü ve sıcaklıklara göre geogridlerin malzeme güvenlik katsayıları ve sünme güvenlik katsayıları da değişkenlik göstermekte olup; geogrid teknik föylerinden kontrol edilmesi gerekmektedir.

BS 8006:2010 yönetmeliği ayrıca dolguda oluşabilecek deformasyonların ekonomik sonuçlarıyla da ilişkilendirilen güvenlik katsayıları kullanmaktadır. Bu güvenlik katsayısı f_n simgesi ile anılmaktadır. Bu güvenlik katsayısının etkisi yapının tasarım ömrü ve yapı önemine göre değişmekte olup değeri 1,0 ile 1,1 arasındadır.

Dolgu kesiti boyunca geogrid tasarım dayanımı P_d alttaki formülle belirlenmektedir.

$$P_d = T_{rp} \times f_m \times f_n \times f_{cr} \quad (3.1)$$

Burada,

T_{rp} geogrid ile sınırlandırılmış çekme gerilmesi.

f_m ise uzun dönem mukavemet hesaplarında güvenlik katsayıları toplamını ifade etmektedir.

$$f_m = f_{m11} \times f_{m12} \times f_{m21} \times f_{m22} \quad (3.2)$$

Burada,

f_{m11} güvenlik katsayısı malzeme üretim şekli ile ilişkilendirilmektedir. Malzeme üretim şeklinin testler sonucu geogrid mukavemetine etkisini belirten katsayıdır.

f_{m12} güvenlik katsayısı laboratuvar testlerinde bulunan çekme dayanımına ilişkin katsayıdır.

f_{m21} güvenlik katsayısı uygulama sırasında geogridte oluşabilecek hasarlara yönelik

katsayıdır.

f_{m22} güvenlik katsayısı geogridin toprak içerisinde kimyasal ve biyolojik etkilere karşı dayanım katsayısıdır.

Dolgu Lokal Stabilitesi

Dolgunun şevli olması durumunda şevlerin stabilitesine ilişkin formül;

$$\frac{H}{L_s} \leq \frac{\tan \varphi'_{cv}}{f_{ms}} \quad (3.3)$$

Burada;

H dolgu yüksekliği,

L_s dolgu şevi uzunluğu,

φ'_{cv} efektif gerilme altında dolgu içsel sürtünme açısı değeri,

f_{ms} $\tan \varphi'_{cv} \times$ kısmi malzeme katsayısı.

Dolgunun Yanal Ötelenmeye Karşı Stabilitesi

Dolgunun yanal ötelenmeye karşı stabilitesi, dolgu tabanı ile geogrid arasında oluşan sürtünme yüzeyi ile alakalı bir durumdur. Geogrid ürünün, stabilitenin sağlanması için ötelenme sonucu oluşacak gerilmelere karşı koyması gerekmektedir. Geogrid üzerinde oluşacak en büyük gerilme dolgu kret seviyesinin olduğu bölgeye tekabül etmektedir. Oluşan kuvvet alttaki formül ile ifade edilmektedir;

$$T_{ds} = 0.5K_a H(f_{fs}\gamma H + 2f_q w_s) \quad (3.4)$$

K_a toprak aktif kuvveti = $\tan^2(45^\circ - \varphi'_{cv}/2)$

f_{fs} dolgu birim ağırlığı kısmi katsayısı,

- γ dolgu birim ağırlığı,
 f_q etkiyen yükler kısmi yük faktörü,
 w_s sürşarj yükü.

Çekme kuvveti oluşturmak için T_{ds} dolgu malzemesinin donatıları üzerinden kaymaması gerekmektedir. Yatay kaymayı önlemek için maksimum donatı boyu L_e ;

$$L_e \geq \frac{0.5K_a H(f_{fs}\gamma H + 2f_q w_s)f_s f_n}{\gamma h \frac{\alpha' \tan \phi'_{CV}}{f_{ms}}} \quad (3.5)$$

Burada;

- f_s kayma direnci kısmi faktörü,
 h güçlendirme üzerinde kalan dolgunun ortalama yüksekliği,
 α' $\tan \phi'_{CV}$ dolgu ve geogrid arasında oluşan ara yüzey katsayısı

Temel Kabarma Tahkiki

Dolgu geometrisi zayıf temel zemin içerisinde dışa doğru kayma gerilmelerine neden olur. Temel zeminin çok zayıf ve sınırlı derinliği olduğu durumda dışa doğru kayma gerilmeleri temelin kabarmasına neden olabilir. Bu kabarmaları önlemek için dolgunun yan şev uzunluğu L_s dışa doğru olan kayma gerilmesinin dolguyu hareket ettirmesini engelleyecek kadar ağırlık teşkil etmek zorundadır.

Dolgunun gelen yükler karşısında taşıma kapasitesini aşan bölgelerde kabarma oluşabilmektedir. Meydana gelen bu limit durumunu engellemek için, geogridin yeterli bir yüzey alanı üzerinde yeterli yanal soketlenmesi yapılarak dışarıya doğru temel hareketini sınırlamak gereklidir. Bunun için iki koşul sağlanmalıdır;

- a. Geogrid altına gelen kayma direnci temel zemini içerisindeki yanal yüklere karşı

yeterli olmalıdır,

- b. Kayma gerilmeleri tarafından temele aktarılan çekme gerilmelerini karşılayacak dayanımda geogrid ürünler kullanılmalıdır.

Zayıf temel sınırlı derinlik ve derinliğe bağlı olarak drenajsız kayma mukavemeti olduğu yerlerde minimum gerekli şev uzunluğu belirlemek için aşağıdaki formül kullanılabilir;

$$L_s \geq \frac{(f_{fs}\gamma_1 H + f_q w_s \frac{4C_u}{f_{ms}})Z_c}{\frac{(1+\alpha'_{ab})C_u}{f_{ms}}} \quad (3.6)$$

Burada;

γ_1 dolgu birim hacim ağırlığı,

C_u yumuşak temel zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemeti,

Z_c zayıf zemin katman kalınlığı,

α'_{ab} C_u etkileşimli geogrid zemin ara yüzey katsayısı.

Yumuşak temelin sınırlı derinliğe sahip olduğu ve drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle arttığı durumlarda, aşağıda gösterilen ilişki asgari gerekli yan eğim uzunluğunun L_s belirlenmesi için kullanılır.

$$L_s \geq \frac{(f_{fs}\gamma_1 H + f_q w_s - \frac{(2C_u + Z_c \rho)^2}{f_{ms}})Z_c}{\frac{(1+\alpha'_{ab})C_u + \rho Z_c}{f_{ms}}} \quad (3.7)$$

Burada;

ρ metre başına drenajsız kayma mukavemetini arttıran orandır.

Drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle arttığı kritik derinliklerde zayıf zemin katman

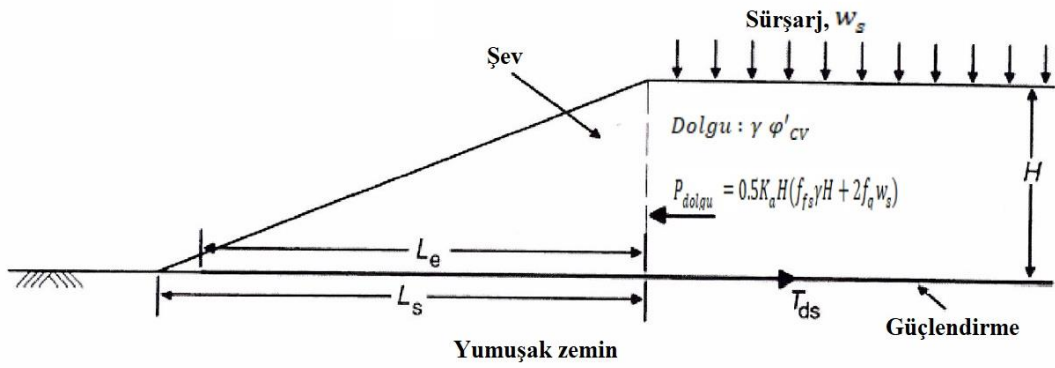
kalınlığı şu formülle belirlenir;

$$Z_c = \sqrt{\frac{(1+\alpha'_{bc})C_u nH}{2\rho}} \quad (3.8)$$

Burada;

n şevli dolguyu temsil etmektedir.

Drenajsız kayma mukavemeti farklı değerleri için Z_c ve L_s yan şev uzunluğunu maksimize edecek şekilde kullanılmalıdır.



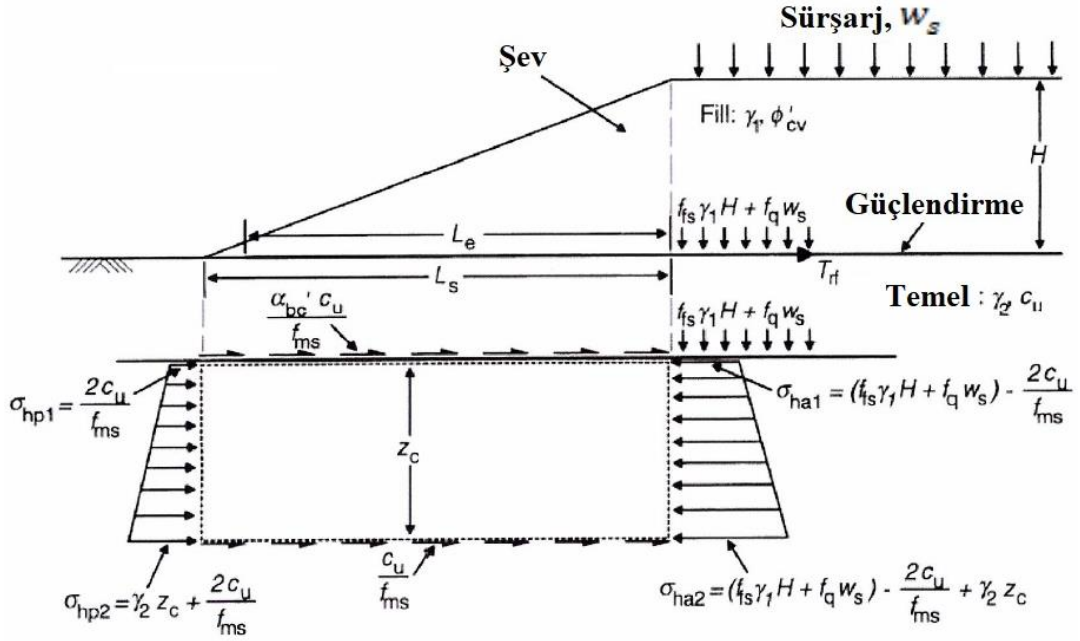
Resim 3.9 Temel kabarması ve yanal kaymaya karşı gerekli donatı boyu

Zemin güçlendirme içerisinde her bir metrede ortaya çıkan çekme kuvveti T_{rf} nedeniyle temel üzerindeki kayma gerilmesi;

$$T_{rf} = \frac{\alpha'_{ab} C_{UO} L_e}{f_{ms}} \quad (3.9)$$

Burada;

C_{UO} donatı altında kalan temel zeminin drenajsız kayma mukavemetidir.



Resim 3.10 Kabarma tahkiki.

Sekil Değiştirme

Geogrid için uzama miktarı ε_{max} dolguda oluşabilecek farklı oturmaları engellemek için sınırlandırılmalıdır. Özellikle yüksek olmayan dolgularda kayma düzlemlerinin dolguyu aşması sonucunda ortaya çıkan başlıca problemidir. BS 8006:2010 yönetmeliği geogridlerin uzama miktarlarını bu tip problemleri engellemek amaçlı sınırlandırmıştır. Geogrid çalışması için belirli bir yük karşısında şekil değiştirmeye başlaması gerekmektedir. %3 ile %6 arasında sınırlanan uzama değerleri, yapı önem katsayısı ve tasarım ömrü baz alınarak seçilmektedir.

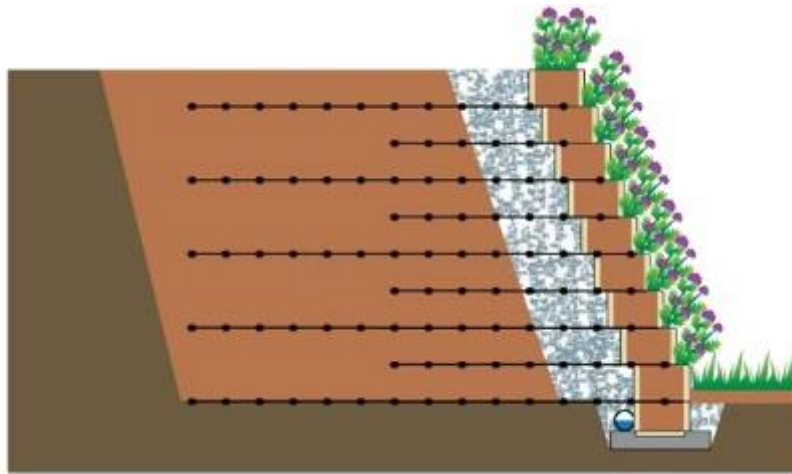
3.4.2 Şevlerde Geogrid Kullanımı

Şev ve toprak dolguların kaymaları geçmişten günümüze en çok karşılaşılan, en çok can alan ve meydana gelme sayısı oldukça fazla olan doğal afetlerin başında gelmektedir. İnşaat faaliyetlerinde zeminin doğal koşullarının değişmesi, yüksek miktarda hafriyat gerektiren demiryolu ve karayolu kenarları veya destekli kazılardaki şev stabilitesi projelerinde beklenmedik gerilme artışları meydana gelebilmektedir. Bu çalışmalar sırasında bazı güvenlik sorunları oluşabilmektedir. Ek olarak, şev stabilitesi tasarımı ekonomik çözüm gerektirmektedir. Şev destek yapıları için bu önemli gereksinimler göz

önünde bulundurularak en efektif tasarım yapılmalıdır (Evirgen vd. 2017). Şev stabilitesinin sağlanmasında hâlihazırda birçok yöntem uygulanmaktadır. Bunların temel amacı bir şevin göçmeden uzun süre boyunca istikrarlı olarak kalmasını sağlamaktır. Şev stabilitesinin sağlanmasında başlıca istinat duvarları, püskürtme beton ile güçlendirme teknikleri, beton veya kaya dolgu duvarlar, ankrajlar, çivileme yöntemleri gelmektedir. Günümüzde kullanımı yaygınlaşan polimer kökenli geosentetik malzemelerin kullanımı da sıklıkla tercih edilmeye başlamıştır (Pınarlık vd. 2017).

Geogrid ürünlerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde ve uygulandığı zeminde meydana gelen kenetlenme ile oluşturulan şevlerde kayma, göçme ve çökme risklerinin önüne geçilmektedir. Geogrid kullanımı ile daha dik şevlerin inşası da mümkün olabilmektedir. Bu sayede yeni bir karayolu dolgusunun kapladığı alan küçültülebilir ya da şevli bir bölgede inşa alanı genişletilerek alan tasarrufu sağlanabilir. Bütün bunlara paralel olarak zaman tasarrufu ve maliyetlerin azaltılması da sağlanabilir.

Yapılan uygulamalar genellikle; zemin dolgusunun tabakalar halinde yapılması ve bu tabaka aralarına da geogrid ürün serilerek güçlendirilmesi şeklindedir. Geogrid ürünlerin güçlü çekme dayanımları, düşük şekil değiştirme ve güçlü aderans özellikleri sayesinde zemin güçlendirilir. Ancak gerektiği durumlarda şev yüzeyi geogrid ile kaplanarak ve tabaka aralarına yerleştirilen geogrid ürünlerle de bağlantısı sağlanarak daha etkili şev çözümleri de sağlanabilir. Şev yapısında geogrid kullanımı ile yapının bitkilendirilmesine de olanak sağlanarak daha çevreci yapıların inşası söz konusu olmaktadır.



Resim 3.11 Şevlerde kademeli olarak tabakalar halinde bitkilendirilmiş geogrid uygulaması.

Tayvan'ın Taichung şehri, Chung-Hsin kasabasında inşaat sahası olarak kullanılabilir arazi alanının en üst seviyeye çıkarılması adına 35 metre yüksekliğinde geogrid ürün ile güçlendirilmiş bir şev oluşturma gereksinimi oluşmuş ve tasarım buna göre yapılmıştır. Yapılan uygulamanın şev açısı 60 derece, kademe (palye) yüksekliği 5 metre ve kademeler arası uzaklık 2,5 metredir. İstinat yapısının dış yüzeyine yapılan çimlendirme ile doğal bir görünüm kazandırılarak, geogrid malzemenin güneşin zararlı etkilerinden korunması da sağlanmıştır. Benzer şekilde geogrid ürünler ile 40 metreye kadar donatılı duvar uygulama örnekleri bulunmaktadır (Ay 2014, Tenax SpA 2005).



Resim 3.12 Tayvan Taichung şehri Chung-Hsin kasabası geogridli şev uygulaması (Tenax SpA 2005).

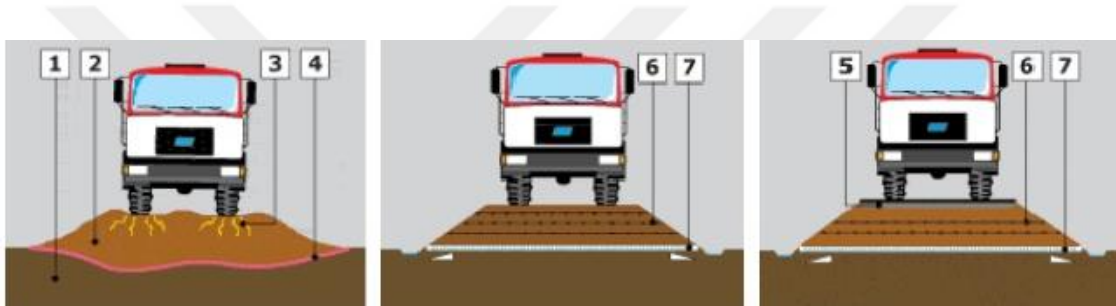
3.4.3 Kaplamalı ve Kaplamasız Yollarda Geogrid Kullanımı

Kaplamalı ve kaplamasız yollardaki problemler değişik şekillerde ortaya çıkabilir. Bu problemler genelde yapısal eksiklikler ve bunun sonucu ortaya çıkan yoldaki işlev kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bu eksiklikler, mekanik özelliklerdeki bozulmaya veya tasarım yükünden daha yüksek olan yüklere bağlı olarak artar (İnt. Kyn. 16).

Geogrid ürünlerin kaplamalı ve kaplamasız yollarda kullanması ile; temel tabakasının yanal deformasyonunun önüne geçilerek zeminde meydana gelebilecek farklı oturmalar

önlenmiş ve zeminin taşıma kapasitesi arttırılmış olup, güçlendirme fonksiyonunun yerine getirilmesi sağlanır. Kaplamalı ve kaplamasız yollarda geogrid kullanımının yol performansı arttırmada ve yolun hizmet ömrünün uzamasında etkili olduğu uygulama örneklerinde görülmektedir.

Geogridlerin zeminde nasıl teşkil edilmesi gerektiği kaplamalı ve kaplamasız yollarda uygulama öncesinde yapılan hesaplamalar neticesinde tasarlanan proje ile belirlenmektedir. Platformun oluşturulacağı mevcut zeminin taşıma kapasitesi ve dolgu yüksekliği kullanılacak geogrid ürünün tipini, türünü ve kaç sıra kullanılacağını belirlemede önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.1 Kaplamalı ve kaplamasız yollarda geogrid kullanımı (Sağlam 2009).

- | | |
|----------------------------|---------------------|
| 1. Zayıf zemin. | 5. Yol kaplaması. |
| 2. Yol dolgusu. | 6. Geogrid. |
| 3. Zemin çatlakları. | 7. Drenaj tabakası. |
| 4. Bozulan yol geometrisi. | |

3.4.4 Demiryollarında Geogrid Kullanımı

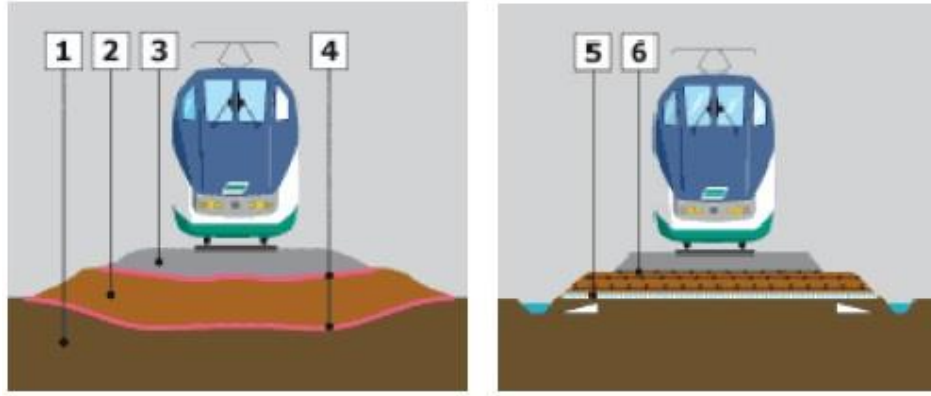
Demiryolları, dünyadaki en ekonomik ve önde gelen ulaşım sistemlerinden biridir. Ayrıca bir ülkenin altyapı gelişiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Nüfus artışı, hızlı kentleşme, giderek artan yakıt fiyatları, trafik sıkışıklığı ve medeniyetin gelişmesinde anahtar rol oynuyor olması demiryolu ulaşım altyapısının geliştirilmesine yönelik talebin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, dünya çapındaki demiryolu kuruluşları, verimli ve uygun maliyetli hizmetler sağlamak için yüksek hızlı demiryolu koridorları inşa etmek zorundadır. Ancak yapımları çok fazla miktarda malzeme gerektiren demiryolları için bir

yandan yeni yollar inşa edilmekte iken bir yandan da doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Bundan dolayı alternatif üstyapı inşaat malzemeleri ve bu tür malzemelerin daha az miktarlarını içeren tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve benimsenmesi gerekmektedir (Sweta ve Hussaini 2020, Goud vd. 2020).

Yüksek hızlı trenlerin devreye girmesi, üzerine ilave döngüsel gerilmelerin eklenmesine ve hat alt yapısını daha fazla olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır. Sürekli tren geçişi ile oluşan bu ek gerilmeler, genellikle bağlanmamış balast tabakasının zamanla dikey yönde oturması ve yanal yayılma sonucunda bozulmalar ile karşılaşılması şeklinde sonuçlanmaktadır. Balast malzemesinin yanal olarak yayılmasını önlemek için, geogridler stratejik olarak balast tabakasının altına (yani balast-altbalast ara yüzüne) yerleştirilir, böylece hat bakım işlemlerinin de devamlılığı sağlanmış olur. Geogridlerin demiryollarında kullanımı, düşük maliyetleri ve kolay kurulumları nedeniyle geniş kabul görmektedir (Sweta ve Hussaini 2020, Goud vd. 2020).

Demiryollarında yolun hizmet ömrünü uzatmak, kullanılacak tabaka (balast tabakası ve dolgu malzemesi) kalınlıklarını azaltmak için güçlendirme amacıyla kullanılan geogridler, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Üstyapı katmanlarındaki kalınlığın azaltılması, malzeme işleme, nakliye ve inşaat süresi ile ilgili faaliyetleri doğrudan etkilemektedir (Goud vd. 2020).

Şekil 3.2’ de gözleneceği üzere geogrid kullanılmayan demiryolu profilinde bir süre sonra oturma ile başlayan bozulmalar meydana gelirken, geogrid kullanımı ile bozulmaların önüne geçilebilmekte ve temel tabakası kalınlığı azaltılabilmektedir.



Şekil 3.2 Demiryolu inşaatlarında geogrid kullanımı (Karagül 2007).

- | | |
|---------------------|-------------------------|
| 1. Zayıf zemin. | 4. Deformasyon profili. |
| 2. Yol dolgusu. | 5. Geokompozit. |
| 3. Balast tabakası. | 6. Çift yönlü geogrid. |

3.4.4.1 Demiryolu Balast Tabakasında Geogrid Kullanımı

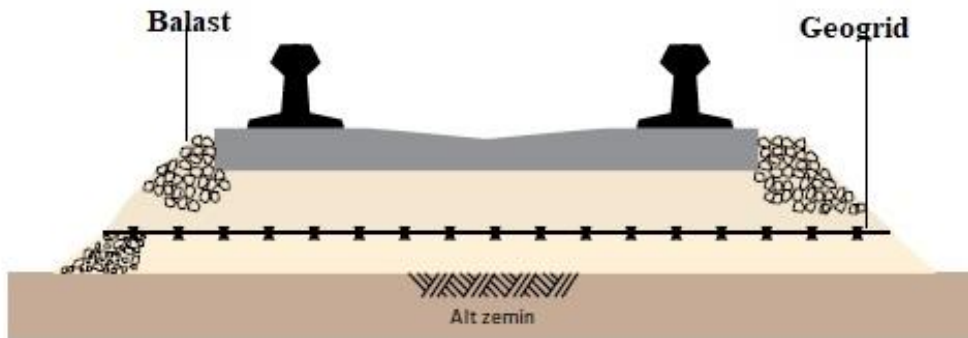
Demiryollarında tren geçişlerine bağlı olarak dinamik yüklerden dolayı granüler malzeme yani balast tabakası ile yumuşak zemin tabaka malzemesinin zamanla birbirine karışması sorunları ile karşılaşilmektedir. Ayrıca bu dinamik yükler balast malzemesinin zamanla ufalanarak fiziksel değişimine de neden olmaktadır. Bu tür sorunlar neticesinde balastın taşıma gücü azalır, balast tabakasında sürtünmenin azalmasına bağlı olarak yanıl deformasyon meydana gelir ve oturmalar meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak hat kesimi hız sınırlamaları ve hat bakım çalışmalarının daha sık yapılma zorunluluğu doğmaktadır (Aydın 2019).



Resim 3.13 Demiryolu balast ile ince malzeme karışımı sonrası taşıma gücünün azalması sorunları ile karşılaşılan bir örnek.

Balast tabakasının geogridler yardımı ile mekanik olarak stabilizasyonu sonucunda hat oturmaları azaltılabilir ve böylece bakım operasyonlarının periyod aralıklarının uzatılması sağlanmaktadır. Demiryolu balast tabakasında geogrid kullanımı ile;

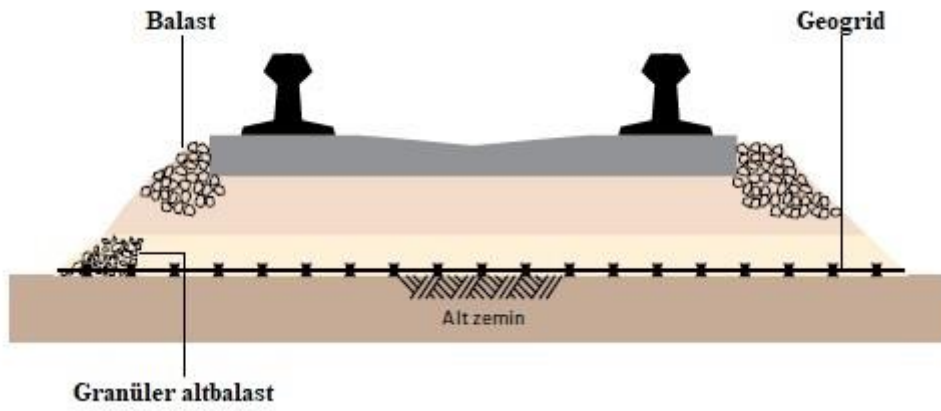
- Balast oturma oranını azaltır,
- Hattın geometrisini daha uzun süre korur,
- Bakım döngüsünü yaklaşık 3 kata kadar arttırır,
- Uzun süre (20 yıldan fazla) balastın içinde görev yapar,
- Demiryolu trafiğinden dolayı balast malzemesinde meydana gelecek fiziksel değişim ve bozulmaları azaltır (Tensar 2014).



Şekil 3.3 Demiryolu balast tabakasında geogrid kullanımı (Tensar 2014).

3.4.4.2 Demiryolu Altbalast Tabakasında Geogrid Kullanımı

Düşük bir taşıma kapasitesine sahip yumuşak alt zemin üzerine demiryolu inşası durumunda; maliyetinin düşük olması ve pratik bir çözüm olması sebebiyle geogrid kullanımı taban zemini ve altbalast arası için uygun bir üründür. Geogrid ürünlerin tercih edilmemesi durumunda muhtemelen kimyasal stabilizasyon veya yumuşak zeminin bölgeden uzaklaştırılması için derin kazı yapılması ve bunu takip eden granüler malzeme nakliyesi gibi maliyetli çözümler üretilmek zorundadır (Tensar 2014).



Şekil 3.4 Demiryolu altbalast tabakasında geogrid kullanımı (Tensar 2014).

Taban zemini ve altbalast arasına yerleştirilen geogrid ürünler ile dinamik ve statik yüklerden kaynaklı olarak zemine gelen yük basıncının daha geniş alanlara yayılması sağlanarak taban zemininin taşıma kapasitesi arttırılır, zemine etkiyen basınç azalır. Altbalast tabakası kalınlığının azaltılmasında da önemli bir rol almaktadır. Taban zemini ile altbalast tabakası arasında geokompozit (geotekstil-geogrid) ürünler yardımı ile yağışlardan veya yeraltı suyunun yükselmesinden kaynaklı doğabilecek drenaj sorunlarının da önüne geçilebilmektedir (Aydın 2019).



Resim 3.14 Demiryolu altbalast tabakasında geogrid ve geotekstil ürünün birlikte kullanımı (Bratislava – Slovakya) (Tensar 2014).

3.4.4.3 Demiryolu Projelerinde Geogrid Kullanım Örnekleri

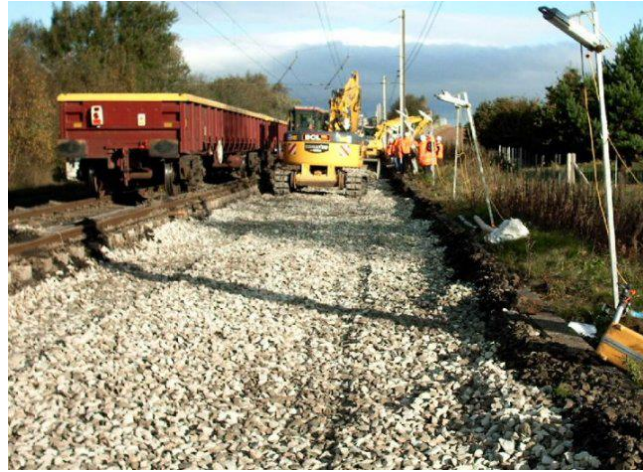
Geogridler ülkemiz demiryolu projelerinde henüz yaygın olarak kullanılmasa da Avrupa ülkelerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Polatlı – Afyon Yüksek Hızlı Tren projesinin Km. 160+000 ile 160+400 arasında 400 metrelik bir kısımda 8698 m²'lik bir alan için zayıf zeminin güçlendirilmesi ve tabaka kalınlıklarını azaltılması amacıyla geogrid uygulaması yapılmıştır.



Resim 3.15 Polatlı – Afyon YHT projesi geogrid uygulama görselleri.

İngiltere'nin Wigan yakınlarındaki Lancashire'da West Coast ana hattı boyunca 2004 yılında hat yenileme çalışmaları yapılmıştır. İşi yürüten Network Rail firması tarafından yapılan deney sonuçlarına göre mevcut demiryolu hattının oturduğu zeminin zayıf zemin oluşu ve balast tabakasının sadece 20 cm altında suyun varlığı neticesinde göz aralığı 30-65 olan geogrid malzeme kullanımına karar verilmiştir. Hat yenilemesinin uygulanacağı saha uzunluğu yaklaşık 1 kilometre (0,625 mil) olup 400 metrelik kısmında geogrid uygulaması yapılmıştır (Kwan 2006).

Yapılan uygulamanın hemen ardından Yüksek Hızlı İz Kayıt Aracı (HSTRC) ve Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) aracılığıyla gözlemler yapılmıştır. HSTRC; 35 metre uzunluğunda rayın standart sapması cinsinden hareketli bir hattın sürüş kalitesini gösterir. FWD ise; plaka üzerine düşen bir ağırlık kullanılarak alt zeminin yüzeyinde ölçülen stresin belirlenmesi olarak tanımlanır ve sonuçlar sertlik değeri vermek üzere analiz edilir. HSTRC ve FWD'den elde edilen veriler ışığında geogrid kullanımı ile hat bozulma oranında azalmaların gerçekleştiği tespit edilmiştir. Saha denemesinden elde edilen sonuçlar laboratuvar bulgularıyla karşılaştırılmış ve paralel sonuçlar elde edilmiştir (Kwan 2006).



Resim 3.16 Yenileme çalışmalarının yapıldığı örnek bir güzergâh (Kwan 2006).

Amerika, Millstead Alabama yakınlarında zayıf kilden oluşan yumuşak zemin ve yüksek yeraltı su seviyesi nedeniyle hattın 2 kilometrelik kesimi yeniden inşa edilmiştir. Bu demiryolu hattının sürekli olarak ağır demiryolu trafiğine maruz kalması; alt zeminin kademeli olarak kaymasına, drenaj kanallarının tıkanmasına ve taban zemininde mevcut

ince malzemenin balast ile karışması neticesinde balast tabakasının kirlenmesine neden olmuştur. Bu sebeplerden ötürü demiryolunda oturmalar meydana gelmektedir. Bu güzergahta bakım çalışması 2 ile 4 haftada bir yapılmakta ve 8 km/s'lik sürekli hız sınırlaması uygulanmaktadır (Das 2016).

İşletmesi Amerika Birleşik Devletleri'nde 1. sınıf demiryolu şirketlerinden biri olan CSX Transportation'a ait olan bu hat için; yol güzergahını değiştirmek gibi alternatif ve daha maliyetli bir çözümü benimsemek yerine, mevcut sorunların önüne geçmek adına demiryolu temelinde geosentetik malzeme kullanımı tercih edilmiştir. Tabakalar arası ek ayırma sağlamak için mevcut altbalast üzerine geotekstil ürün yerleştirilmiş ve bunun üzerine ekstrüde çift eksenli geogrid tabakası serilmiş ve 30 cm yüksekliğinde balast tabakası oluşturulmuştur. Proje Aralık 1983'te tamamlanmış olup; 1987 yılında yapılan hat kontrollerinde yolun stabilitesinde herhangi bir sorun ile karşılaşılmamış ve hattın maksimum hızı 56 km/s'e çıkarılmıştır (Das 2016).

Güney Avustralya'da Adelaide yakınları Cavan' da bulunan demiryolu hattının 700 metrelik bir kısmında zayıf zemin (killi toprak) ve yüksek yeraltı su seviyesi sorunları nedeniyle rehabilitasyon gerekmiştir. Bu demiryolu hattında altbalast tabakasını muhafaza altına almak ve sal gibi bir yapı oluşturmak için alt zemin üzerine geotekstil malzemesi yerleştirildikten sonra 45 cm yüksekliğe sahip altbalast tabakasının alt ve üstüne geogrid ürün serilmiştir. Daha sonra hat üzerinde yapılan kontroller sırasında demiryolu hattında gözle görülür bir hareket veya oturma ile karşılaşılmamıştır (Das 2016).

