
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BETONARME TRAVERS ALTINDA GEOGRİD VE GEOCELL KULLANILARAK OLUŞTURULAN BALAST YATAĞINDAKİ BOŞALMALARIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ercan ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2019

Ercan ÜNAL tarafından hazırlanan "BETONARME TRAVERS ALTINDA GEOGRİD VE GEOCELL KULLANILARAK OLUŞTURULAN BALAST YATAĞINDAKİ BOŞALMALARIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Mehmet BARAN
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 18/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ercan ÜNAL

18/09/2019

BETONARME TRAVERS ALTINDA GEOGRİD VE GEOCELL KULLANILARAK OLUŞTURULAN BALAST YATAĞINDAKİ BOŞALMALARIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ercan ÜNAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Balast, kolay erişilebilirliği ve maliyetinin ucuz olması nedeniyle travers altı yatak malzemesi olarak çok tercih edilen doğal bir malzemedir. Ancak zaman içerisinde traversten iletilen titreşimler ve sel gibi doğal afet kaynaklı boşalmalardan dolayı can ve mal kayıplarıyla sonuçlanan kazalara neden olmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmada balast yatağındaki boşalmalardan kaynaklı ön germeli betonarme travers davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Balast yatağını güçlendirmek amacıyla geogrid ve geocell kullanılmıştır. Kullanılan travers ise B70 ön germeli traverstir. Travers altındaki boşalmayı temsil etmek amacıyla travers ucundan itibaren sırasıyla 0, 25, 50, 75, 87,5, 100 ve 115 cm uzunluğunda balast boşaltması yapılmıştır. Tam dolu balast yatağına sahip referans deneyleri dâhil olmak üzere toplamda 15 adet deney yapılmıştır. Eleman üzerinde oluşan düşey deplasman ve birim deformasyon değişimleri dijital görüntü korelasyonu tekniği ile analiz edilmiştir. Deney sonuçları (i) yük-noktasal deformasyon ve (ii) yük-birim deformasyon davranışları altında incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre, geogrid kullanılması durumunda balast altı boşalma miktarı arttıkça traverste de açısal deformasyon artışı gözlenmiştir. Ancak geocell kullanılması durumunda farklı boşalmalara maruz kalan balastın yatay ve dolayısıyla düşey hareketi de sınırlandırılmıştır. Bu sebeple traverste lokal açısal deformasyon oluşmuş ve traversin orta bölgesinde üstteki ön germe halatına kadar eğilme çatlakları gözlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91127
Anahtar Kelimeler	:	Balast, Travers, Geogrid, Geocell, Dijital Görüntü Korelasyonu
Sayfa Adedi	:	181
Danışman	:	Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DISCHARGES OF BALLAST BEDS USING GEOGRID AND GEOCELL ON REINFORCED CONCRETE TRAVERS

(M. Sc. Thesis)

Ercan ÜNAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

Ballast is a natural material which is preferred as traverse under bed because of its easy accessibility and low cost. However, it causes accidents that result in loss of life and property due to natural disaster caused by floods and floods. Therefore, in this study, the pretensioned reinforced concrete sleeper behavior caused by the discharges in the ballast bed was investigated experimentally. Geogrid and geocell were used to strengthen the ballast bed. The traverse used is the B70 pretensioner. Ballast evacuation was performed from the crossmember end to 0, 25, 50, 75, 87,5, 100 and 115 cm in length, respectively, to represent discharge below the traverse. A total of 14 experiments were performed, including reference tests with a full ballast bed. Vertical displacement and unit deformation changes on the element were obtained by digital image correlation technique. Test results (i) were investigated under load-point deformation and (ii) load-unit deformation behaviors. According to the results of the experiment, in case of using geogrid, the increase in angular deformation was observed in the traver. However, in case of using geocell, the horizontal and therefore vertical movement of the ballast, which are subject to different discharges, is also limited. Therefore, local angular deformation occurred in the traver and bending cracks were observed up to the upper rope in the middle of the crossmember.

Science Code	:	91127
Key Words	:	Ballast, Travers, Geogrid, Geocell, Digital Image Correlation
Page Number	:	181
Supervisor	:	Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli bilgi, tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, ileri görüşlülüğü ve engin fikirleriyle beni yönlendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN' a emeği ve katkılarından dolayı teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu tezi bitirebilmek için vakit ayıramadığım ve ilgilenemediğim sevgili eşim Merve ve sevgili kızım Zehra' ya beni anlayışla karşıladıkları ve destek oldukları için teşekkür ederim.

Beni bu günlere sabır ve büyük emeklerle getiren ve asla haklarını ödeyemeyeceğim sevgili anne ve babama teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan başta sayın hocam Uzman Hüseyin KAPAN' a, Arş. Gör. Muhammed GÜMÜŞ' e, kardeşim Emin ÜNAL' a ve lisans bitirme öğrencileri Batuhan DENİZ' e, Tolunay AYDIN' a ve Engin Furkan ŞATIR' a, teşekkürlerimi sunarım.

Deney malzemelerini bir araya getirmemde ve tecrübeleriyle çalışmama destek olan TCDD personeli değerli mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi
RESİMLERİN LİSTESİ xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR xxii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI 5
2.1. Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) Tekniği 5
2.2. Demir Yollarında Geogrid Kullanımı 7
2.3. Demir Yollarında Geocell Kullanımı 9
3. DEMİR YOLU BİLEŞENLERİ 13
3.1. Balast 13
3.1.1. Balastın görevleri 14
3.1.2. Balastta bulunması gereken özellikler 14
3.1.3. Balast profili tasarım değerleri 15
3.1.4. Yoldaki balast hacminin hesaplanması 15
3.1.5. Balast katmanında oluşan kuvvetler 16
3.1.6. Balast ve geosentetik malzemelerin bir arada kullanılması 17
3.2. Subbalast ve Özellikleri 17
3.3. Travers ve Özellikleri 18
3.3.1. Traverslerin görevleri 19
3.3.2. Traverslerde bulunması gereken özellikler 19

Sayfa

3.3.4. Traverslerin sınıflandırılması 19
3.3.5. Beton traversler 19
3.3.6. Beton travers özellikleri 21
3.4. Beton travers tasarım esasları 23
3.4.1. Travers tasarımında durumlar 23
3.4.2. Statik aks yükünün dinamik yük olarak artışı 24
3.4.3. Boyuna yük dağılımı 25
3.4.4. Dinamik ray yatak yükü 27
3.4.5. Karakteristik eğilme momenti 28
3.4.6. Travers merkez kesiti negatif eğilme momenti 30
3.4.7. Travers merkez kesiti pozitif eğilme momenti 35
3.4.8. Travers eğilme momenti testleri 35
3.4.9. Servis sınır durumu için ön germeli traverslerde gerilmelerin kontrolü 37
3.5. Dever 38
3.5.1. Dever formülünün oluşturulması 39
3.5.2. Teorik dever 40
3.5.3. Normal dever (uygulama deveri) 41
3.5.4. Minimum dever 41
3.5.5. Maksimum dever 42
4. DENEYİN AMAÇ VE METEDOLOJİSİ 43
4.1. Deneyin Amacı 43
4.2. Deneyin Metodolojisi 46
4.3. Travers Altı Balast Katmanları 51
5. DENEYLER VE SONUÇLARI 55
5.1. Geogrid ile Oluşturulan Deney Ortamı 55
5.1.1. Geogrid ile deney aşamaları ve analiz sonuçları 56
5.2. Geocell' li Balast Yatağı Deney Ortamı 102
5.2.1. Geocell ile deney aşamaları ve analiz sonuçları 105
5.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırması 157

Sayfa

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 175

KAYNAKLAR 179

ÖZGEÇMİŞ 181

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Balast elek analizi 14

Çizelge 3.2. Travers tipine göre balast hacimleri 16

Çizelge 3.3. Subbalast elek analizi 18

Çizelge 3.4. Travers tipleri ve özellikleri 21

Çizelge 3.5. Ray tipine göre k_d değerleri 27

Çizelge 3.6. Travers ölçülerine göre $k_{i,c}$ değerleri 34

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Deneye konu demir yolu yapısı kesiti 2

Şekil 3.1. Demiryolu kesiti 16

Şekil 3.2. Demiryollarında kullanılan mono blok beton travers 20

Şekil 3.3. Demiryollarında kullanılan ikiz bloklu beton travers 20

Şekil 3.4. Mono blok B70 beton travers 22

Şekil 3.5. Travers eğilme momenti hesabında yük dağılımı 24

Şekil 3.6. Hız etki faktörü k_v 25

Şekil 3.7. Travers üzerinde gerçekleşen yük dağılımı 28

Şekil 3.8. Standart ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması_1 30

Şekil 3.9. Standart ölçülü travers için $M_{c,neg,100}$ değerinin bulunması _2 31

Şekil 3.10. Standart ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması _3 31

Şekil 3.11. Geniş ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması 32

Şekil 3.12. Dar ölçülü travers geometrisi 33

Şekil 3.13. Demir yolunda dever kuvveti bileşenleri 39

Şekil 4.1. Selin demir yolunda meydana getirdiği zararlar 45

Şekil 4.2. Standart travers altyapısı 51

Şekil 4.3. Geogrid ile oluşturulmuş travers alt yapısı 52

Şekil 4.4. Geocell ile oluşturulmuş travers alt yapısı 52

Şekil 5.1. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 57

Şekil 5.2. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 58

Şekil 5.3. Sol mesnet birim deformasyonlar 58

Şekil 5.4. Travers ortası birim deformasyonlar 59

Şekil 5.5. Sağ mesnet birim deformasyonlar 59

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.6. Beton birim şekil değiştirme değerleri 62

Şekil 5.7. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 63

Şekil 5.8. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 64

Şekil 5.9. Sol mesnet birim deformasyonlar 65

Şekil 5.10. Travers ortası birim deformasyonlar 65

Şekil 5.11. Sağ mesnet birim deformasyonlar 66

Şekil 5.12. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 69

Şekil 5.13. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 70

Şekil 5.14. Sol mesnet birim deformasyonlar 71

Şekil 5.15. Travers ortası birim deformasyonlar 71

Şekil 5.16. Sağ mesnet birim deformasyonlar 72

Şekil 5.17. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 72

Şekil 5.18. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 76

Şekil 5.19. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 77

Şekil 5.20. Sol mesnet birim deformasyonlar 78

Şekil 5.21. Travers ortası birim deformasyonlar 78

Şekil 5.22. Sağ mesnet + boşaltma çizgisi birim deformasyonlar 79

Şekil 5.23. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 82

Şekil 5.24. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 83

Şekil 5.25. Sol mesnet birim deformasyonlar 84

Şekil 5.26. Travers ortası birim deformasyonlar 84

Şekil 5.27. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 85

Şekil 5.28. Sağ mesnet birim deformasyonlar 85

Şekil 5.29. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 89

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.30. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 90

Şekil 5.31. Sol mesnet birim deformasyonlar.....91

Şekil 5.32. Travers ortası birim deformasyonlar 91

Şekil 5.33. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar.....92

Şekil 5.34. Sağ mesnet birim deformasyonlar 92

Şekil 5.35. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar.....96

Şekil 5.36. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 97

Şekil 5.37. Sol mesnet birim deformasyonlar.....98

Şekil 5.38. Travers ortası birim deformasyonlar 98

Şekil 5.39. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar.....99

Şekil 5.40. Sağ mesnet birim deformasyonlar 99

Şekil 5.41. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar.....106

Şekil 5.42. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 106

Şekil 5.43. Sol mesnet birim deformasyonlar.....107

Şekil 5.44. Travers ortası birim deformasyonlar 107

Şekil 5.45. Sağ mesnet birim deformasyonlar 108

Şekil 5.46. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar.....111

Şekil 5.47. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 112

Şekil 5.48. Sol mesnet birim deformasyonlar.....113

Şekil 5.49. Travers ortası birim deformasyonlar 113

Şekil 5.50. Sağ mesnet birim deformasyonlar 114

Şekil 5.51. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar.....117

Şekil 5.52. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 118

Şekil 5.53. Sol mesnet birim deformasyonlar.....119

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.54. Travers ortası birim deformasyonlar 119