Çek Cumhuriyeti'nde demiryolu bölümleri dört koridora ayrılmıştır. Hat uzunlukları sırasıyla 430 km., 240 km., 540 km., ve 200 km. uzunluğundadır. Bu hatların proje hızları 160 km/s olup hızlı trenler seyir edecek şekilde planlama yapılmıştır. 430 kilometrelik birinci koridorun 92 kilometrelik hat kesimi ve 240 kilometrelik ikinci koridorun 32 kilometrelik hat kesimlerinde zemin koşullarının elverişsiz olması ve yüksek yeraltı su seviyesi sorunu ile büyük bölümünde karşılaşılması sebebiyle hat üzerinde iyileştirme yapılması gerekliliği doğmuştur (Das 2016).

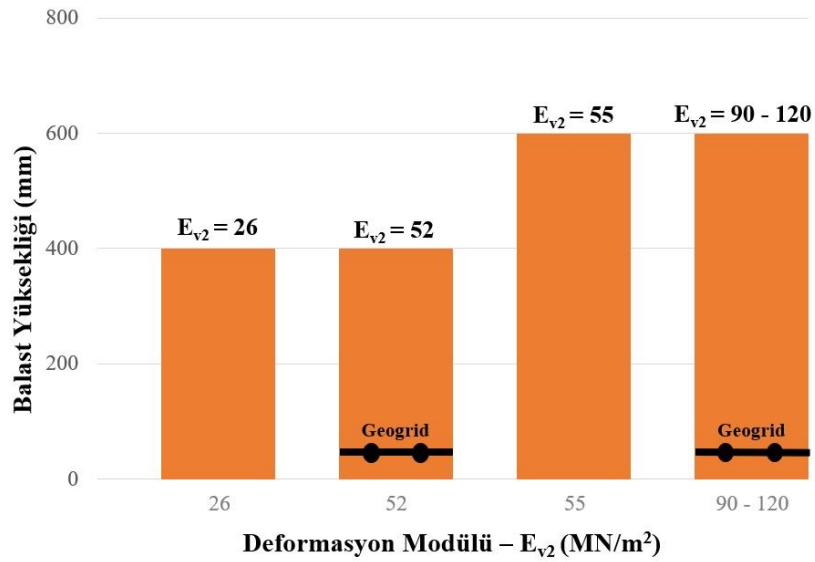
İlk etapta taban zemininin iyileştirilmesi için çimento ile stabilizasyon düşünülmüş ancak bölgede mevcut yoğun yağışlardan dolayı içme suyunun kirlenmesi, doğaya verilebilecek zararlar ve çevresel kaygılar göz önünde bulundurularak bu fikirden vazgeçilmiştir. Bunun yerine; zayıf taban zeminini bulunduğu yerden kaldırıp kaliteli dolgu zemin oluşturulmasına bile gerek kalmadan balast ve altbalast tabakalarının altına ve bazı durumlarda içine çift eksenli geogrid ürünler serilerek sorunların önüne geçilmiştir. Yapılan bu çalışma kötü hava koşullarından etkilenmeden sürdürülmüş, tabaka kalınlıklarının azaltılmasına fayda sağlamış ve yatırım maliyetlerinden önemli ölçüde tasarruf edilmiştir (Das 2016).

Macaristan'ın Nagykanizsa şehrinde bulunan bir demiryolu hattında, taban zemininde bulunan ince malzemenin altbalast ve balast tabakaları ile karışması neticesinde sıklıkla (ayda 1) bakım yapılması gerekmektedir. Bu da bakım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Sorunun çözümü için 2000 yılında zayıf zemin üzerine ayırma fonksiyonunun yerine getirilmesi için geotekstil ürün serilmiş ve üzerine ise çift eksenli geogrid ürün yerleştirilmiştir. Geogrid ürünün üzerine balast tabakasının serilmesi ile balast parçacıkları geogridin açıklıklarına nüfuz etmiş ve kenetlenme sağlanmıştır. Oluşan bu mekanizma ile tabakanın yatay hareketleri engellenmiş ve demiryolu hattında yapılan ölçümlerde önceki duruma kıyasla deformasyonların önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Das 2016).

Alman demiryolu yetkilileri 1990'lı yılların ortalarında polimer geogridin etkisini araştırmışlardır. Hochstadt ve Probstzella arasındaki demiryolu hattında ki, zayıf zemine sahip kesimde geogrid malzeme ile güçlendirme yapılmıştır. Uygulama sonrası yapılan plaka testi sonuçlarına göre; güçlendirme yapılarak 40 cm yüksekliğinde balast tabakası oluşturulan kesim ile güçlendirme yapılmamış 60 cm yüksekliğinde balast tabakası oluşturulan kesimin taşıma değerleri benzer performans göstermiştir. Yani geogrid kullanımı ile tabaka kalınlığında %33'lük bir azalma sağlanmıştır. Bu uygulamada ayrıca güçlendirme yapılmış 40 cm ve 60 cm balast tabakasına sahip kesimlerin deformasyon modülü değerleri, eşdeğer yükseklikte balast tabakası oluşturulan ve güçlendirme yapılmamış kesimlere göre yaklaşık 2 kat daha iyi sonuç verdiği de gözlemlenmiştir (Kwan 2006, Penman vd. 2009).



Resim 3.17 Hochstadt ve Probstzella arası demiryolu hattı güçlendirme çalışması (Kwan 2006).

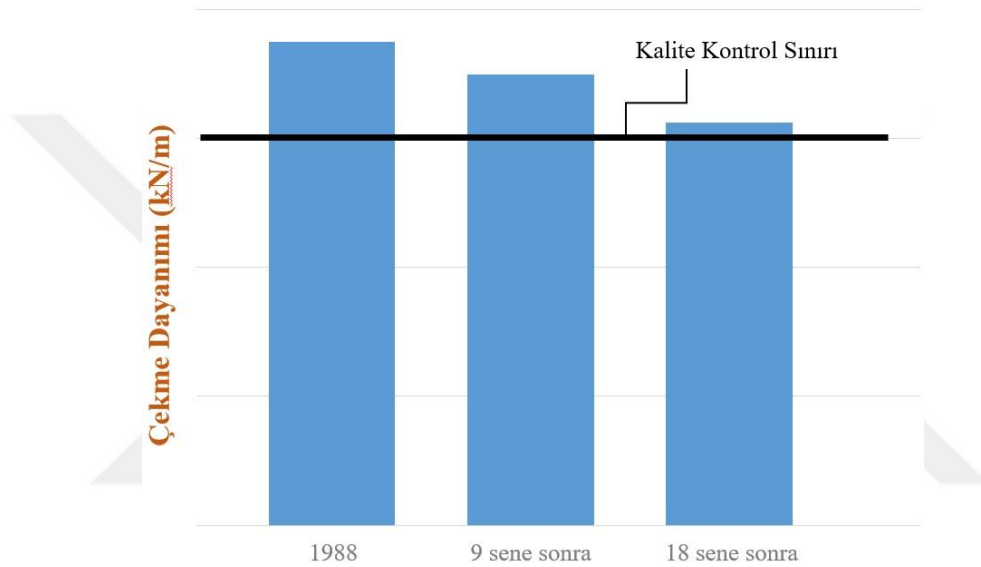


Şekil 3.5 Hochstadt ve Probstzella arası demiryolu hattı güçlendirme yapılmış ve geogrid ile güçlendirme yapılmamış balast yüksekliklerine ait deformasyon modülü değerleri (Penman vd. 2009).

İngiltere’de Shirland olarak bilinen bölgede 1988 yılında demiryolu güzergahı geogrid ile takviye edilmiş; 1997 ve 2006 yıllarında takviye edilen geogrid ürünlerden numuneler alınmıştır. Montajın yapıldığı tarihten, numune alındığı tarihe kadar demiryolu yaklaşık 200 milyon gros ton nakliye ve yolcu trenleri yükü trafiğine maruz kalmıştır. Travers tabanının yaklaşık 225 mm altına yerleştirilmiş olan geogrid ürünün çekme dayanımı özelliklerine bakılarak yıpranma değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirme

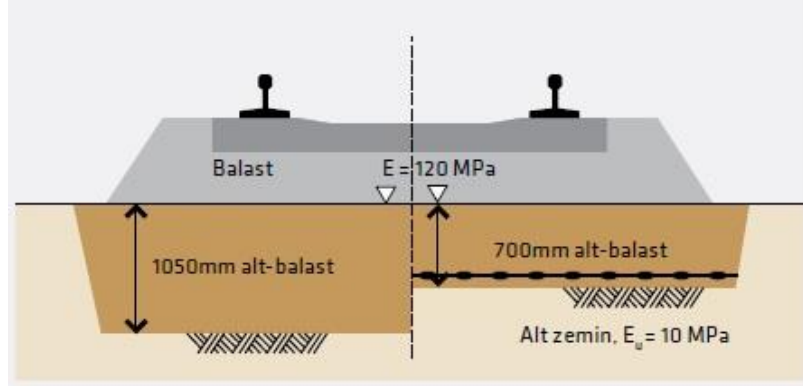
sonuçlarına göre geogridin çekme dayanımı özelliklerinin korunduğu ve kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir (Tensar 2014).

Kötü doğa koşullarına maruz kalmış olmasına rağmen geogridlerin servis ömrünün 20 yıldan fazla olduğunun kanıtlandığı bu uygulamada yılda birkaç kez yapılması zorunlu olan bakım çalışması aralıklarının da uzamasına yardımcı olduğu sahada görülmüştür (Tensar 2014).



Şekil 3.6 Geogridlerin 18 sene sonunda çekme dayanımı değişim grafiği (Tensar 2014).

Bunların dışında Köln’ de 2003 yılında gözlemlenen bir projede yumuşak taban zeminine sahip güzergâh için zemin güçlendirme amacıyla geokompozit ürün kullanılmıştır. Yapılan uygulama neticesinde altbalast kalınlığının 1050 mm’den 700 mm’ye düşürülmesi için imkân sağlamış ve balast destek değeri olarak belirlenen katsayı 120 MPa’ ı sağlamıştır.



Şekil 3.7 Güçlendirme yapılmamış ve güçlendirme yapılmış dizayn kıyaslaması (Tensar 2014).

2008-2009 yıllarında Güney Teksas'ta aktif olarak kullanılmayan yaklaşık 145 km. uzunluğundaki demiryolu hattının yeniden inşası söz konusu olmuştur. Yapılan fizibilite çalışmaları neticesinde mevcut altbalast tabakasının yıprandığı ve taban zemininin de yumuşak zayıf zemin olduğu tespitine varılmıştır. Bu şartlar göz önünde bulundurulduğunda 30 cm yüksekliğinde altbalast tabakasının oluşturulması gerekmiştir. Söz konusu bölgeye altbalast malzemesinin nakliyesinin en yakın Meksika veya Arkansas bölgelerinden sağlanabileceği bilindiğinden yapım maliyeti çok yüksek çıkmıştır. Alternatif olarak taban zemini ile altbalast tabakası arasında geogrid kullanılarak yapılan tasarım ile altbalast tabaka yüksekliği 15 cm' ye kadar düşürülmüştür. Bu da yapım maliyetlerinde ciddi bir düşüşe imkân sağlamıştır (Öztürk ve Ay 2013).

3.4.5 Geogrid Kullanımı Hakkında Yapılmış Akademik Çalışmalar

Fischer (2022), demiryolu hattı geometrisini stabilize etmek için 5 farklı geosentetik ürün ile bazı testler yapmıştır. 2010 yılında başlayan bu çalışma 11 yıl sürmüş ve geometri kayıt aracının yapmış olduğu ölçümleri bir araya toplayarak geogrid takviyesinin geometrik stabilizasyon etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmanın; saha testleri ile doğal demiryolu koşulları sırasında farklı geogrid ürünlerin güçlendirme etkisini değerlendirmek açısından avantaj sağladığı söylenebilir. Sonuçların değerlendirilmesi aşamasında araştırmacı; geogrid takviyelerinin dengeleyici bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamıştır ancak geometri stabilizasyonu için en kötü veya en iyi takviye sağlayan geogrid ürüne karar vermenin zor olduğunu belirtmiştir. Test edilen geogridlerin, geogrid takviyesi ile üst yapı stabilizasyonunu iyileştirmede faydalı

bir etkiye sahip olduğu ise kesin olarak ifade edilmiştir (Fischer 2022).

Sweta ve Hussaini (2020), yaptıkları çalışmada yükleme frekanslarının etkisini araştırmış olup; demiryolu hattında meydana gelecek yanal yer değiştirme, dikey oturma ve bozulmaların yükleme frekansından büyük ölçüde etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Geogridler balastın esneklik modülünü de önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte; yükleme sıklığı arttıkça geogridin verimliliğinin azaldığı yine bu çalışmada yapılan tespitlerdendir. Bu geogridlerin sadece belirli tren hızlarına kadar etkili bir şekilde çalışabileceğini ima etmektedir. Bu aslında demiryolu kuruluşlarına, belirli bir tür geogrid ile takviye edildiğinde bir rayın maruz kalabileceği maksimum tren hızı hakkında da fikir vermektedir. Yine bu çalışmada; çeşitli yükleme koşulları altında geogrid kullanımı ile balast hareketini kısıtlayan çeşitli araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalara da yer verilmiştir (Sweta ve Hussaini 2020).

Yu vd. (2019), tarafından dinamik yatay gerilim seviyelerinin yüksek olduğu yüksek hızlı demiryolu hattı numuneleri kombine olarak yatay ve dikey yönde döngüsel yüklemeye yapılarak laboratuvar testlerine tabi tutulmuştur. Balastlı demiryolu hattı için uygulanan üç eksenli basınç deneyi neticesinde geogridin balast ile altbalast arasına yerleştirildiğinde yaklaşık %35 oranda iyileşme gözlemlenmiştir. Geogrid ürünün altbalast ile taban yüzeyi arasına uygulanması halinde ise %10-15'lik bir zemin iyileştirmesi gözlenmiştir. Ayrıca CBR değeri düşük alt zeminlerde geogrid ürün kullanıldığında ise performansın daha da yükseldiği çalışma sonucunda görülmüştür (Yu vd. 2019).

Chen vd. (2017), ağır yüke sahip demiryolu araçlarının kullanıldığı bir demiryolu hattı dizayn ederek; geogrid kullanımı olmadan ve 32 mm - 26 mm göz aralığına sahip farklı aralıklarda ($d=10$, $d=15$ ve $d=20$ cm) geogrid ürünün kullanılması yardımıyla çalışmalarında geleneksel üç eksenli basınç dayanımı testleri yapmışlardır. Çalışmanın amacına ulaşabilmek adına Çin Demiryolu departmanının belirlediği sınırlar çerçevesinde uygun kriterlerde agrega ve diğer malzemelerin seçimi yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde geogrid kullanımının yol dayanımı için kritik sınırı üst değerlere taşıdığı ve geogrid ile takviye (katman) sayısının arttırılması ile sonuçların doğrusal bir

şekilde olumlu yönde arttığı gözlemlenmiştir (Chen vd. 2017).

Esmaili vd. (2018), tarafından laboratuvar testleri ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan bu araştırmada; yüksek hızlı demiryolu hatlarının stabilitesi ve karşılaşılabilecek olan oturmaların geogrid ürün kullanılması durumunda oluşacak etkilerin gözlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada geogrid takviyesi olmadan yapılan analiz ve bir ile dört kata kadar geogrid takviyesi yapılmış hali karşılaştırılmış ve sonuçlar buna göre değerlendirilmiştir. Tek bir geogrid tabakası ile güçlendirilmiş dolguların, takviyesiz dolguyla laboratuvar ortamında karşılaştırılması sırasıyla taşıma kapasitesinde %7,14 oranında artışa ve oturma yüzdesinde %11,24 azalma gözlemlenmiştir. İki, üç ve dört geogrid takviyeli zeminlerde ise sırası ile (%19 - %36,14), (%26,3 - %52,8) ve (%28,9 - %53,42) oranlarında iyileşmeler gözlenmiştir (Uğur 2019).

Yine Esmaili vd. (2018) yaptığı bu çalışmada; zemin stabilitesi ve oluşacak oturmaların, 5 metre tabaka kalınlığı için optimum geogrid katmanına ulaşıldığında geogrid sayısının daha fazla arttırılmasının zemini etkilemediği, gözlenen oranların tatmin edici değerlere ulaşmadığı grafiklerde görülmektedir. Ancak tabaka kalınlığı arttırıldıkça (10 metre - 20 metre) geogrid katman sayısının arttırılması haline, tabakalarda oluşan oturmaların da azaldığı görülmektedir. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi de geogrid katmanlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Uğur 2019).

Ngo vd. (2016), ayırık elemanlar yöntemi kullanarak geogrid ile güçlendirilmiş demiryolu balastının modellenmesi üzerine çalışmış ve büyük ölçekli doğrudan kesme kutusu ile yeni bir ray izleme simülasyon aparatı kullanılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen kapsamlı laboratuvar testlerine dayanarak, kesme dayanımı ve deformasyon açısından geogrid takviyeli balastın performansında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Ancak balastın kirlenmesine neden olan dış etkilerin mevcudiyeti halinde performansın olumsuz şekilde etkilendiği de bulunmuştur. Çalışma içerisinde balastın kirlenmesi halinde oluşacak etkilerin takip edilebilmesi için 1,5 mm çapında küreler halinde kömür taneleri balast içerisinde belli oranlarda kullanılmıştır. Bu çalışmanın deneysel sonuçları göstermiştir ki; geogrid kullanımı ile fazladan iç sınırlama sağlanmakta ve balast malzemesinin kenetlenmesi ile balastta oluşabilecek deformasyonlar da azalmaktadır (Ngo 2016).

Brown vd. (2007), geogrid takviyesini etkileyen temel parametreleri belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; trafik yükü altında farklı oturmaların oranı düşürülebilirse, balastlı demiryolu hatlarının bakım maliyetlerinin azaltılabileceği değerlendirilmiştir. Balast oturmalarının artması sürüş kalitesinin bozulması ve güvenliğin azalması ile sonuçlanmaktadır. Bu çalışmada, balasta geogrid takviyesinin yapılması neticesinde bakım işlemleri arasında geçen sürelerin 12 kata kadar artırılabilceği tespit edilmiştir. Neticede bakım maliyetlerinin azalması ile ekonomik anlamda çok iyi bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Yine bu çalışmadan alınan sonuçlardan biri de; geogrid takviyesinin etkisi, sert zeminlere kıyasla yumuşak bir zemin için daha belirgin güçlendirme sonuçları ile karşılaşılmıştır (Brown 2007).

Brown vd. (2007), geogrid ile birlikte yapıştırılmış veya bağlanmamış bir şekilde ilave geotekstil ürün kullanılmasının, güçlendirme mekanizmasına müdahale ederek güçlendirmenin olumsuz etkilendiğini belirtmiştir. Bunun hakkında ayrıca çalışma yapılması gerektiği değerlendirilmiş olup; bunun sebebi ikinci bir geosentetik ürünün kullanılması sonucu kenetlenme görevinin tam olarak yerine getirilememesinden kaynaklanabileceği tespitine varılmıştır (Brown 2007).

Hussaini vd. (2014), yaptığı çalışmada ise geogrid'in balast performansı üzerindeki faydalarını tespit etmek ve doğrulamak için modifiye proses simülasyon test cihazı kullanılarak geogrid ile güçlendirilmiş balast üzerinde büyük ölçekli drenajlı döngüsel testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, geogridin balastın yanal yayılmasını durdurduğunu, kalıcı dikey oturmanın boyutunu azalttığını ve partikül kırılmasını en aza indirdiğini göstermektedir. Indraratna vd. (2013), optimum geogrid yerleştirme konumunun altbalast-balast arayüzünün 65 mm üzerinde olduğu sonucuna varıldığı bu çalışmada belirtilmiştir (Hussaini vd. 2014).

Hussaini vd. (2014), çalışmasının içerisinde yer alan döngüsel yükleme altında balast oturmalarını azaltmada geosentetiklerin rolünün ortaya koyulduğu çalışmalara yer verilmiştir. Demiryolu üstyapısına geogrid ürün serildiğinde hız sınırının arttırılabildiği daha önce yapılmış çalışmaların incelenmesi sonucu bildirilmiştir. Daha önce aşırı yol

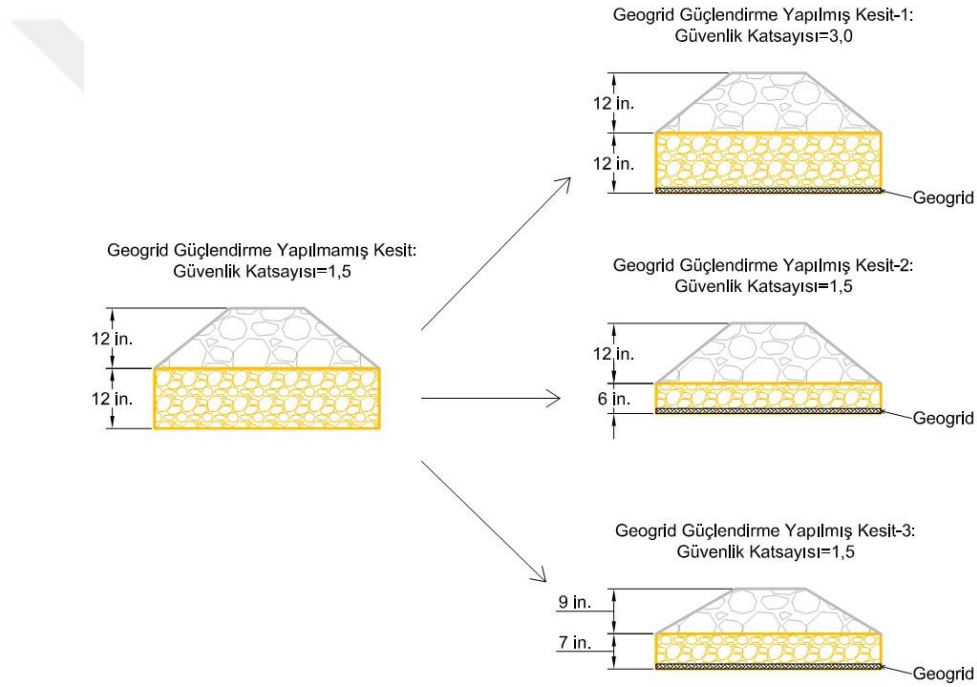
oturması açısından sorun teşkil eden bir yol kesiminde geogrid uygulaması sonucu hız limiti yaklaşık olarak 50 km/s arttırılmıştır. Bu çalışmada ise geogrid uygulaması sonucunda balastın ortalama yanal yer değiştirmesi 24 mm' den 5,49 mm' ye ve dikey oturması 26,89 mm' den 9,8 mm' ye düşmüştür (Hussaini vd. 2014).

Sadeghi vd. (2020), yapmış olduğu çalışmada farklı oranlarda kum ile kirletilmiş olan balast tabaka numuneleri geogrid ile güçlendirilmiş ve laboratuvar ortamında doğrudan kesme testleri ile plaka yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar; geogrid takviyesinin kirlenmiş balastın kesme mukavemetini ve düşey sertliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Rakamsal olarak geogrid takviyesi ile düşey sertlik %24 oranında artmış ve balast kesme mukavemetini %25 oranında arttırmıştır. Balastın kirlilik oranının %24'ü aşması durumunda ise geogrid takviyesinin yeterli etkinliğe sahip olmadığı ve balast temizliğinin yapılması gerektiği tavsiye edilmektedir (Sadeghi vd. 2020).

Çiçek (2020), farklı malzemeler ve geosentetik kullanarak yaptığı çalışmada kumlu silt ile yol dolgusu yapımında dolgu içinde geogrid ürün kullanılması halinde yol güvenlik katsayısının 1,5 kat arttığını gözlemlemiştir. Yaptığı çalışmada farklı malzemeler de kullanarak yol dolgu güvenliğini test etmiş ve farklı sonuçlara ulaşmıştır. Yani yol dolgusu için farklı malzeme kullanımı halinde geosentetik malzemenin de etkisi farklı olmaktadır. Zayıf malzemeler ile birlikte geogrid ürün kullanılması halinde yol güvenliğine karşı olumlu etki de artmaktadır (Çiçek 2020).

Küçükakyüz (2020), geogrid ürünlerin zemin güçlendirme sistemi olarak etkinliğinin ve güvenilirliğinin yapılar üzerindeki etkisinin de araştırıldığı bu çalışmada laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Farklı geogrid ürün konfigürasyonlarının kullanıldığı ve geogrid ürünün kullanılmadığı farklı deprem koşulları altında sismik davranışlar incelenmiştir. Yapılan testlerin neticesinde zemine geogrid malzeme takviye edilmesinin, geogrid tabakaları ile zemin arasında meydana gelen kenetlenme sayesinde; zeminden yapıya iletilen sismik enerjinin sönümlenmesinde pozitif etki yarattığı ve deprem neticesinde oluşabilecek olumsuz sonuçların geogrid kullanımı ile azaltılabileceği ortaya koyulmuştur (Küçükakyüz 2020).

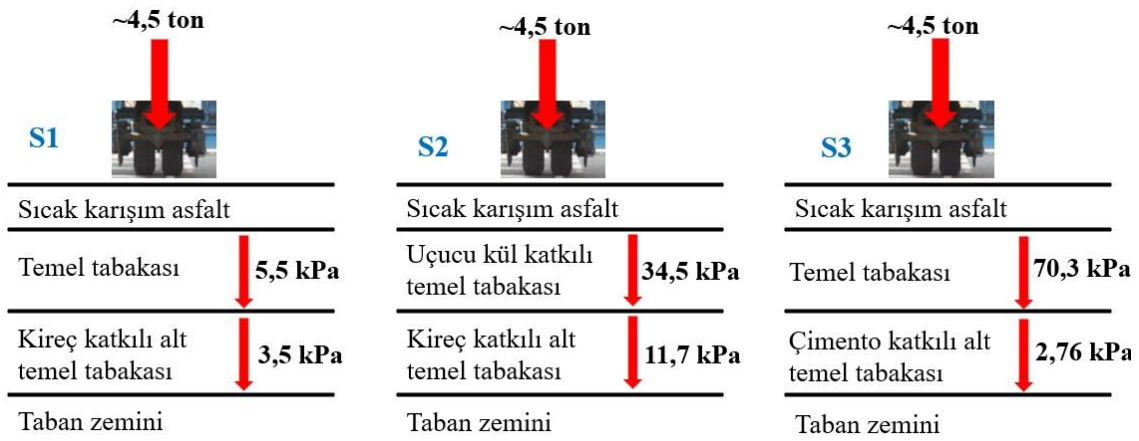
Yapılmış başka bir çalışmada; geogrid ürün kullanımı ile balast, altbalast tabaka kalınlıklarının azaltılması ve güvenlik katsayısı değişimi hakkında araştırma gerçekleştirmiştir. Kullanılan dolgu malzemesi örneği ve tasarlanan işletme koşulları altında gerekli görülen 30 cm (12 inç) yüksekliğe sahip balast tabakası ve yine 30 cm (12 inç) yüksekliğe sahip altbalast tabakası için geogrid ürün kullanımı sonrasında oluşturulan alternatif kesitler değerlendirilmiştir. Tabaka kalınlıklarının azaltılması ile yapım maliyetlerinin düşmesine ve inşaat süresinin kısalmasına doğrudan olumlu etki yaratılmaktadır (Ay 2014).



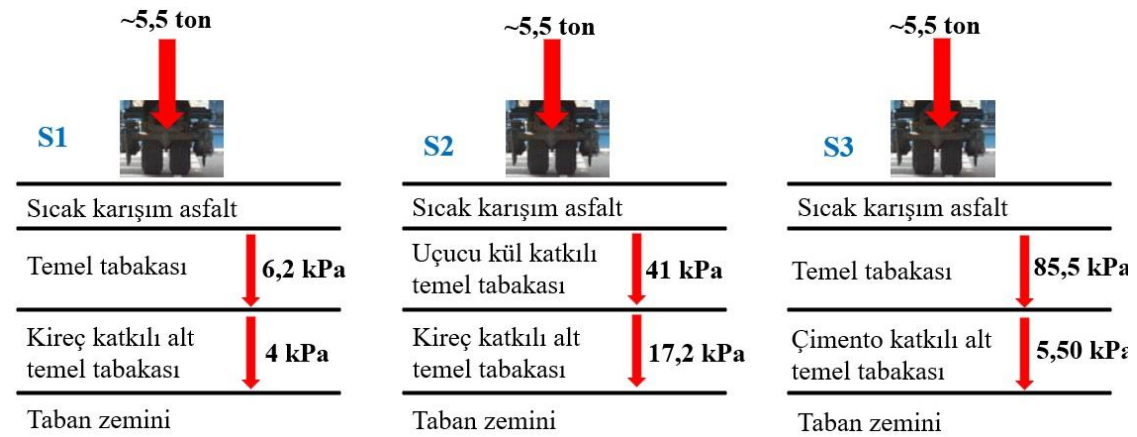
Şekil 3.8 Geogrid kullanımının balast ve altbalast tabaka kalınlıklarına olan etkisi (Ay 2014).

Wu (2007), stabilitesi sağlanmış temel ve alt temel malzemeleri içeren esnek kaplamaların hızlandırılmış yükleme altında yapısal performansını değerlendirmek amacıyla Louisiana ulaşım araştırma merkezinde bir çalışma yapmıştır. Yaklaşık olarak 30,5 metre uzunluğunda ve 55 ton ağırlığında, ayarlanabilir yüke sahip bir araç ile taşıt trafiği simüle edilmiştir. Tasarımda yol kesiti; 5,08 cm kaplama yüksekliği, 21,6 cm temel yüksekliği ve 30,5 cm alt temel yüksekliği olarak belirlenmiştir. Temel ve alt temel tabakalarında kullanılan malzeme türlerine göre yapılan testlerde; eşdeğer dingil yükü ve benzer tabaka kalınlıklarına sahip olan numuneler için farklı gerilmelerin meydana

geldiği görülmüştür. Yaklaşık 4,5 tonluk dingil yükü için temel tabakasına etki eden gerilmeler; en az 5 kPa iken, en çok 70,3 kPa olmaktadır. Alt temel tabakasındaki gerilmeler ise; en az 2,76 kPa, en çok 11,7 kPa olmaktadır. Yaklaşık 5,5 tonluk dingil yükü için ise temel tabakasında oluşan gerilmeler; en az 6,2 kPa, en çok 85,5 kPa olmaktadır. Alt temel tabakasındaki gerilmeler; en az 4 kPa, en çok 17,2 kPa olmaktadır (Wu 2007).



Şekil 3.9 Dingil yükü 4,5 ton için temel ve alt temel tabakalarında oluşan gerilme değerleri (Wu 2007).



Şekil 3.10 Dingil yükü 5,5 ton için temel ve alt temel tabakalarında oluşan gerilme değerleri (Wu 2007).

Hughes (1986), polimer geogrid takviyesinin asfalt kaplamalar üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi tam ölçekli deney gerçekleştirmiştir. Asfalt ara yüzeyinde geogrid takviyesinin etkisini incelemek için iki adet üstyapı inşa edilmiş ve büyük bir kesme kutusu testi geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, geogrid ürün kullanımı ile kalıcı

deformasyon oranında yaklaşık 3 kat azalma olduğu sonucuna varılmıştır. Kalıcı deformasyonu önlemek için, geogrid ideal uygulama noktasının bitümlü katmandaki maksimum kesme gerilmesi bölgesinde veya deformasyona duyarlı yapıların alt katmanlarında yani asfalt tabakasının altında olması gerektiği belirtilmiştir (Kwan 2006).

1990'lı yılların başında British Rail Research; tekrarlayan tren yükü altında balast malzemesinin yanal hareketini kısıtlaması amacıyla geogrid ürün kullanarak birtakım testler uygulamıştır. Araştırmada hattın oturması ve dikey hat geometrisinde yaşanacak bozulmalar incelenmiştir. Test parkuru bu araştırma için balast katmanı içinde geogrid takviyeli ve herhangi bir geogrid takviyesi olmadan şeklinde kısımlara ayrılmıştır. Oluşturulan parkura 2 milyon gros ton yükü simüle etmek amacıyla 40 tonluk silindir yük ekipmanı kullanılarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları geogrid takviyesinin yumuşak bir alt zemin üzerinde bulunan balastlı tabaka ile sert zemin üzerinde bulunan geogrid takviyesiz balastlı tabakanın eşdeğer performanslar sergilediğini göstermiştir. Geogrid ürünlerin ayrıca %40 oranında elastik eğilmeyi azalttığı görülmüştür. Bu bakım masrafları ve oluşacak ray deformasyonlarına karşı önemli bir tespit olmaktadır (Kwan 2006).



Resim 3.18 British Rail Research tarafından yapılan araştırmaya ait test düzeneği (Tensar 2014).

Nottingham Rail Test tesisi 2006 yılında sonuçlanan ve tam ölçekli bir demiryolu hattının 3 travers uzunluğundaki bir bölümünü kapsayan birtakım testler yapmıştır. Yapılan çalışmada üç adet hidrolik hareket mekanizması yardımıyla hareket eden dinamik bir yük simüle edilmiştir. Bu testte geogrid takviyesi olmadan ve farklı farklı iki noktada (balast tabakasının tabanına ve balast tabakasının içine) geogrid takviyesi yapılmış şekliyle bir

milyonluk döngü uygulanmıştır. Araştırma sonunda oluşan oturma değerleri ölçülmüş ve sonuçlar daha küçük ölçekli testler ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Araştırma sonuçları göstermiştir ki; geogrid kullanımı ile hat bakımı müdahale aralığı 2,5 kata kadar artmaktadır (Tensar 2014).



Resim 3.19 Nottingham Üniversitesi Rail Test simüle edilen tren yükü düzeneği (Tensar 2014).

Raymond (2002), tekrarlanan yüklemeye maruz kalan geogrid ile güçlendirilmiş balast tabakasının davranışını incelemiştir. Yapılan araştırma neticesinde kalıcı oturmaların %13-30 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. Temel tabakasının zayıf olduğu durumlarda daha büyük bir gelişme gözlemlendiği kaydedilmiştir. Demiryolu hattına geogrid takviyesi yapılmasının mevcut 3 aylık bakım periyodunun, 3 yıldan fazla bir periyoda uzatılabileceği sonucuna varmıştır. Yapılan testler gerçek bir demiryolu hattının küçültülmüş bir versiyonu olmasından kaynaklı olarak; bulguların literatürün geri kalanı ile karşılaştırıldığında tutarlı olsa da sonuçların gerçekçi olmayabileceği belirtilmiştir (Raymond 2002).

Hali hazırda yapılmış olan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda demiryolu güzergahlarında geogrid kullanımı iki şekilde ön plana çıkmaktadır. İlk olarak, demiryolu güzergahlarının inşası sırasında kaliteli malzemeye sahip arazi alanlarının kısıtlı olması durumunda daha iyi stabiliteye sahip güzergâh inşa etmek için geogrid ürün kullanılarak arazi korunabilir. İkinci olarak, mevcut demiryolu güzergâhı üzerinde işleyen demiryolu araçlarının çalışma hızını ve dingil yükünü arttırmak amacıyla geogrid takviye edilerek stabiliteyi kontrol altına almak ve oturmayı azaltmak için kullanılabilir.

4. DEMİRYOLU

Bir yerden başka bir yere madeni yol üzerinde, mekanik bir güçle hareket ettirilen araçlar içerisinde, insan ve eşya taşınmasını sağlayan tesislerin tümüne birden demiryolu denir (Bilgiç 2017). Bir demiryolu hattı tasarlanırken amaç; hareket halindeki aracın, merkezciil kuvvetlere karşı direnen kuvvetlerin dengesinde, ivmelenme durumunda yolculuk konfor faktörünün olumsuz etkilenmesini önlemeye çalışmaktadır. Bu sebeple hat geometrisi; hat eğimi, dever, eğrilik yarıçapı, azami hız gibi parametreler sınır değerlere sadık kalacak şekilde belirlenir (Akıllı Törer 2019).

4.1 Demiryolunun Tarihsel Gelişimi

İlk demiryolu M.Ö. 600 yıllarına dayanan Eski Yunan dönemine ait ve oluklu izlere sahip granit yollar sayılmaktadır. Demiryolunun atası sayılan bu yollar ahşap tekerlekli araçlar yardımıyla gemilerin ve yüklerin taşınmasında kullanılmıştır. Bu yolların uzunluğu 6 ile 8,5 km arasında değişmektedir. İz genişliği ise günümüzde UIC (Uluslararası Demiryolu Birliği) standartları ile belirlenmiş olan 1435 mm'lik yol açıklığına çok yakın bir değer olup; 1500 mm'dir (Bilgiç 2017).



Resim 4.1 Oluklu granit yollar (Bilgiç 2017).

1550 yılında “Hund” olarak adlandırılan elle itilen tekne tipi vagonlar Almanya’da madenlerle kullanılmış, sonrasında ise İngiliz madenciler tarafından da kullanılmaya başlamıştır. Aynı tarihlerde Fransız madenciler tarafından da Alsace şehrinde metal kılavuzlar üzerinde hareket eden araçlar kullanılmıştır. Huntingdon Beaumont ve Sir

Percival Willoughby tarafından 1603 – 1604 yılları arasında yeryüzündeki ilk ahşap kılavuzlu yollar inşa edilmiştir. İngiltere'nin Nottinghamshire şehrinde madenlerin taşınmasında kullanılan bu yollar 3,2 km uzunluğa sahip olup; Wollaton Wagonway olarak anılmaktadır.



Resim 4.2 Fransa Alsace madenleri ve İngiltere ahşap yolda kullanılan vagonlar (Bilgiç 2017).

Günümüz demiryollarının öncüleri, 18. yüzyılın sonu ile 19. yüzyılın başlarında ortaya çıkmıştır. 1803 yılında Galler'deki bir maden ocağında raylardan meydana getirilmiş lokomotif yürütülmüştür. Bunu ilk başaran İngiliz mühendis Richard Trevithick'tir. 6 Ekim 1929'da Liverpool ile Manchester arasında demiryolu hattı inşa edilmiştir. Başlangıçta yük taşımacılığı için planlanan bu yol yolcu taşımacılığında da talep görünce demiryolunun gelişimi bu noktada hızlanmıştır. 1850 yılında ABD'de 14500 km'lik demiryolu hattı mevcutken; 1890 yılında 209000 km'lik demiryolu hat uzunluğuna sahip olunmuştur. Ülkemizde ise 1856 yılında İngilizler tarafından başlanan 130 km'lik İzmir-Aydın demiryolu hattı 1866 yılında hizmete açılmış ve ülkemiz demiryolu ile tanışmıştır. TCDD 2021 yılı istatistik verilerine göre Türkiye toplam demiryolu hat uzunluğu 13022 km'ye ulaşmıştır (Bilgiç 2017, TCDD 2022).

4.2 Demiryolu Üstyapı Elemanları

4.2.1 Balast

Traverslerden alınan yükü yayarak bir alt tabakaya ileten, yolda elastik bir tabaka oluşturan, 31,5 mm ile 63 mm arası ebatlarda sert ve sağlam bazalt veya granit taşların

kırılması neticesinde keskin köşeli ve keskin kenarlı kübik şekilli malzemeye balast denir (TCDD 2018, Ünal 2019).

Ocaktan elde edilen balast malzemesinde aranan şartları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Atmosfer şartlarına karşı direnci yüksek olmalı,
- Aşınmaya karşı yüksek sertlik ve mukavemete sahip olmalı,
- Noktasal dinamik ve statik basınçlara karşı yüksek dirençli olmalı,
- Sürtünme direnci ve içsel sürtünme açısı yüksek olmalı,
- Uygun stabiliteye sahip ve drenaj kabiliyeti yüksek olmalı,
- Masif yapıda ve homojen olmalı,
- Zararlı bileşen, kil ya da toprak içeriği bulundurmamalı,
- Yuvarlak, pürüzsüz dere çakılı kullanılmamalıdır.

Balast agregası ana hatlar için Çizelge 4.1’de verilen gradasyon aralığında, 31,5 – 50 mm arasında kalan malzeme miktarı da toplam malzemenin en az %50’sini kapsayacak şekilde üretilmelidir.

Çizelge 4.1 Balast malzemesi gradasyon sınır değerleri (TCDD 2020).

Kare Gözlü Elek Açıklığı (mm)	HT ve YHT Hatları	Konvansiyonel Hatlar
	% Geçen	
63	100	100
50	70-99	70-99
40	30-65	30-65
31,5	1-25	1-25
22,4	0-3	0-3
0,5	≤ 0,6	≤ 1
0,063	≤ 0,5	≤ 0,5

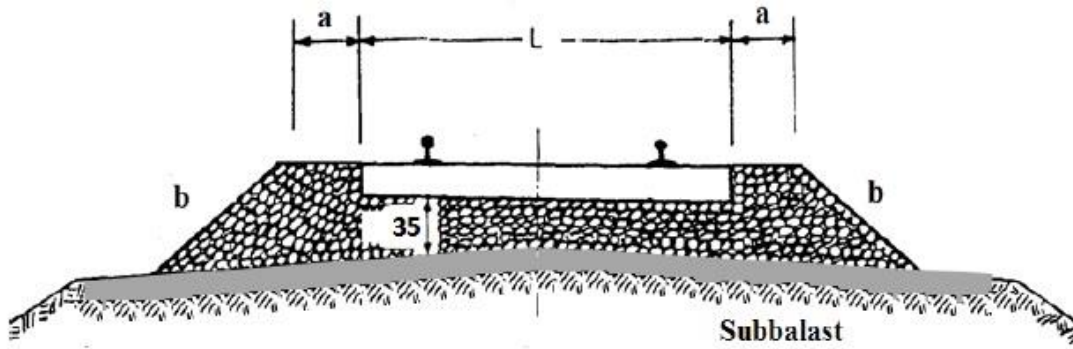
Balast malzemesinin ana işlevleri şu şekilde sıralanabilir; tren yükünden gelen gerilmeleri absorbe edip azaltarak altbalast katmanına dağıtmak, raya yanal sınırlama sağlamak ve serbest drenaj koşulu sağlamak. Tren yüklerinin tekrarlanması ile zaman içerisinde balast

bozulur ve yanal olarak yayılarak ray dengesizliğine neden olur. Ayrıca, aşamalı olarak balastın deformasyona uğraması, ince parçacıkların karışması ve alt zeminden çamur pompalanması nedeniyle balast kirlenir ve bu da balastlı hatların gücünü ve deformasyonunu zamanla olumsuz etkilemektedir (Ngo vd. 2016).

TCDD Hat Bakım El Kitabı (2013) balast profili dizayn değerlerini şu şekilde belirtmiştir;

Çizelge 4.2 Balast profili dizayn değerleri (TCDD 2013).

Balast Profili	Dizayn Değerleri
Balast omuz genişliği (a)	HT ve YHT hatlarında en az 50 cm
	Ray boyu $L \leq 36$ m olan konvansiyonel hatlarda en az 30 cm
	Ray boyu $L > 36$ m olan konvansiyonel hatlarda en az 40 cm
	Makaslar, izole contalar ve hassas noktalarda en az 50 cm
	500 m $< R < 2000$ m olan kurplarda en az 50 cm
	$R \leq 500$ m olan kurplarda en az 60 cm
Balast şev eğimi (b)	Konvansiyonel hatlarda en fazla (4/5)
	HT ve YHT hatlarında en fazla (2/3)
Travers altı balast kalınlığı	Tüm hatlarda en az 35 cm
	Tüm hatlarda en fazla 50 cm



Şekil 4.1 Tek hatlı yollarda balast enkesiti (TCDD 2013).

4.2.2 Travers

Raylardan gelen yüklerin daha geniş bir yüzeyde yayılmasını sağlayarak balast tabakasına ileten, yolun açıklığını koruyan, yanal kuvvetlere karşı yolun ekseninde kalmasını sağlayan, rayın altına döşenmiş yol üstyapı malzemesine travers denir (Yücel 2009).

TCDD Hat Bakım El Kitabına göre, traversler arası mesafe dizayn değeri, UIC 60 (60 E1) ve daha büyük kesitli rayların kullanıldığı demiryolu hatlarında 60 cm; diğer rayların kullanıldığı hatlarda ise 62 cm olmalıdır. Uygulamada ise; tüm ray tipleri için konvansiyonel demiryolu hatlarında 62 cm ve HT – YHT hatlarında 60 cm travers aralığı tercih edilmektedir. Travers aralıkları belirlenen değerlerden daha az olabilir ancak bu durumda maliyetler artacak ve bakım çalışmaları sırasında zorluklarla karşılaşılacaktır (TCDD 2018).

Ahşap, demir, beton ve plastik olmak üzere 4 çeşit malzemeden imal edilen traversler genel olarak şu özellikleri taşımaktadır;

- Basınca ve aşınmaya karşı dayanıklı olmalı,
- Bükülme direnci yüksek olmalı,
- Yeterli seviyede esnekliğe sahip olmalı,
- Plastik deformasyonlara uğramaması için yeterli seviyede sertliğe sahip olmalı,
- Hava ve diğer dış etkenlere karşı dayanıklı olmalıdır (Ünal 2019).

Demiryollarında ilk yıllarda tercih edilmeye başlanan ahşap traversler; çam, kayın, meşe, okalıptüs ve azobe ağaçlarından imal edilmiştir. Bu dönemde ahşap traverslerin esnek olmasının avantajından faydalanılmış ve raylardan gelen yükleri yaylanarak karşılamıştır. Ancak ormanların azalması, üretim maliyetlerinin fazla olması, yüksek hız yapılan demiryolu hatları için uygun olmaması ve dış etkenlere karşı yeterince dayanıklı olmaması sebebiyle alternatif olarak çelik traversler üretilmiştir (TCDD 2018, Akıllı Törer 2019).



Resim 4.3 Ahşap travers (İnt. Kyn. 17).

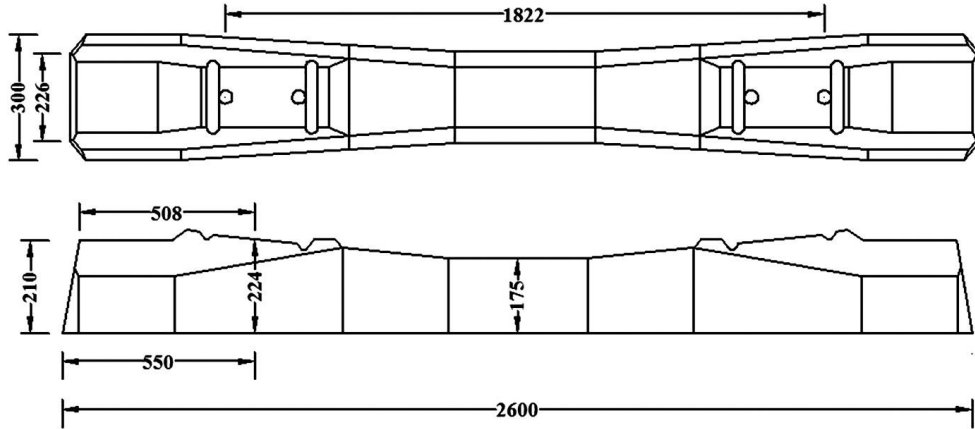
Ahşap traverslere göre daha hafif, rijit ve yanmaya karşı dayanıklı olan çelik traversler; iletken olmaları nedeniyle sinyalli bölgelerde kullanımı mümkün olmaması, rutubete karşı dayanıksız olması, gürültülü ve konforsuz bir yolculuğa neden olması ve hafif olması sebebiyle yerini ağır dingil yükünü karşılayabilecek beton traverslere bırakmıştır. Bazı demiryolu işletmeleri tarafından (özellikle Güney Amerika ülkeleri) hala tercih edilmektedir (TCDD 2018, Akıllı Törer 2019).



Resim 4.4 Çelik travers (TCDD 2018).

Özel çimento ve çakıl kullanılarak, içinde bulunan çelik gergi çubuklarının gerilmesi suretiyle ön gerilmeli veya ard germeli beton olarak imal edilen beton traversler; yüksek hızlı tren işletmeciliği ve ağır yük taşımacılığına en uygun travers türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton traverslere esneklik kazandırmak amacıyla ray tabanının altına isabet eden bölgede plastik seletler veya daha kalın plastikten mamul pedler kullanılmaktadır. Beton traversler tipleri bakımından mono blok beton traversler ve ikiz bloklu beton traversler olmak üzere iki ana grubu ayrılmaktadır (Akıllı Törer 2019, Ünal 2019).

Ülkemiz demiryollarında üretiminin kolay olması ve maliyetinin düşük olması sebebiyle Şekil 4.2’de gösterilen mono blok beton traversler tercih edilmektedir. Mekanik dayanım olarak ikiz bloklu beton traverslere, geometrik yapı olarak ise ahşap traverslere benzerler. İkiz bloklu beton traverslere göre daha az donatı barındırır ve daha hafiftir. Mono blok beton traversler Türkiye dışında; Çin, ABD, İngiltere Japonya gibi birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır (TCDD 2018).

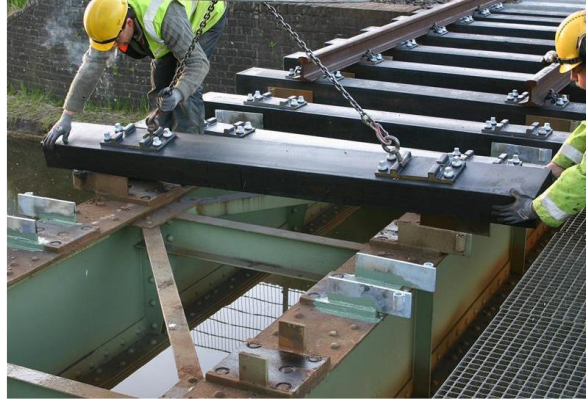


Şekil 4.2 Demiryollarında kullanılan mono blok beton travers (Ünal 2019).



Resim 4.5 Mono blok beton travers (TCDD 2018).

Avrupa Birliği tarafından, 2018 yılında çevre koruma önlemleri kapsamında kreozot kullanımının sınırlandırılmasını ön gören karar ile alternatif olabilecek travers uygulamalarına hız verilmiştir. 2015 yılında Fransa’da ahşap travers kullanımının azaltılması amacıyla 335.000 adet ahşap travers kaldırılmış yerine beton travers monte edilmiştir. 2016 yılından itibaren ise yıllık 810.000 adet ahşap travers kaldırılmış ve yerine beton traversler monte edilmiştir. Benzer şekilde 2005 yılından itibaren Hollanda’da da ahşap traversler yerine alternatif travers yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. 2010 yılından itibaren ise ahşap travers yerine plastik travers uygulaması yaygınlaşmıştır. Plastik traverslerin; köprüler, makaslar ve normal yollar için üretilen tipleri mevcuttur. Kalıp içerisine erimiş plastik dökülerek imal edilir (Kozak 2020, İnt. Kyn. 18).

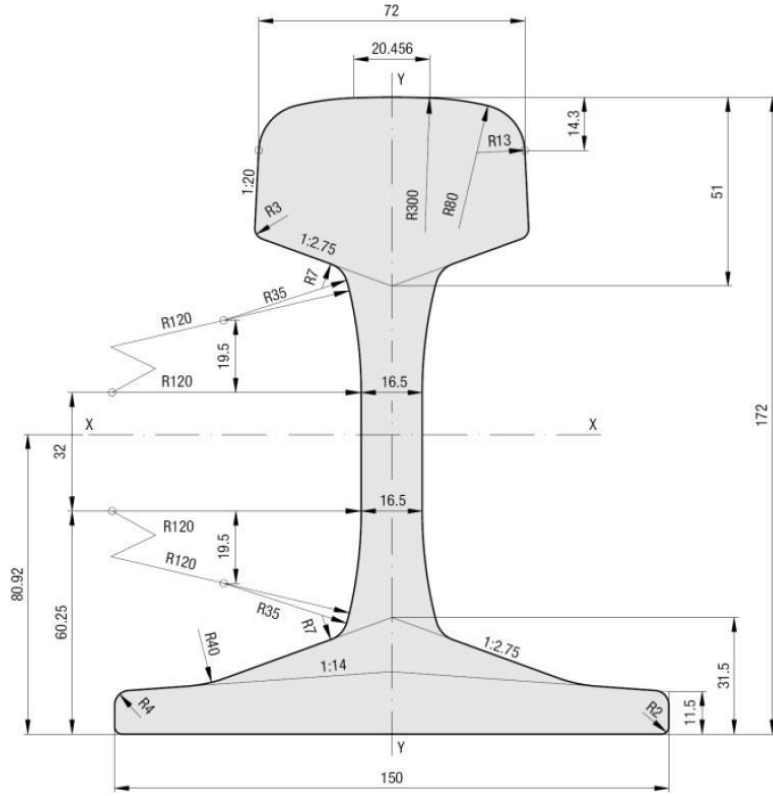


Resim 4.6 Plastik travers (TCDD 2018).

4.2.3 Raylar

Raylar demiryolu çeken ve çekilen araçlara ait tekerleklerle kılavuzluk sağlayan, dingillerden gelen kuvvetlere doğrudan maruz kalan ve dikey, yatay, boyuna gelen kuvvetleri traverslere ileten çelik malzemeden üretilmiş üstyapı malzemeleridir. Rayların etki eden kuvvetlere karşı dayanım gösterebilmesi için; aşınmaya karşı yeterli dayanımı sağlayacak kadar sert, ancak darbeler ve üzerine gelen yükler nedeniyle oluşabilecek şekil değişimleri nedeniyle hemen kırılmayacak kadar yumuşak bir çelikten imal edilmesi gerekmektedir.

Demiryollarının tarihsel gelişimine paralel olarak çeşitli şekil ve boyutlarda raylar tasarlanmıştır. Günümüzde tüm dünya demiryollarında, tasarımcısının ismini taşıyan ve Vinyol (Vignol) tipi olarak adlandırılan düz tabanlı raylar kullanılmaktadır. Vinyol tipi raylar; mantar, gövde ve taban olarak 3 bölümden oluşmaktadır. Raylar; profil özelliklerine göre ve çelik kalitesine göre sınıflandırılmaktadır. Profil özelliklerine göre raylar, bir metresinin ağırlığı baz alınarak isimlendirilmektedir. Ülkemiz demiryollarında 60 E1 adıyla isimlendirilmiş ray tipi kullanılmaktadır. Şekil 4.3'te bu ray profiline ait bilgiler verilmiştir (TCDD 2018).



Şekil 4.3 Vinyol tipi ray profili 60 E1 (Erdi 2022).

Çizelge 4.3 Rayların profillerine göre sınıflandırılması (TCDD 2018).

Ray ismi	Rayın birim ağırlığı		Taban genişliği	Yüksekliği	Mantar genişliği
60 E1	TCDD 15. seri	60.340 kg/m	150 mm	172 mm	72 mm
	EN 13674-1	60.210 kg/m			
60 E2	EN 13674-1	60.030 kg/m	Mantar profili farklı makas rayı		
49 E1	TCDD 15. seri	49.430 kg/m	125 mm	149 mm	67 mm
	EN 13674-1	49.390 kg/m			
49 E2	TCDD 15. seri	49.050 kg/m	125 mm	148 mm	67 mm
	EN 13674-1	49.100 kg/m			
46 E2	TCDD 15. seri	46.303 kg/m	134 mm	145 mm	64 mm
	EN 13674-1	46.270 kg/m			
S 39	TCDD 15. seri	39.520 kg/m	120 mm	138 mm	62 mm

* Ülkemiz demiryollarında 60 E1 isimli ray tercih edilmektedir. İstasyon yolları ve tali yollarda ise 49 E1 halen kullanılmaktadır.

Çizelge 4.4 Rayların çelik kalitelerine göre sınıflandırılması (TCDD 2018).

Çelik türü	Ray kalitesi	Sertlik aralığı HBW	Asgari çekme mukavemeti (N/mm ²)
R 260	900 A	260 – 300	880
R 260 Mn	900 B	260 – 300	880
R 320 Cr (%1)	1100	320 – 360	1080
R 350 HT	900 A (HH)	350 – 390	Mantar : 1175 Taban ve gövde : 880

* HBW – Brinell sertlik birimi

Demiryolu hatlarında kullanılacak raylar için gereksinimler şu şekilde sıralanabilir;

- Ray ve tekerlek arasında optimum temas alanı sağlamak ve oluşacak temas gerilimlerini azaltmak için ray mantarı geniş yuvarlanma yüzeyine sahip olmalıdır,
- Optimum mukavemet sağlanması, bükülme sertliği ve korozyonu engellemek amacıyla kalın ray gövdesine sahip olmalıdır,
- Rayın stabilitesini sağlamak ve korozyona karşı maksimum direnci sağlamak için geniş ray tabanına sahip olmalıdır,
- Ray yüksekliği ile ray tabanı genişliği arasında optimum değerler sağlanarak devrilmeye karşı stabilite olmalıdır,
- Rayın ağırlık merkezi, ray yüksekliğinin orta noktasına yakın olmalıdır,
- Ray dikey ve yatay yönlerde yüksek atalet momentine sahip olmalıdır,
- Ray kesiti geçişleri yuvarlatılarak içbükey geçişler sağlanmalıdır (Fischer vd. 2015).

4.2.4 Bağlantı Elemanları

Bağlantı elemanları; rayları, raya veya traverse bağlayan, stabilitesi yüksek bir çerçeve ve elastik bir bağlantı oluşturulmasına yardımcı olan, raydan gelen yüklerin traverslere veya raydan raya iletilmesine olanak sağlayan ve hattın bozulmasına engel olup rayların şekil ve yer değiştirmesini engelleyen üstyapı malzemeleridir.

Rayı raya bağlayan bağlantı elemanları; cebire, cebire bulonu, rondela ve deliksiz rayların

bağlantısında kullanılan kör cebire mengenesinden oluşmaktadır. Son dönemlerde cebire kullanımı yerine bakım masraflarının azaltılması, konforlu bir ulaşım sağlamak ve ray geçişleri sırasında zamanla çeken ve çekilen araçlarda oluşan arıza ve yıpranmaları azaltmak amacıyla ray kaynağı yapılmaktadır. Ray kaynağı olarak demiryollarında yaygın olarak; elektrikli direnç alın kaynağı ve alüminotermite ray kaynağı kullanılmaktadır (Erdi 2022, TCDD 2018).



Resim 4.7 Rayı raya bağlayan cebire bağlantı elemanı ve ray kaynağı örneği.

Dünya geneli ve ülkemizde, geçmişten günümüze kadar çok çeşitli ray – travers bağlantı şekilleri kullanılmıştır. Ancak son dönemde ağır yük taşımacılığında ve yüksek hızlı tren işletmeciliğinde yaygın olarak “HM” tipi bağlantı tercih edilmektedir. Bu bağlantı sistemi modern ve tam elastik olup; gergi kısılacı, aç kılavuzu, plastik selet, tirfon ve besleme rondelasından oluşmaktadır (İnt. Kyn. 19).



Resim 4.8 Rayı traverse bağlayan “HM” tipi bağlantı (İnt. Kyn. 19).

Bunun dışında dünya genelinde ve ülkemizde kent içi raylı sistemlerinde farklı tiplerde elastik bağlantılar mevcuttur. Bunlardan en bilinenleri; pandrol ve nabla isimli bağlantı sistemleridir. Bu bağlantı sistemlerinden pandrol sistemi ülkemiz kent içi raylı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Resim 4.9 Pandrol ve nabla tipi rayı traverse bağlayan bağlantı sistemleri.

4.3 Demiryoluna Etki Eden Kuvvetler

Demiryolu çeken ve çekilen araçların tekerlekleri ve raylar arasındaki dinamik etkileşimler; demiryolu, çeken ve çekilen araçların özellikleri yani araçların statik ve dinamik yük değerleri, işletme koşulları ve çevresel koşulların bir fonksiyonudur. Demiryolu araçlarını hareket ettirmek için uygulanan kuvvetler statik yük ve statik yükün üzerine ilave edilen dinamik bileşenlerin kombinasyonudur. Demiryolunda oluşan maksimum gerilme ve şekil değiştirme; statik yükü arttıran bir katsayı vasıtasıyla ifade edilen dinamik yükleme altında gerçekleşmektedir. Dinamik yük ile statik yük arasındaki farkı dinamik artış belirlemektedir (Bayrak 2018).

Yük parametrelerine bağlı olarak yolun taşıma gücü ve kalite gereksinimleri belirlenmektedir. Dingil yükü (dingil başına düşen statik yük), tonaj yükü (dingil yüklerinin toplamı) ve hareket hızı yük parametrelerini oluşturan bağıntılardır (Esveld 2001).

Çizelge 4.5 Demiryolunda uygulanan dingil yükleri (Esveld 2001).

Demiryolu Taşıtı	Dingil Sayısı	Boş Ağırlık	Dolu Ağırlık
Tramvay	4	50 kN	70 kN
Hafif raylı	4	80 kN	100 kN
Yolcu vagonu	4	100 kN	120 kN
Motorlu yolcu vagonu	4	150 kN	170 kN
Lokomotif	4 veya 6	215 kN	-
Yük vagonu	2	120 kN	225 kN
Ağır yük vagonu (ABD, Avustralya)	2	120 kN	250-350 kN

4.3.1 Dikey Kuvvetler

Demiryolu araçlarının kendi ağırlıkları ile ray ve tekerleklerden çeşitli sebeplerle raya gelen kuvvetler dikey kuvvetler olarak anılmaktadır. Demiryolu araçlarının hızı, statik tekerlek yükü ve tekerlek çapı, demiryolu aracının kütlesi ve durumu, yolun birleşim yerleri, yolun geometrisi, yolun yapısal durumu ve balast, altbalast özellikleri dikey kuvvetlerin büyüklüğünü etkileyen önemli faktörlerdir.

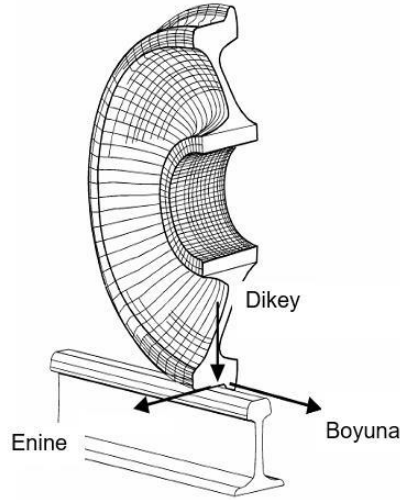
Demiryolu araçlarından kaynaklanan dikey tekerlek kuvveti, travers sayısına bağlı şekilde dağıtılır. Travers sayısına, travers aralığına ve ray atalet momentine bağlı olarak etki eden dikey kuvvetler sönümlenir. Dikey kuvvetler karşısında ray ve travers elastik davranış gösterirken, balast ve altbalast tabakaları elastoplastik davranış sergilemektedir (Ay 2014).

4.3.2 Yatay (Enine) Kuvvetler

Merkezkaç kuvveti, merkezcil kuvvetler, basit harmonik hareketten kaynaklanan yönlendirme kuvveti, rüzgâr kuvveti, boden kesme kuvveti ve laşe hareketi yani bandajın eğimli yapısı ve yol ile araç arasındaki ekartman farkı nedeniyle tekerleklerin yol içinde yaptığı düzenli ve periyodik salınımlar gibi kuvvetlerdir.

4.3.3 Yatay (Boyuna) Kuvvetler

Aderans adı verilen tekerleğin rayda dönmesi ve tutunabilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, belli bir hızda giden trenlerin maksimum ivme ile yavaşlaması yani frenaj etkisi, belli bir hızda giden veya duran trenlerin maksimum ivme ile aniden hızlanmaları yani demeraj, sıcaklık değişimleri sonucu oluşan ileri geri hareketler, contalardaki mevcut düşük ve/veya çok açık imbisat payı sonucu meydana gelen kuvvetler boyuna kuvvetleri etkileyen önemli faktörlerdir.



Şekil 4.4 Demiryolu hattına etki eden kuvvetler (TCDD 2018).

Yola etki eden dikey, yatay(enine), yatay (boyuna) kuvvetlere karşı demiryolu hattı da karşı bir direnç sergiler. Üstyapı elemanlarının fiziksel yapısı, kimyasal özellikleri, bağlantı sistemleri ve yolun geometrik yapısı bu karşı direncin boyutunu oluşturan faktörlerdir. Yola etki eden kuvvetler, yolun karşı direncinden küçük olduğu sürece herhangi bir sorun ile karşılaşmaz. Ancak yola etki eden kuvvetler, yolun karşı direncinden büyük ise yolda arızalar meydana gelmektedir. Ayrıca yolun direnci yeterli büyüklükte bile olsa, dinamik yükler ve atmosferik etkiler nedeniyle çalışan bir demiryolu için zamanla meydana gelecek arızalar kaçınılmazdır. Düzgün olmayan yol geometrisi, demiryolu çeken ve çekilen araçların ve yol bileşenlerinin bozulmasına, yolcu konforunun azalmasına, demiryolu araçlarının işletme hızlarının düşürülmesine ve ileri aşamalarda deray adı verilen raydan çıkmalara neden olmaktadır. Demiryolu hatlarının

bakım maliyetleri, toplam kullanım ömrü maliyetlerinin yaklaşık olarak %70'ini oluşturmaktadır (Tacıroğlu vd. 2022).

4.4 Demiryolunda Meydana Gelen Bozulmalar

Demiryolu üstyapı arızaları mekanik ve geometrik arızalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Mekanik arızaları; ray arızaları, traverslerde görülen arızalar ve bağlantı malzemesi arızaları olarak sıralamak mümkündür. Geometrik arızalar ise; düşey eksen arızaları ve yatay eksen arızalarından oluşmaktadır.

4.4.1 Mekanik Arızalar

Demiryolu çeken ve çekilen araçlardan kaynaklanan ve yola etki eden kuvvetlerin hat üzerinde ilk karşılandığı bölüm üstyapı olması sebebiyle demiryolu işletmeciliğinde en sık rastlanan arızalar üstyapı malzeme arızaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu arızalar; yol üstyapı malzemelerinin eskimesi, yıpranması, aşınması, çatlaması, çürümesi, kırılması, bağlantı malzemelerinde meydana gelen gevşemeler, laçkalaşmalar ve fiziki özelliklerin yitirilmesi şeklinde sıralanabilir.

4.4.1.1 Raylarda Görülen Arızalar

Ray üst yüzeyinde oluşan az ya da çok miktarda düzlemsel bozukluklara ray aşınması (ondülasyon) adı verilmektedir. Ondülasyon arızaları tüm demiryollarında ve kent içi raylı sistemlerde aks yüklerine bağlı olmaksızın, farklı işletme hızlarında meydana gelebilmektedir. Demiryolu işletme güvenliğini rayların yuvarlanma yüzeyinin kalitesi doğrudan etkilemektedir. Raylarda oluşan aşınma; demiryolu araçlarında ve çevre yapılarda gürültü ile titreşime neden olarak yolculuk konforunu olumsuz etkilerler. Ayrıca yol üstyapısında meydana gelen dinamik etkiden dolayı raylar ve üstyapı elemanları olan travers ve bağlantı elemanlarının da zarar görmesine sebep olurlar. Ondülasyon derinliğinin $\leq 0,05$ mm olması durumunda, gürültü düzeyinde hissedilen bir artış meydana gelirken; ondülasyon derinliğinin $\geq 0,1$ mm olması halinde üstyapı bakım maliyetleri artmaktadır (Demirdağ ve Öztürk 2017, Tarhan ve Akpınar 2005).



Resim 4.10 Ray aşınması (ondülasyon) örnekleri (Tarhan ve Akpınar 2005).

Ray mantarında meydana gelen yatay ve dikey ayrılmalar sonucunda kırık ray arızası oluşmaktadır. Yuvarlanma yüzeyinde 50 mm'den uzun ve 10 mm'den derin boşluk bulunan raylar kırık ray olarak tanımlanmaktadır. Ray kırıkları daha çok ray kaynağı ya da cebire ile rayların uç uca eklendiği kısımlarda meydana gelmektedir. (Arlı 2015)

Rayın herhangi bir yerinde kırılmaya yol açabilecek süreksizlikler çatlak olarak tanımlanmakta olup; bu bozulmalar gözle muayene sonucu tespit edilirler. Rayda oluşan hatalar ilk evrelerinde yavaş ilerlerken, devam eden süreçte hızla çatlak oluşumu ve sonrasında rayda kırılmalar ile sonuçlanmaktadır. Erken müdahale amacıyla rayın iç kısmında oluşan hataların tespit edilmesi için ultrasonik hata dedektörleri ve manyetik parçacık ile muayene ekipmanları gibi özel ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır (Tuğyanoğlu vd. 2013).

Rayların çeşitli nedenlerle ileri geri hareket etmesine ray yürümesi (şöminman) adı verilmekte olup; bu arıza genellikle trenlerin daha sık seyir ettiği istikamette meydana gelmektedir. Şöminman arızalarının yaşandığı kısımlarda anti şöminman takozu kullanılmaktadır.

Bunların dışında ray yüzeyinden kabuk atma, pullanma ve yapraksı kopma gibi

kopmaların yaşandığı parça kopmaları; demiryolu araçlarının ilk hareket sırasında patinaj yapması nedeniyle oluşan patinaj izi (apleti) arızası; soğuk yaralanma, korozyon gibi dış etkenlere bağlı arızalar da ray arızası olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.4.1.2 Traverslerde Görülen Arızalar

Traverslerde çatlama, kırılma, tirfon yataklarının laçkalaşması, eğilme, çürüme, aşınma, soyulma gibi arızalar meydana gelmektedir. Bunların dışında travers açıklıkların standart dışı olması, düzensiz olması ve traverslerin raylar ile yaptığı dik açının bozulması neticesinde eker hatası adı verilen travers arızasına da sıklıkla rastlanmaktadır. Kullanılan traversin cinsine göre arızanın şekli ve yeri değişiklik göstermektedir.

4.4.2 Geometrik Arızalar

Demiryolu hattının olması gereken yatay ve düşey doğrultudaki konumu, demiryolu hat geometrisini oluşturmaktadır. Hattın olması gereken bu konumundan sapması ise demiryolu hat geometrisinin bozulması olarak tanımlanır. Demiryolu hat geometrisinin bozulması; düşey geometrinin bozulması ve yatay geometrinin bozulması şeklinde sınıflandırılabilir. Hat geometrisinin bozulmasında demiryolu hattının maruz kaldığı dinamik yüklerin ve çevresel faktörlerin etkisi büyüktür (Güler ve Jovanovic 2005).

Demiryolu hattında meydana gelen geometrik bozulmalara neden olan etkenler literatürdeki mevcut çalışmalara dayanarak; demiryolu üzerindeki dingil yükleri, hattın karakteristiği, malzeme ve imalat özellikleri, tasarım ve yapım parametreleri, bakım ve onarım şartları, çevre ve arazi şartları olarak sıralanabilir.

Bozulma mekanizması çok karmaşık bir süreç içinde gerçekleşir. Yeni buraj yapılmış bir hat kesiminde tekrarlı tren geçişleri sonucunda oturmalar meydana gelir. Bu oturmalar demiryolu hattının her noktasında aynı miktarda meydana gelir ise hat geometrisinde düzensizlik oluşmaz. Fakat hat yapısında mevcut farklılıklar ve yük dağılımının homojen olmaması gibi etkenler sonucu hattın farklı kesimlerinde farklı miktarlarda oturmalar gerçekleşmektedir. Oluşan bu farklı oturma miktarlarından dolayı geometrik bozulmalar

çeşitli dalga boylarında ortaya çıkmaktadır (Tacıroğlu 2015).