Şekil 5.55. Sağ mesnet birim deformasyonlar 120

Şekil 5.56. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 120

Şekil 5.57. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 124

Şekil 5.58. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 125

Şekil 5.59. Sol mesnet birim deformasyonlar 126

Şekil 5.60. Travers ortası birim deformasyonlar 126

Şekil 5.61. Sağ mesnet + balast boşaltma çizgisi birim deformasyonlar 127

Şekil 5.62. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 130

Şekil 5.63. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 131

Şekil 5.64. Sol mesnet birim deformasyonlar 132

Şekil 5.65. Travers ortası birim deformasyonlar 132

Şekil 5.66. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 133

Şekil 5.67. Sağ mesnet birim deformasyonlar 133

Şekil 5.68. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 137

Şekil 5.69. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 138

Şekil 5.70. Sol mesnet birim deformasyonlar 139

Şekil 5.71. Travers ortası birim deformasyonlar 139

Şekil 5.72. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 140

Şekil 5.73. Sağ mesnet birim deformasyonlar 140

Şekil 5.74. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 144

Şekil 5.75. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 145

Şekil 5.76. Sol mesnet birim deformasyonlar 146

Şekil 5.77. Travers ortası birim deformasyonlar 146

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.78. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 147

Şekil 5.79. Sağ mesnet birim deformasyonlar 147

Şekil 5.80. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar 151

Şekil 5.81. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar 152

Şekil 5.82. Sol mesnet birim deformasyonlar 153

Şekil 5.83. Travers ortası birim deformasyonlar 153

Şekil 5.84. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar 154

Şekil 5.85. Sağ mesnet birim deformasyonlar 154

Şekil 5.86. 1. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 158

Şekil 5.87. 1. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 158

Şekil 5.88. Geogrid deney_1 traverste dönme açısı ve travers son durumu 159

Şekil 5.89. Geocell deney_1 traverste dönme açısı ve travers son durumu 159

Şekil 5.90. 2. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 160

Şekil 5.91. 2. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 160

Şekil 5.92. Geogrid deney_2 traverste dönme açısı ve travers son durumu 161

Şekil 5.93. Geocell deney_2 traverste dönme açısı ve travers son durumu 161

Şekil 5.94. 3. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 162

Şekil 5.95. 3. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 162

Şekil 5.96. Geogrid deney_3 traverste dönme açısı ve travers son durumu 163

Şekil 5.97. Geocell deney_3 traverste dönme açısı ve travers son durumu 163

Şekil 5.98. 4. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 164

Şekil 5.99. 4. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 164

Şekil 5.100. Geogrid deney_4 traverste dönme açısı ve travers son durumu 165

Şekil 5.101. Geocell deney_4 traverste dönme açısı ve travers son durumu 165

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.102. 5. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 166

Şekil 5.103. 5. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 166

Şekil 5.104. Geogrid deney_5 traverste dönme açısı ve travers son durumu 167

Şekil 5.105. Geocell deney_5 traverste dönme açısı ve travers son durumu.....167

Şekil 5.106. 6. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 168

Şekil 5.107. 6. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 168

Şekil 5.108. Geogrid deney_6 traverste dönme açısı ve travers son durumu 169

Şekil 5.109. Geocell deney_6 traverste dönme açısı ve travers son durumu.....169

Şekil 5.110. 7. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 170

Şekil 5.111. 7. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 170

Şekil 5.112. Geogrid deney_7 traverste dönme açısı ve travers son durumu 171

Şekil 5.113. Geocell deney_7 traverste dönme açısı ve travers son durumu.....171

Şekil 5.114. 8. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri 172

Şekil 5.115. Geocell deney_8 traverste dönme açısı ve travers son durumu.....172

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Dijital görüntü matris kümesi 7

Resim 3.1. Demir yollarında kullanılan balast 13

Resim 3.2. Demiryollarında kullanılan B70 mono blok tip beton travers 22

Resim 4.1. Demiryolunda sel suları ile birlikte balastın boşalması-1 43

Resim 4.2. Demiryolunda sel suları ile birlikte balastın boşalması-2 44

Resim 4.3. Deney düzeneği boyutları 46

Resim 4.4. Deney düzeneği hazırlık aşamaları 47

Resim 4.5. Deney düzeneği hazırlık aşamaları_1 47

Resim 4.6. Deney düzeneği hazırlık aşamaları-2 48

Resim 4.7. Deney düzeneği hazırlık aşamaları-3 48

Resim 4.8. Travers yüzeyinin deneye hazırlanması 49

Resim 4.9. Tamamlanmış deney düzeneği 50

Resim 4.10. Deneyde Kullanılan Geogrid 53

Resim 4.11. Deneyde Kullanılan Geocell 53

Resim 5.1. Geogrid ile oluşturulmuş subbalast tabaka 55

Resim 5.2. Analizde belirtilen B70 traversi üzerindeki P1, P2, P3, P4, P5 noktaları 56

Resim 5.3. Geogrid ile birinci deney aşaması 57

Resim 5.4. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 60

Resim 5.5. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 60

Resim 5.6. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 61

Resim 5.7. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 61

Resim 5.8. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 62

Resim 5.9. Geogrid ile ikinci deney aşaması 63

Resim **Sayfa**

Resim 5.10. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 66

Resim 5.11. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 67

Resim 5.12. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 67

Resim 5.13. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 68

Resim 5.14. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 68

Resim 5.15. Geogrid ile üçüncü deney aşaması 69

Resim 5.16. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 73

Resim 5.17. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 73

Resim 5.18. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 74

Resim 5.19. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 74

Resim 5.20. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 75

Resim 5.21. Geogrid ile dördüncü deney aşaması 76

Resim 5.22. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 79

Resim 5.23. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 80

Resim 5.24. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 80

Resim 5.25. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 81

Resim 5.26. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 81

Resim 5.27. Geogrid ile beşinci deney aşaması 82

Resim 5.28. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 86

Resim 5.29. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 86

Resim 5.30. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 87

Resim 5.31. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 87

Resim 5.32. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 88

Resim 5.33. Geogrid ile altıncı deney aşaması 89

Resim **Sayfa**

Resim 5.34. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 93

Resim 5.35. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 93

Resim 5.36. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 94

Resim 5.37. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 94

Resim 5.38. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 95

Resim 5.39. Geogrid ile yedinci deney aşaması 96

Resim 5.40. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 100

Resim 5.41. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 100

Resim 5.42. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 101

Resim 5.43. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 101

Resim 5.44. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 102

Resim 5.45. Subbalast tabakası (7 cm kum tabakası) 103

Resim 5.46. Şaşırtmalı olarak serilmiş geocell ile hazırlanmış düzenek 104

Resim 5.47. Deneye hazır tamamlanmış geocell içi balast dolgulu düzenek 104

Resim 5.48. Geocell ile birinci deney aşaması 105

Resim 5.49. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 108

Resim 5.50. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 109

Resim 5.51. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 109

Resim 5.52. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 110

Resim 5.53. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 110

Resim 5.54. Geocell ile ikinci deney aşaması 111

Resim 5.55. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 114

Resim 5.56. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 115

Resim 5.57. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 115

Resim **Sayfa**

Resim 5.58. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 116

Resim 5.59. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 116

Resim 5.60. Geocell ile üçüncü deney aşaması 117

Resim 5.61. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 121

Resim 5.62. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 121

Resim 5.63. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 122

Resim 5.64. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 122

Resim 5.65. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 123

Resim 5.66. Geocell ile dördüncü deney aşaması 124

Resim 5.67. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 127

Resim 5.68. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 128

Resim 5.69. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 128

Resim 5.70. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 129

Resim 5.71. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 129

Resim 5.72. Geocell ile beşinci deney aşaması 130

Resim 5.73. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 134

Resim 5.74. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 134

Resim 5.75. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 135

Resim 5.76. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 135

Resim 5.77. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 136

Resim 5.78. Geocell ile altıncı deney aşaması 137

Resim 5.79. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 141

Resim 5.80. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 141

Resim 5.81. %60Pmax yüklemede birim deformasyonlar 142

Resim **Sayfa**

Resim 5.82. %80Pmax yüklemede birim deformasyonlar 142

Resim 5.83. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 143

Resim 5.84. Travers üzerinde oluşan çatlaklar 143

Resim 5.85. Geocell ile yedinci deney aşaması 144

Resim 5.86. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 148

Resim 5.87. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 148

Resim 5.88. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 149

Resim 5.89. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 149

Resim 5.90. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 150

Resim 5.91. Geocell ile sekizinci deney aşaması 151

Resim 5.92. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 155

Resim 5.93. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 155

Resim 5.94. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 156

Resim 5.95. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 156

Resim 5.96. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar 157

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_{nom}	Hareketli bir tekerlekte nominal aks yükü
A	Travers kesit alanı
A_R	Travers yatak alanı
a	Balast omuz genişliği
a	Traversler arası boşluk uzunluğu
b_{rail}	Ray taban genişliği
c	raylar arası merkez uzunluğu
C_2	Balast ve Subbalast için elastisite modülü
c_{tot}	Raydaki mesnetlenme için sertlik kat sayısı
c_1	Statik yükler için ray pedinin sertliği
c_2	Balast ve subbalast sertliği
d	Şev iz düşüm uzunluğu
d	Dever
d_{min}	Minimum dever
d_{max}	Maksimum dever
e	İki ray arası mesafe (ekartman)
e	Rayın altında meydana gelen yük dağılımının uzunluğu
e_p	Ön germe kuvvetinde dış merkezlik
E_R	Rayın elastisite modülü
F	Bileşke kuvvet
$f_{ct,fl,t=28\ gün}$	28 günlük travers çekme dayanımı

Simgeler	Açıklamalar
$f_{ct,fl,fat}$	Yorulmalardan dolayı beton dayanımı
f_c	Beton basınç gerilmesi
G	Ağırlık merkezi
H	Balast yatak derinliği
I_R	Rayın atalet momenti
I_r	Travers atalet momenti
K	Hattın toplam genişliği
K	Merkezkaç kuvveti
k_v	Nominal araç yükleri için izin verilen hız faktörü
k_d	Yük dağıtım faktörü
k_r	Balast yatağındaki hatalardan dolayı düzeltme faktörü
k_p	Ray pedinin zayıflama etkileri yük azaltma faktörü
$k_{i,c}$	Düzensiz balast reaksiyonu düzeltme faktörü
$k_{i,r}$	Ray yatağı ile travers arasında ki düzensizlik faktörü
k_{1s}	Olağan dışı yük faktörü
k_{1d}	Olağan dışı yük faktörü
k_{2s}	Kaza yükü faktörü
k_{2d}	Kaza yükü faktörü
k_3	Yorulma yükü faktörü
L	Travers uzunluğu
L_p	Balastta meydana gelen gerilme dağılımının uzunluğu
L_{el}	Winkler kirişi için elastik uzunluk
M_k	Servis yüklerine bağlı olarak eğilme momentleri
$M_{k,r,pos}$	Ray altında traversteki pozitif eğilme momenti
$M_{k,r,neg}$	Ray altında traversteki negatif eğilme momenti

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{M_{k,c,pos}}$	Travers merkezinde pozitif eğilme momenti
$\mathbf{M_{k,c,neg}}$	Travers merkezinde negatif eğilme momenti
M	Subbalast derinliği
M	Araç ağırlık merkezi
m	Metre
mm	Milimetre
$\mathbf{m^3}$	Metre küp
$\mathbf{m^2}$	Metre kare
$\mathbf{m/sn^2}$	İvme
$\mathbf{M_{k,c,neg}}$	Ray yatağında traversteki negatif eğilme momenti
$\mathbf{M_{c,neg}}$	Travers merkezinde ki negatif eğilme momenti
N	Hattın balast üst genişliği
$\mathbf{N_{p\ (t=40\ yıl)}}$	40 yıl sonra travers üzerinde ki ön germe kuvveti
$\mathbf{P_0}$	Ray yatağı yükü
$\mathbf{P_k}$	Dinamik ray yükü
R	Kurp yarıçapı
S	Travers altındaki balastın hacmi
q	Yer çekim ivmesi
Q	Dinamik aks yükü
$\mathbf{Q_0}$	Tekerlek yükü
V	1 mt yoldaki toplam balast hacmi
V	Hız
$\mathbf{V_{max}}$	Maksimum hız
y	Maksimum yanal ivme
$\mathbf{y_o}$	Ray sapması

Simgeler	Açıklamalar
$\mathbf{Z_{c,top}}$	Travers üstünden itibaren atalet eksenine olan mesafe
W	Kesit atalet momenti
λ	Her bir rayda ki iç kol faktörü
$\mathbf{\Delta_{c,c+s+r,t=40\ yıl}}$	40 yıl sonra traversteki ön germe kayıpları
$\mathbf{\Delta_{c,c+s+r,t=28\ gün}}$	28 günlük traverste ön germe kayıpları
$\mathbf{\sigma_{ct,max}}$	Maksimum çekme gerilmesi
$\mathbf{\varepsilon_c}$	Beton birim şekil değiştirmesi