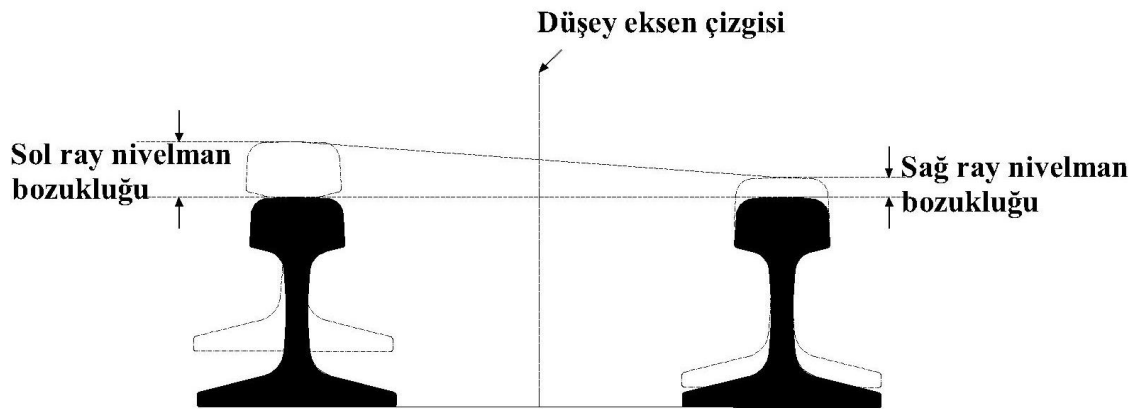
Demiryolu hattında meydana gelen bozulmalar düşey doğrultuda; burulma, düşüklük veya şişlik olarak tabir edilen nivelman bozulmaları, dever bozulması olarak sıralanabilir. Yatay doğrultuda bozulmalar ise; hat genişliğinin bozulması ve demiryolu hattının eksenden sapması olarak sıralanmaktadır. Her bir rayın yatay ve düşey doğrultuda iki serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu nedenle demiryolu hattında meydana gelen bozulmalar her bir ray için değişiklik göstermektedir (Güler 2005).

4.4.2.1 Düşey Geometrinin Bozulması

Düşey geometrinin bozulması kısa, orta ve uzun olmak üzere 3 dalga boyunda incelenmektedir. Kısa dalga boyundaki bozulmalar 0-3 m bant aralığında oluşmakta olup; bu uzunluktaki kusurlar ray başının boyuna şekli ve kalitesiz kaynak yapılması sonucu rayın boyuna düzgünlüğünde görülmektedir. Kısa dalga boyundaki bozulmalar demiryolu hattına ve demiryolu araçlarında mevcut süspansiyon ve boji sistemlerine ek yükler oluşturacak şekilde sirayet ederler. Kısa dalga boyundaki bozulmalar ray taşlaması veya rayların düzeltilmesi ile giderilebilmektedir. Orta dalga boyundaki bozulmalar 3-25 m bant aralığında oluşmakta olup; demiryolu hattının balast içinde yapmış olduğu farklı oturmalarından kaynaklanmaktadır. Orta dalga boyundaki bozulmalara neden olan etkenlerin başında balast malzemesinin oturma karakteristiği ve dinamik yüklerin değişkenliği gelmektedir. Orta dalga boyundaki bozulmalar demiryolu araçlarının boji ve gövdesine doğru olan veya bunlardan kaynaklanan kuvvetler üzerine önemli etkileri vardır. Orta dalga boyundaki bozulmalar buraj makinelerinin hassas modda çalıştırılması ile giderilebilmektedir. Uzun dalga boyundaki bozulmalar ise 25-70 m bant aralığında oluşmaktadır. Uzun dalga boyundaki bozulmalar; yol bakım ve tasarım kusurlarından veya zemin hareketinden kaynaklanan bozulmalardır. Uzun dalga boyundaki bozulmaların hat üzerindeki yüklere etkisi çok büyük olmamaktadır. 70 m'den daha büyük dalga boyunda oluşan bozulmalar ise çok uzun dalga boyundaki bozulmalar, doruğumsu dalgalar olarak adlandırılmaktadır. Çok uzun dalga boyundaki bozulmalar tasarım kriterlerinden ve çeşitli düşey yöndeki kurp kusurlarından kaynaklanmaktadır (Tacıroğlu 2015, Güler 2005).

Demiryolunun düşey düzlem üzerindeki yerini belirleyen eksene yol kotu adı verilmektedir. Hattın düşey kotu belirli kesimlerde bulunan balastın içindeki düzensizliklerinden ve hattın farklı yüklere maruz kalmasından kaynaklı olarak traverslerde meydana gelen farklı oturmalar sonucu bozulmalar gerçekleşmektedir. Her bir traversin taşıdığı yük demiryolu araçlarının dinamik yüküne, ray doğrultusundaki bozukluklara, komşu travers arası uzaklığa ve traversleri destekleyen elastik yatağa bağlı olarak değişmektedir.

Yolun kotunun istenmeyecek şekilde değişmesi şeklinde oluşan arızalara nivelman arızası adı verilir. Nivelman arızası rayların düşey ekseninde bulunmaları gereken tasarım yüksekliğinden daha düşük veya daha yüksek olması şeklinde karşımıza çıkabilmektedir. Nivelman değerleri her bir ray dizisi için ayrı ayrı ölçülmektedir. Demiryolu kotunda meydana gelen düşüklük herhangi bir nedenle travers altı balast kalınlığının azalması sonucu yolun olması gereken kotundan daha aşağı bir kota gelmesidir. Demiryolu kotunda meydana gelen şişlik ise; sabit noktalara göre yolun olması gereken kotundan daha yukarı bir kota gelmesi nedeniyle oluşan düşey geometri bozulmasıdır. Şişlik arızası genellikle hatalı tamiratlar sonucu meydana gelmekte olup; nivelman arızalarının genel olarak giderilmesi işlemine rölovaj adı verilmektedir.



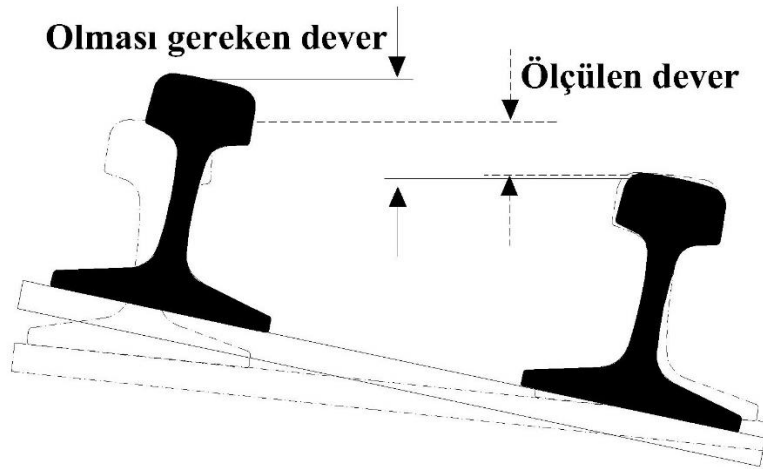
Şekil 4.5 Nivelman bozukluğu.

Burulma bozulması; hatta mevcut olan nivelman arızası, dever arızaları ve gizli boşlukların birleşmesi nedeniyle meydana gelmektedir. Burulma; bir vagon veya boji

- Travers yatakları çabuk bozulur,
- Ekartman hataları meydana gelir,
- Tekerlek bodenlerinin dış ray mantarına sürtünmesi sonucu fren etkisi artar ve ek dirençler meydana gelir,
- Tren yüklerinin dağılım dengesi bozulacağından dış ray tarafındaki dingil yataklarında yanma riski doğmaktadır (TCDD 2018).

Deverin tasarım kriterleri ile belirlenen değerden fazla olması durumunda; yola etki eden merkezci kuvvetlerde yani merkezkaç kuvvetinin tam aksi yönünde demiryolu aracını kurp içine doğru devirmek isteyen kuvvetlerde artış meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak ise;

- İ rayda ezilmeler meydana gelir,
- İ ray tarafındaki balast çabuk parçalanır ve ufalanır,
- İ raya ait küçük malzemeler daha çabuk gevşer ve lakalaşır,
- Uzun vadede ekartman hataları meydana gelebilir,
- Travers yatakları çabuk bozulur,
- Demiryolu çeken ve çekilen araçların içi tarafta kalan st köşeleri, tünel ve kafes kirişli köprü gibi sanat yapılarının yan duvarlarına sürtmesi veya çarpması riskleri artar,
- Tren yüklerinin dağılım dengesi bozulacağından i ray tarafındaki dingil yataklarında yanma riski doğmaktadır (TCDD 2018).

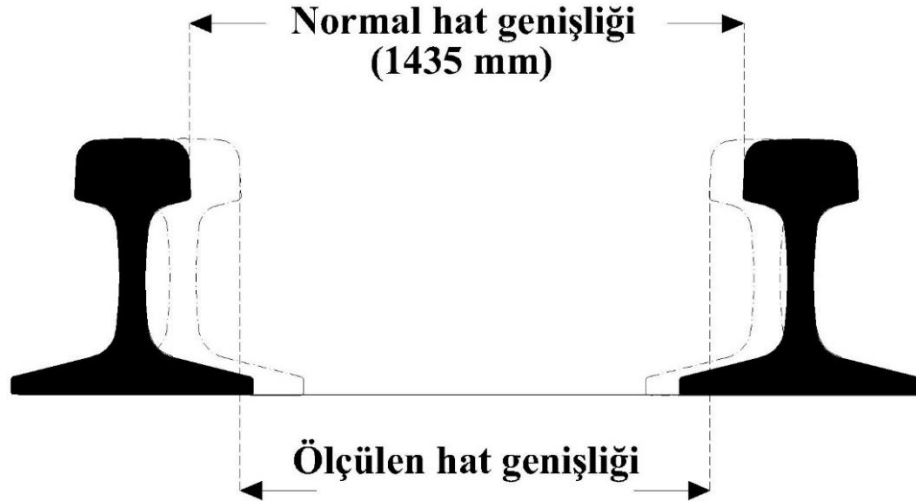


şekil 4.7 Dever bozukluğu.

4.4.2.2 Yatay Geometrinin Bozulması

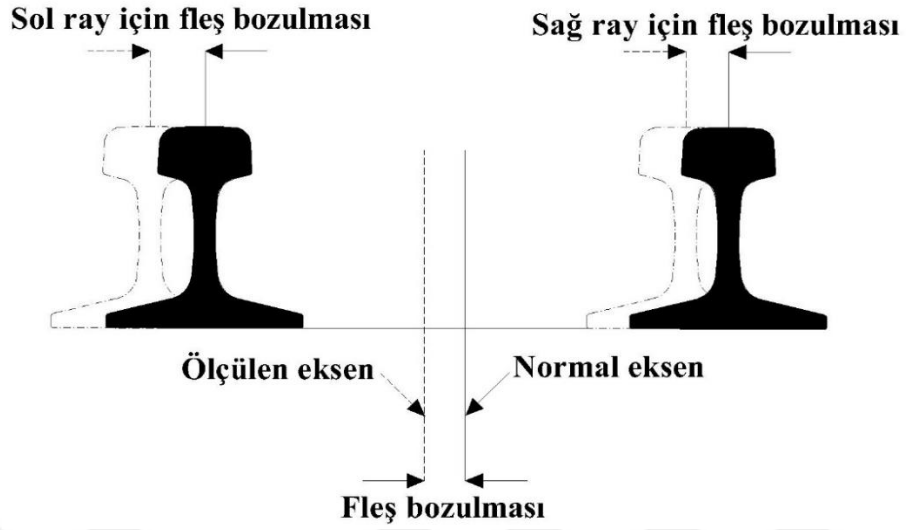
Yatay geometrinin bozulmasına neden olan kusurlarda, düşey geometri bozukluklarında olduğu gibi ray ile çeken çekilen araçların bodenleri arasında sabit bir ilişki bulunmamaktadır. Farklı hızlara sahip farklı demiryolu taşıtları için; yatay geometride ters yönlerde meydana gelen kuvvetlere maruz kalınmaktadır. Yatay geometri bozukluklarının başlıca sebepleri; uzun kaynaklı raylarda meydana gelen termal kuvvetler ve dever değerinin büyük olduğu kesimlerde yerçekiminin etkisi olarak sayılabilir. Yatay geometrinin bozulmasının en basit tanımı; yolun yatay eksen yönünden yani doğrultusundan ayrılması ile oluşan arızalardır şeklinde tanımlamak mümkündür.

Hat genişliğinde meydana gelen bozulmalar, hat genişliğinin olması gereken 1435 mm'lik değerden daha az veya daha çok olması durumu şeklinde açıklanabilir. UIC (Uluslararası Demiryolu Birliği) standartlarına göre belirlenmiş olan ekartman değeri demiryolu hattında döşeli olan iki ray için; ray mantarı iç yanakları arasında kalan yatay mesafeye denmektedir. Ekartman, ray mantarı üst seviyesinin 14 mm aşağısından ve rayın aşınmamış yerinden ölçülmelidir.



Şekil 4.8 Hat genişliğinin bozulması.

Yatay geometrinin bozulmasına bir diğer örnekte fleş bozulmalarıdır. Fleş bozulması; rayların hat eksenine göre yatayda yapmış olduğu yer değiştirmelerdir. Dresaj, flambaj ve dirsek oluşumu fleş bozulmalarına birer örnektir.



Şekil 4.9 Fleş bozulması.

Dresaj arızası, yolun olması gereken yatay ekseninden sapmasına denmektedir. Resim 4.11’de görüldüğü gibi dresaj nedeniyle eksenden saptmış olan yolun, olması gereken eksenine getirilmesi işlemine tanzim adı verilmektedir.



Resim 4.11 Dresaj arızası.

Hava koşullarının sıcak olduğu dönemlerde yol ekseninde görülen “S” şeklindeki keskin saptmalara flambaj (yol kaçması) denmektedir. Islah yöntemi dresaj ile aynı olmakla beraber, Resim 4.12’de görüldüğü üzere rayların sıkışık olması sebebiyle yolun yeniden güzergahına getirilmesi için genellikle rayların kesilmesi gerekmektedir. Flambaj arızaları için yeterli önlem alınmazsa bu durum yüksek demiryolu gerilmelerine neden olur. Köprü ve viyadüklerde bu gerilmeleri önlemek için genişleme derzleri

kullanılmaktadır.



Resim 4.12 Flambaj arızası.

Aşırı sıcak havaların hâkim olduğu ve imbisat ayarlarının problemli olduğu kısımlarda özellikle contalarda kurp dışına doğru oluşan keskin kıvrım şeklindeki çıkıntılara dirsek adı verilmektedir. Dirsekler genellikle dar yarıçaplı kurpların dış ray dizisinde görülmektedir. Bunun haricinde çok sık olmamakla birlikte contalı yolların herhangi bir yerinde de meydana gelebilmektedir.



Resim 4.13 Dirsek arızası.

Yata geometride meydana gelen bozulmalar belirlendiği ve düzeltildiği takdirde, yeniden benzer arızanın aynı bölgede görülme sıklığı çok azdır. Yatay geometri bozuklukları düzeltilmesine rağmen yeniden görülüyorsa, muhtemelen hattın sürekliliğinde bir sorun olduğu üzerinde durulmalıdır. Yatay geometri bozukluklarının yeniden tekrar etme ihtimali en çok makaslar bölgesi ve kesişme bölgeleridir (Güler 2005).

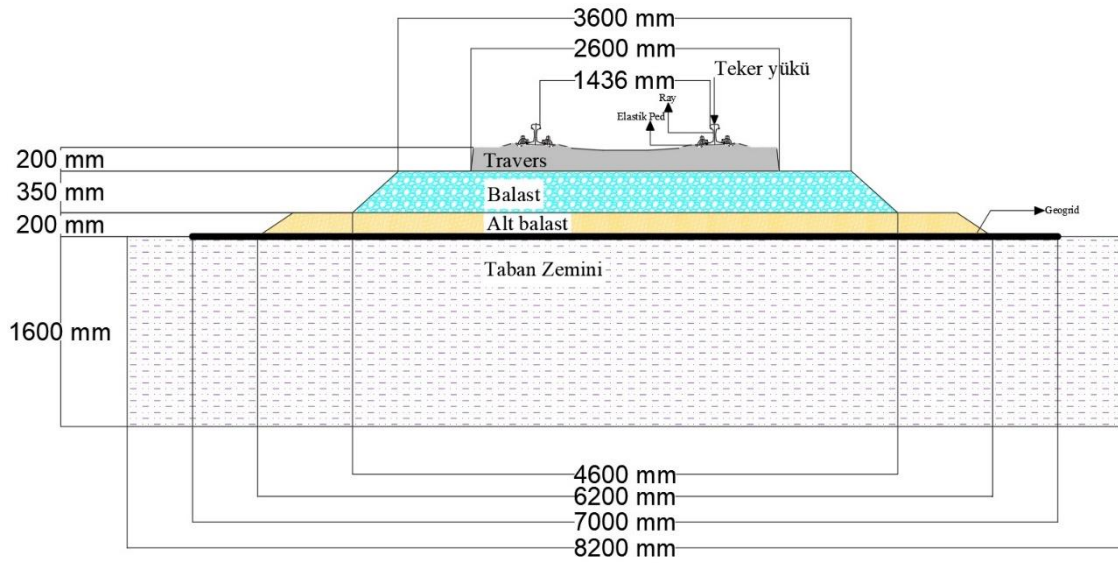
5. MATERYAL VE METOD

5.1 Problemin Tanımı

Bu çalışmada demiryolu üstyapı tasarımında geogrid malzemenin etkisini gözlemlemek hedeflenmiştir. Farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılarak geogrid ürün kullanımı ve geogrid ürün kullanılmadan katmanlarda meydana gelen şekil değiştirme ve gerilme analizlerini kıyaslamak amaçlanmıştır; bunun için sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar metodunun uygulanmasında ANSYS bilgisayar yazılımı tercih edilmiştir.

Mühendislik problemlerin çözümünde; deneysel, analitik veya sayısal yöntemlere başvurulmaktadır. Analitik çözümlerin mümkün olmadığı karmaşık geometrili ve karmaşık sınır değerler içeren durumlarda sayısal bir yöntem olan sonlu elemanlar metodu iyi bir çözüm imkânı sağlamaktadır. ANSYS bilgisayar yazılımı mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi gibi statik ve dinamik problemlerin analizinin yapıldığı, sonuçların görselleştirildiği genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Ele alınan tasarımların sanal ortamda test edilmesine olanak sağlayarak analizlerin ekonomik olmasına da fayda sağlamaktadır (Ağbaba 2019).

Yapılan çalışmada, problem geometrisi üç boyutlu olacak şekilde 3 adet travers tanımlanarak 1500 mm derinliğe sahip bir kesim ele alınmıştır. ANSYS programında aşamalar halinde modellenen demiryolu kesitine ait ölçüler Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan geometrik ölçüler; teker yarıçapı 500 mm, raylar arası mesafe (ekartman) 1436 mm, tekerlerin iç yanakları arası aks uzunluğu 1355 mm, travers uzunluğu 2600 mm, balast tabakası taban kol açıklığı 4600 mm, altbalast tabakası taban kol açıklığı 6200 mm ve taban zemini kol açıklığı 8200 mm olacak şekildedir. Yapılan çalışmada; kabul edilen değerlerin, şartnamelere uygun olmasına özen gösterilmiştir. Benzer şekilde oluşturulan modelin üstyapı elemanları için TCDD ve UIC standartlarına uygun malzeme tercih edilmiş olması analiz sonuçlarının da gerçeğe daha yakın olmasına yardımcı olmuştur.



Şekil 5.1 Analiz için modellenmiş demiryolu kesitinin autocad çizimi.

Klasik bir raylı sistem kesitinin altbalast tabakası ile taban zemini arasında geogrid ürün kullanılarak; farklı dingil yükleri için (120 kN, 225 kN, 350 kN), farklı özelliklere sahip taban zeminleri seçilerek ve farklı altbalast tabaka kalınlıklarına (150 mm, 200 mm) ait demiryolu üstyapısı tasarımında analiz için gerekli olan elastisite modülü ve poisson oranları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu çizelgede yer alan UIC 60 tipi ray için elastisite modülü ve poisson oranı Özdemir ve Voltr (2016) tarafından yapılmış çalışmadan alınmıştır. Elastisite modülü, uygulanan kuvvete maruz kalan malzemelerin meydana gelecek şekil değişimine karşı koyması olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle; malzemenin rijitliği yani elastik şekil değiştirmeye karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanabilir. Her malzemenin elastisite modülü var olup, malzemeye göre karakteristik olarak farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmada statik analiz tercih edildiğinden modelde elastisite modülü ve poisson oranının tanımlanması yeterli olacaktır.

Çizelge 5.1 Modellemede kullanılacak malzemelere ait mekanik özellikler.

Malzeme	Elastisite Modülü E (Mpa)	Poisson Oranı (v)
Tren teker	205000	0,30
Ray (UIC 60)	210000	0,30
Elastik ped	1000	0,45
Travers	25500	0,20

Çizelge 5.1 (Devam) Modellemede kullanılacak malzemelere ait mekanik özellikler.

Balast	200	0,25
Altbalast	115	0,35
Zemin 1 (Kötü)	35	0,40
Zemin 2 (Orta)	80	0,40
Zemin 3 (İyi)	140	0,40
Zemin 4 (Çok iyi)	200	0,40

Demiryolu üstyapı tasarımında geogrid malzemenin performansa etkisini araştırmak amacıyla analizde farklı elastisite modülüne sahip üç farklı geogrid malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri aynı kabul edilmiş ancak mekanik özellikleri birbirinden farklı seçilmiştir. Literatürde geogrid malzeme ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar incelendiğinde; Leonardi vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada geogridin elastisite modülünü $E=760$ MPa olarak, Shamami ve Khiavi (2017) kullandıkları geogrid numunelerden bir tanesinde $E=4230$ MPa olarak ve Skuodis vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada yine kullanmış oldukları geogrid numunelerin bir tanesinde $E=5700$ MPa olarak geogrid elastisite modülünü belirlemişler ve çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada da geogrid malzemeye ait seçilen mekanik özellikler yukarıda belirtilen akademik çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiştir. Kullanılan geogrid malzemeye ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 5.2’de belirtilmiştir.

Geogridin mekanik özelliklerinin belirlenmesi aşamasında yapılan literatür araştırması sırasında geogrid malzeme ile ilgili olarak yapılmış çalışmalar içerisinde değerlendirilen ve deneme analizleri yapılan diğer çalışmalar ise; Geeta vd. (2013), Sridevi vd. (2019) ve Bayram (2006)’nın yapmış oldukları çalışmalardır. Geeta vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada geogrid malzemenin elastisite modülünü sırası ile $E=40000$ MPa, $E=70000$ MPa ve $E=76000$ MPa olarak belirlemiştir. Sridevi vd. (2019) yapmış oldukları çalışmada geogrid için elastisite modülünü $E=1,1 \times 10^9$ MPa olarak seçmişlerdir. Bayram (2006) ise yapmış olduğu yüksek lisans tezinde geogrid elastisite modülünü $E=690000$ MPa olarak belirlemiştir. Bu değerler kullanılarak yapılan deneme analizleri neticesinde elastisite modülü değerinin artması ile tasarımda meydana gelen gerilmelerin ve yer

değiştirmelerin azaldığı, pozitif etki yarattığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2 Modellemede kullanılacak geogrid malzeme bilgileri.

Geogrid Malzeme	Malzeme Göz Açıklığı (mm)	Malzeme Genişliğı (mm)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Elastisite Modülü E (MPa)	Poisson Oranı (ν)
Geogrid 1	40x910	100/90	4	760	0,30
Geogrid 2	40x910	100/90	4	4230	0,30
Geogrid 3	40x910	100/90	4	5700	0,30

Bu çalışmada, analizi yapılacak olan demiryolu hattına yolcu vagonu, YHT ve yük vagonu ve ağır yük vagonu olacak şekilde farklı yüklemeler yapılmıştır. Modelde uygulanan yükler geogrid malzemeli tasarımın dinamik analiz sürecinde çok uzun süreceğı değerlendirildiğinden statik yük olacak şekilde analiz edilmiştir. Farklı dingil yüklerine sahip demiryolu araçları ile analiz tekrarlandığından dinamik yük etkisini hesaba katacak şekilde yük arttırımına gerek duyulmamıştır.

Çizelge 5.3 Modellemede kullanılacak olan dingil yükleri.

Dingil Yüğü (kN)	Demiryolu Taşıtı
120	Yolcu vagonu
225	YHT ve yük vagonu
350	Ağır yük vagonu

Araştırma için farklı yükleme ve farklı zemin durumları için Çizelge 5.4'deki gibi kombinasyon yapılmıştır. Buna göre toplamda 96 adet model analiz edilerek yorumlanmıştır.

Çizelge 5.4 Model kombinasyon detayları

Dingil Yükü (kN)	Altbalast Tabaka Kalınlığı (mm)	Geogrid	Elastisite Modülüne Göre Taban Zemini Cinsi (MPa)	Toplam Model Sayısı (adet)
120	150	Geogrid 1	Taban Zemini 1 (E=35)	32
		Geogrid 2	Taban Zemini 2 (E=80)	
	200	Geogrid 3	Taban Zemini 3 (E=140)	
		Yok	Taban Zemini 4 (E=200)	
225	150	Geogrid 1	Taban Zemini 1 (E=35)	32
		Geogrid 2	Taban Zemini 2 (E=80)	
	200	Geogrid 3	Taban Zemini 3 (E=140)	
		Yok	Taban Zemini 4 (E=200)	
350	150	Geogrid 1	Taban Zemini 1 (E=35)	32
		Geogrid 2	Taban Zemini 2 (E=80)	
	200	Geogrid 3	Taban Zemini 3 (E=140)	
		Yok	Taban Zemini 4 (E=200)	
Toplam model sayısı:				96

5.2 Yöntem

1971 yılında çalışmalarına başlayan Swanson Analysis Systems (SAS) firmasına ait olan ANSYS sonlu eleman programı; sistem elemanlarının sonlu eleman modellerinin oluşturulması ve analizlerinin yapılarak yapının davranışının gözlemlenmesi esasına dayanmaktadır. ANSYS gibi ABAQUS, COSMOS, NASTRAN gibi birçok yazılım da sonlu eleman analiz mantığıyla oluşturulmuştur. Son zamanlarda özellikle yapı analizlerinde sonlu elemanlar yöntemiyle yazılmış CAD programları sıkça tercih edilmektedir. Bunun nedeni, sonlu sayıda geometriye ayrılabilen elemanların her birinin geometrisinin kendi içinde çözümlenebilmesi, farklı malzeme özelliklerinin girilebilmesi ve boşluklu yapıları tanımlarken kolaylıkla çözümleme yapılabilmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizleri bu sebeple numerik yöntemle göre daha avantajlı kılmaktadır (Akıllı Törer 2019).

Programa başlamadan önce nasıl bir model oluşturulmak istendiği ve nasıl bir sonuç

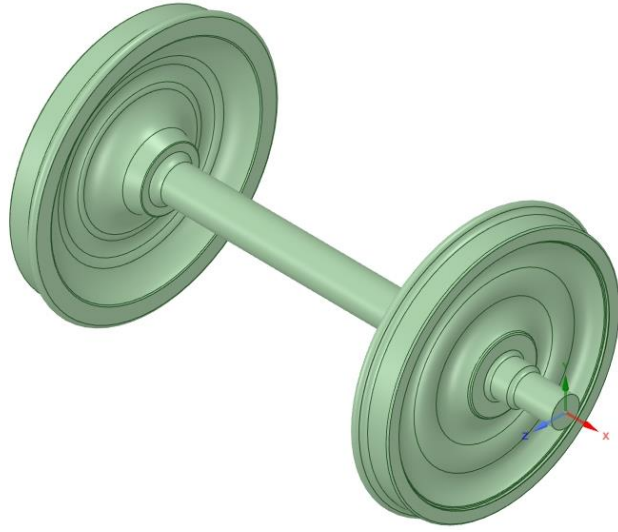
beklendiği belirlenmelidir. Uygulama aşamasında ise tasarlanan geometrinin, kullanılacak malzeme ve sınır şartlarının girilmesi gerekmektedir. Sonrasında ise y¼kleme durumu ve tipi uygulanmalı, son aşamada analiz sonuçları yorumlanmalıdır. ANSYS sonlu elemanlar programına ait işlem adımları sırasıyla şu şekilde ¼zetlenebilir;

- a) Sistem modelinin oluşturulması,
- b) Malzeme ¼zelliklerinin tanımlanması,
- c) Kesit ¼zelliklerinin belirlenmesi,
- d) Eleman tipi, malzeme ve kesit ¼zelliklerinin atanması,
- e) Sonlu elemanlara ayrılması,
- f) Mesnet şartları ve analiz tipinin belirlenmesi,
- g) Y¼klerin tanımlanması,
- h) Analizin yapılması,
- i) Sonuçların yorumlanması.

5.3 Tasarım ve Analiz

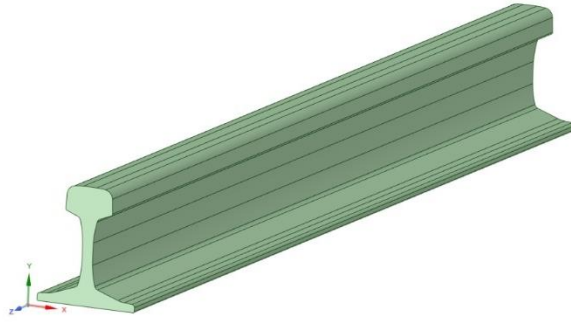
Bu ¼alıřmada tasarlanan geometrinin oluşturulması i¼in ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması kullanılmıştır. Burada oluşturulan geometriler daha sonra birleştirilerek tek bir ANSYS Spaceclaim dosyası haline getirilmiş ve ANSYS Workbench 2020 R2 uygulaması ile analizlerinin yapılması sağlanmıştır.

Demiryollarında mevcut kullanılan 500 mm yarı¼aplı teker tasarım i¼in modellenmiştir. Tren tekerinin modellenmesinde ANSYS Spaceclaim uygulaması kullanılarak; aks, x ekseninden bakış a¼ısı ile d¼zlem oluşturularak hazırlanmış olup, tekerin g¼vdesi ise z ekseninden bakış a¼ısı ile d¼zlem oluşturulması yardımıyla hazırlanmıştır. Sonrasında “d¼nd¼r” komutu ile 360° a¼ı verilerek 3 boyutlu olarak teker tasarımı tamamlanmıştır.



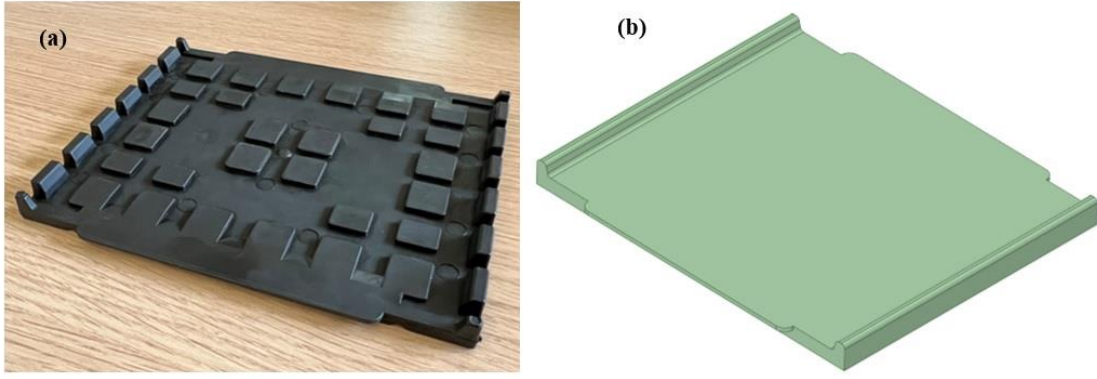
Şekil 5.2 ANSYS Spaceclaim uygulaması ile tren tekerinin 3 boyutlu modeli.

Yapılan çalışmada UIC60 E1 çelik ray tipi kullanılmıştır. UIC60 E1 ray ANSYS Spaceclaim uygulaması kullanılarak Z ekseninde düzlem oluşturulmuş ve 2 boyutlu model çizimi yapılmıştır. Sonrasında Z eksenine doğrultusunda “çek” komutu ile 1500 mm uzunluğunda derinlik verilmiştir.



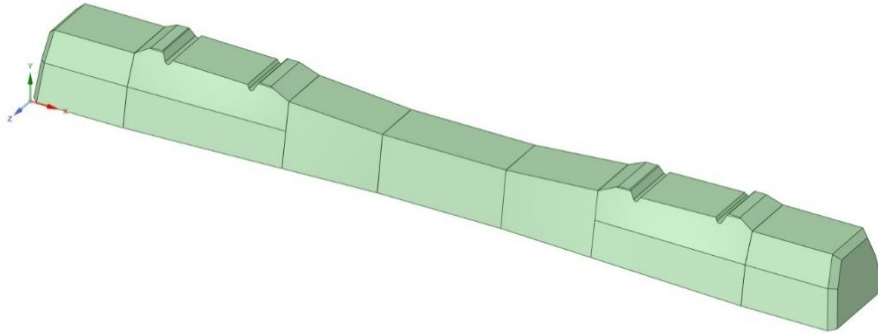
Şekil 5.3 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile UIC60 E1 ray çizimi.

Demiryolu üstyapısı tasarım çalışmasında elastik ped (plastik selet) ray ile travers arasına yerleştirilmiştir. Demiryollarında UIC60 tipi raylar için kullanılan elastik ped, analiz için sadeleştirilerek ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması yardımıyla çizilmiş ve tasarıma yerleştirilmiştir. Tasarımda kullanılan elastik ped ebatları 148x180 mm’ dir.



Şekil 5.4 (a) Elastik ped görseli; (b) analiz tasarımı için sadeleştirilerek çizilmiş elastik ped görseli.

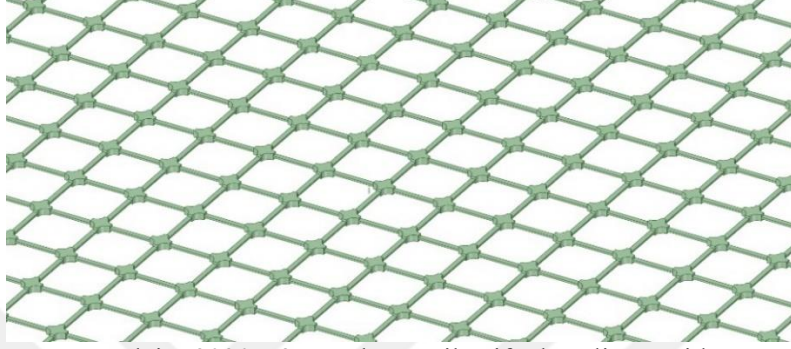
Bu çalışmada analiz aşamasında gerçeğe daha yakın sonuçlar alınabilmesi için elemanlar standartlara uygun modellenmiş olup; travers çiziminde de bu doğrultuda B70 travers elemanı tercih edilmiştir. B70 travers elemanının ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması üzerinde Z eksenine bakış doğrultusunda oluşturulan düzlemde 2 boyutlu kesiti oluşturulmuştur. Traversin uzunluğu 2600 mm, yüksekliği ise 210 mm'dir. Z eksenine doğrultusunda “çek” komutu ile 300 mm derinlik verilen traverse değişken enkesit ölçülerinin tanımlanabilmesi için uygun açılara sahip dikdörtgenler prizmaları oluşturulmuş ve “gövdeyi böl” komutu yardımı ile uygun kesit oluşturulmuştur.