1. GİRİŞ

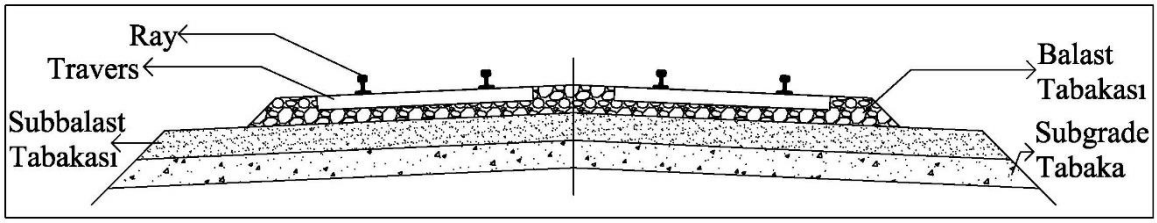
Yük ve yolcu taşımacılığında hem kapasite hem güvenlik açısından uzun yıllardır tercih edilen ve bu tercihi teknolojide ki gelişmelerle destekleyerek yolcu taşımacılığında yüksek hızlı trenlerin hızlarının, eşya taşımacılığında ise yük trenlerinin kapasitesinin her geçen gün arttığı günümüz dünyasında demir yolu alt yapısının da geliştirilmesi gerekmektedir. Balast ve travers ikilisi demir yolu tarihinin başlangıcı kadar eski iki demir yolu unsurudur. Travers olarak ilk zamanlarda ahşap travers kullanımı çok yaygındı fakat zamanla beton teknolojisinin gelişmesi ile ahşap travers yerini beton traverslere bıraktı. Traverste ki bu büyük değişim ona yataklık eden balastta aynı olmadı ve uzun yıllar daha balastı demir yolunda görülmeye devam edecektir. Gelişmiş bazı ülkelerde ise demir yolu olarak manyetik bir sistem kullanılsa da bunun yaygınlaşması şu an için pek mümkün gözükmemektedir.

Balast doğal bir malzeme olsa da doğada balast standardını sağlayacak kaynaklar çok fazla değildir. Balast daneleri demir yolu altında çimento gibi herhangi bir bağlayıcı malzeme ile sabitlenmediği için yük altında sürekli bir deformasyona uğramaktadır. Bağlayıcı herhangi bir malzeme ile bir arada tutulmadığı için doğa olaylarına karşı korumasız olduğundan demir yolunda balastı sürekli gözetim altında tutmak gerekmektedir. Bu gözetim hattın uzunluğuyla hem çok zor hem de maliyeti yüksek bir iştir.

Travers altına balast yerine betonarme yolların yapılması fikrinin yaygın olduğu demir yolu sektöründe, balastın en önemli görevi olan döngüsel yüklerden kaynaklanan dinamik yükleri sönümlemesi betonarme alt yapıda mümkün gözükmüyor. Betonarme alt yapıda dinamik yükleri sönümlemek için travers, rijit bir yapıdan elastik bir yapıya dönüştürülebilir, travers altına elastik pedler konulabilir veya demir yolu araçlarında ki tekerlek takımını uygun süspansiyon sistemiyle kullanarak balast kullanımından vazgeçilebilir.

Trenlerin geçişi ile birlikte meydana gelen gerilmenin tekrar tekrar uygulanması, demir yolunun yerleşimine ve zamanla balastta yanal olarak yayılmalara neden olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, yanal balast akışının ciddi yol sorunlarından biri olduğu da vurgulanmaktadır [1,2,3]. Bu sorunların çözümü yola hız sınırlaması getirmek veya yanal olarak yayılıp boşalan travers altındaki balastı onarmak şeklinde gerçekleşebilir. Ancak hız sınırlamalarının getirilmesi yüksek hızlı trenlerin kullanımının yaygınlaştığı günümüz

dünyasına aykırı bir davranış olacaktır. Bu nedenle hız sınırlaması kalıcı ve kabul edilebilir bir çözüm değildir. Balast yayılmasını tekrar eski haline getirmek ise en yaygın yapılan yol onarım durumlarından birisidir ve dünya genelinde bu çok maliyetli bir durumdur. Balast demir yolu için vazgeçilmez bir malzeme ise bunu yerinde tutmak için çeşitli geosentetiklerin kullanımı en akılcı ve en ekonomik yöntem olarak gözükmektedir. Bu açıdan dünyanın çeşitli yerlerinde bilim insanları sürekli bu konu üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler.



Şekil 1.1. Deneye konu demir yolu yapısı kesiti

Balast tabakaları ile altındaki zemin tabakalarına ya da sanat yapısına "Yol Yatağı Tabakaları (YYT)" adı da verilmektedir. Yol yatağı tabakaları, özellikleri ve kalınlıkları ile yol mesnet rijitliği, yol geometrisinin ve drenaj sisteminin korunması açısından, yol performansı üzerinde önemli bir rol oynarlar.

YYT' nın tasarım kalınlıkları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Alt yapıyı oluşturan zeminlerin özgün karakteristikleri (doğal yapısı, taşıma kapasitesi, suya ve dona tepkisi, vb.),
- Bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik koşulları,
- Bölgenin iklim koşulları,
- Statik ve dinamik trafik etkileri (Brüt-ton, dingil yükleri, hızlar),
- Yol kompozisyonu (Ray kesiti, traverslerin tipi ve aralıkları, vb.).

Yolun durumu, işlevsel ve yapısal koşulları ile tanımlanabilir. İşlevsel durum, yolun demir yolu kullanıcılarına sağlayacağı seyir koşullarının düzeyi ile ilişkili, yapısal durum ise yolun yük taşıma yeteneği ve taban zeminini korunması ile ilişkilidir. Tekrarlanan yük altında, yol yanal ve düşey yönlerde hareket eder, bu hareketlerde yol geometrisinde bozulmalar olur.

Bu bozulmalar genellikle düzensizdir ve yol geometrisindeki bozulmaların artması ile seyir kalitesi azalır ve dinamik etkiler artar [4].

Balast ve geosentetikler üzerine birçok bilim insanı deneysel çalışmaları sonucunda balast tabakasına çift eksenli bir geogridin yerleştirilmesinin 100.000 yük döngüsünden sonra düşey deformasyonlarda %50 ye kadar bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir [5,6,7,8,9]. Ayrıca 50 mm' lik kalıcı bir düşey deformasyonun gerçekleşebilmesi için gereken yük döngüsünün geogrid kullanımından sonra 10 (on) kat artmıştır. Benzer bir deney daha [10] gerçekleştirmiş ve düşeyde balastta çökmede bir azalma olduğunu gözlemlemiştir [11]. Yapılan başka bir çalışmada ise geosentetiklerin hattın performansını artırmadaki rolünü doğrulamıştır. Balasta geogrid takviyesi aynı zamanda balast danelerinin yük altında kırılma derecesini azalttığını [8-12] yaptıkları çalışmalarda ayrı ayrı göstermişlerdir.

Tüm dünyada büyük kazalara sebebiyet veren travers altı balast boşalmasının önüne geçebilmek için geogrid ve geocell kullanılarak ayrı ayrı oluşturulan bir adet traversin doğal ortamı laboratuvar ortamında modellenerek kademe kademe yapılan balast boşaltması ile yük–düşey deplasman ve birim deformasyon değerleri incelenmiştir. Deneyin analizleri, mono blok B70 traversinin bir yüzeyinde beyaz bir zemin oluşturarak siyah boya ile rastgele noktalar hazırlayıp ardından profesyonel dijital kamera görüntüleri ile elde edilen fotoğraf verilerini dijital görüntü korelasyonu tekniği ile matlab programında analiz ederek buradan yük-düşey deplasman, yük-birim deformasyon değerleri elde edilmiştir.

Dijital görüntü korelasyonu tekniği, deney numunesine temas etmeden numunenin üzerinden alınacak görüntülerin güvenli bir şekilde elde edilmesini sağlar. Bu durum ölçüm cihazlarından kaynaklanacak veri hatalarının, veri kayıplarının önlenmesini sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) Tekniği

Korelasyon kavramı, olasılık kuramı ve istatistikte iki veya daha fazla rastlantısal değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü göstermeye yarayan bir kavramdır. Dijital görüntü korelasyonu ise profesyonel bir dijital kameradan alınan kareler arasında sabit bir süre ile çekilen dijital görüntülerin art arda işlenmesiyle yüzey yer değiştirmelerinin görselleştirilmesi için optik ve temassız bir ölçüm yöntemidir [13,14].

Dijital görüntü korelasyonu, bir malzemenin veya bir yapının deformasyonunu, yer değişimi ve gerilimine ilişkin tam alan analizine izin veren bir optik ölçüm tekniğidir. Özellikle çeşitli parçaların ve malzemelerin gerilme değerlerini ve yükleme altındaki davranışlarını ölçmek için dijital görüntü korelasyonu kullanılan havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerinde tekniğin popülerliği giderek artmaktadır. Yüksek hızlı kameralar ve çeşitli yazılım paketleri, DIC' ın yeni uygulamalara genişlemesine yardımcı olurken aynı zamanda tekniğin kaliteli nicel veriler sağlamasına imkan veriyor.

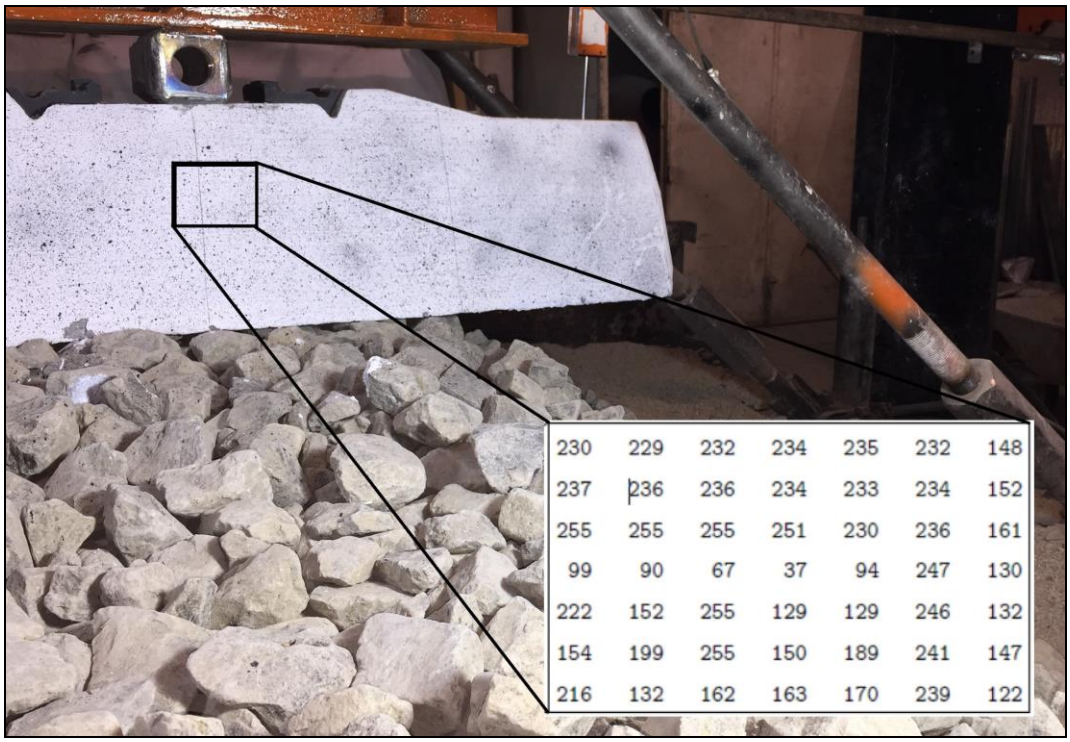
DIC tekniğinin en önemli avantajı, ilk çatlağın yüksek hassasiyetle kolayca tespit edilmesini sağlaması, çatlak boyutunun ölçümüne ve betonarme elemanların işlevselliğini yitirmesine kadar ilerleyen çatlak aşamalarının kolayca takip edilmesini sağlamasıdır [15].