Şekil 5.5 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile B70 travers çizimi.

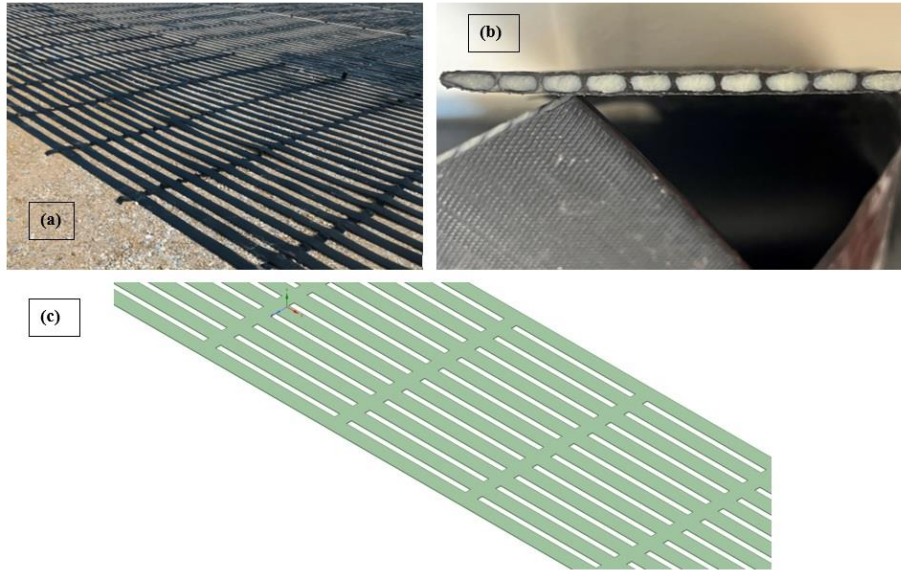
Geogrid malzemeler kullanım alanı ve ihtiyaca göre; farklı türlerde, farklı dayanımlarda, farklı göz açıklıklarına sahip ve farklı şerit kalınlığında üretilebilen malzemelerdir. Yaptığımız bu çalışmada geogrid malzemenin tasarlanması aşamasında ilk olarak Hussein ve Meguid (2016) tarafından yapılmış olan çalışmada kullanılan Şekil 5.6'da gösterilen geogrid türüne benzer çift eksenli geogrid tasarımı yapılmıştır. Bu geogridin

göz açıklığı 37x37 mm olup, şerit genişliği 3 mm, şerit yüksekliği 1,1 mm ve düğüm noktaları yüksekliği 4,1 mm olarak belirlenmiştir. Ancak analize başlamadan mesh aralıklarının belirlenmesi süresinin 6 saat geçmesine rağmen sonuçlandırılmamış olması nedeniyle analiz sürelerinin ne kadar süreceği öngörülemediğinden tasarım revize edilmiştir.



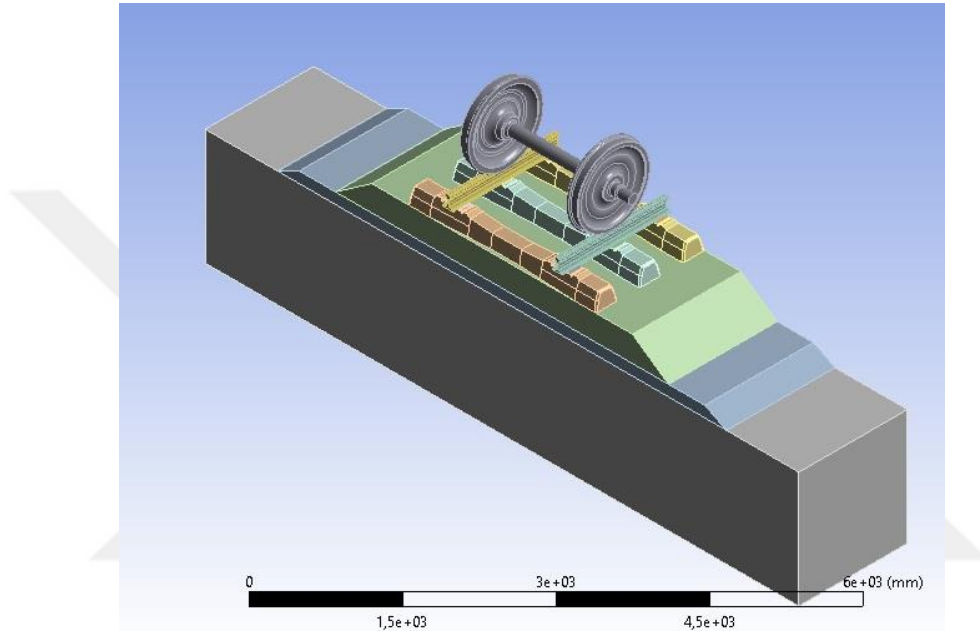
Şekil 5.6 ANSYS Spaceclaim 2020 R2 uygulaması ile çift eksenli geogrid tasarımı.

Geogrid tasarımı mümkün olduğunca analiz sonuçlarını etkilemeyecek ve paralelinde de analiz sürelerini kısaltacak şekilde planlanmış ve Şekil 5.7’de görseli bulunan polietilen kaplı yüksek dayanımlı polyester liflerden oluşan tek eksenli geogrid türü tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım yine ANSYS Spaceclaim uygulaması yardımıyla hazırlanmış olup altbalast tabakası ile taban zemini arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.7. (a) Tek eksenli geogrid saha uygulama örneği; (b) tek eksenli geogrid kesiti; (c) analiz tasarımında kullanılan tek eksenli geogrid çizimi.

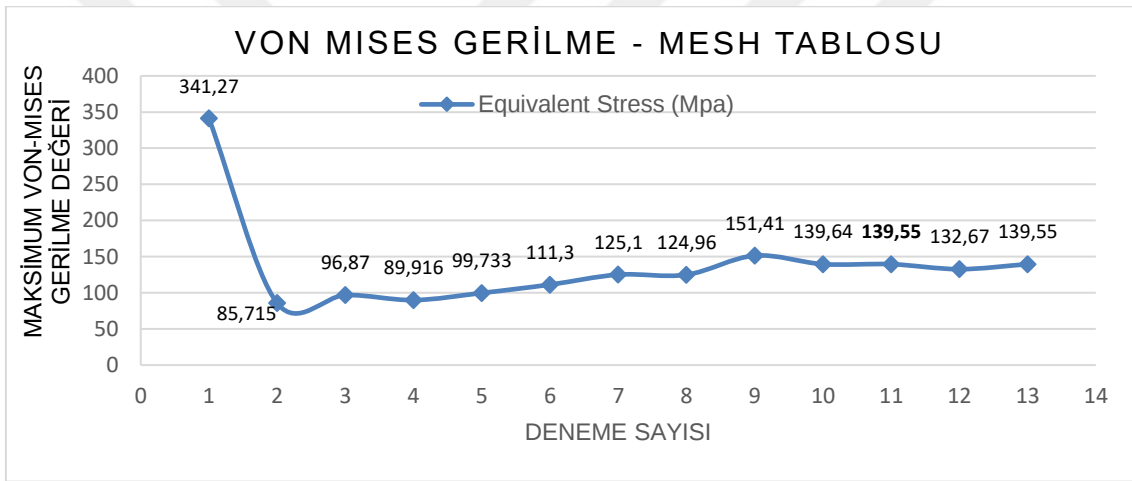
ANSYS Workbench 2020 R2 programı açıldığında ilk olarak çalışılacak modeli çözdürmek için “Static Structural” analiz sistemi seçilmiştir. ANSYS Spaceclaim uygulaması yardımıyla hazırlanan model “Geometry” komutu yardımıyla ANSYS Workbench 2020 R2 programı sistemine aktarılmıştır. ANSYS Workbench uygulamasına aktarılan modele ait görsel Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8 ANSYS Workbench 2020 R2 uygulamasına aktarılmış model.

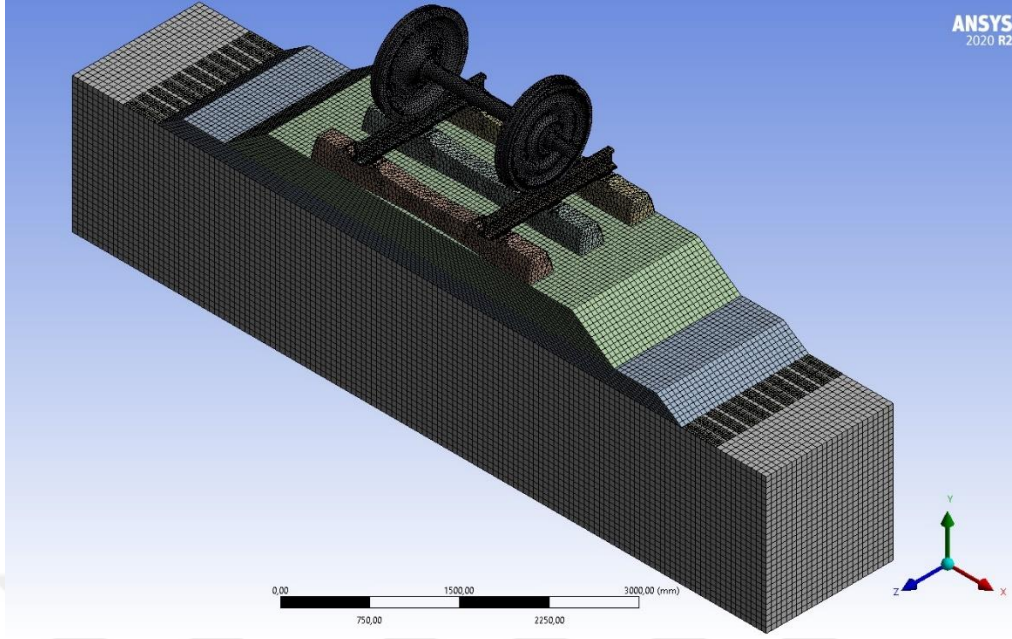
Programda modelin sisteme aktarılması sonrası oluşturulan modele malzeme mekanik özelliklerinin tanımlanması için “Engineering Data” seçeneği kullanılmıştır. Modelde mevcut malzemelere ait özelliklerin ataması “Linear Elastic” sekmesi altında her bir malzeme için ayrı ayrı belirlenmiş olan elastisite modülü ve poisson oranı tanımlamaları yapılarak gerçekleştirilmiştir. “Materials” seçeneği altında malzeme mekanik özellikleri tanımlandıktan ve “Connections” seçeneği altında oluşturulan modele ait kontak noktalarının kontrol edilmesinin ardından mesh aralıklarının tespiti (sonlu elemanlar ağı) çalışması yapılmıştır. Contact sekmesi altında; “no separation”, “rough” ve “frictional” komutları farklı farklı kombinasyonlar ile denemeler yapılmış ancak “bonded” komutundan farklı sonuçlar alınmamıştır. Bu nedenle yine bilgisayar performansı ve analiz süreleri göz önünde bulundurularak tüm analizler “bonded” komutu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Mesh aralıklarının belirlenmesi aşamasında 20 cm alt temel

tabakasına sahip demiryolu tasarımı kullanılarak “insert-sizing” komutu kullanmadan “generate mesh” komutu ile belirlenen otomatik mesh (451 mm) dahil “body sizing” komutu yardımıyla değişken 13 adet deneme yapılmıştır. Mesh aralığının tayini amacıyla yapılan sonlu elemanlar ağı-gerilme grafiği Şekil 5.9’da gösterilmekte olup bu çalışmada optimum mesh aralığı olarak 11. denemede mevcut değerler tercih edilmiştir. Bu değerler; taban zemini için 60 mm, balast tabakası ve altbalast tabakası için 50 mm, traversler için 40 mm, teker, ray ve geogrid için ise 25 mm’dir. Oluşturulan mesh kombinasyonu ile 1.098.258 adet düğüm noktası ve 361.527 adet eleman oluşturulmuştur. Tercih edilen mesh aralığı yapılacak bütün analizlerde aynı şekilde uygulanmıştır.



Şekil 5.9 ANSYS Workbench analiz için mesh optimizasyon grafiği.

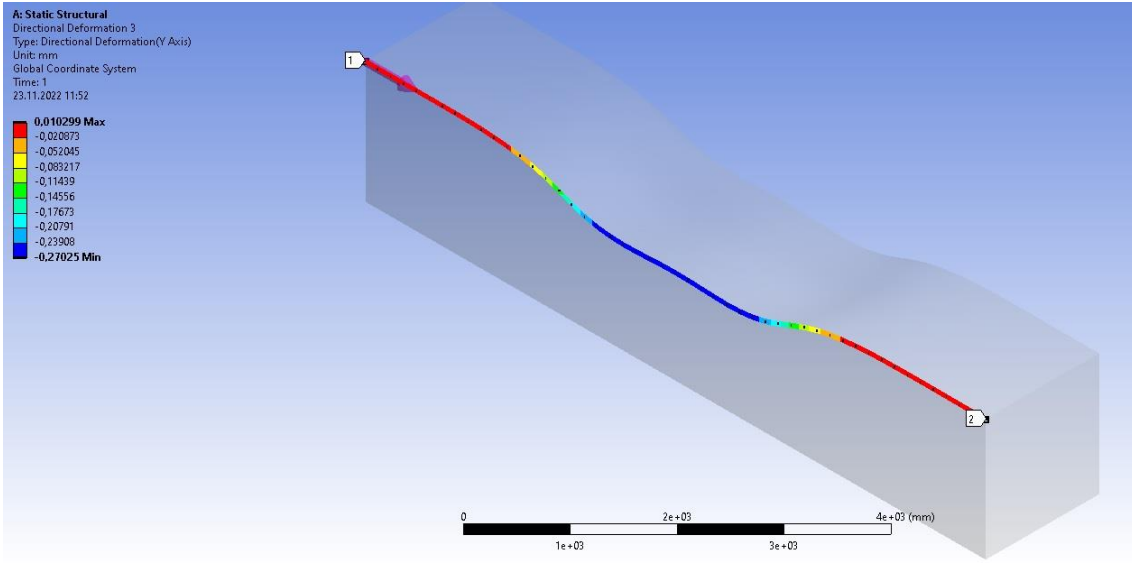
Mesh aralıkları için optimum değerin belirlenmesi; oluşturulan ağı analiz sonuçlarını direkt olarak etkilemesi sebebiyle önem arz etmektedir. Elemanlar için küçük aralıklı meshlerin atanması doğru sonuca yaklaştırırken, analiz sürelerinin de uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle optimum mesh aralığının belirlenmesi çalışma analizlerine başlamadan önceki önemli bir aşamadır. Şekil 5.10’da ideal mesh için belirlenen sonlu eleman boyutlarının, oluşturulan modele atandığı görsele yer verilmiştir.



Şekil 5.10 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş modelin son hali.

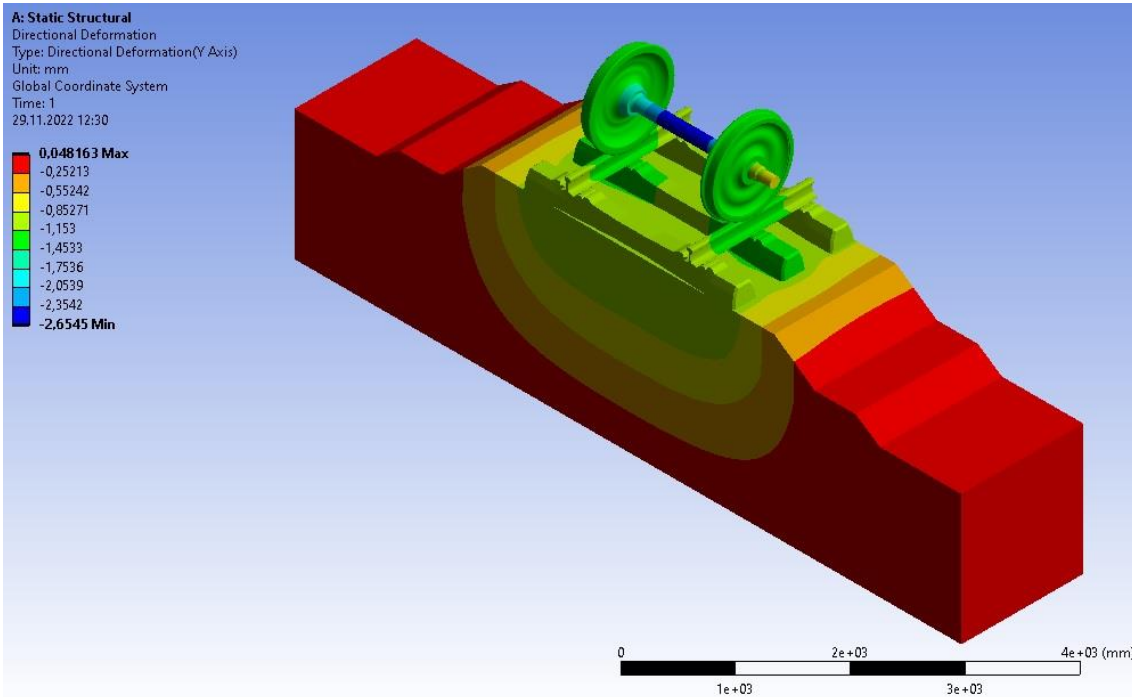
Sonlu elemanlar ağının belirlenmesi sonrasında modelin mesnet şartları “Static Structural” sekmesi altında belirlenmiştir. “Force” komutu yardımıyla analizde uygulanacak dingil yükü modelde mevcut tekerin aksına “components” olarak tanımlanmış ve uygulanmıştır. Aynı sekme altında taban zemini tabakasının en alt yüzeyi “fixed support” komutu yardımı ile sabitlenirken, yan yüzeyleri “displacement” komutu yardımıyla yatayda sabitlenmiş düşeyde ise serbest bırakılmıştır. Benzer şekilde balast ve altbalast tabakaları da yine “displacement” komutu yardımıyla Z eksenine doğrultusunda sabitlenmiş, diğer doğrultular için serbest bırakılmıştır.

Oluşturulan modelde altbalast tabaka kalınlığı, taban zemini ve geogrid mekanik özellikleri değişken elemanlar olduğu için tanımlamalar bütün modellerde taban zemininin üst yüzeyinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada "directional deformation", “equivalent stress” ve “normal stress” değerleri dikkate alınmış olup; “path” komutu yardımıyla yapıda meydana gelen deformasyonlar özel aralıklar için değerlendirilmiştir. Şekil 5.11’de “Construction Geometry” komutu altında oluşturulan ve yapılan analiz sonuçlarının okunduğu “path” görseli mevcuttur. Bu komut altında oluşturulan eksenin koordinat sistemindeki başlangıç ve bitiş noktaları belirlenerek lokasyon tayini yapılmaktadır. Bu çalışmada “path” taban zemini ile altbalast tabakası birleşim noktasından 5 mm aşağıda oluşturulan doğru ile okumalar yapılmıştır.

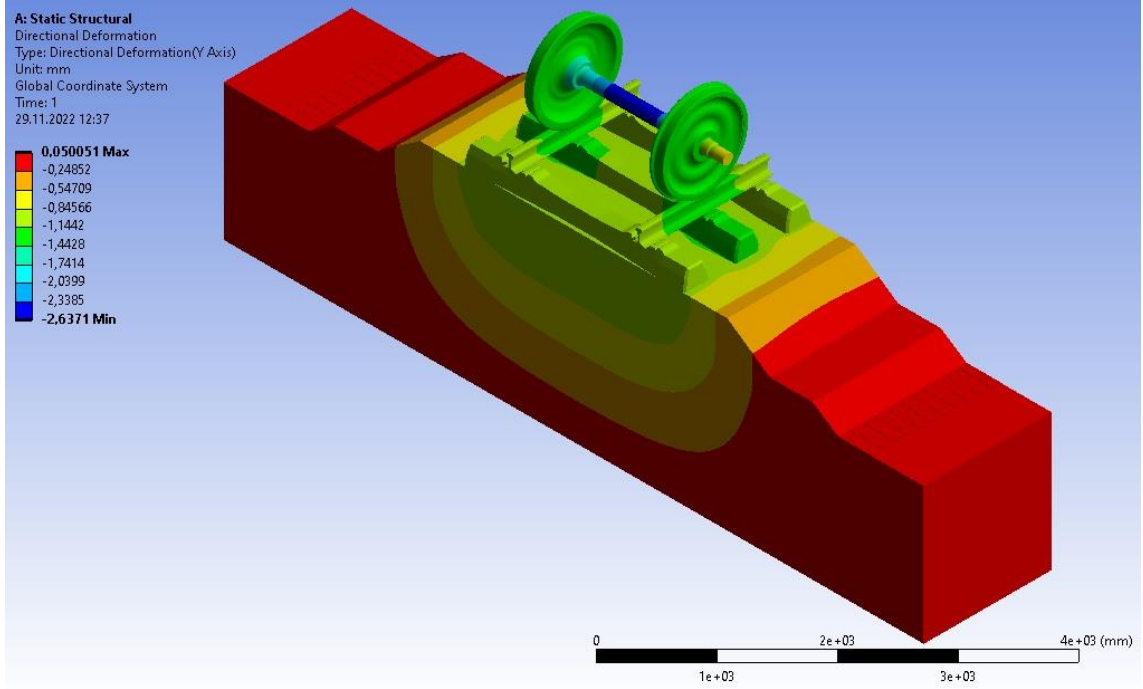


Şekil 5.11 Analiz sonuçlarının okunduğu yatay hat (path).

Şekil 5.12’de geogridsiz demiryolu üstyapı tasarımı 225 kN dingil yükü altında meydana gelen yer değişimleri ve Şekil 5.13’te 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogridli bir demiryolu üstyapı tasarımı için 225 kN dingil yükü altında meydana gelen yer değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.12 225 kN dingil yükü altında geogridsiz üst yapı tasarımı için yer değiştirme.



Şekil 5.13 225 kN dingil yükü altında 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogridli üst yapı tasarımı için yer değiştirme.

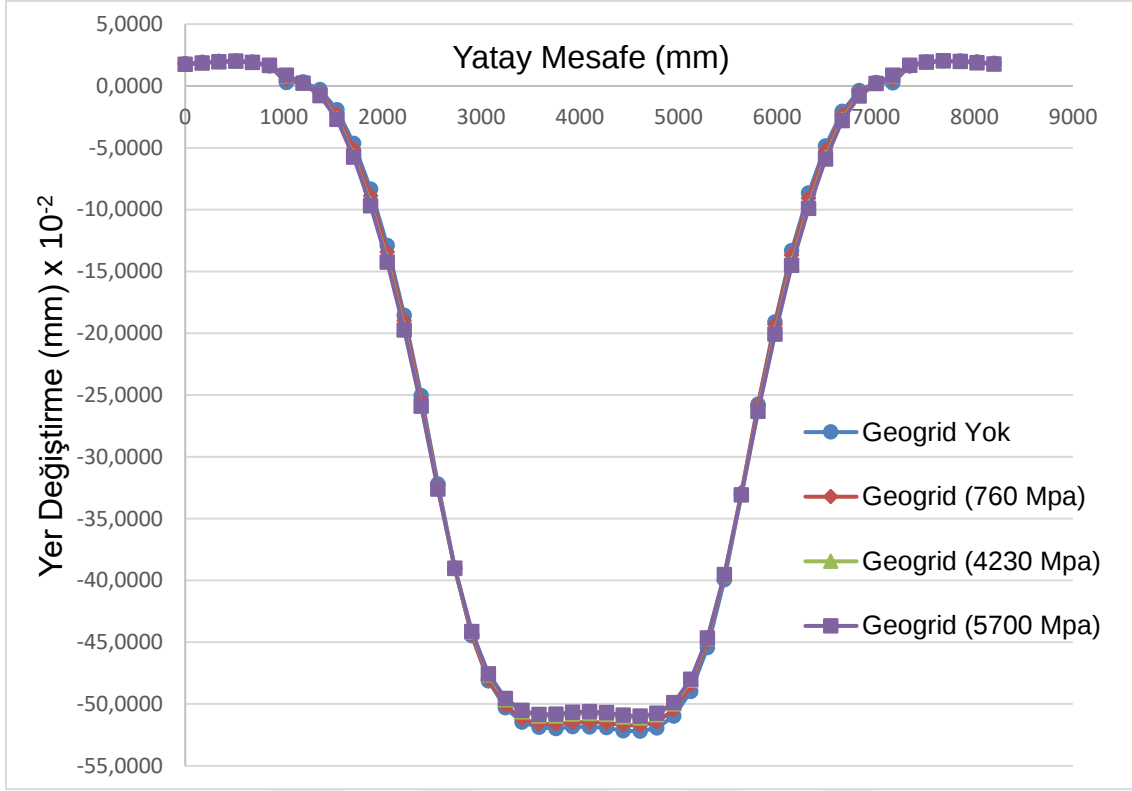
6. BULGULAR

Tasarımı yapılmış olan demiryolu üstyapısı üzerinde yapılan analizler sonucunda; 3 farklı dingil yükü için, 3 farklı geogrid için elastisite modülü kullanılarak, farklı albalast tabaka kalınlığı altında ve 4 farklı taban zemini elastisite modülü kullanılarak ayrı ayrı analizler yapılmış ve bu analizler neticesinde taban zemini üst seviyesinde meydana gelen gerilme değerleri grafikler yardımıyla gösterilmiştir.

6.1 Dingil Yükü Değişimine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi

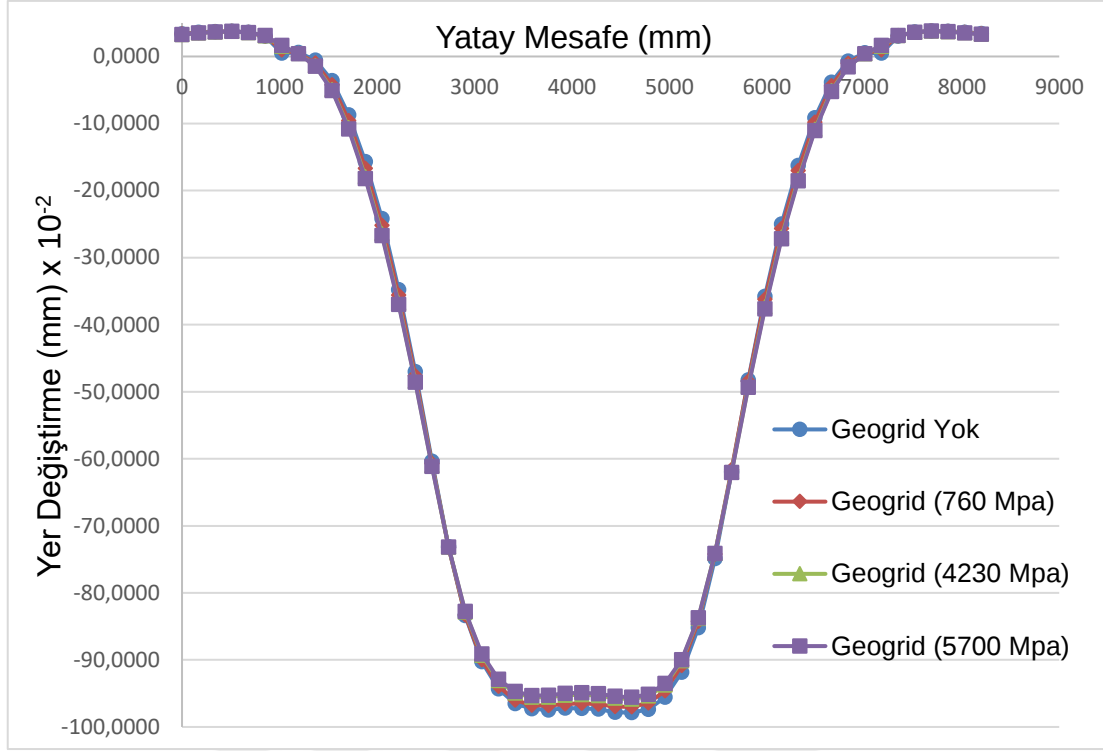
Bu çalışmada demiryolu üstyapı tasarımı için sırasıyla 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükünün gerilme ve deformasyona etkisi analiz edilmiştir.

Şekil 6.1’de 120 kN dingil yükü uygulanan 20 cm albalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca düşey yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum düşey yer değişimi 0,5219 mm iken, 760 MPa geogrid için 0,5174 mm, 4230 MPa geogrid için 0,5112 mm ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 0,5098 mm’dir. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az deformasyon oluşmasını sağlayan 5700 MPa geogrid kullanımı deformasyonların %2,3 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



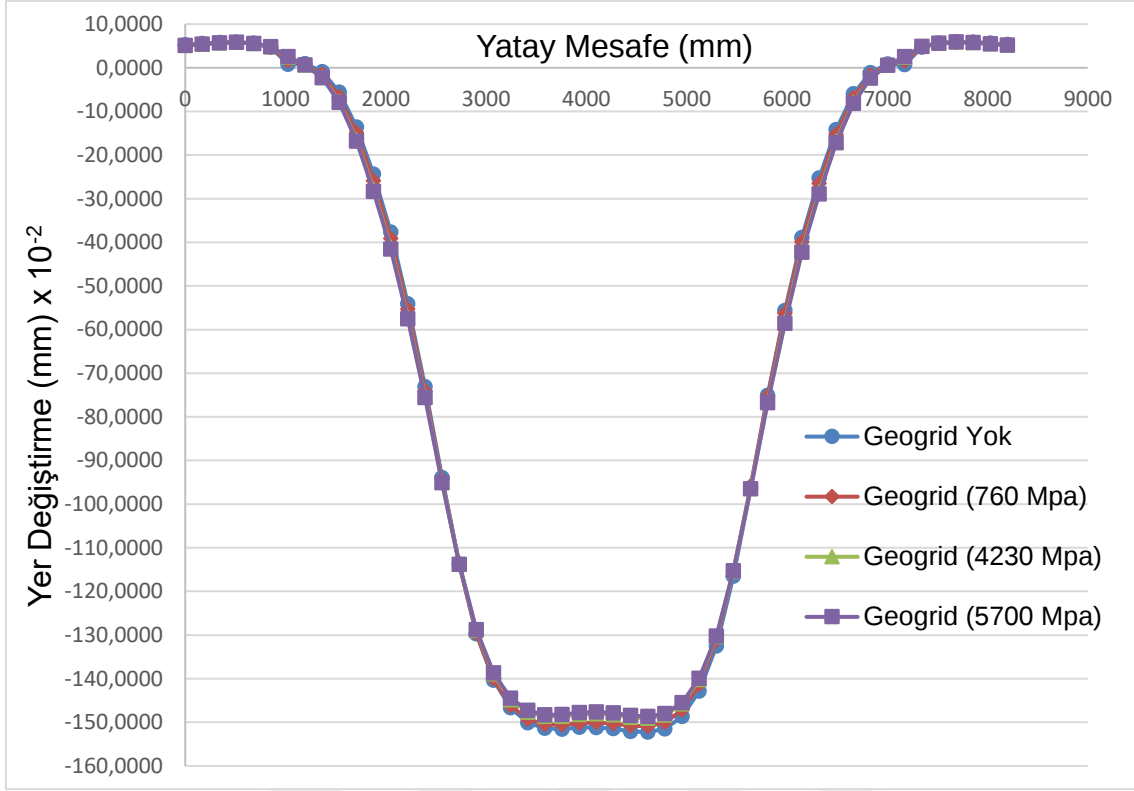
Şekil 6.1 120 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.2’de 225 kN dingil yükü uygulanan 20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca düşey yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum düşey yer değişimi 0,9786 mm iken, 760 MPa geogrid için 0,9702 mm, 4230 MPa geogrid için 0,9585 mm ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 0,9558 mm’dir. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az deformasyon oluşmasını sağlayan 5700 MPa geogrid kullanımı deformasyonların %2,3 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



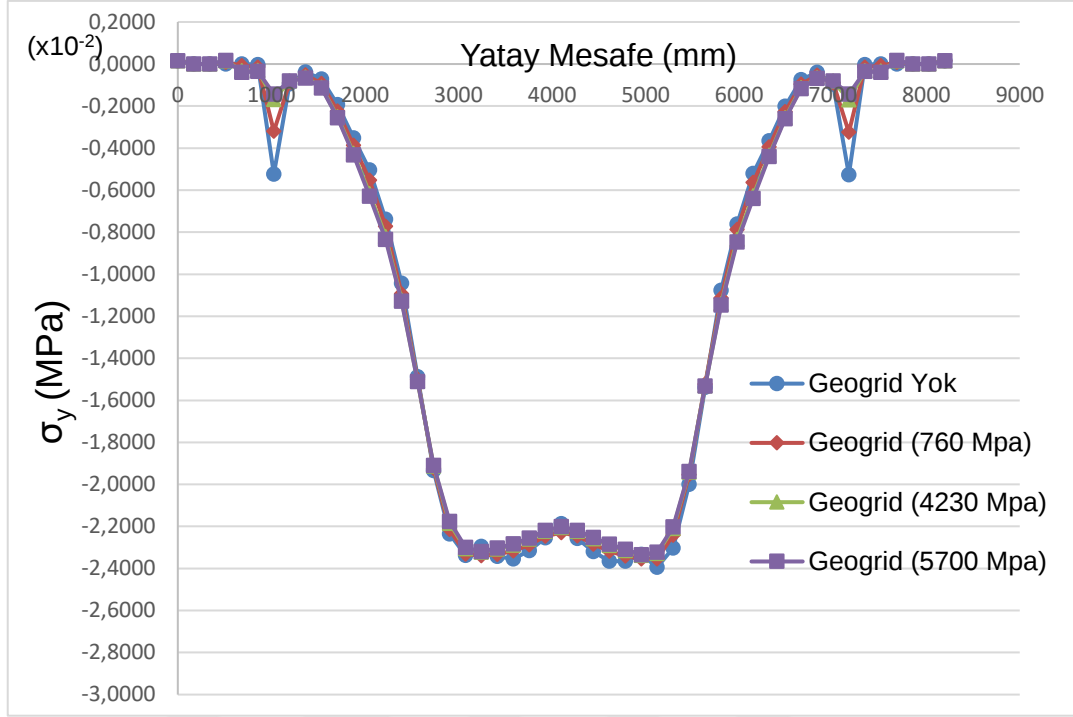
Şekil 6.2 225 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.3'te 350 kN dingil yükü uygulanan 20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca düşey yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum düşey yer değişimi 1,522 mm iken, 760 MPa geogrid için 1,51 mm, 4230 MPa geogrid için 1,491 mm ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 1,487 mm'dir. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az deformasyon oluşmasını sağlayan 5700 MPa geogrid kullanımı deformasyonların %2,3 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