Beton yüzeyde üzerinde oluşturulan renklendirilmiş yüzey izleyici görevi görür. Dijital kamera sensörleri, piksel adı verilen küçük, ışığa duyarlı öğelerden oluşur. Bir resim çekildiğinde, her piksel görüntülenen nesneden yansıyan ışığın miktarına orantılı olarak üç adet kavramı yansıtır. Bunlar sırasıyla Y-Cb-Cr değerleridir. Y parlaklık, Cb mavilik, Cr ise kırmızılıktır. Dijital görüntü korelasyonu sistemi, ışık yoğunluğundaki farklılıkları, CCD kamerada her piksele kaydedilen gri ölçekli bir model olarak algılanır. Dijital görüntü korelasyonu için üç fonksiyon çok önemlidir; i) görüntü alanı yoğunluğu, ii) çapraz korelasyon fonksiyonu ve iii) enterpolasyon fonksiyonu. Görüntü yoğunluğu alanı, görüntü düzlemindeki her noktaya, fiziksel alandaki karşılık gelen noktanın ışık yoğunluğunu (Y-renk bileşeni) yansıtan bir skaler değer atar (fiziksel bir uzayda tek bir parçacığın ışık

enerjisini eşleştirir) . Gri seviye, 8 bitlik bir görüntü için sayısal olarak 0 (siyah) ile 255 (beyaz) arasında değişir. Dijital görüntüden sözde ilgilenilen bir alan kesilir ve arama alt kümeleri (yama veya pencereler) adı verilen küçük örtüşen alt alanlar seçilir. İki görüntü arasındaki deformasyon yeterince küçükse, sorgulama hücrelerinin kalıplarının özelliklerini değiştirmemeleri beklenir (sadece konumları). Bir sabitleme pozisyonunda kalan bir kamera tarafından çekilen ardışık iki görüntü, ekseni deformasyon düzlemine dik olarak yönlendirilmiş durumdayken, bir yer değiştirme deseni tespit edilir. "1" ve "2" arasındaki resimler arasında yerel bir yer değiştirme bulmak için, ikinci görüntüden bir arama bölgesi çıkarılır. Her sorgulama hücresi için doğru bir yerel yer değiştirme vektörü, iki dijital görüntüde iki ardışık parlaklık dağılımı arasındaki bir çapraz-korelasyon işlevi vasıtasıyla gerçekleştirilir. İşlev, ilk görüntüdeki tüm gri değerleri, ikinci görüntüdeki tüm gri değerleri ile ilişkilendirerek basit olası değişimleri hesaplar. Korelasyon düzlemi tekli piksel aralıklarında değerlendirilir, bu da çözünürlüğün bir piksele eşit olduğu anlamına gelir. Bir enterpolasyon işlevinin zirveye yakın bölgeye yerleştirilmesiyle, yer değiştirme vektörü yüksek bir doğrulukla (korelasyon ofsetine eşit) kurulur. Korelasyon fonksiyonundaki en yüksek nokta, iki resmin birbirinin üzerine geldiğini yani iki resim arasında "eşleşme derecesini" gösterir [15].

Dijital bir görüntü Resim 2.1.'de görüldüğü gibi aslında matris şeklinde düzenlenmiş bir değerler kümesidir. Matlab matris işlemleri için en uygun programlama dili olduğundan, görüntü ile ilgili işlemler için matlab kullanmak birçok açıdan araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlar. Çok fazla kodlamadan hoşlanmayan araştırmacılar matlabın kısa kodlarıyla işlerini kolaylıkla halledebilmektir.

DIC, bir deney numunesinde deformasyonun farklı aşamalarında bir bileşenin veya deney parçasının dijital fotoğraflarını karşılaştırarak çalışır. Piksel bloklarını izleyerek, sistem yüzey yer değiştirmesini ölçebilir ve tam alan 2B ve 3B deformasyon vektör alanları ve şekil değiştirme haritaları oluşturabilir. DIC' nin etkili çalışması için, piksel bloklarının bir dizi kontrast ve yoğunluk seviyesiyle rastgele ve benzersiz olması gerekir. Özel bir aydınlatma gerektirmez ve çoğu durumda yapının veya bileşenin doğal yüzeyi, herhangi bir özel yüzey hazırlığına gerek duymadan DIC' nin çalışması için yeterli görüntü dokusuna sahiptir [16].



Resim 2.1. Dijital görüntü matris kümesi

DIC, geleneksel NDT yöntemlerine ve lazer shearography ve benek interferometresi gibi diğer optik tekniklerden bazılarına sahiptir, bunlar genellikle daha pahalı olan ve hassas kurulum ve düşük titreşimli ortamlar gerektiren laboratuvar dışında kullanımı daha zor olan laboratuvar dışında da daha zordur. Her zaman dış mekânda kullanım için uygun değildir. Bunun aksine, DIC geleneksel dijital fotoğrafçılığı kullanır ve inşaat mühendisliği ölçme teknikleriyle birlikte tipik dış mekan ortamlarında yapıların uygun şekilde doğru şekilde ölçülmesini sağlamak için kullanılabilir. Yapıdaki herhangi bir değişiklik, yakalanan görüntülerle kolayca karşılaştırılabilir ve böylece beklenmedik değişikliklerden kaynaklanabilecek anormallikler, köprüdeki bir kuş inişi gibi kolayca belirlenebilir [16].

2.2. Demir Yollarında Geogrid Kullanımı

Geosentetikler demir yollarında neredeyse otuz yıldır çeşitli şekillerde kullanılmaktadır ve rehabilitasyonu hala devam etmektedir. Uygun şekilde tasarlanıp uygulandığında geleneksel yöntem demir yollarına göre daha düşük maliyetli yollar yapılabilir. Demir yollarında düzeltilmesi gereken birkaç sorun var; alt tabaka zemin taşıma gücünün artırılması, balastın alt tabakalardan dolayı kirlenmesinin önlenmesi ve döngüsel tren yükü ile oluşan yüksek su

basınçlarının dağıtılması gerekir. Geoteknik mühendisliği projelerinde olduğu gibi demir yolu inşaatları içerisinde geosentetik kullanımını altı kategoriye ayrılabilir [17]:

- Ayırma
- Güçlendirme
- Filtrasyon
- Drenaj
- Nem bariyeri ve su yalıtımı
- Koruma

Geogrid malzeme kullanılarak balast ve subbalast tabakasında yapılacak güçlendirmeler tabaka kalınlıklarının azaltılması çalışmaları incelenmiştir. Yapılan maliyet analizleri neticesinde, dünyada birçok demir yolu hatlarında alt yapının yeterli olmadığı ve balast kaynaklarının sınırlı olduğu yerlerde kullanılan geogrid malzemesi ile güçlendirme uygulamalarının sağladığı mali faydalar ülkemiz demir yollarında da kullanılması halinde ekonomik açıdan avantaj sağlayacağı tespit edilmiştir [18].

Güney Kore' de Seul' den Pusan' a kadar olan yüksek hızlı tren demir yolu için demir yolu yatağının döngüsel yüklerden kaynaklanan kalıcı oturmaları belirlemek amacıyla bir dizi ölçüm yapılmıştır. Alt katmanların kalınlığını azaltmak için geogridin takviye olarak kullanılmasının uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Test sonuçlarına dayanarak döngüsel yük nedeniyle kalıcı oturmaların 10^5 devirden sonra tamamlandığı belirlenmiştir. Demir yoluna yapılan bu takviyenin en faydalı olduğu deney aşaması geogrid ve geotekstilin subbalast ve onun hemen altında ki alt temel katmanının arasına yerleştirildiğinde elde edilmiştir [19].

Tekrarlanan yükler altında balast, çoğunlukla balast yoğunlaşması, balast bozulmaları ve balastın yanal yayılmalarından dolayı demir yolunda düşey deplasmanlar gerçekleşmektedir. Queen's University and Royal Military College son birkaç yıldır büyük ölçekli demir yolu, travers, balast sisteminin izlemek ve performansını araştırmak için stratejiler geliştirmektedir. Ulaştırma araştırma kurulu 1987 yıllık toplantısında balast ile birlikte polimer bazlı takviyenin yani geogridin demir yolu alt yapısına dâhil edilmesinin yanal balast yayılımını engelleyeceği belirtilmiştir [5].

Bir demir yolunda balast ve subbalast tabakası, bağlanmamış granüller parçacıklardan oluşur. Balast ve subbalast tabakalarında sıkışma işlemi bir demir yolunun yapımı veya bakımı bittiğinde hemen başlar. Tabakalar belirli bir yük tekrarından sonra daha kompakt bir duruma gelir. Geogridler genellikle demir yolu inşaatında güçlendirme ve stabilizasyon görevi görmektedir. Ağır yük trenleri, alt tabakalarda ki takviyeli granüller parçacıkların üzerindeki basıncı artırarak bu parçacıkların davranışını değiştirir. Dikdörtgen (BX), üçgen (TX) şekilli geogridler ile geogrid ile desteklenmemiş bir dizi testler yapılmıştır. Geogrid subbalast ve onun altında ki subgrade tabakaları arasına yerleştirilmiştir. Bir demir yolu yapısı geogridli ve geogridsiz şekilde laboratuvar ortamında modellenmiştir. Dört kablosuz cihaz bu deneylerde ray altına, travers altına, balast ve subbalast arasına, subbalast ve subgrade arasına yerleştirilmiştir. Döngüsel yükleme altında tabakalarda iki farklı konfigürasyonda üç farklı deney incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar geogridin demir yoluna dâhil edilmesinin, belirli tekrarlanan yükler altında balast yüzeyindeki düşey yer değiştirmeyi, balast parçacıklarının çevirimini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir [20].

2.3. Demir Yollarında Geocell Kullanımı

Demir yolunda travers altında balastın yayılması önemli bir problemdir. Özellikle yüksek hızlı tren hatlarında bu problem daha önemlidir. Araştırmalarda demir yolu alt yapısında geosentetiklerin kullanımı ile birlikte balast hareketlerine sınırlama getirdiğinden yatay ve düşey deformasyonların önlendiği birçok çalışma ile tespit edilmiştir. Geocell' in ise üç boyutlu bir yapıda olmasından dolayı balastın yatay ve düşey deformasyonuna daha iyi çözüm sunması beklenmektedir. Geocell' in bu avantajı bir dizi test yapılarak incelenmiştir. Test sonuçları geocell takviyesinin balast yüzünün sürtünmesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve bu sayede balast kütlesinin yanal yayılımını büyük ölçüde durdurabildiği tespit edilmiştir. Geocell' in cep büyüklüğü balast büyüklüğünün (D50) ortalama iki katına çıktığı testlerde performansta ki iyileşme en iyi seviyelerde olmuştur. Balastın yanal yayılmasının azaltılasıyla birlikte; yolda oluşan deformasyonlar, alt tabakalarda aşırı gerilmelerin önlenmesi, bakım periyodunun artmasına neden olan parça bakım maliyetlerinin düşmesi sağlanmış olacaktır. Ancak bu bulguların büyük ölçekli testlerle doğrulanması gerekir [3].

Geocell ile güçlendirilmiş demir yolu altı subbalast tabakasında ki gerilmeleri incelemek üzere Wollongong Üniversitesi' nde bir cihaz tasarlandı. Belirli bir yük aralığında (1 kPa ≤ q ≤ 45 kPa) subbalast – geocell düzeneğinde hareketlerden dolayı aktif çekme gerilmelerini ($\tau_{tensile}$), pasif gerilmelerini (τ_{pasif}) belirlemek için bir dizi test yapıldı. Subbalast ve geocell etkileşimini dengede tutmak ve gerçeği en iyi şekilde simüle etmek için ara yüz düşey bir hizada tutuldu. Test sonuçları geocell takviyesinin, geocell şeridi üzerindeki açılma alanının (OA) ve yanal basıncın (σ_n) etkili birer faktör olduğunu ve önemli derecede pasif direnç sağladığını göstermiştir. Üç boyutlu bir sonlu elemanlar simülasyonu da yapıldı. Simülasyonun sayısal sonuçları geocell kullanımıyla oluşan gerilme kuvvetlerinin, geocell sertliği arttıkça gerilme kuvvetlerinin de artacağını ancak τ_{pasif} gerilme kuvvetinin azalacağını gösterdi. Geocell sertliği arttıkça sürtünme kat sayısının pasif direnç ve hareketli çekme gerilmesini üzerinde ki etkilerini araştırmak için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar pasif direncin ve hareketli çekme gerilmesinin aşırı yük basıncı (q) ve sürtünme kat sayısındaki (δ) artışla arttığını göstermektedir [21].