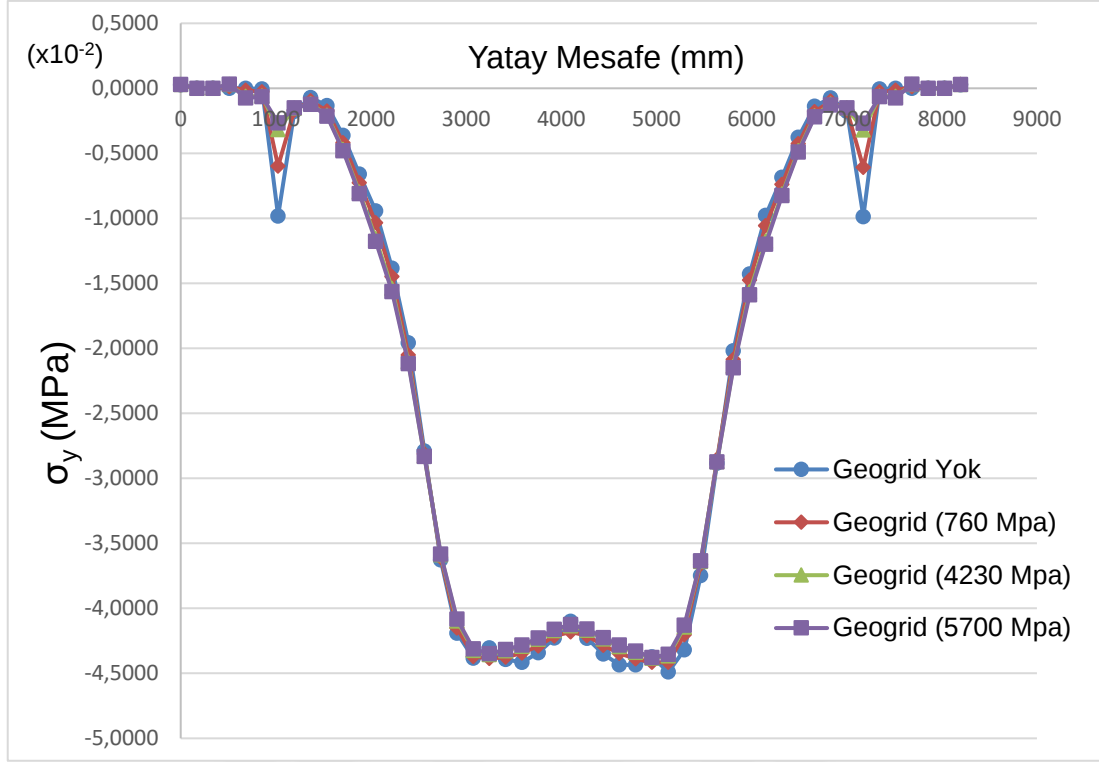
Şekil 6.3 350 kN dingil yükü için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.4'te gösterilen grafikte 120 kN dingil yükü uygulanan 20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0239 MPa iken, 760 MPa geogrid için 0,0235 MPa, 4230 MPa geogrid için 0,0234 MPa ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 0,0234 MPa'dır. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az gerilmelerin olduğu 5700 MPa geogrid kullanımı Y yönlü gerilmelerin %2,1 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



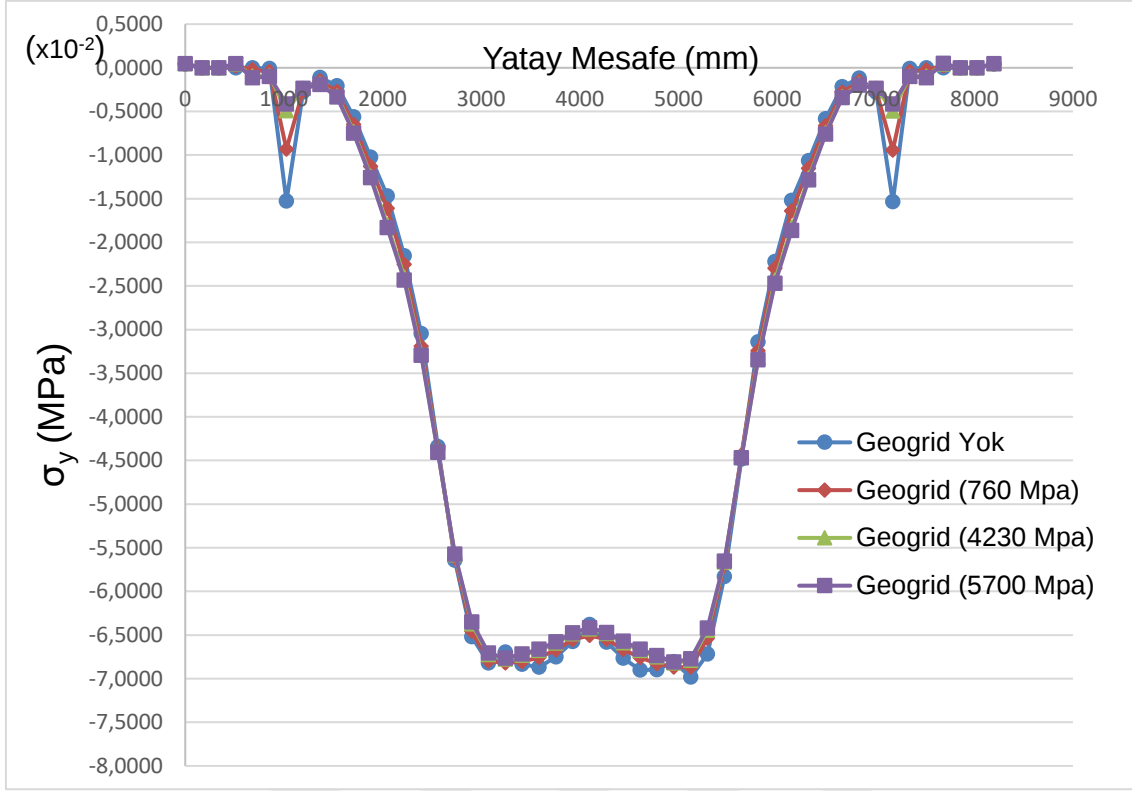
Şekil 6.4 120 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.5'te gösterilen grafikte 225 kN dingil yükü uygulanan 20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0449 MPa iken, 760 MPa geogrid için 0,0441 MPa, 4230 MPa geogrid için 0,0438 MPa ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 0,0438 MPa'dır. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az gerilmelerin olduğu 5700 MPa geogrid kullanımı Y yönlü gerilmelerin %2,4 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



Şekil 6.5 225 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.6’da gösterilen grafikte 350 kN dingil yükü uygulanan 20 cm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış olan üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0698 MPa iken, 760 MPa geogrid için 0,0687 MPa, 4230 MPa geogrid için 0,0682 MPa ve 5700 MPa geogrid kullanımında ise 0,0681 MPa’dır. Geogrid kullanılmamış olan zemine kıyasla en az gerilmelerin olduğu 5700 MPa geogrid kullanımı Y yönlü gerilmelerin %2,4 oranında azalmasına yardımcı olmuştur.



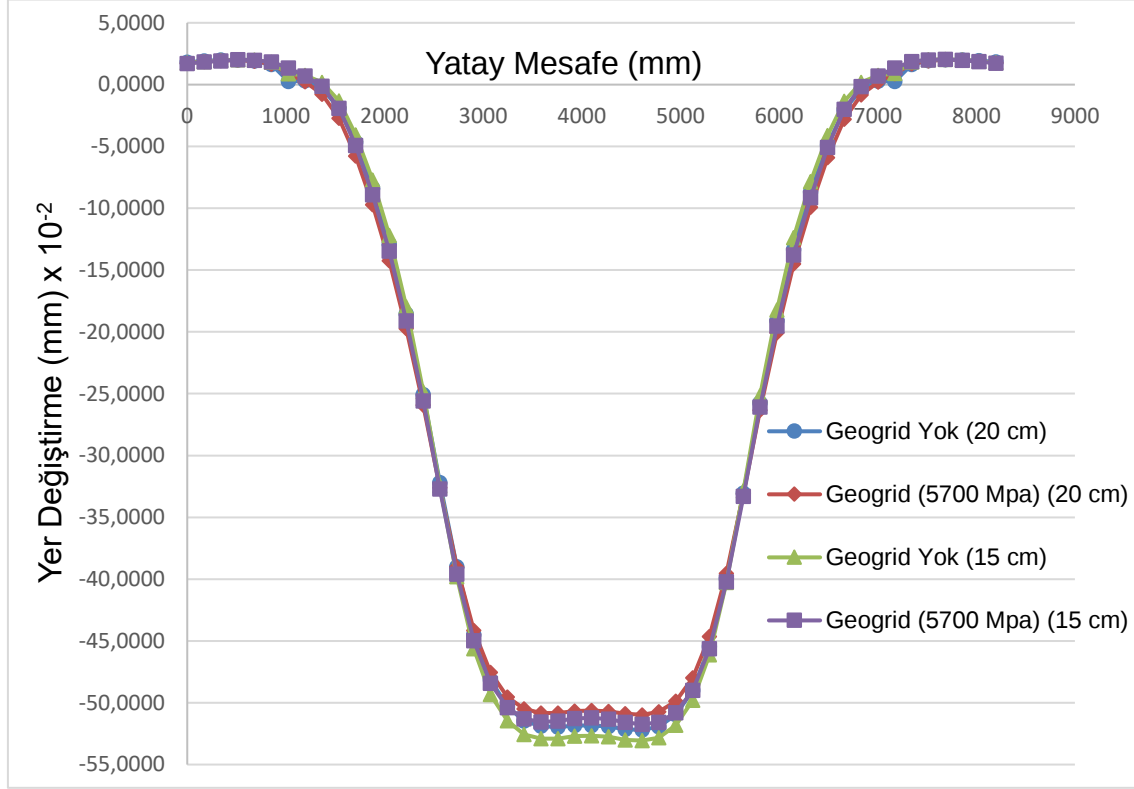
Şekil 6.6 350 kN dingil yükü için Y yönlü gerilme grafiği.

6.2 Altbalast Tabaka Kalınlığı Değişimine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi

Yapılan çalışmada iki farklı altbalast tabaka kalınlığı seçilerek ANSYS programı yardımıyla oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler üstyapı tasarımında incelenmiştir.

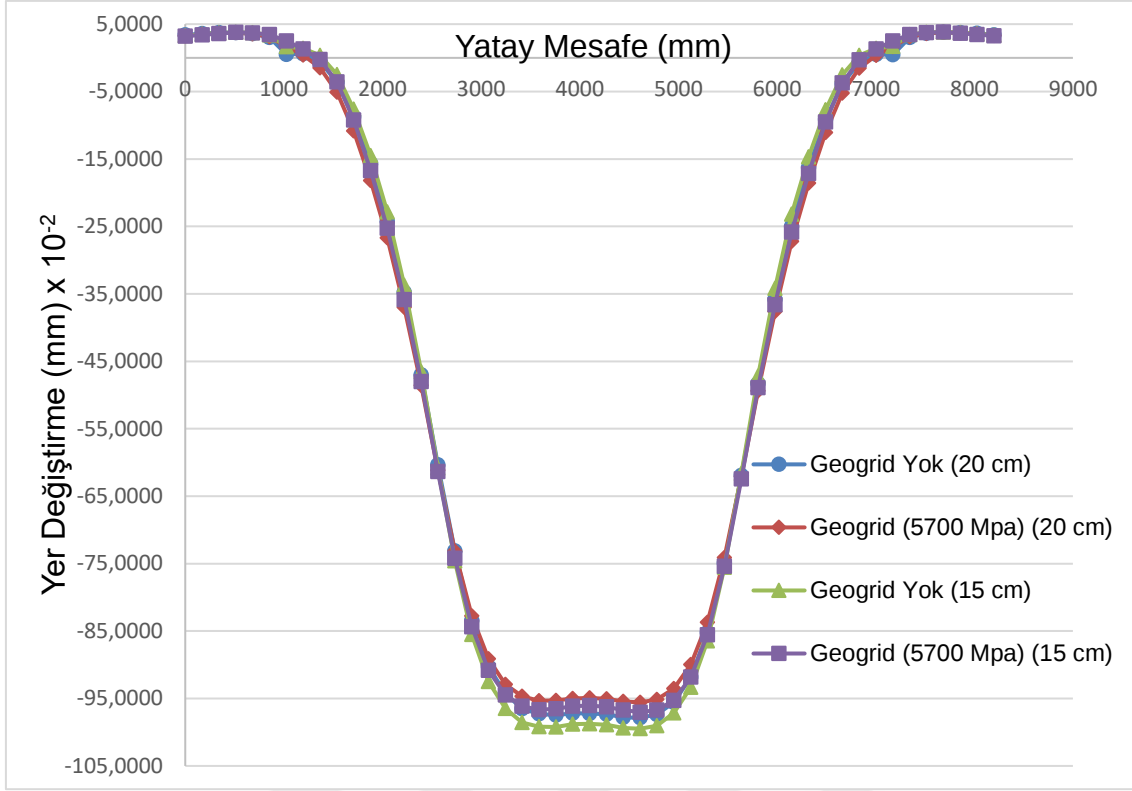
Şekil 6.7’de 120 kN dingil yükü ve zemin türü 1 için altbalast tabaka kalınlığının 150 mm ve 200 mm olduğu üstyapı tasarımında; geogrid olmadan ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid varlığında meydana gelen yer değiştirmeler incelenmiştir. Farklı altbalast tabaka kalınlıklarının deformasyona karşı etkili olduğu grafiklerde görülmektedir. 150 mm tabaka kalınlığı için geogrid olmadan meydana gelen en fazla yer değişimi 0,5306 mm iken; tasarımda meydana gelen en az deformasyonu sağlayan 200 mm altbalast tabaka kalınlığı ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanımı ile 0,5098 mm elde edilmiştir. Oluşan yer değişim farkı oran olarak yaklaşık %4’tür. Ayrıca 200 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid olmadan yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme 0,5198 mm iken; 150 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid kullanılarak yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme

sonucu 0,5156 mm çıkmıştır. Bu değerler ile geogrid kullanımı ile tabaka kalınlığının azaltılabileceği sonucuna varılmaktadır.



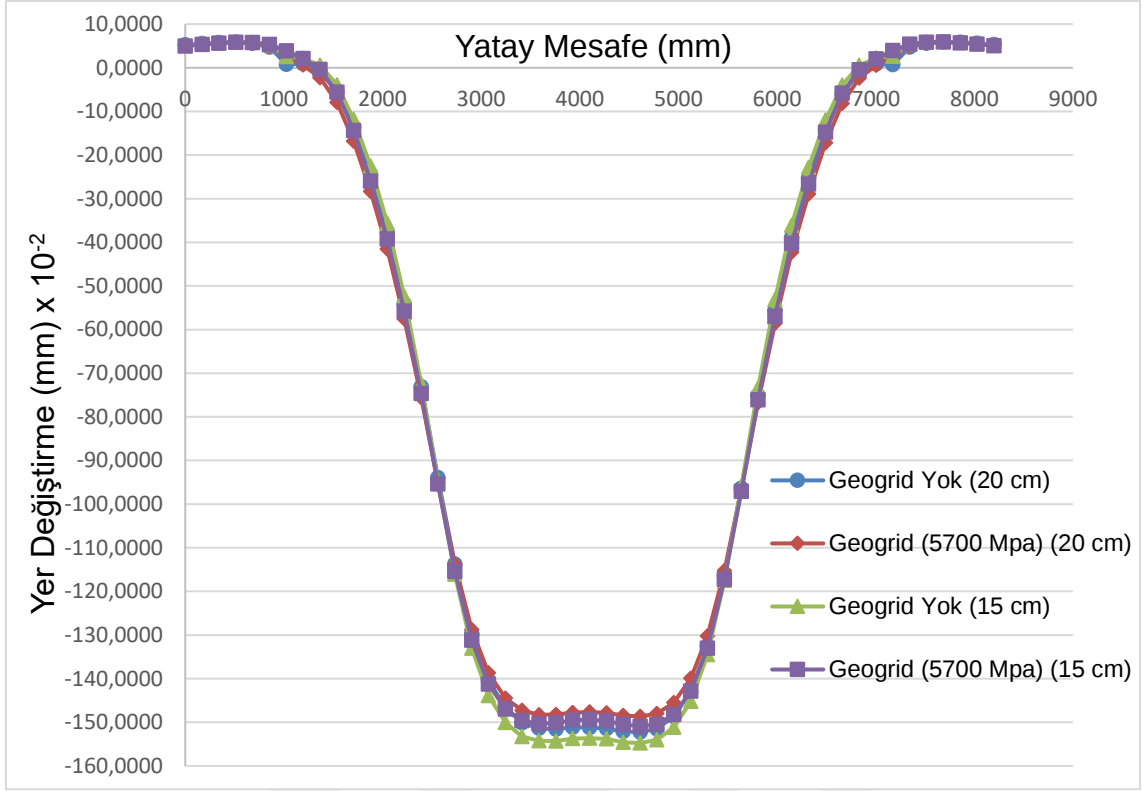
Şekil 6.7 120 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi grafiği.

Şekil 6.8’de 225 kN dingil yükü ve zemin türü 1 için farklı altbalast tabaka kalınlıkları, geogrid olmadan ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid varlığında meydana gelen yer değiştirmeler incelenmiştir. Sonuçlar 120 kN dingil yükü için yapılan analizlere paralel şekilde çıkmaktadır. 150 mm tabaka kalınlığı için geogrid olmadan meydana gelen en fazla yer değişimi 0,9948 mm iken; tasarımda en az deformasyonun oluşmasını sağlayan 200 mm altbalast tabaka kalınlığı ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanımı ile 0,9558 mm elde edilmiştir. Oluşan yer değişim farkı oran olarak yine yaklaşık %4’tür. 200 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid olmadan yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme 0,9786 mm iken; 150 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid kullanılarak yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme sonucu 0,9703 mm çıkmıştır. Geogrid kullanımı ile tabaka kalınlığının azaltılabileceği sonucu görülmektedir.



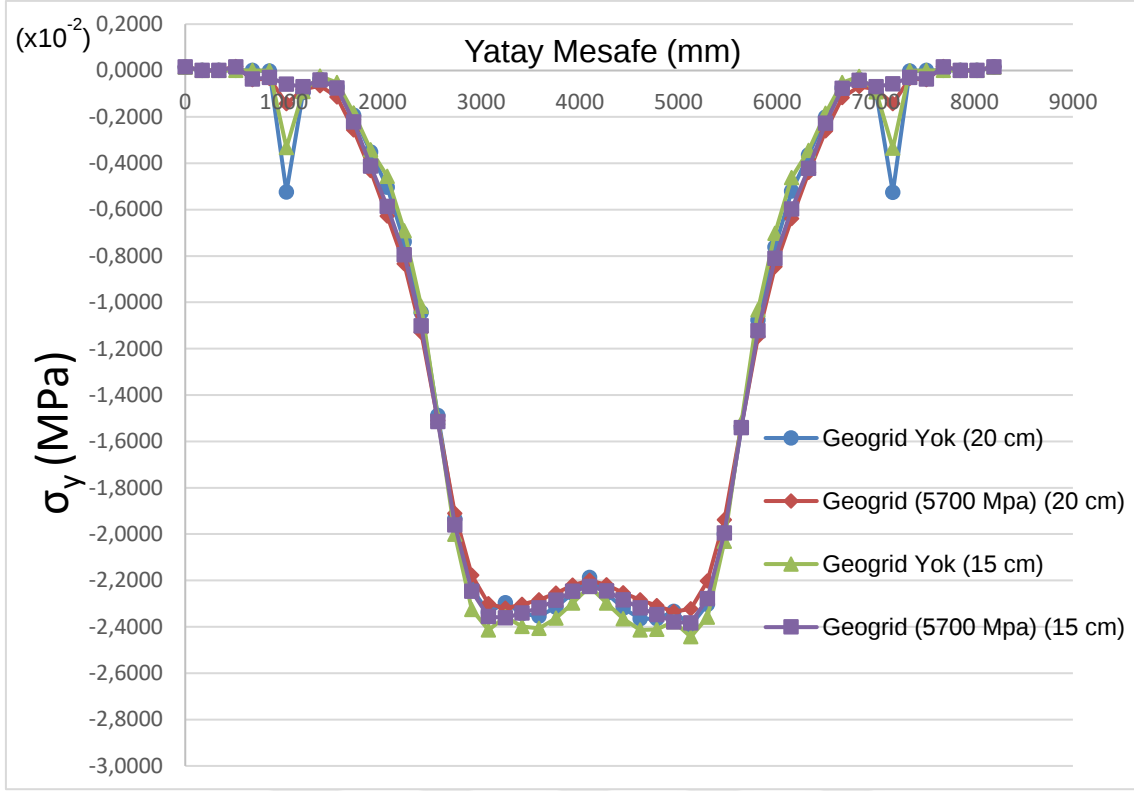
Şekil 6.8 225 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi grafiği.

Şekil 6.9’da 350 kN dingil yükü ve zemin türü 1 için farklı altbalast tabaka kalınlıkları, geogrid olmadan ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid varlığında meydana gelen yer değiştirmeler incelenmiştir. Sonuçlar 120 kN ve 225 kN dingil yükü için yapılan analizlere paralel şekilde çıkmaktadır. 150 mm tabaka kalınlığı için geogrid olmadan meydana gelen en fazla yer değişimi 1,548 mm iken; tasarımda en az deformasyonun oluşmasını sağlayan 200 mm altbalast tabaka kalınlığı ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanımı ile 1,487 mm elde edilmiştir. Oluşan yer değişim farkı oran olarak yine yaklaşık %4’tür. 200 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid olmadan yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme 1,522 mm iken; 150 mm altbalast tabaka kalınlığına sahip ve geogrid kullanılarak yapılan tasarım için en fazla gerçekleşen yer değiştirme sonucu 1,504 mm çıkmıştır. Geogrid kullanımı ile tabaka kalınlığının azaltılabileceği sonucu burada da görülmektedir.



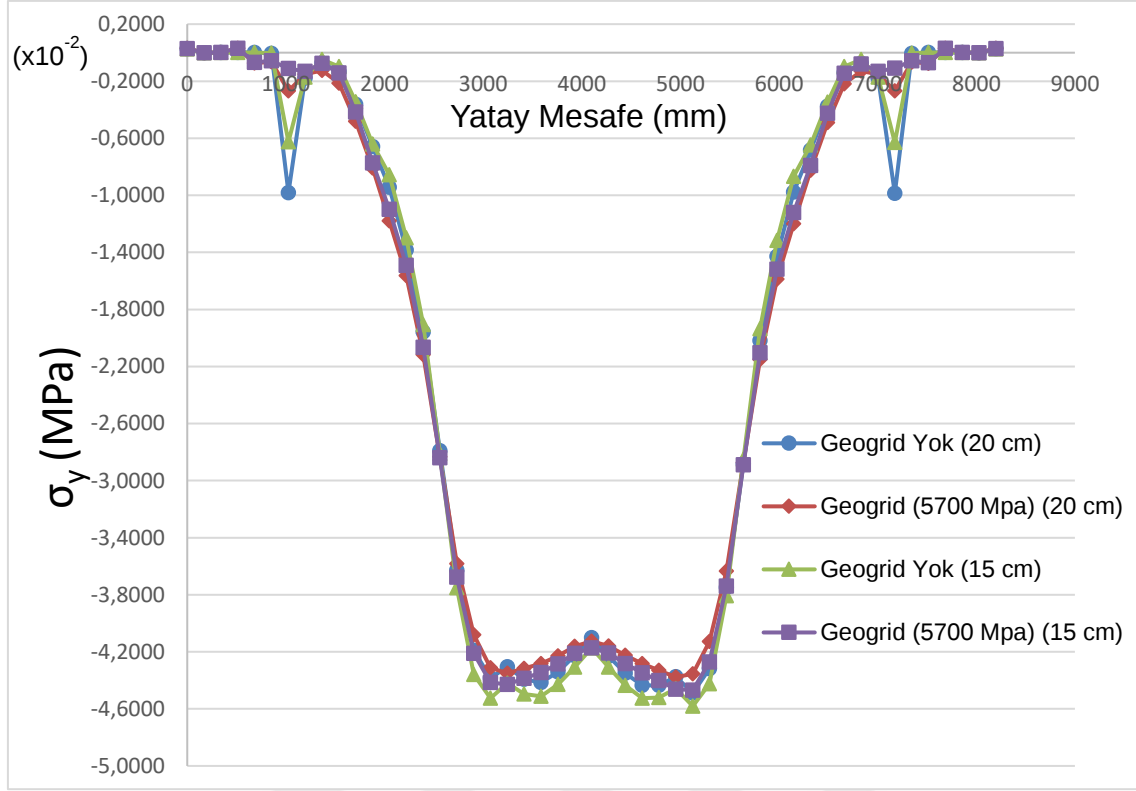
Şekil 6.9 350 kN dingil yükü için altbalast tabaka kalınlığının şekil değişimine etkisi grafiği.

Şekil 6.10'da gösterilen grafikte 120 kN dingil yükü uygulanan 150 mm ve 200 mm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0244 MPa iken, 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için Y yönlü gerilme değeri 0,0239 MPa çıkmaktadır. Geogrid kullanılması durumunda ise 150 mm tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme değeri 0,0238 MPa iken; 200 mm tabaka kalınlığı için 0,0233 MPa değer çıkmaktadır. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı ile 5700 MPa geogrid kullanılmış 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı kıyaslandığında Y yönlü gerilmeler %4,5 oranda azalmıştır. Yer değiştirme grafiklerine benzer şekilde; geogrid kullanılmamış 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı ile 150 mm tabaka kalınlığına sahip ve geogrid kullanılmış üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değerleri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Bu da geogrid kullanımının altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasında faydalı olduğu sonucunu desteklemektedir.



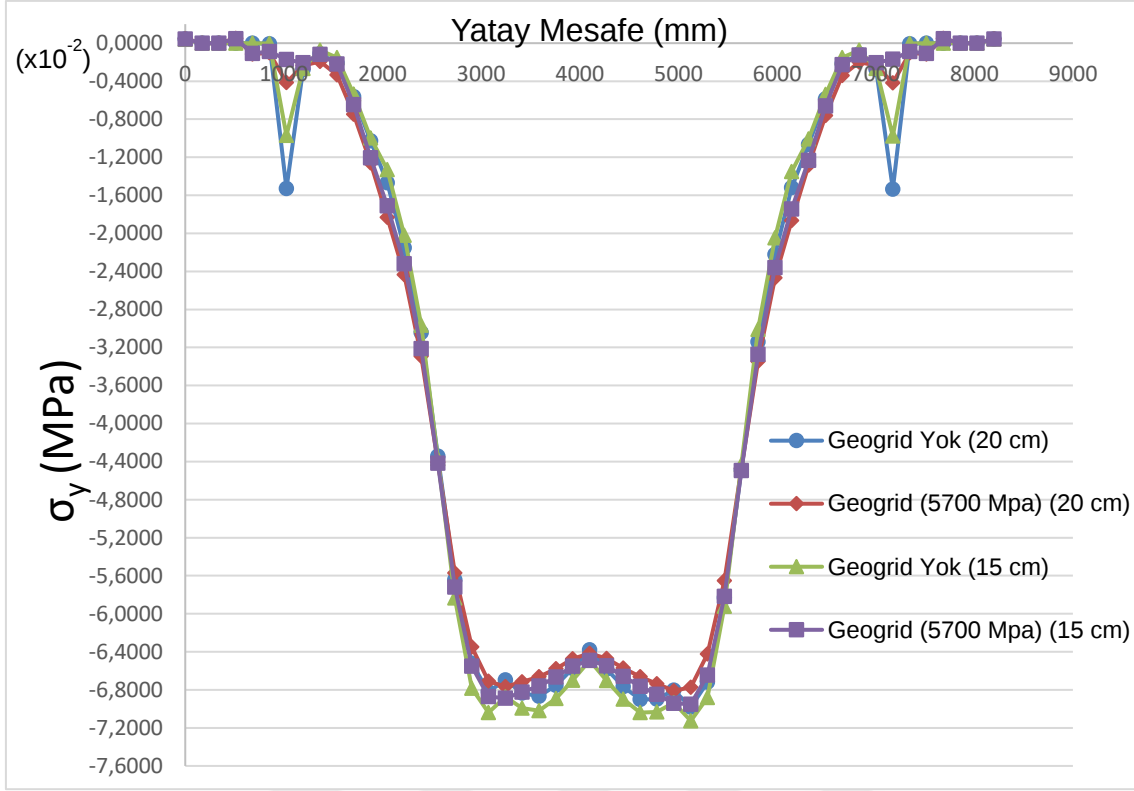
Şekil 6.10 120 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.11’de gösterilen grafikte 225 kN dingil yükü uygulanan 150 mm ve 200 mm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0458 MPa iken, 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için Y yönlü gerilme değeri 0,0449 MPa çıkmaktadır. Geogrid kullanılması durumunda ise 150 mm tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme değeri 0,0447 MPa iken; 200 mm tabaka kalınlığı için 0,0438 MPa değer çıkmaktadır. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı ile 5700 MPa geogrid kullanılmış 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı kıyaslandığında Y yönlü gerilmeler %4,4 oranda azalmıştır. Geogrid kullanımının altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasında faydalı olduğu sonucunu burada da görülmektedir.



Şekil 6.11 225 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.12’de gösterilen grafikte 350 kN dingil yükü uygulanan 150 mm ve 200 mm altbalast tabakası ve taban zemin türü 1 için yatay hat boyunca Y yönlü gerilme grafiği görülmektedir. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için maksimum Y yönlü gerilme değeri 0,0713 MPa iken, 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı için Y yönlü gerilme değeri 0,0698 MPa çıkmaktadır. Geogrid kullanılması durumunda ise 150 mm tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme değeri 0,0695 MPa iken; 200 mm tabaka kalınlığı için 0,0681 MPa değer çıkmaktadır. Geogrid kullanılmamış 150 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı ile 5700 MPa geogrid kullanılmış 200 mm tabaka kalınlığına sahip üstyapı tasarımı kıyaslandığında Y yönlü gerilmeler %4,5 oranda azalmıştır. Geogrid kullanımının altbalast tabaka kalınlığının azaltılmasında faydalı olduğu sonucunu burada da görülmektedir.



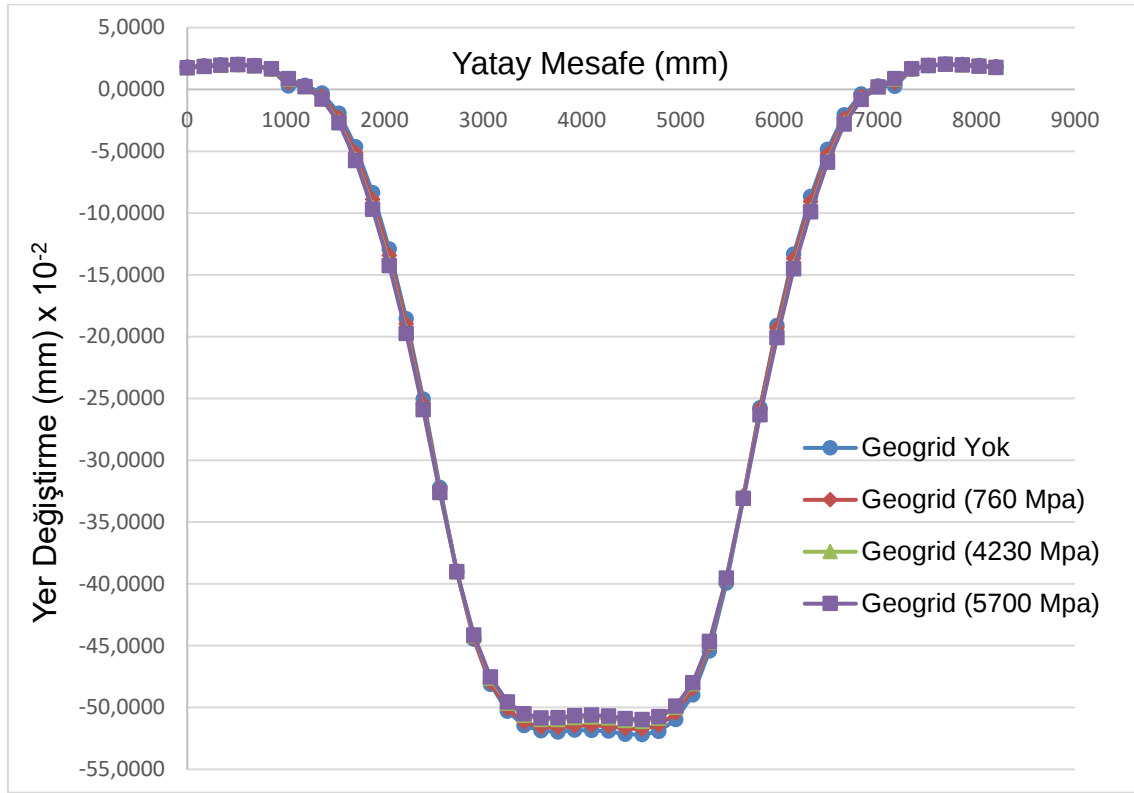
Şekil 6.12 350 kN dingil yükü ve farklı altbalast tabaka kalınlığı için Y yönlü gerilme grafiği.

6.3 Farklı Elastisite Modülüne Sahip Taban Zemini Türlerine Göre Demiryolu Üstyapı Analizi

Yapılan çalışmanın bu aşamasında taban zeminine ait farklı elastisite modülleri için analizler yapılmış ve tasarımda meydana gelen deformasyonlar ölçülmüştür. Analizde kullanılan zemin türleri sırasıyla; taban zemini 1 ($E=35$ MPa), taban zemini 2 ($E=80$ MPa), taban zemini 3 ($E=140$ MPa), taban zemini 4 ($E=200$ MPa)'tür. Dingil yükleri ise; 120 kN, 225 kN ve 350 kN olarak uygulanmıştır.

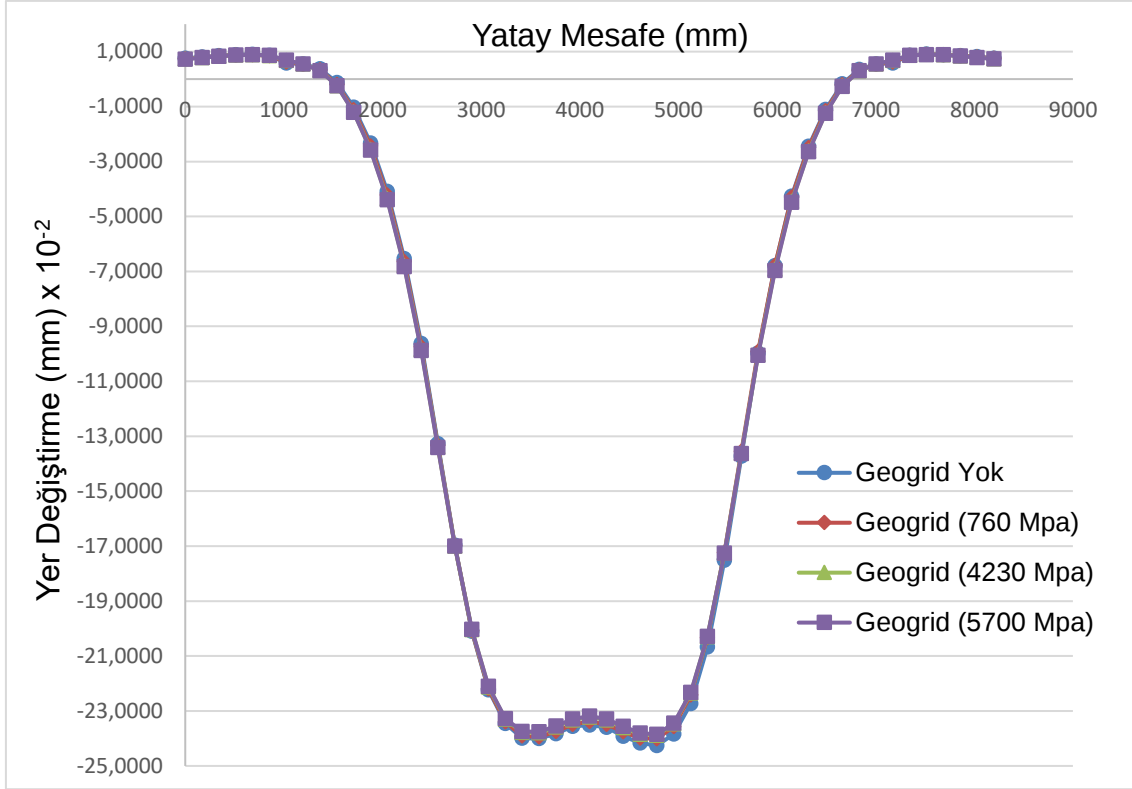
Şekil 6.13'te 105 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 1 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,5219 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,5174 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,5112 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,5098 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %2,3

ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



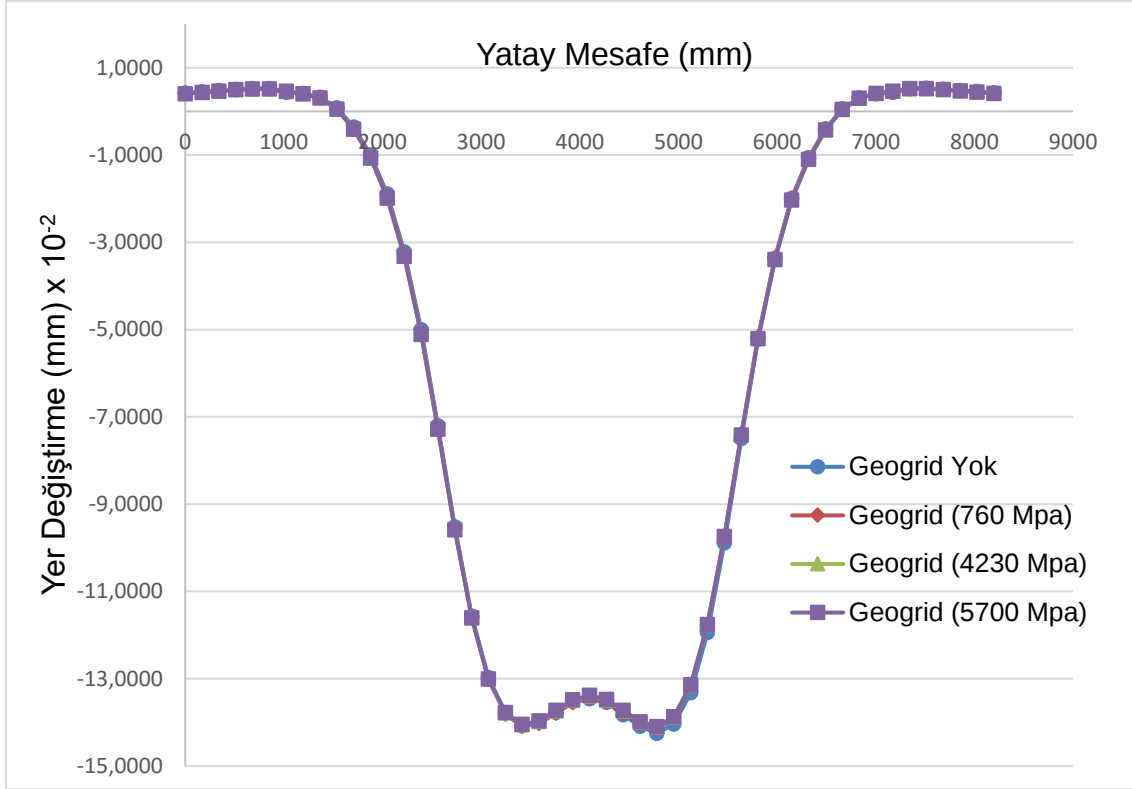
Şekil 6.13 120 kN dingil yükü ve taban zemini 1 (E=35 MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.14'te 105 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 2 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,2426 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2401 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2388 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,2385 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1,7 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



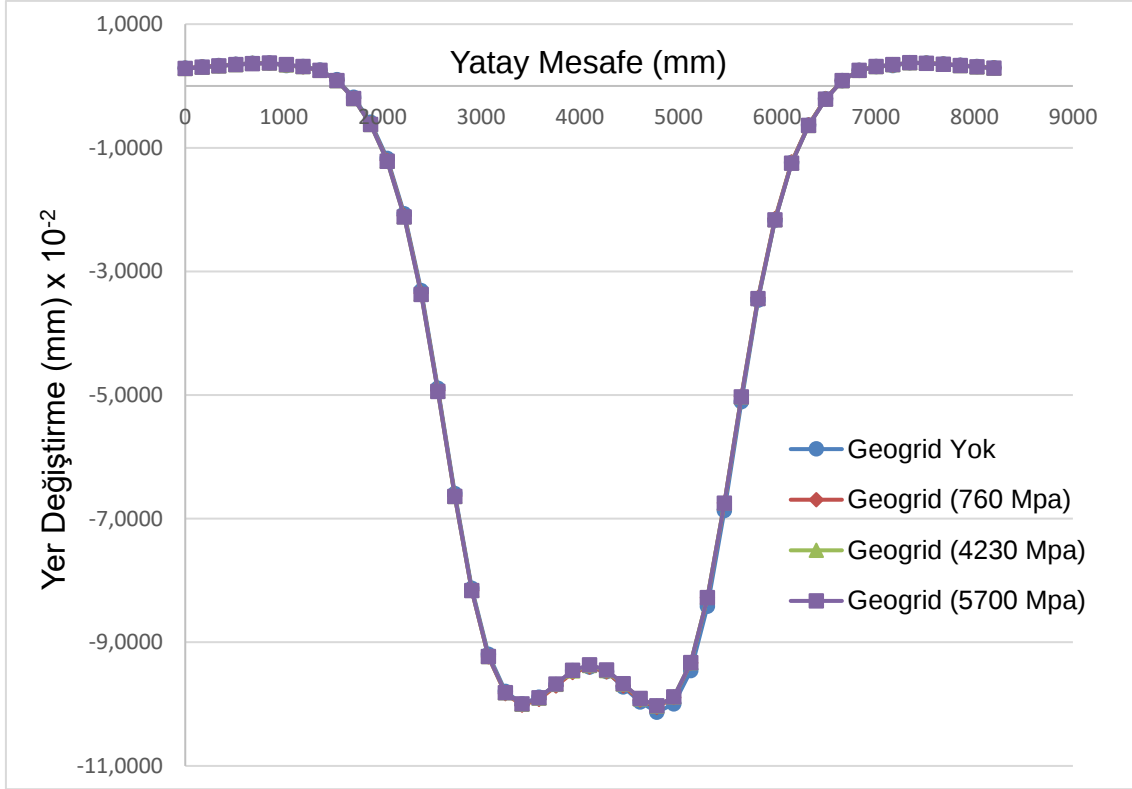
Şekil 6.14 120 kN dingil yükü ve taban zemini 2 ($E=80$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.15'te 105 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 3 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,1425 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1415 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1411 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,1410 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



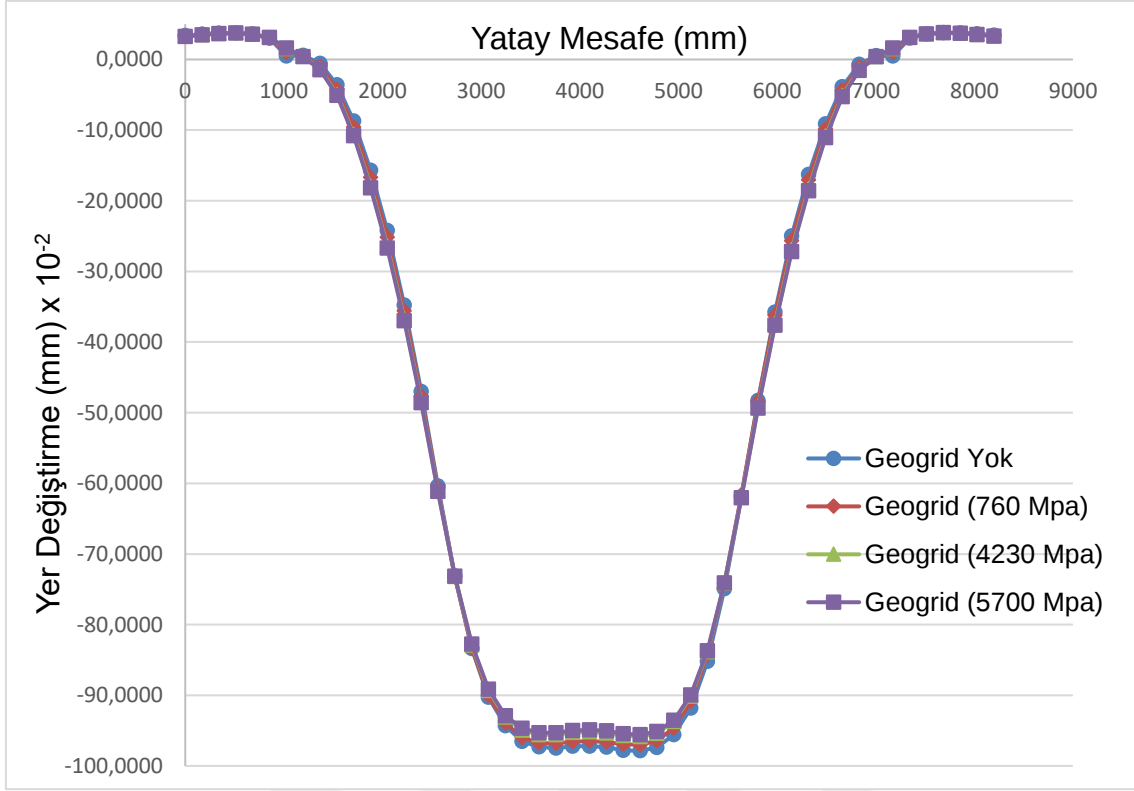
Şekil 6.15 120 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.16'da 105 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 4 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,1013 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1005 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1004 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,1003 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



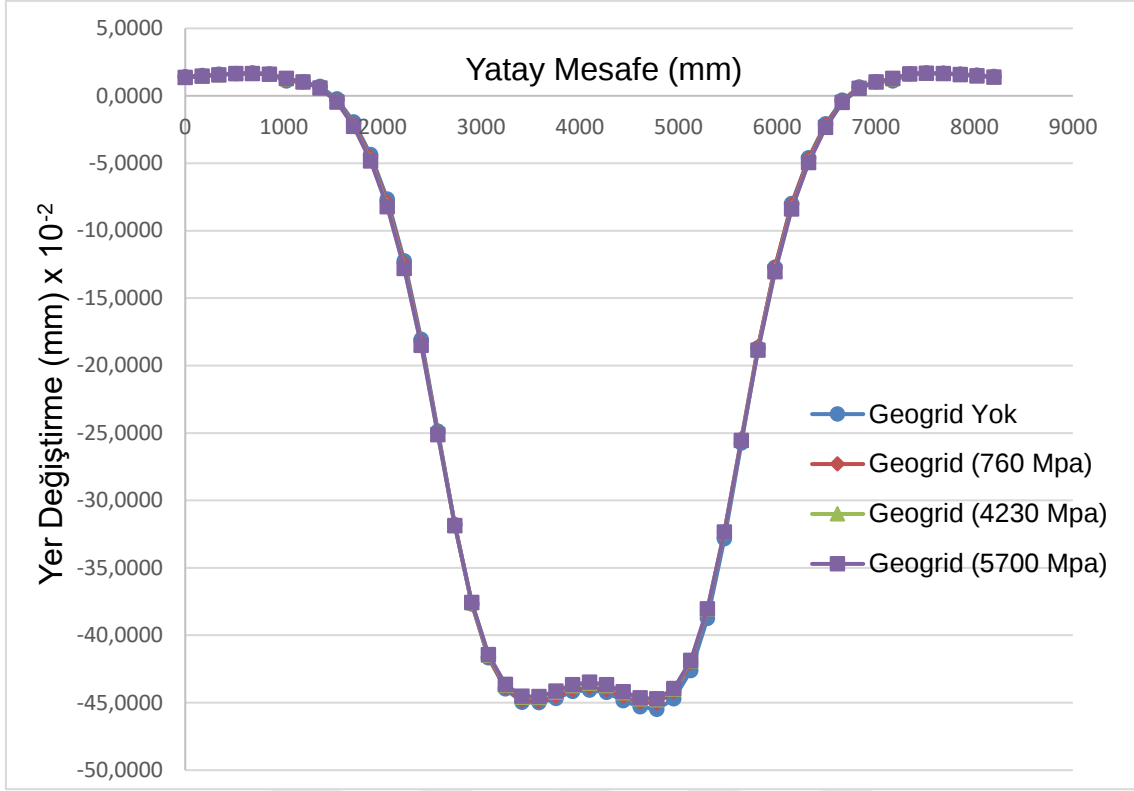
Şekil 6.16 120 kN dingil yükü ve taban zemini 4 ($E=200$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.17’de 225 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 1 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,9786 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,9702 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,9585 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,9558 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %2,3 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



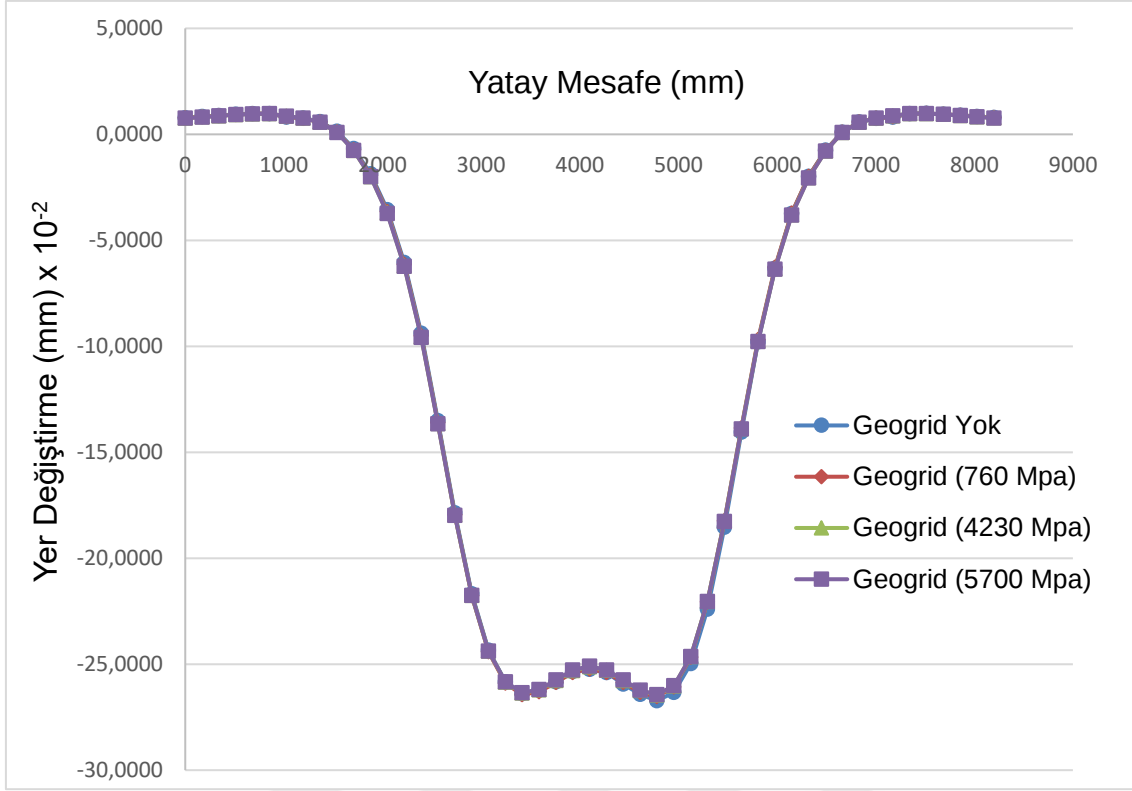
Şekil 6.17 225 kN dingil yükü ve taban zemini 1 ($E=35$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.18’de 225 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 2 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,4549 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,4502 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,4478 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,4472 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1,7 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



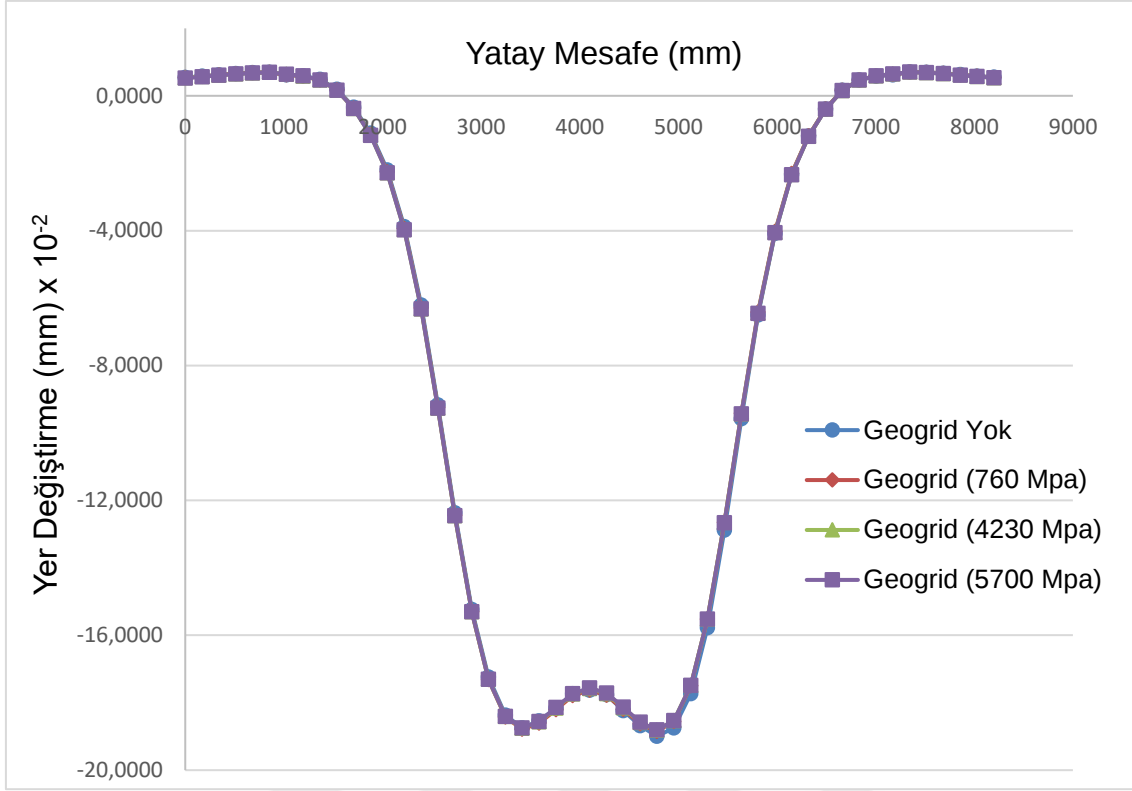
Şekil 6.18 225 kN dingil yükü ve taban zemini 2 ($E=80$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.19’da 225 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 3 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,2673 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2653 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2646 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,2644 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1,1 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



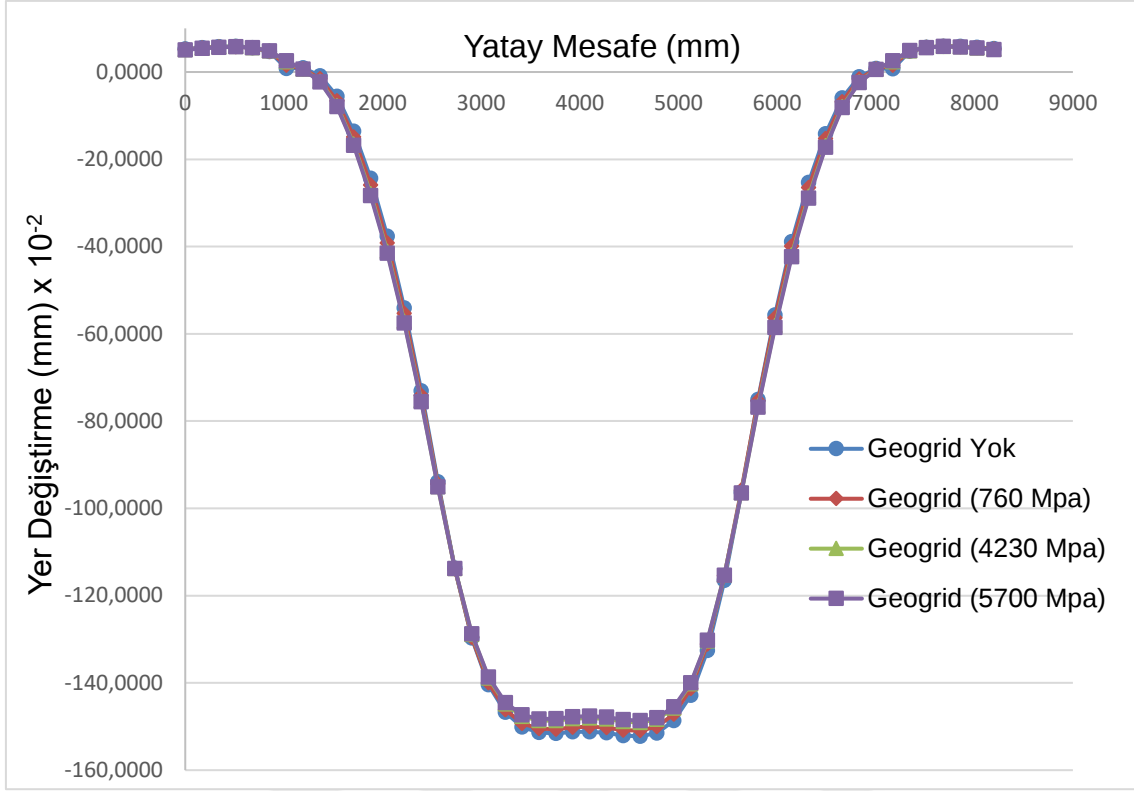
Şekil 6.19 225 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.20’de 225 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 4 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,1899 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1885 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,1882 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,1881 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %0,95 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



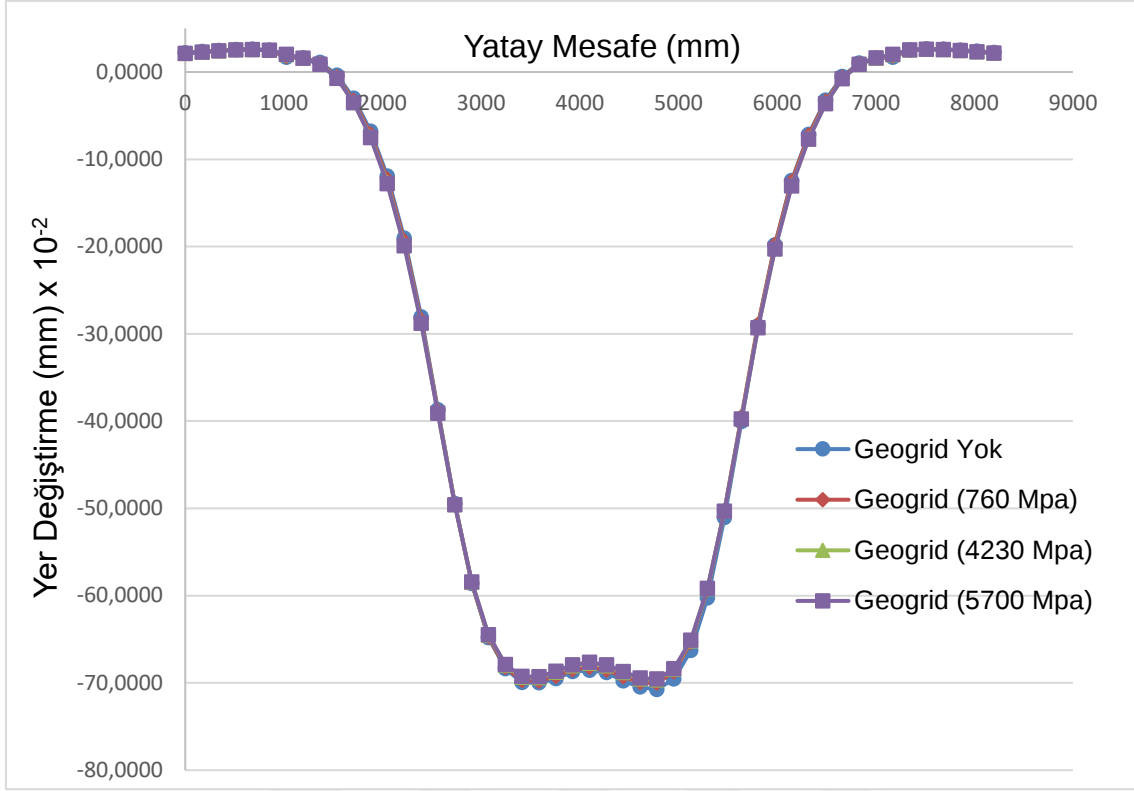
Şekil 6.20 225 kN dingil yükü ve taban zemini 4 (E=200 MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.21’de 350 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 1 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 1,5222 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 1,5092 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 1,4910 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 1,4868 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %2,3 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



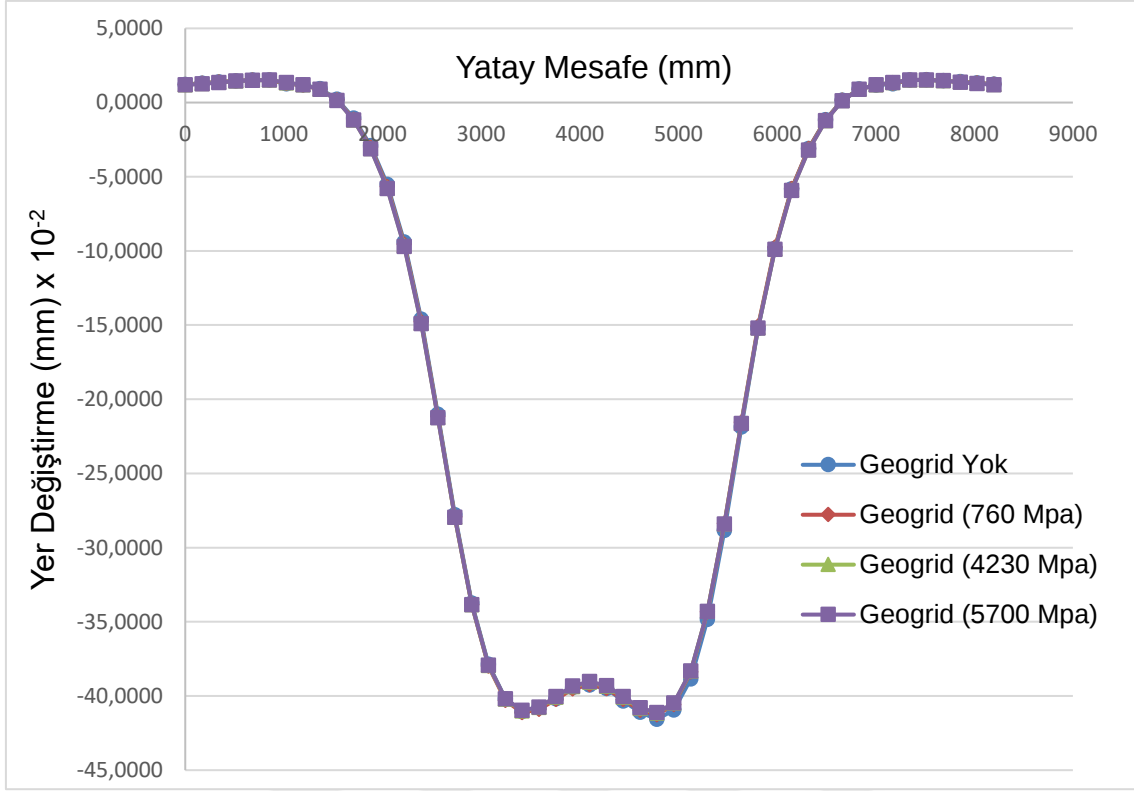
Şekil 6.21 350 kN dingil yükü ve taban zemini 1 ($E=35$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.22’de 350 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 2 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,7076 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 1,5092 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,6966 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,6956 mm’dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1,7 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



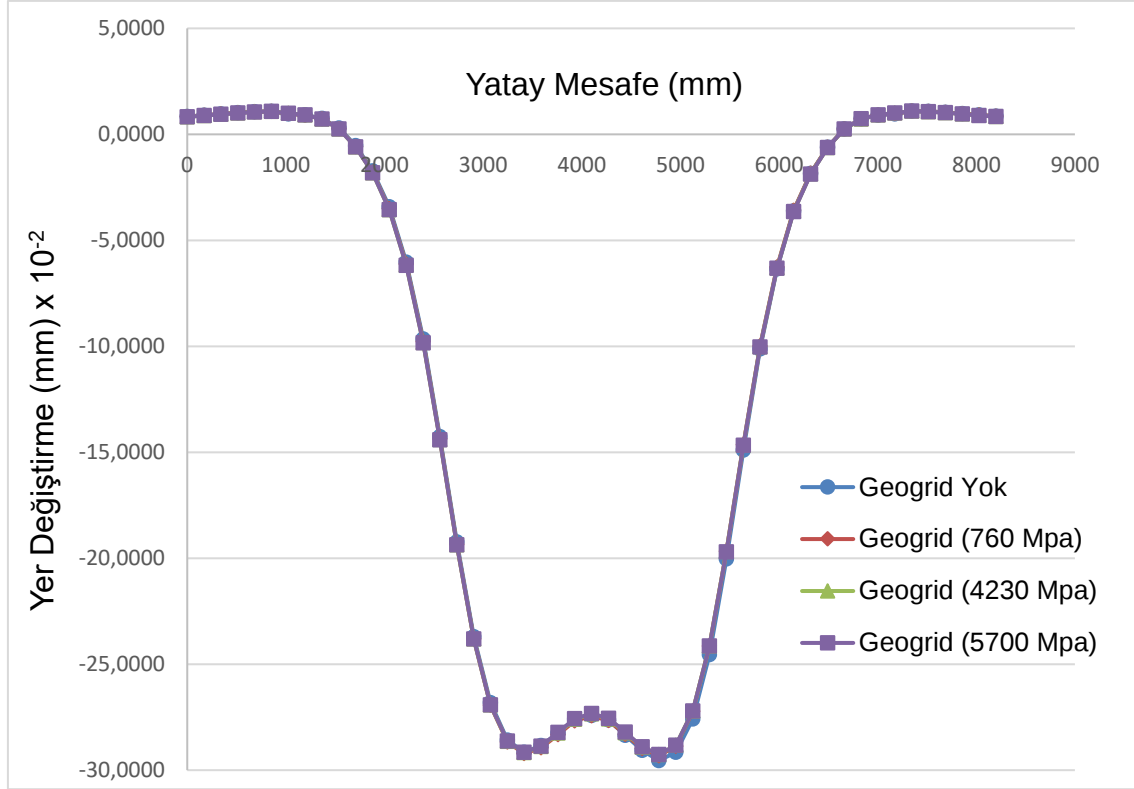
Şekil 6.22 350 kN dingil yükü ve taban zemini 2 (E=80 MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.23'te 350 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 3 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,4157 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,4127 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,4115 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,4113 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1,05 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



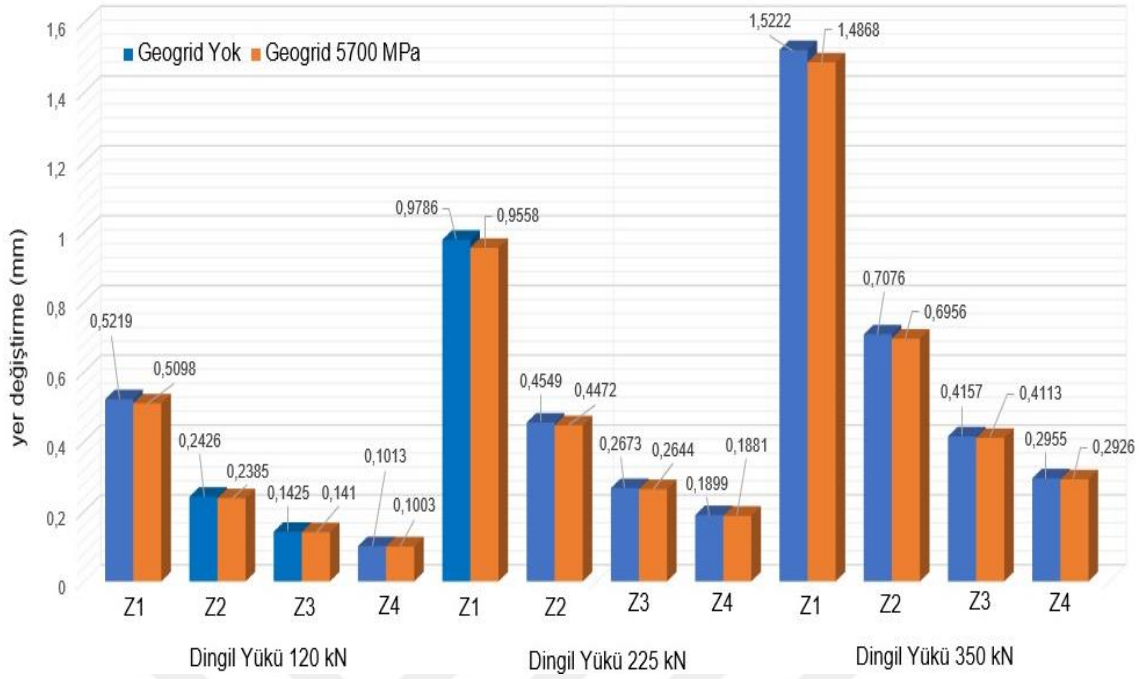
Şekil 6.23 350 kN dingil yükü ve taban zemini 3 ($E=140$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.24'te 350 kN dingil yükü uygulanan taban zemini 4 için taban zemini üst noktasından oluşturulan yatay hat boyunca meydana gelen düşey yer değişim grafiği verilmiştir. Geogrid kullanılmamış tasarım için oluşan en fazla düşey yer değişimi 0,2955 mm iken, 760 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2932 mm, 4230 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması halinde 0,2927 mm ve 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda ise 0,2926 mm'dir. Geogrid kullanılmamış tasarıma göre en az düşey yönlü deformasyon farkı yaklaşık %1 ile 5700 MPa elastisite modülüne sahip geogrid kullanılması durumunda görülmüştür.



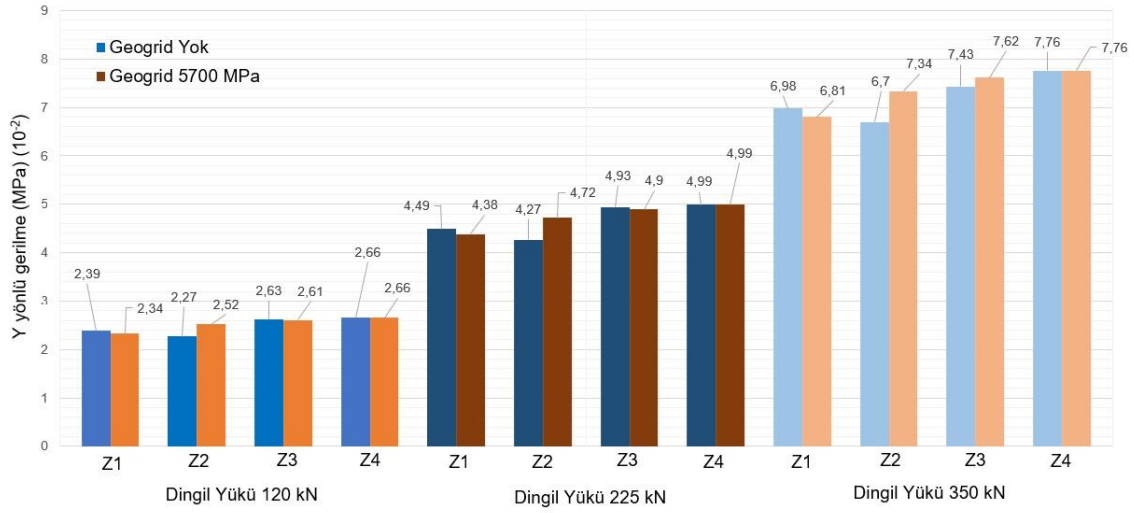
Şekil 6.24 350 kN dingil yükü ve taban zemini 4 ($E=200$ MPa) için düşey yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.25'te 200 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için düşey yönlü yer değişim maksimum değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. Taban zemin türü değişiminin meydana gelen düşey yönlü yer değişimine etkisinin çok önemli olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Ayrıca grafikler incelendiğinde taban zemini elastisite modülü yükseldikçe yani taban zemini iyileştikçe geogridin etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle geogrid, elastisite modülü düşük zayıf taban zemini için daha iyi sonuçlar vermekteyken; taban zemini kalitesi arttıkça geogridin etkisi yüzde olarak düşmektedir.