Geçtiğimiz yıllarda demir yolu taşımacılığında teknolojide ki etkinliğin ve ilerlemenin sonucu olarak demir yoluna büyük bir ilgi olmuştur. Bununla birlikte demir yolu uzunluğunun oldukça fazla olması sebebiyle yer yer değişkenlik gösteren zemin nedeniyle birçok sorun ortaya çıkmaktadır. En önemli sorunlardan birisi sürekli deformasyona uğrayan ve zayıflayan zeminin bakım ve onarımıdır. Demir yolu alt yapısında ki bu zayıflılar genellikle geocell de dâhil olmak üzere çeşitli takviye türleri ile desteklenmektedir. Geocell ile balast hareketini kısıtlamayı araştırmak amaçlı, geocell yerleşiminin farklı konfigürasyonlarına sahip (bir katman ve iki katman) bir dizi takviyesiz alt yapı tabakalarına kıyasla döngülü ve döngüsüz yükler altında deneyler yapılmıştır. Bu deneyler yapıldıktan sonra her bir deney sonlu elemanlar prosedürleri ile sayısal olarak modellenmiştir. Geocell' in kullanıldığı tek tabaka ve çift tabaka geocelli aşamalar ile geocell kullanılmadığı takviyesiz aşamaların sonuçları sonlu eleman sayısal modeller karşılaştırıldı.

Hem deneyler hem sayısal model analizleri geocell kullanılan aşamalarda düşey deformasyon ve yanal yayılımın önlendiği sonucu elde edildi. Bununla birlikte balastın sıkıştığı gözlemlendi. Bu sonuçlar ışığında geocell kullanımının özellikle yumuşak temellerde yüklerden dolayı gerilme dağılımında daha iyi sonuçlar veren ve taşıma kapasitesini artıran ve yayılmayı azaltan bir kompozit yatak meydana gelmektedir. Sonuçlar

bazı arazi koşullarında geocell kullanımının sık bakım ve / veya düşük tren hızlarına ekonomik bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Geocellin bozulmuş, deformasyona uğramış zayıf, geri dönüşüme tabi tutulmuş balastlarla kullanmanın maliyet açısından fayda sağlayacağı, balast stabilizasyonu için geocell kullanımının yaygın ve pahalı yol rehabilitasyonlarına alternatif çözüm olacağı düşünülmektedir [22].

3. DEMİR YOLU BİLEŞENLERİ

3.1. Balast

Traverslerden aldığı yükü daneler arasındaki sürtünme ile yayarak bir alt tabakaya ileten ve yolda elastik bir yatak oluşturan 31,5 mm - 63 mm ebadında sert ve güçlü açısal parçacıklardan oluşan sert ve sağlam taşlara balast denir. Türkiye de demir yollarında kullanılan balast; TS EN 13450:2013 standartlarına uygun malzemeden seçilen, uygun stabiliteye sahip, yuvarlak pürüzsüz dere ve nehir çakılından olmayacaktır. Balast alt kalınlığı travers altından itibaren optimum 25 – 30 cm'dir. Balast malzemesinin drenaj kabiliyeti yüksek, çatlaksız, damarsız, travers altında yük alıp kırıldığında keskin köşeli ve aynı kayaçtan olacaktır. Bitişik parçacıklar arasındaki temas noktalarındaki yüksek gerilmelerden dolayı zamanla kırılmaktadır. Kırıldığında içerisinde farklı bir formasyon çıkmayacaktır. Yüksek kaliteli balast kaynakları sınırlıdır ve dinamik yükler altında çoğu balast kırılma, deformasyon ve kirlenme nedeniyle periyodik olarak değişir. Balast kirlenmesi ve tıkanması geçirgenliği azaltır ve bu nedenle de balast içerisinde birikip kalan su balast daneleri arasında yükün iletimini engeller ve travers altındaki balast yatağının görevini yapmasına engel olur.



Resim 3.1. Demir yollarında kullanılan balast

Çizelge 3.1’ e göre balastın elek analizine göre dane çapı aralığı tabloda belirtilen aralıkta olmalıdır [23].

Çizelge 3.1. Balast elek analizi

Elek Boyutları	% Geçen
63 mm	100
50 mm	97-100
28 mm	0-20
14 mm	0-2
1,18 mm	0-0,8

3.1.1. Balastın görevleri

- Demir yolunda gelen yükleri, daneler arası sürtünme kuvveti ile daha geniş bir alana homojen yayarak alt tabakalara iletir.
- Demir yolu araçlarının titreşimlerini en aza indirger
- Kaymalara karşı direnç sağlar (enine ve boyuna)
- Yola elastik bir yatak oluşturarak traversleri yerinde tutar.
- Yolun otlanmasını önler.
- Yola drenaj sağlar.
- Traversi toprak zeminden uzak tutarak travers ömrünü uzatır.

3.1.2. Balastta bulunması gereken özellikler

- Sağlam ve damarsız taştan hazırlanmalıdır.
- Su emme özelliği çok küçük miktarlarda olmalıdır.
- Isı değişimlerinden etkilenmemelidir.
- Çok yüzlü ve çok köşeli olup temas ettiği diğer taşlarla kaynaşmalıdır.
- Darbelere karşı dayanıklı olmalıdır.

- Çok fazla irili ufaklı olmamalı elek analizi 31.5mm – 63 mm aralığında olmalıdır [24].

3.1.3. Balast profili tasarım değerleri

Balast omuz genişliği;

- HT ve YHT hatlarında en az 50 cm
- Ray boyu L ≤ 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 ≤ 500 m olan kurplarda en az 60 cm

Balast şev eğimi;

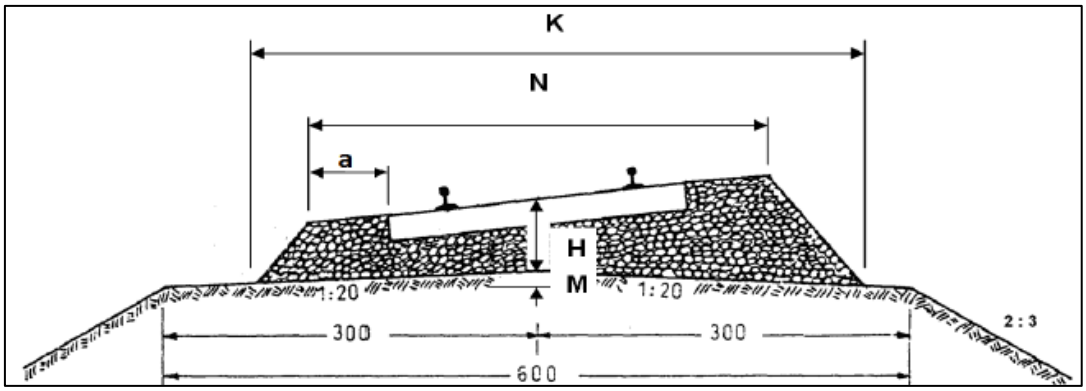
- Konvansiyonel hatlarda en fazla (4 / 5)
- HT ve YHT hatlarında en fazla (2 / 3)

Travers altı balast kalınlığı;

- Tüm hatlarda en az 30 cm
- Tüm hatlarda en fazla 50 cm [25]

3.1.4. Yoldaki balast hacminin hesaplanması

Bir metre uzunluğundaki hatta bulunması gereken balast miktarı aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilir.



Şekil 3.1. Demiryolu kesiti

Çizelge 3.2. Travers tipine göre balast hacimleri

Yol Tipi	Ölçüler					Trvs. Hacmi m³	İlave Balast m³
	a	K	N	H	M		
B 58 Beton Trv.	35	4.54 + (2 *d)	3,1	0,510 + (d/2)	0,12	0,104	-
B 58 Beton Trv.	40	4,64 + (2 *d)	3,2	0,510 + (d/2)	0,12	0,104	0,052
B 58 Beton Trv.	50	4,84 + (2 *d)	3,4	0,510 + (d/2)	0,12	0,104	0,065
B 70 Beton Trv.	35	4.80 + (2 *d)	3,3	0,500 + (d/2)	0,12	0,128	-
B 70 Beton Trv.	40	4,90 + (2 *d)	3,4	0,500 + (d/2)	0,12	0,128	0,052
B 70 Beton Trv.	50	5,10 + (2 *d)	3,6	0,500 + (d/2)	0,12	0,128	0,065

$$S = \left[\left[(K + N) \ / \ 2 \right] * (H + M) \right] - \left[(K * M) \ / \ 2 \right] \quad (3.1.)$$

$$V = \left(S + \text{İlave balast} \right) - \left(\text{Travers hacmi} \ / \ \text{Travers ara mesafesi} \right) \quad (3.2.)$$

3.1.5. Balast katmanında oluşan kuvvetler

Balast katmanının yoldaki işlevini yerine getirirken maruz kalabileceği yükleme ortamını anlamak önemli bir unsurdur. Raya uygulanan kuvvetler mekanik (hem statik hem dinamik) ve termal olarak sınıflandırılabilir [26].

- Demir yolu aracının kendi ağırlığından dolayı oluşturduğu yarı statik – statik yükler ve reaksiyon kuvvetleri.
- Demir yolu aracının hareket halinde oluşturduğu dinamik yükler.
- Kaynaklı raylardaki sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan termal yükler.

3.1.6. Balast ve geosentetik malzemelerin bir arada kullanılması

Trenlerin geçişi nedeniyle oluşan döngüsel yükten dolayı hattın hizalanmasının kontrol altında olması gerekir. Ray hizalamasını sağlamak için demir yolunda zaman zaman önemli bakım maliyetleri ve trafiğin engellenmesi söz konusu olmaktadır. Bu gibi durumlar demir yolu işletmesinde verimliliği etkileyen olumsuz faktörlerdir. Avustralya'da balastla ilgili bakım maliyetlerinin NSW' de yıllık yaklaşık 15 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir. Balastlı bir ray yapısının stabilitesinin, doğrudan balast katmanının performansına bağlı olduğu açıkça bilinmektedir ve bu, durum hattın geosentetiklerle güçlendirilmesiyle arttırılabilir.

Bazı araştırmacıların yaptıkları çalışmaya göre demir yolunda geogridin kullanılması ile birlikte hız sınırının 8 km/saat olduğu bir yerde bu sınırın 56 km/saat' e çıkabildiği ölçülmüştür. Geogridin kullanımının balast açısından hem yanal akmaların önüne geçeceği hem de balastta bozulma derecesini düşürdüğü gözlemlenmiştir [27].

3.2. Subbalast ve Özellikleri

Demir yolunda balastın altındaki katmanı oluşturan, demir yolu araçlarının, travers ve balastın yükün dayanabilen ve bu yükleri alt temele ileten kırma taş malzemeden oluşan tabakadır. Yaklaşık olarak 20 cm kalınlığında oluşturulan balast altı malzemesi;

- Taban zemininin doygun hale gelip yük altında zayıflamasını engellemek için, hattan gelen suyun büyük bir kısmını yan hendeklere aktarabilecek düzeyde geçirimli olacaktır,
- Donma ve çözülmeye karşı yeterli kalınlıkta oluşturulacaktır.

Subbalast malzemesi aşağıda belirtilen koşullara uygun olacaktır:

Çizelge 3.3. Subbalast elek analizi

Elek Boyutları	% Geçen
37.5 mm	100
25 mm	72-100
19 mm	60-92
9.5 mm	40-75
4.75 mm	30-60
2.00 mm	20-45
0.425 mm	8-25
0.075 mm	0-12

- Los Angeles aşınma dayanımı LA < %25 olacaktır (ASTM C 535-89).
- Maksimum dane çapı 25 mm olacaktır.
- İnce malzeme oranı (<0,075 mm) %12 den az olacaktır.
- Malzeme iyi derecelenmiş olacaktır (uniformluk kat sayısı Cu>6).
- Don kaybı % 25 den az olacaktır. (ASTM-C 88)
- Geçirgenlik kat sayısı 5x10-5 m/sn den küçük olacaktır.
- Subbalast malzemesi balast ve hazırlanmış tabanı ayırıcı özelliğe sahip olmalıdır.
- Subbalast malzemesinin gradasyonu, Terzaghi tarafından tarif edilen ve aşağıda belirtilen filtre kriterini sağlamalıdır.

$D15$ (filtre) $\leq 5xD_{85}$ (korunacak malzeme)

$D50$ (filtre) $\leq 25xD_{50}$ (korunacak malzeme) [28].

3.3. Travers ve Özellikleri

Demir yolunda raydan kendisine etkiyen kuvvetleri daha geniş bir yüzeyde karşılayıp altındaki balast tabakasına aktaran, raylar arasındaki ekartmanı sabit tutan, yolu yan etkilere karşı ekseninde tutan, raylara dik belirli aralıklarla döşenmiş kirişlere travers denir.

3.3.1. Traverslerin görevleri

- Raylardan gelen yükleri yayarak balasta iletmek
- Raylar arasındaki ekartmanı korumak
- Yolun ekseninde tutmak
- Raylara içe doğru eğim verilmesini sağlar

3.3.2. Traverslerde bulunması gereken özellikler

- Aşınma ve deformasyonlara karşı sağlam olmalıdır.
- Üstten gelen yüklere karşı hafif olmamalıdır.
- Maliyeti uygun olmalıdır.
- Isı ve rutubete karşı dayanıklı olmalıdır.
- Elektrik akımını iletmemelidir.
- Yüksek hız ve ağır yüklerle baş edebilmelidir.

3.3.4. Traverslerin sınıflandırılması

- Ahşap traversler
- Demir traversler
- Plastik traversler
- Beton traversler

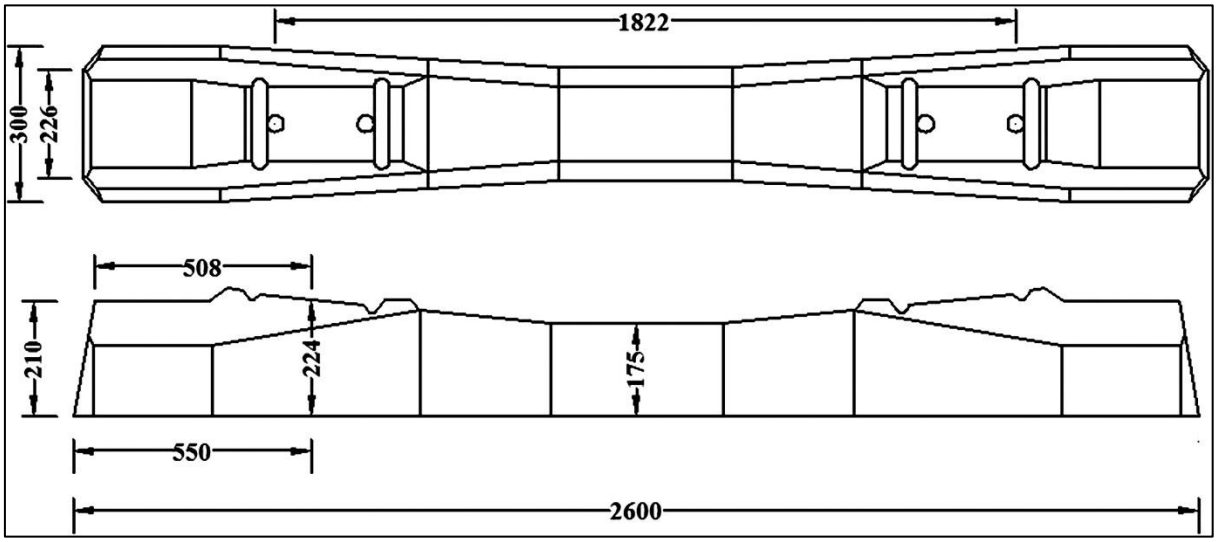
3.3.5. Beton traversler

Demir yollarında çok yaygın olarak kullanılan beton traversler, istenilen şekil verilebilmesi ve çok yüksek dayanım sağlaması sebebiyle farklı geometrik kalıplar kullanılarak kolay ve hızlı imal edilebilmektedir. İçerisinde bulunan çelik çubukları ön germe metoduyla kalıba yerleştirip ardından beton dökerek yüksek dayanımlı bir malzeme üretilmektedir. Beton traversler, beton ve çeliğin tek bir cisim gibi çalıştığı kompleks bir elemandır. Betonun basıncı çeliğin çekmeyi karşıladığı ve çelik çubukların ön germe sayesinde çatlakları minimumda tuttuğu bu yapı elemanı sayesinde demir yollarında çok büyük yükler rahatlıkla taşınabilmektedir.

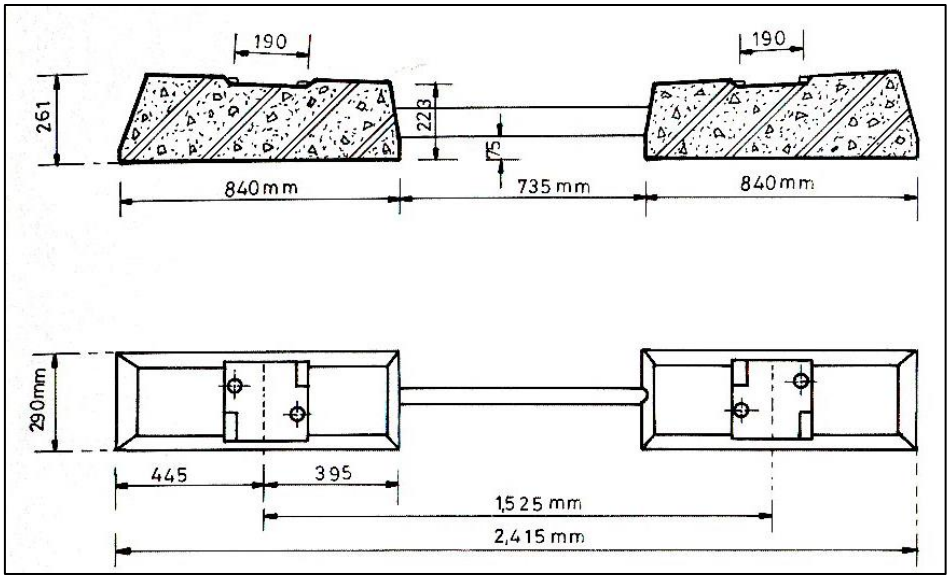
Beton traversler tipleri bakımından iki ana gruba ayrılır.

- Mono blok beton traversler
- İkiz bloklu beton traversler

Ülkemizde demir yollarında beton travers olarak TCDD mono blok beton traversler kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra metro, tramvay ve hafif raylı sistemlerde ikiz bloklu beton traversler de kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Demiryollarında kullanılan mono blok beton travers



Şekil 3.3. Demiryollarında kullanılan ikiz bloklu beton travers

İkiz bloklu traversler hem balastlı hatlarda hem de betona tespitli yollarda kullanılabilmektedir. Kullanım süreleri coğrafi şartlara bağlı olarak ortalama 50 yıldır. Dünyanın birçok ülkesinde ikiz bloklu beton traversler kullanılmaktadır.

3.3.6. Beton travers özellikleri

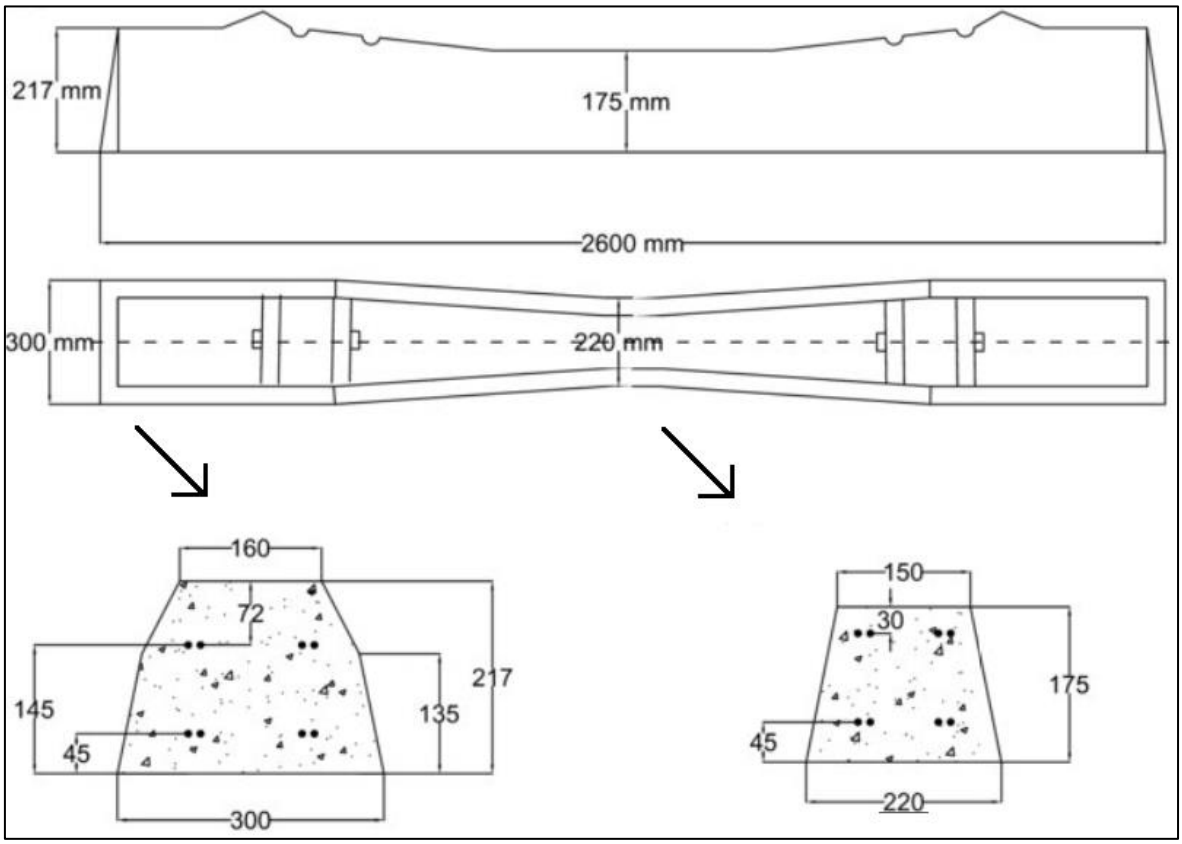
Beton traversler, üzerine montajı yapılan rayın tipine göre değişik ölçü ve ağırlıkta imalatı yapılır. TCDD hatlarında kullanılmakta olan beton traverslere ait bilgiler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Travers tipleri ve özellikleri

Travers Tipi	B 55	B58		B70	
Kullanıldığı Ray Tipi	S 46	49 EI / 49 E2		60 EI / 60 E2	
Üst Genişlik		150 mm		161 mm	
Alt Genişlik		320 mm		300 mm	
Yükseklik		Orta kısım	175 mm	Orta kısım	185 mm
		Ray altı	200 mm	Ray altı	215 mm
		Baş Kısmı	200 mm	Baş Kısmı	190-235 mm
Uzunluk	230 cm	240 cm		260 cm	
Ağırlık		252 kg		291 kg	
Ömür		20 - 30 yıl (tahmini)		20 - 30 yıl (tahmini)	
Üretim Durumu	Üretimi Yok	Üretimi devam ediyor		Üretimi devam ediyor	



Resim 3.2. Demiryollarında kullanılan B70 mono blok tip beton travers



Şekil 3.4. Mono blok B70 beton travers

3.4. Beton travers tasarım esasları

Travers tasarım esaslarında verilen bilgiler ve formüller BS EN 13230-6 başta olmak üzere TS EN 13230 - 1 / 2 / 3 / 4 / 5 standartları kaynak alınarak hazırlanmıştır.