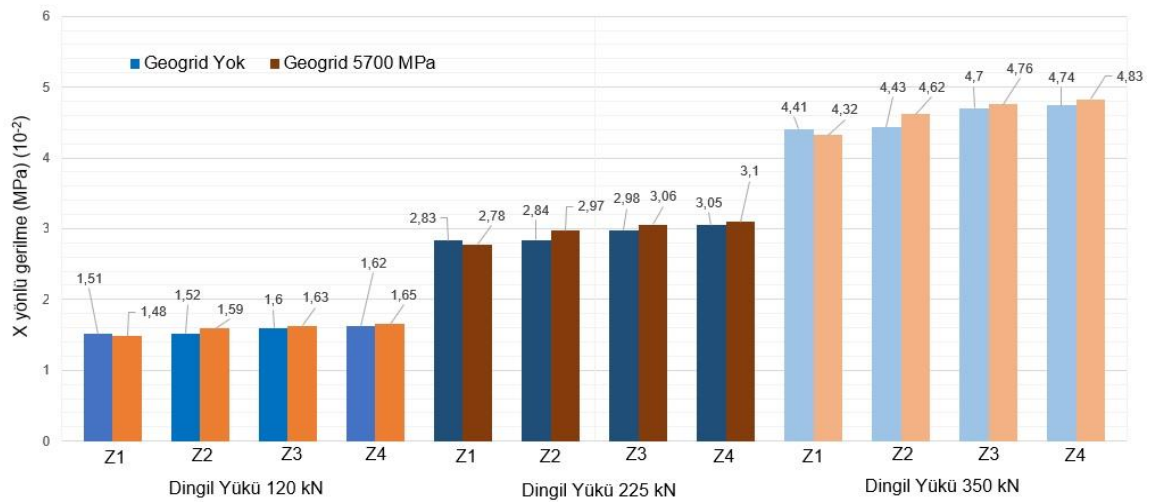
Şekil 6.25 200 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.26’da 200 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için Y yönlü MPa cinsinden maksimum gerilme değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. Meydana gelen Y yönlü gerilmelere karşı taban zemin türünün değişimi farklı etkiler yaratmaktadır. Taban zemin türü kötü zemin seçildiğinde geogrid kullanımı ile meydana gelen gerilmelerde azalma gözlenirken; taban zemin türünün orta, iyi ve çok iyi seçilmesi durumunda geogridin Y yönlü gerilmelere karşı etkisini kaybettiği görülmektedir. Yer değiştirme grafiğinde olduğu gibi geogrid elastisite modülü düşük zayıf taban zemini için daha iyi sonuçlar vermekteyken; taban zemini kalitesi arttıkça geogridin etkisi kaybolmaktadır.



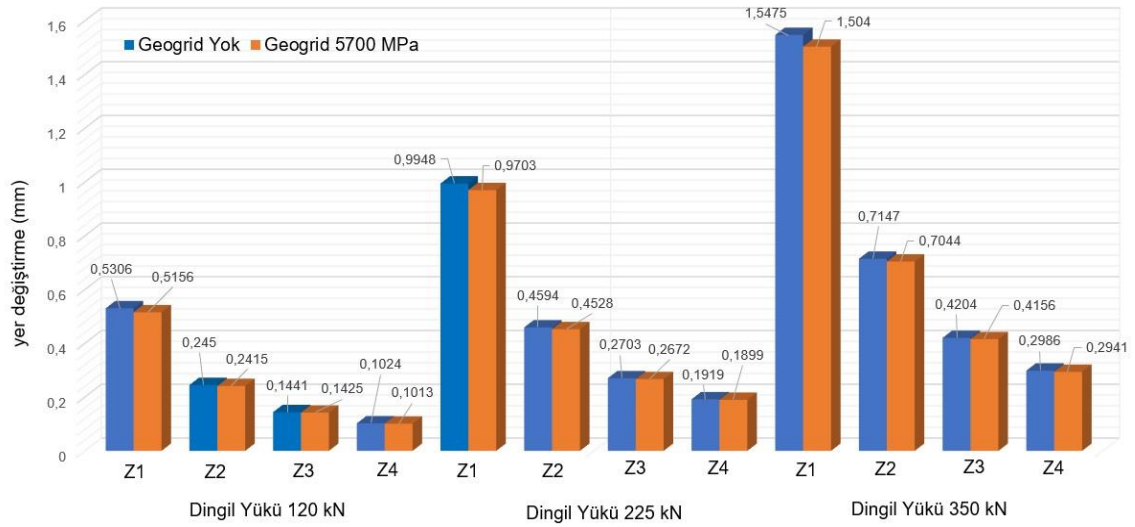
Şekil 6.26 200 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.27’de 200 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için X yönlü MPa cinsinden maksimum gerilme değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. X yönlü gerilme değerleri, Y yönlü gerilme değerlerine kıyasla daha düşük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu grafikten yola çıkarak yapılacak yorum Y yönlü gerilme grafiklerinden farklı olmayıp; zayıf türde taban zemini seçilmesi durumunda geogridin daha etkili olduğu söylenebilir.



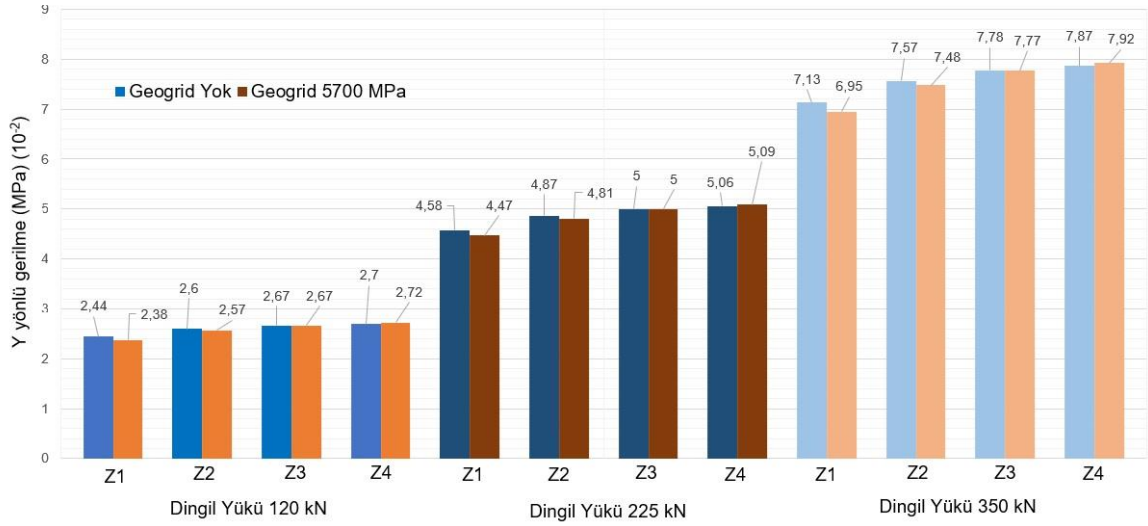
Şekil 6.27 200 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için X yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.28’de 150 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için düşey yönlü yer değişim maksimum değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. Grafikler incelendiğinde tasarımda elastisite modülü düşük zayıf taban zemini kullanıldığında geogrid kullanımı neticesinde alınan sonuçlar daha iyi olmaktadır; taban zemini kalitesi arttıkça geogridin etkisinin yüzde olarak düştüğü görülmektedir.



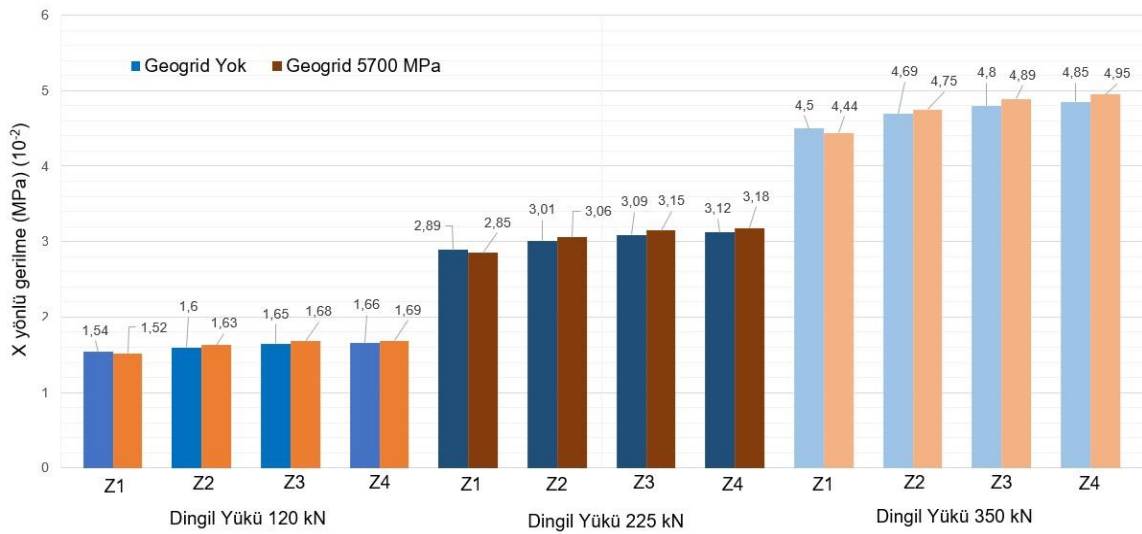
Şekil 6.28 150 mm tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve zemin türleri için yer değıştirme grafiğı.

Şekil 6.29’da 150 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için Y yönlü MPa cinsinden maksimum gerilme değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. Meydana gelen Y yönlü gerilmelere karşı taban zemin türünün değışimi farklı etkiler yaratmaktadır. Taban zemin türü kötü zemin seçildiğinde geogrid kullanımı ile meydana gelen gerilmelerde azalma gözlenirken; taban zemin türünün orta, iyi ve çok iyi seçilmesi durumunda geogridin Y yönlü gerilmelere karşı etkisini kaybettiğı görülmektedir.



Şekil 6.29 150 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için Y yönlü gerilme grafiği.

Şekil 6.30'da 150 mm altbalast tabakası ve farklı taban zemini türleri için 120 kN, 225 kN ve 350 kN dingil yükleri altında geogrid kullanılmadan ve 5700 MPa geogrid kullanılarak yapılan tasarımlar için X yönlü MPa cinsinden maksimum gerilme değerlerinden oluşan grafiğe yer verilmiştir. Yine X yönlü gerilme değerleri, Y yönlü gerilme değerlerine kıyasla daha düşük değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu grafikten yola çıkarak yapılacak yorum Y yönlü gerilme grafiklerinden farklı olmayıp; zayıf türde taban zemini seçilmesi durumunda geogridin daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 6.30 150 mm altbalast tabaka kalınlığı, farklı dingil yükü ve farklı zemin türleri için X yönlü gerilme grafiği.

6.4 Maliyet Analizi

Demiryolu üstyapı tasarımında geogrid kullanılmadan 200 mm kalınlığında altbalast tabakasının oluşturulması ve geogrid kullanılması durumunda 150 mm kalınlığında altbalast tabakası oluşturulması durumlarına göre maliyet analizi ile karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplamalarda baz alınan malzemelere göre TCDD 2021 yılı üstyapı pozları ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2021 yılı için yayınlamış olduğu birim fiyat listesi kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Maliyet analizi 1000 metre uzunluğunda bir demiryolu hattı ve tasarımı yapılmış olan hattın altbalast taban genişliği (6200 mm) göz önünde bulundurulacak şekilde yapılmıştır.

Yapılan analizler incelendiğinde gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin geogrid malzemenin kullanılması durumunda, geogrid kullanılmaması durumuna göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda hat geometrisi ve hattın yapısı daha uzun süre korunabilecektir. Yapılan araştırmalara göre balastlı bir demiryolu hattının ortalama kullanım ömrü 30-40 yıl iken; geogrid malzemenin karbon salınımının az olması ve 80-100 yıla kadar kullanım ömrüne sahip olması maliyet analizinde göz önünde bulundurulması gereken hususlar arasındadır. Bunlara ek olarak geogrid kullanılmadan yapılan çalışmalarda malzeme serilmesi ve sıkıştırılması dahil geçen inşaat sürelerine karşı, geogrid malzeme kullanılması durumunda inşaat süresinde de tasarruf sağlanabilir.

Çizelge 6.1'de proje ve şartnamelere uygun olarak altbalast malzemesinin temini, işyerine nakli, serilmesi, sıkıştırılması ve reglajı dahil nihai kotuna getirilmiş imalatın ve geogrid malzemenin fiyatlandırılma mukayesesi yapılırken; her iki durumda da yapılacak benzer çalışmalar hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Çizelge 6.1 Maliyet analiz tablosu.

	Tanım	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Miktarı	Tutar (TL)	Öngörülen kullanım ömrü (yıl)	Maliyet analizi (TL/yıl)
Geogrid kullanılmadan 200 mm kalınlığında altbalast tabakası oluşturulması	Altbalast malzeme temini, nakliyesi ve işçiliği	m ³	135,05	1180 m ³	159.359,00	30	5.312,00
	Toplam:				159.359,00		
Geogrid kullanılarak 150 mm kalınlığında altbalast tabakası oluşturulması	Altbalast malzeme temini, nakliyesi ve işçiliği	m ³	135,05	885 m ³	119.519,25		
						80	2.792,12
	Tek eksenli polyester liflerden oluşan geogrid	m ²	16,75	7000 m ²	103.850,00		
Toplam:					223.369,25		

7. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada bir demiryolu üstyapı enkesitinde, altbalast tabakası ile taban zemini arasına yerleştirilmiş 3 farklı mekanik özelliklere sahip geogrid ile yine farklı elastisite modülüne sahip 4 farklı taban zemini için 3 farklı dingil yükü uygulanarak ANSYS programı yardımıyla sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Sonuçların mukayese edilebilmesi için geogrid kullanılmadan ve geogrid malzemesi kullanılmış haliyle analizler tekrarlanmış ve bu sırada altbalast tabaka kalınlığı da 150 mm ve 200 mm olacak şekilde farklı değerler için incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Altbalast tabakası ile taban zemini arasında geogrid kullanımının taban zemini üzerinde oluşan düşey yönlü yer değiştirmelere ve gerilmelere karşı etkili olduğu yapılan analizlere ait grafiklerde görülmüştür. Ayrıca zayıf zeminlerde gerilme soğanının geogrid kullanılması durumunda genişlediği ve gerilmelerin daha geniş alana yayıldığı anlaşılmaktadır.
- Kullanılan geogridin mekanik özellikleri iyileştikçe etkilerin de buna paralel olarak arttığı ve sonuçların istenilen değerlere yakınlığı görülmüştür. Literatürde geogrid malzemesi için birbirinden farklı değerlere rastlanmıştır. Bu çalışmada geogridin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde realist ve optimum seçim yapılmaya özen gösterilmiştir.
- Altbalast tabaka kalınlığı değişiminin incelendiği analizler neticesinde geogrid kullanılması durumunda, geogrid kullanılmadan oluşturulan tasarımlara göre altbalast tabaka kalınlığının azaltılabileceği anlaşılmaktadır.
- Zayıf zeminlerde geogridin gerilme ve düşey yönlü yer değiştirmelere karşı olumlu etkileri daha net ortaya çıkarken; orta, iyi ve çok iyi olarak adlandırılan zeminlerde geogridin olumlu etkilerinin oransal olarak yüzdesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yani elastisite modülü düşük zayıf taban zemini olan tasarımlarda geogrid kullanımı gerilme ve deformasyonları azaltırken; taban

zemini kalitesinin yüksek olduğu tasarımlarda geogrid kullanımı pozitif bir fark yaratmamaktadır. Zemin iyileştirme ve güçlendirme çalışmalarının yüksek maliyetli olduğu göz önüne alındığında, taban zemini üzerine uygun içerik ve özelliklerde geogrid kullanımı güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Yapılan çalışmada geogrid malzemesinin taban zeminine olan etkisini değerlendirmek ve oluşan gerilmeleri daha iyi gözlemlemek amacıyla alt temel tabakasına tasarım aşamasında yer verilmemiştir. Farklı bir çalışmada alt temel tabakası dizayna dahil edilerek, farklı alt temel tabaka kalınlıkları için de geogrid malzemesinin etkisi gözlemlenebilir. Yine farklı bir çalışmada benzer demiryolu tasarımı farklı sonlu elemanlar programı yardımıyla analiz edilerek çıkan sonuçlar mukayese edilebilir.
- Saha uygulamalarında sıkça rastlanılan birden fazla sıra geogrid kullanımının dizayna etkilerinin gözlemlenmesi amacıyla farklı sonlu elemanlar programı yardımıyla analizler tekrarlanabilir.
- Yapılan maliyet analizi sonucunda, geogrid malzemesi kullanılarak oluşturulan tasarımın yapım maliyetinin, geogrid kullanılmadan yalnızca granüler malzeme kullanılarak oluşturulan tasarıma göre daha maliyetli olduğu görülmüştür. Ancak geogrid kullanımı ile yapının hizmet ömrünün 80-100 yıla kadar arttığı, granüler malzeme işleme, nakliye ve inşaat yapım sürelerini kısalttığı, geleneksel yapım yöntemlerine göre işçiliğin daha basit olduğu, ülkemiz ve dünyada dolgu malzemesi olarak kullanılan granüler malzemeye ulaşmanın giderek zorlaştığı, geogrid malzemenin inşaat sırasında kolay uygulanabilir olduğu ve işletme sırasında bakım sıklıkları ile maliyetlerinin azalacağı durumları bir bütün olarak değerlendirildiğinde geogrid kullanımının daha ekonomik ve avantajlı olduğu değerlendirilmektedir.
- Sonuçlar göstermektedir ki; sonlu elemanlar metodu kullanılarak çok kısa zamanda, uzun süren ve maliyetli laboratuvar çalışmalarına gerek kalmadan üstyapı tasarımının yapılması ve malzeme özellikleri ile kriterlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

8. KAYNAKLAR

- Ağbaba B, 2019, Balastlı Demiryolu ve Balastsız Demiryolunun Ansys Programı Yardımıyla Analizinin Yapılması ve Karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, Ankara.
- Akıllı Törer T, 2019, Yüksek Hızlı Hat Demiryollarında Alt Balast Tabakası Yerine Bitümlü Karışım Kullanımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120s, Afyonkarahisar.
- Akyıldız M H, 2019, Geosentetik Türlerinin İnşaat Mühendisliğindeki Uygulamaları ve Sağladığı Kolaylıklar, DÜMF Mühendislik Dergisi, 10, 791-796.
- Anonim, 2022, 2017-2021 İstatistik Yıllığı, TCDD İşletmesi Genel Müdürlüğü, TC Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 120s, Ankara.
- Anonim, 2020, TCDD Balast Teknik Şartnamesi, TCDD Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Anonim, 2020, TCDD Sub-Balast Teknik Şartnamesi, TCDD Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Anonim, 2018, Yol Altyapısı – Üstyapısı ve Demiryolu Araçları Ders Notları, Demiryolu Teknik Elemanları Temel Eğitim Programı, Hizmet İçi Eğitim Ders Notları, TCDD İnsan Kaynakları Dairesi Başkanlığı Yayınları, 94s, Ankara.
- Anonim, 2016, Maccaferri SpA Broşür, İstanbul.
- Anonim, 2016, D1 Motorway Hricovske, Case History, Maccaferri SpA, 2p, Podhradie, Slovakia.
- Anonim, 2015, Basal Reinforcement of Ore Stockpile Pad, Case History, Maccaferri SpA, 2p, Val D'or, Quebec, Canada.
- Anonim, 2014, Demiryolları Hat Balastı ve Alt Balastın Mekanik Olarak Stabilizasyonu, Tensar International Limited, 2, 12p, United Kingdom.
- Anonim, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Anonim, 2013, TCDD Hat Bakımı El Kitabı, TCDD Yol Dairesi Başkanlığı, Ankara.

- Anonim, 2013, Subgrade Stabilisation Mechanically Stabilised Layers for Roads and Trafficked Areas Brochure, Roads and Platforms, Tensar International Limited, 12p, United Kingdom.
- Anonim, 2012, Major Highway Embankment Reinforcement, Case History, Maccaferri SpA, 2p, Levan to Dames Road, Albania.
- Anonim, 2008, The Properties and Performance Advantages of Tensar TriAx Geogrids, Tensar International Limited, 12p, United Kingdom.
- Anonim, 2005, Tenax Tools Cd., Tenax SpA, Milano.
- Archer S, 2008, Subgrade Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids, Contech Construction Products Inc.
- Arlı V, 2015, Demiryolu Mühendisliği, Birsen Yayınevi, 640s, İstanbul.
- Ay İ, 2014, Geosentetik Malzemelerin Demiryollarında Kullanımı ve Balast – Alt Balast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 151s, İstanbul.
- Aydın S, 2019, Karayollarında Kullanılan Farklı Tür Geogridler İçin Kullanılacak Dolgu Miktarının Araştırılması, Toros Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Mersin.
- Bayrak M Ç, 2018, Altyapı Özelliklerinin Demiryolu Üstyapısının Performansına Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 176s, Isparta.
- Bayram A, 2006, Hava Alanları Pist Dolgularının Geosentetik Malzemeler Kullanılarak Güçlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, İstanbul.
- Bilgiç Ş, 2017, Demiryolu Ders Notları-1, 42s, Eskişehir.
- Brown S F, Kwan J, Thom N H, 2007, Identifying the Key Parameters That Influence Geogrid Reinforcement of Railway Ballast, Geotextiles and Geomembranes, 25, 326-335.

- Chen X, Jia Y, Zhang J, 2017, Geogrid – Reinforcement and the Critical State of Graded Aggregates Used in Heavy – Haul Railway Transition Subgrade, *Transportation Geotechnics*, 11, 27-40.
- Çiçek E, 2020, Farklı Malzemeler ve Geosentetiklerin Yol Dolgusu Güvenliğine ve Davranışına Etkileri, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6, 334–344.
- Dağdeviren U, 2015, Zemin İyileştirme Yöntemlerine Giriş, *Ders Notları*, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Das B M, 2016, Use of Geogrid in the Construction of Railroads, *Innovative Infrastructure Solutions*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Demirdağ M N, Öztürk Z, 2017, Balastsız Üstyapılarda Ondülasyon Bakım Maliyetinin Üstyapı Bakım Maliyeti İçindeki Oranının Örnek Hatta İncelenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4, 509-517.
- Dhule S B, Valunjkar S S, Sarkate S D, Korrane S S, 2011, Improvement of Flexible Pavement With Use of Geogrid, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 16, Bundle C, 269-279.
- Erdi E, 2022, Demiryolları İçin Nesnelerin İnterneti ile Uzaktan İzlenebilen Ray Sıcaklığı ve Tren Hızı Ölçüm Sistemi Tasarımı ve Meteoroloji ile Saha Verisi Üzerinden Makine Öğrenmesi/Derin Öğrenme ile Zamana Dayalı Ray Sıcaklığı Tahmini, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 133s, İzmir.
- Esveld C, 2001, *Modern Railway Truck, MRT – Productions*.
- Evirgen B, Tuncan M, Tuncan A, 2017, Modelling Study on the Geotextile Geogrid and Steel Strip Reinforced Slopes, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32, 227-240.
- Fischer S, 2022, Geogrid Reinforcement of Ballasted Railway Superstructure for Stabilization of the Railway Track Geometry – A Case Study, *Geotextiles and Geomembranes*, 50, 1036-1051.
- Fischer S, Eller B, Kada Z, Nemeth A, 2015, *Railway Construction*, Universitas – Győr Nonprofit Kft.

- Geeta B, Bhadoriya S S, Sleem A, 2013, Model Studies on Footing Beam Resting on Geogrid Reinforced Soil Bed, International Institute for Science, Technology and Education, E-journals, 3, 6p.
- Gevrek L, 2008, Yol Katmanlarında Meydana Gelen Gerilme Dağılımının Ansys Bilgisayar Programı ile Nonlinear Sonlu Eleman Analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Afyonkarahisar.
- Goud G N, Ramu B, Umashankar B, Sireesh S & Madhav M R, 2020, Evaluation of Layer Coefficient Ratios for Geogrid-Reinforced Bases of Flexible Pavements, Road Materials and Pavement Design, India.
- Gönül V E, 2021, Doğal Liflerden Geliştirilen Geogridin Yolun Taşıma Gücüne Etkisinin Araştırılması, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Düzce.
- Gül S, Huvaj N, 2019, Geotekstillerin Barajlarda Filtre Malzemesi Olarak Kullanımı ve Tasarım Kriterleri, Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 16-17 Mayıs, İstanbul, 337-347.
- Güler H, 2005, Demiryolu Hat Geometrisi Bozulmasının Bilgi Sistemler Destekli Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 291s, İstanbul.
- Güler H, Jovanovic S, 2005, Demiryollarında Hız Yükseltilmesi Amacıyla Yapılması Gerekli Ön Çalışmalar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 275-286.
- Holtz R D, 2009, Geosynthetics for Soil Reinforcement, Frontier Technologies for Infrastructures Engineering (143-165), CRC Press, 502p, New York.
- Hussaini S K K, Indraratna B, Vinod J S, 2014, Performance Assessment of Geogrid – Reinforced Railroad Ballast During Cyclic Loading, Transportation Geotechnics, 2, 99-107.
- Hussein M G, Meguid M A, 2015, A Three – Dimensional Finite Element Approach for Modeling Biaxial Geogrid with Application to Geogrid – Reinforced Soils, 44, 295-307.

- Karagül Ç B, 2007, Yol Dolgularının Geogrid Kullanılarak İyileştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, İstanbul.
- Kocaer M, 2011, Geosentetiklerin Karayolu Yapılarında Kullanımı: Türkiye Örnekleri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127s, İstanbul.
- Kozak M, 2020, Kalker ve Bazalt Agregaları ile Beton Travers Üretimi, Teknik Bilimleri Dergisi, 10, 19-25.
- Küçükakyüz O, 2020, Experimental Study On Effects of Geogrid Reinforced Zone on Seismic Performance of Low-to-Medium Rise Buildings, Boğaziçi Üniversitesi, Deprem Araştırma Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 192s, İstanbul.
- Kwan C C J, 2006, Geogrid Reinforcement of Railway Ballast, The University of Nottingham, Doktora Tezi, 195p, United Kingdom.
- Leonardi G, Bosco D L, Palamara R, Suraci F, 2020, Finite Element Analysis of Geogrid-Stabilized Unpaved Roads, Sustainability 2020, 12, 11p.
- 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.
- Ngo N T, Indraratna B, Rujikiatkarnjorn C, 2016, Modelling Geogrid-Reinforced Railway Ballast Using the Discrete Element Method, Transportation Geotechnics, 8, 86-102.
- Önal T Ö, 2020, Üniform Kum Zemine Yerleştirilmiş Geogridin Çekme Direncinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Osmaniye.
- Özdemir Y, Voltr P, 2016, Analysis of the Wheel and Rail Frictionless Normal Contact Considering Material Parameters, Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 15, 95-103.
- Öztürk Z, Ay İ, 2013, Demiryollarında Geosentetik Malzeme Kullanımı-Geogrid Kullanılarak Balast/Altbalast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması, 2. Uluslararası

- Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim 2013, Karabük.
- Penman J, Geol C, Priest D J, 2009, The Use of Geogrids in Railroad Applications, Contech Construction Products Inc.
- Pınarlık M, Öztürk Kardoğan P S, Kılıç Demircan R, 2017, Şev Stabilitesine Zemin Özelliklerinin Etkisinin Limit Denge Yöntemi ile İrdelenmesi, Journal of Engineering Sciences and Design, 5, 675-684.
- Raymond G P, 2002, Reinforced Ballast Behaviour Subjected to Repeated Load, Geotextiles and Geomembranes, 20, 39-61.
- Raymond G P, 1999, Railway Rehabilitation Geotextiles, Geotextiles and Geomembranes, 17, 213-230.
- Sadeghi J, Kian A R T, Ghiasinejad H, Moqaddam M F, Motevalli S, 2020, Effectiveness of Geogrid Reinforcement in Improvement of Mechanical Behavior of Sand – Contaminated Ballast, Geotextiles and Geomembranes, 48, 768-779.
- Sağlam R, 2009, Karayolu Yapımında Geotekstil Uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 146s, İstanbul.
- Sert T K, Gurbuz A, Akpınar M V, 2020, A Study on the Effects of Highway Reinforcement on Load Distribution, Sciennovation A Journal of Structural Science and Innovation, 51-58.
- Shamami V H, Khiavi A K, 2017, Effect of Temperature on Geosynthetic Rutting Performance in Asphalt Pavement, Petroleum Science and Technology, 35, 1104-1109.
- Skuodis S, Dirgeliene N, Medzvieckas J, 2020, Using Triaxial Tests to Determine the Shearing Strength of Geogrid-Reinforced Sand, Studia Geotechnica et Mechanica, 42, 341-354.
- Sridevi G, Sudarshan G, Shivaraj A, 2019, Performance of Geocell and Geogrid Reinforced Weak Subgrade Soils, Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, 273-283.

- Sungur N, 2015, Jeogrid Donatılı Zeminlerde Taşıma Gücü Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 142s, Ankara.
- Sweta K, Hussaini S K K, 2020, Effect of Geogrid on Deformation Response and Resilient Modulus of Railroad Ballast Under Cyclic Loading, Construction and Building Materials, 264, 120690.
- Şerefoğlu E, 2012, Ulaştırma Yapılarında Geomembran Kullanımı Üzerine Bir Değerlendirme, İzmir İnşaat Mühendisleri Odası, Bildiriler.
- Tacıroğlu M V, Karaşahin M, Tığdemir M, Işıker H, 2022, Demiryolu Hat Geometrisinin Fraktal Analizi, Demiryolu Mühendisliği Araştırma Makalesi, 16, 170-184.
- Tacıroğlu M V, 2015, Yüksek Hızlı Tren Hatlarında Fleş ve Nivelman Bozulmalarının Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 158s, Isparta.
- Tarhan R, Akpınar B, 2005, Şehir İçi Raylı Sistemlerde Deformasyon Ölçmeleri, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İTÜ – İstanbul, 18-27.
- Tuğyanoğlu M, Keskin A, Biçer U, Erdoğan Ş, 2013, Yüksek Hızlı Tren (YHT) Hatlarında Kusurlu Ray İncelemesi, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), 9-11 Ekim, Karabük.
- Tunç A, 2002, Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, 912s, İstanbul.
- Tüfekçibaşı G, Bilirol Y, Karaçağıl Z, Yılmaz Y, 2019, Sıkıştırılmış Mühendislik Dolgusu Üzerinde İnşa Edilecek Yüzeysel Temellerin Performansına Hücresel Dolgu Uygulamasının Etkisinin Model Deneylerle Araştırılması, Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 16-17 Mayıs, İstanbul, 371-379.
- Uğur A, 2019, Investigation of the World Railway Sector Development Prospects and Turkey's Status, Alphanumeric Journal, 7, 369-398.

- Ünal E, 2019, Betonarme Travers Altında Geogrid ve Geocell Kullanılarak Oluşturulan Balast Yatağındaki Boşalmaların Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 209s, Ankara.
- Wu Z, 2007, Evaluating Structural Performance of Base – Subbase Materials at the Louisiana Accelerated Pavement Research Facility, Transportation Engineering Conference, 11-44 February, Baton Rouge.
- Yılmaz H R, Eskişar T, 2007, Geosentetik Ürünlerin Geoteknik Mühendisliği Sorunlarının Çözümünde Kullanımı ve Sağladığı Faydalar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Adana Şubesi 2. Geoteknik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 437-453.
- Yu Z, Woodward P K, Laghrouche O, Connolly D P, 2019, True Triaxial Testing of Geogrid for High Speed Railways, Transportation Geotechnics, 20, 9p.
- Yücel H, 2009, Hızlı Demiryolu Üstyapı Elemanlarının Kabul ve Uygunluk Ölçütleri: Ankara-Eskişehir Hızlı Tren Projesi Örneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, İstanbul.
- Zanzinger H, 2019, Laboratory Testing of Geogrids and Geocells Used For The Function Stabilisation, Sekizinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 16-17 Mayıs, İstanbul, 31-54.
- Zornberg J G, 2017, Functions and Applications of Geosynthetics in Roadways, Procedia Eng., 189, 298-306.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://docplayer.biz.tr/64119001-Geosentetiklerin-ozellikleri-fonksiyonlari-ve-kullanim-alanlari-uzerine-bir-inceleme.html>, 12.01.2022
- 2- <https://silo.tips/download/yol-naatinda-geosentetklern-kullanimi>, 12.01.2022
- 3- https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/64839ee72d8938c_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=3, 12.01.2022
- 4- http://www.tekniktekstiller.com/wp-content/uploads/2017/08/Jeo_Tekstiller.pdf,

19.01.2022

5- <https://www.geobera.com/urunler/geodrainage/>, 08.02.2022

6- <http://www.grosteck.com.tr/orgusuz-geotekstil/>, 10.02.2022

7- <https://www.sernak.com/urun-geokompozit-66>, 11.02.2022

8- <http://www.geostone.com.tr/geosentetikler-geosynthetics/>, 11.02.2022

9- <https://www.geoplas.com.tr/tr/urunler/geomembranlar/polietilen-geomembranlar/puruzlu-ldpe-ve-hdpe-geomembran>, 28.02.2022

10- <https://m.made-in-china.com/product/Composite-Geonet-Drainage-for-Road-Railway-Highway-Tunnel-Dam-1902662412.html>, 08.03.2022

11- <https://santiyede.com/geogrid-nedir-kullanim- Alanlari-nerelerdir/>, 12.05.2022

12- <https://www.geoplas.com.tr/tr/urunler/geogrid/cift-eksenli-ekstrude-geogrid>, 23.05.2022

13- <https://maccaferri.com.tr/geogrid-macgrid/>, 23.05.2022

14- <https://info.tensarcorp.com/build-better-roads>, 24.05.2022

15- <https://www.geobera.com/urunler/geogrid/>, 07.06.2022

16- <https://www.movea.com.tr/geosentetiklerin-yollarda-kullanimi/>, 09.06.2022

17- <https://rayhaber.com/2021/05/ahsap-travers-satin-alinacaktir/>, 09.08.2022

18- <https://tr.frwiki.wiki/wiki/Cr%C3%A9osote>, 09.08.2022

19- <https://docplayer.biz.tr/58115545-Rayli-sistemler-bilgisi.html>, 15.08.2022