3.4.1. Travers tasarımında durumlar

Travers türlerinden ağırlıklı olarak kullanılan mono blok traverslerde beton ve çeliğin ham madde ve işlevsellik açısından kullanımını optimize etmek için traversler ön germeli olarak tasarlanmaktadır. Ön germeli tasarlanan traverslerin boyutları belirlenirken belirli kriterleri karşılaması açısından dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Demir yolu araçlarından yola aktarılan yükler traversin tasarımında değişiklik gösterir. Bu yükler;

i. Farklı aks yükü veya demir yolu hattının hız kategorisi

ii. Yoldaki kısıtlamalar

iii. Servis yüklerinde ki farklılıklar (örneğin; kurplar, balastlı köprüler)

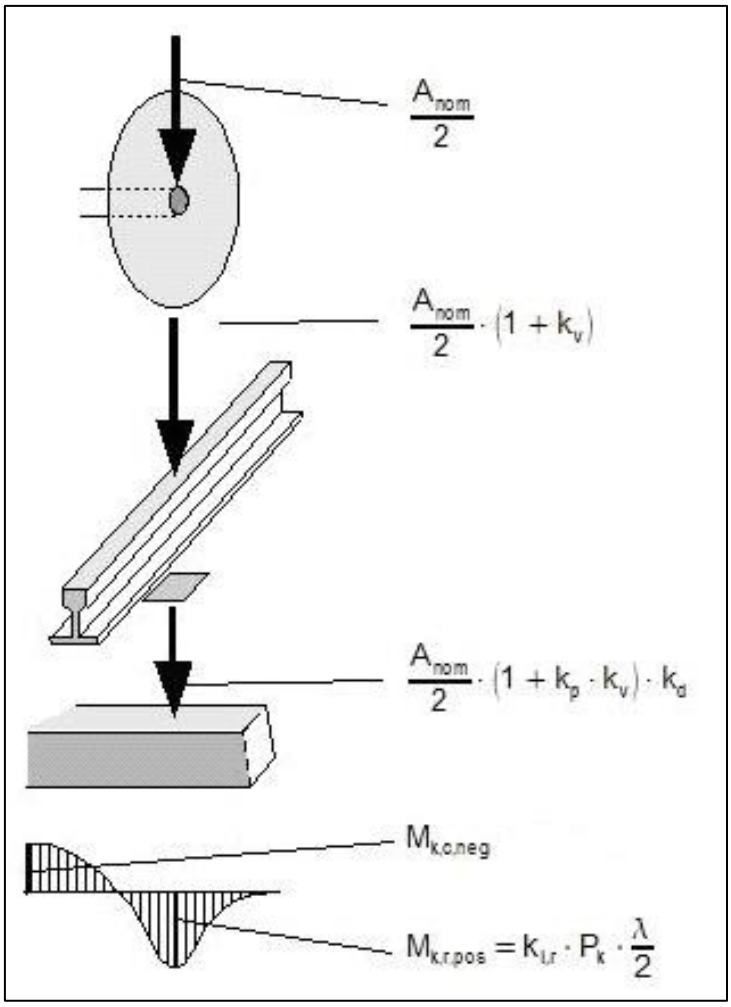
iv. Yoldaki farklı durumlar (örneğin; genleşme derzi)

Travers tasarım eğilme momentleri, aşağıdaki durumları dikkate alınarak elde edilir:

a) Statik yükleme ve normal servis dinamik yükleri dikkate alan temel tasarım eğilme momenti. Bu yük seviyesinde traverste herhangi bir kalıcı çatlak meydana gelmez.

b) (a) maddesinde belirtilenlere ek olarak yükleri hesaba katan ve beton elemanın ömründe (örneğin tekerlek boşlukları) yalnızca birkaç kez beklenebilecek istisnai bir yük ile gerçekleşecek eğilme momenti. Bu yük seviyesinde travers üzerinde oluşan herhangi bir çatlak, yükün kaldırılmasıyla kapanır.

c) Kaza sonucu darbe yükleri ile gerçekleşen eğilme momenti. Bu yükleme traversin nihai yük kapasitesini tanımlamaktadır [29].



Şekil 3.5. Travers eğilme momenti hesabında yük dağılımı

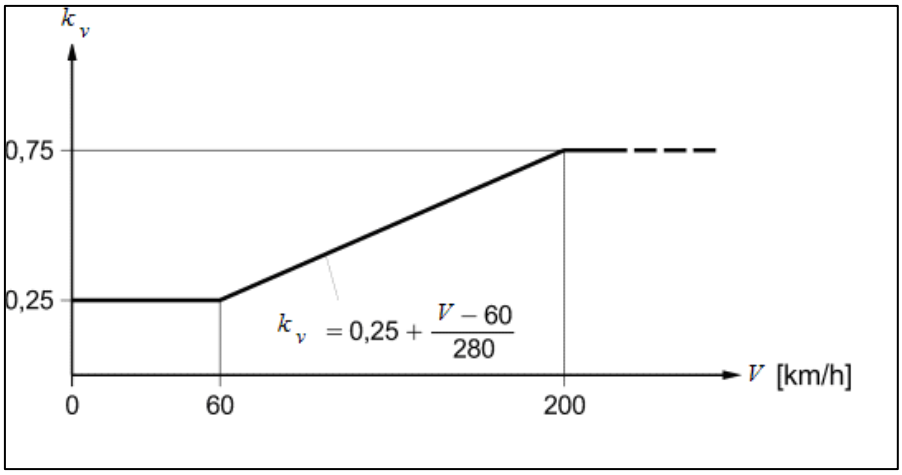
[30]

3.4.2. Statik aks yükünün dinamik yük olarak artışı

Dinamik aks yükü Q, hız ve yol koşullarının etkilerinden dolayı A_{nom} ve k_v faktörü kullanılarak 3.1. eşitliği hesaplanır;

$$Q = \frac{A_{nom}}{2} \times (1 + k_v) \qquad (3.3.)$$

Hız etki faktörü k_v Şekil 3.6. dan hesaplanmalıdır. Yol kusurları dikkate alınarak k_v faktörü türetilmiştir. Yüksek hızlı tren yolları gibi bakımlı yollar için bu değer daha düşük olabilir.



Şekil 3.6. Hız etki faktörü k_v

$0 \leq V \leq 60$ km/h $\qquad k_v = 0{,}25$

$60 < V < 200$ km/h $\qquad k_v = 0{,}25 + \frac{V-60}{280}$

$V \geq 200$ km/h $\qquad k_v = 0{,}75$

3.4.3. Boyuna yük dağılımı

a) Teorik dağılım

Tekerlek yüklerinin ray boyunca traversler arasında ki dağılımı "esnek bir mesnet üzerinde elastik kiriş" modeli kullanılarak hesaplanabilir. Rayın desteği için c_{tot} ve yük dağıtım faktörü k_d' nin hesaplandığı formüller aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

- Balast ve subbalast desteği için traversin yarısına etki eden c_2 faktörü;

$c_2 = 0{,}5 \text{ x } A_R \text{ x } C_2$ (N/mm) (3.4.)

A_R : Travers yatak alanı (mm^2)

C_2 : Balast ve subbalast için elastisite modülü (N/mm^3)

c_{tot} : Raydaki mesnetlenme için sertlik kat sayısı;

$$c_{tot} = (\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2})^{-1} \qquad (3.5.)$$

c_1 : Statik yükler için ray pedinin sertliği

c_2 : Balast ve subbalast sertliği

- Winkler kirişi için elastik uzunluk $L_{el;}$

$$L_{el} = \sqrt[4]{\frac{4\,x\,E_R\,x\,I_R}{c_{tot}\,/\,a}} \qquad (3.6.)$$

E_R: Rayın elastisite modülü (N/mm^2)

I_R: Rayın atalet momenti (mm^4)

a: traversler arası boşluk uzunluğu (mm)

- Birim tekerlek yükü Q_0 için ray sapması y_0;

$$y_0 = \frac{Q_0\,x\,a}{2\,x\,c_{tot}\,x\,L_{el}} \qquad \text{(mm)} \qquad (3.7.)$$

- Aks konumlarının x_i' de η etkisi;

$$\eta_i = \frac{\sin\xi_i + \cos\xi_i}{e^{\xi_i}} \qquad (3.8.)$$

$$\xi_i = \frac{x_i}{L_{el}} \qquad (3.9.)$$

- Tekerlek yükü Q_0 ile ray üzerinde oluşan P_0;

$$P_0 = c_{tot}\,x\sum_i n_i\,x\,y_0 \qquad (N/mm^2) \qquad (3.10.)$$

- Yük dağıtım faktörü;

$$k_d = \frac{P_0}{Q_0} \qquad (3.11.)$$

Yoldaki ölçümlerde k_d' nin değeri ray boyunca yük dağılımının ortalama değerine karşılık geldiği görülmüştür.

Öneriler;

i) Normal durumlarda k_d= 0,5 faktörü kullanılır. Bu değer 46 kg/m' lik raylarda ve ardışık iki travers aralığı ≤ 65 cm olan durumlar için geçerlidir.

ii) Daha ağır raylarda, zayıf ray pedlerinde, travers aralığı 60 cm olan durumlarda, 2,3 ~ 2,6 m uzunluktaki traverslerde, C= 0,1 N/mm^3 olan yatak modülünde, tek tekerlek veya bojilerde, elastik temel üzerinde ki kiriş teorisine dayalı olarak hesaplanmış k_d değerleri aşağıda ki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Ray tipine göre k_d değerleri

Ray Tipi	Ray Ağırlığı (kg/m)	k_d
49 EI	49	0,41
54 E3	54	0,40
60 EI	60	0,38

b) Balast yatağındaki hataların etkisi

Balast yatağındaki hatalardan dolayı travers – balast reaksiyonu için k_r değeri kullanılmaktadır. Bu reaksiyonun sebep olduğu hataları minimize edebilmek için %35 lik yük artışı öngörülmektedir ve k_r = 1,35 olarak hesaplarda kullanılmaktadır.

3.4.4. Dinamik ray yatak yükü

Elastik bir ray pedinin zayıflama etkileri için yük azaltma faktörü k_p değeri kullanılır. Dinamik ray yükü P_k aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$P_k = \frac{A_{nom}}{2} x\left(1 + (k_p \, x \, k_v)\right) x \, k_d \, x \, k_r \qquad (3.12)$$

k_p değeri için;

Düşük zayıflıktaki pedler için (< % 15) $k_p = 1,0$

Orta zayıflıktaki pedler için (%15 ~ 30) $k_p = 0,89$

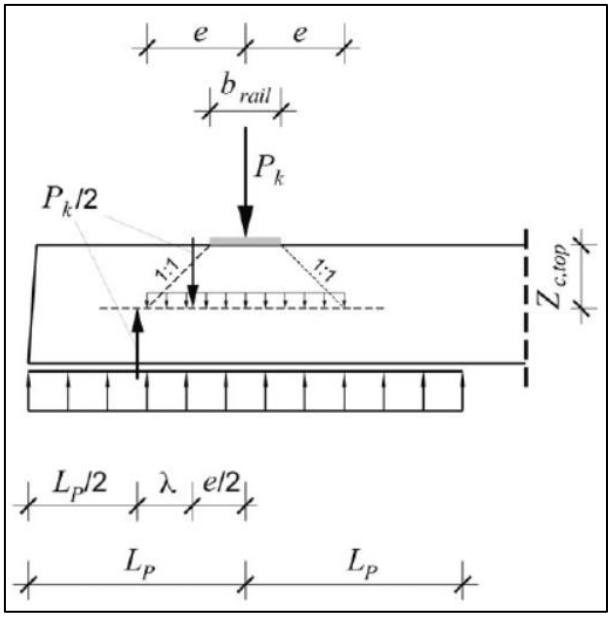
Yüksek zayıflıktaki pedler için (> % 30) $k_p = 0,78$

3.4.5. Karakteristik eğilme momenti

Karakteristik eğilme momentlerinin hesaplanmasında balast reaksiyonlarının düzensiz dağılımından dolayı traversin elastisitesi dikkate alınmalıdır.

Ray yatağı kesiti

Pozitif eğilme momenti $M_{k,r,pos}$, $2L_p$ uzunluğu boyunca sabit bir yatak modülü ile elastik temel üzerinde kullanılacak bir traversle P_k den hesaplanır. Balastta ki düzensiz reaksiyonlar için $k_{i,r}$ hesaplanmalıdır. Aşağıda gösterilen şekle göre traverste gerçekleşen bir yük dağılımı ve $2L_p$ v boyunca sabit bir balast reaksiyonunun gerçekleştiği varsayılmaktadır. Düzensiz balast reaksiyonu $k_{i,r}$ faktörü ile telafi edilmektedir.



Şekil 3.7. Travers üzerinde gerçekleşen yük dağılımı

- Demir yolunun altında gerçekleşen yük dağılımı

$$2e = b_{rail} + \left(2 \text{ x } Z_{c,top}\right) \tag{3.13}$$

b_{rail} : ray taban genişliği

$Z_{c,top}$: travers üstünden itibaren atalet eksenine olan mesafe

- Balasttaki basıncın toplam uzunluğu L_p;

$$L_p = \frac{L - c}{2} \tag{3.14}$$

c: raylar arası merkez uzunluğu

L: Travers uzunluğu

- $\frac{P_k}{2}$ kuvvetinin sonucu olarak her bir rayda ortaya çıkan λ;

$$\lambda = \frac{L_p - e}{2} \tag{3.15}$$

- Eğilme momenti $M_{k,r,pos}$;

$$M_{k,r,pos} = k_{i,r} \; x \, \lambda \, x \frac{P_k}{2} \tag{3.16}$$

Tavsiye 1: Travers tasarımı yapılırken $0{,}35 \leq L_p \leq 0{,}55$ ise $k_{i,r} = 1{,}6$ alınır. Bu değer ölçümler sonucu elde edilmiştir.

Tavsiye 2: Travers uzunluğu 2,5 ~ 2,6 m için yapılan tasarımlarda ray yatağı için negatif eğilme momenti olarak $M_{k,r,pos}$ değerinin %50' si alınabilir.

3.4.6. Travers merkez kesiti negatif eğilme momenti

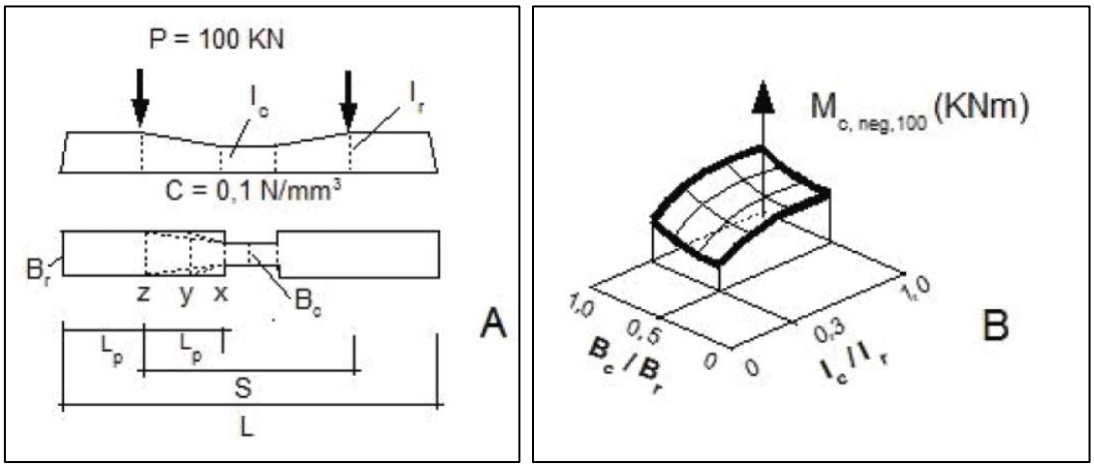
Negatif eğilme momenti $M_{k,neg}$, merkez kesiti için traversin tüm uzunluğu boyunca sabit yatak modülü ile elastik temel üzerindeki kiriş mantığından P_k ile hesaplanır. Düzensiz balast reaksiyonu $k_{i,c}$ faktörü ile telafi edilmektedir.

i) Standart ölçülerdeki traverslerde

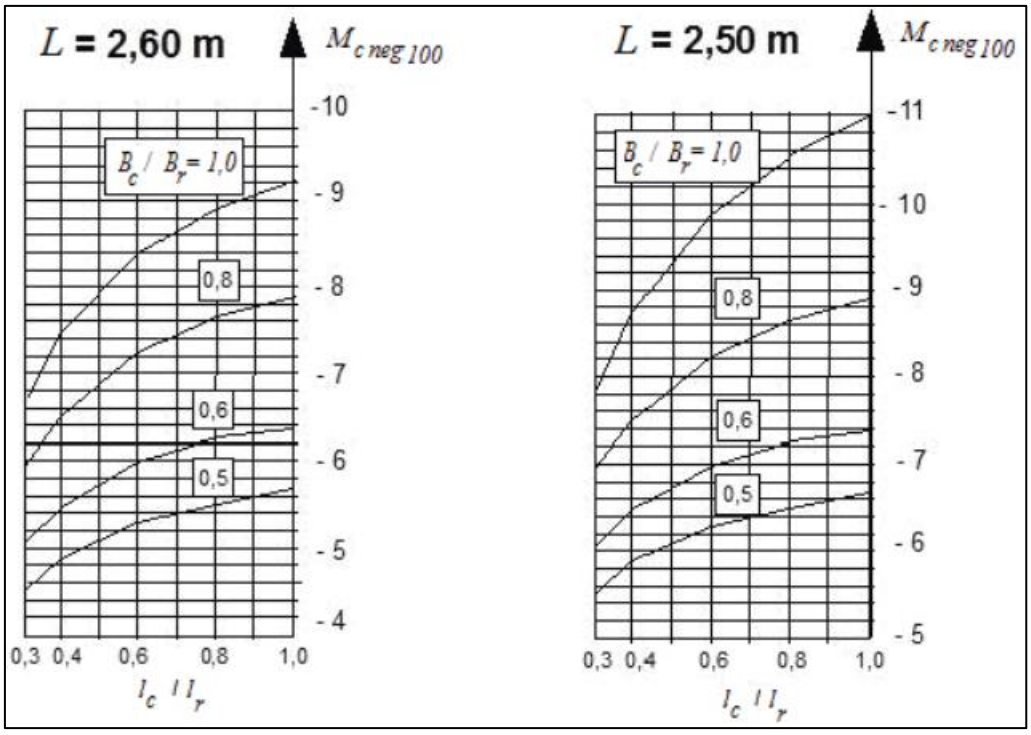
Değişken travers ölçüleri için negatif eğilme momenti şu şekilde hesaplanır;

$$M_{k,c,\,neg} = k_{i,c}\; x\, P_k\; x \frac{M_{c,\,neg,100}}{100} \qquad (3.17)$$

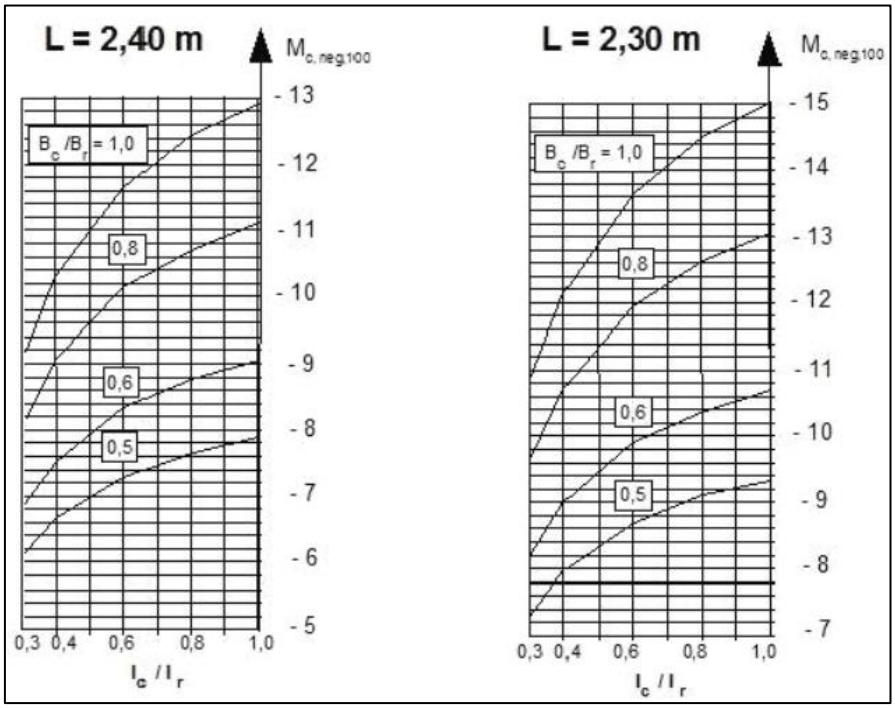
$M_{k,c,\,neg,100}$ değeri aşağıdaki tablolar yardımı ile bulunabilir.



Şekil 3.8. Standart ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması_1

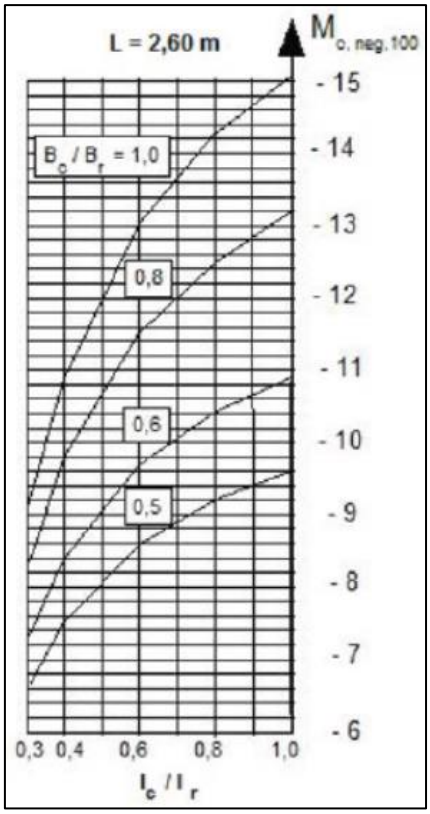


Şekil 3.9. Standart ölçülü travers için $M_{c,neg,100}$ değerinin bulunması _2



Şekil 3.10. Standart ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması _3

ii) Geniş ölçülerdeki traverslerde



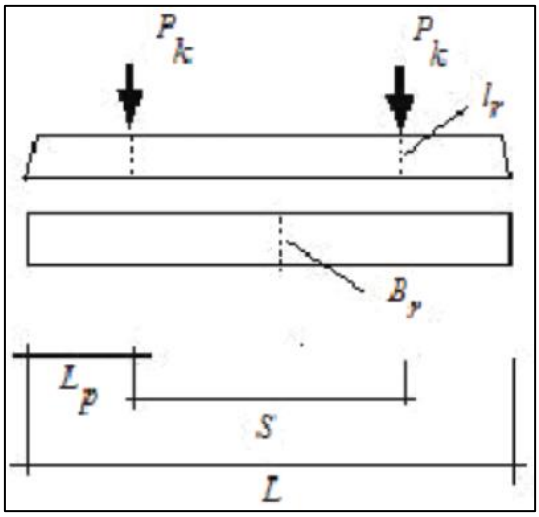
Şekil 3.11. Geniş ölçülü travers için $M_{c,\,neg,100}$ değerinin bulunması

iii) Dar ölçülerdeki traverslerde

Şekil 3.12. 'ye göre ölçüleri ≥ 1 m olan traversler için negatif eğilme momenti $M_{c,\,neg}$, aşağıda verilen şekle göre sabit bir yatak yükü uygulayarak basitleştirilmiş bir şekilde belirlenebilir.

$$M_{c,\,neg} = -P_k \; x\left(\frac{2S-L}{4}\right) \tag{3.18}$$

$$M_{k,c,\,neg} = k_{i,c} \; x M_{k,c,neg} \tag{3.19}$$



Şekil 3.12. Dar ölçülü travers geometrisi

Dar ölçülü traversler için sabit bir alt taban genişliği B_r ve uygulamada ki sabit travers atalet momenti $I_r = 70 \times 10^6\ mm^4$ varsayılmıştır.

iv) Travers tasarımında kullanılacak $k_{i,c}$ değerleri

Standart travers tasarımında kullanılacak $k_{i,c}$ faktörü rayın boyuna ve enine yönünde sabit bir $C_2 = 0{,}1\ N/mm^3$ yatak modülü için kullanılır.

Çizelge 3.6. Travers ölçülerine göre $k_{i,c}$ değerleri

Ülke	Dar ölçülü traversler		Standart ölçülü traverler		Geniş ölçülü traversler	
	Uzunluk	$k_{i,c}$	Uzunluk	$k_{i,c}$	Uzunluk	$k_{i,c}$
Avusturya			2,6	2,1 – 2,4		
Belçika			2,5	1,1 – 2,2		
Fransa			2,26	0,9		
			2,4	1		
			2,5	1,1		
Almanya			2,6	2		
			2,4	1,5		
Hollanda			2,5	1,13		
Portekiz			2,6	1,6	2,6	1
İspanya			2,6	1,6	2,6	1
İsviçre	2	1,6	2,6	1,4		
Birleşik Krallık			2,5	0,5 – 0,8		

Bu tablo bir dizi deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiş ve bu değerlerle tasarlanan traversler demir yolunda olumlu performans göstermektedir.

3.4.7. Travers merkez kesiti pozitif eğilme momenti

Formül (3.20.) pozitif eğilme momenti travers uzunluğu 2,20 ≤ L ≤ 2,60 m değerlerinde ki standart ölçüde ki traversleri kapsar.

$$M_{k,c,pos} = 0,7\, x\, M_{k,c,neg} \quad (3.20)$$

Formül (3.21.) pozitif eğilme momenti travers uzunluğu 1,30 ≤ L ≤ 2,00 m değerlerinde ki dar ölçüde ki traversleri kapsar.

$$M_{k,c,pos} = 1,0x\ M_{k,c,neg} \quad (3.21)$$

Travers tasarımı için yararlanılan kaynak [30].

3.4.8. Travers eğilme momenti testleri

a) Eğilme momenti ilk çatlak testi

Eğilme momenti M_t, ilk çatlak başlangıcı traversin test anındaki yaşına bağlıdır. Ayrıca ön germe kuvvetinde zamana bağlı kayıplar ve beton çekme dayanımının statik yük ve yorulmaya bağlı oluşan yükler altında eğilme momenti M_k, k_t ile çarpılmasıyla artırılır.

28 günlük bir travers için pozitif eğilme momenti $M_{t,r,pos}$;

$$M_{t,r,pos} = M_{k,r,pos} + \left[\left(f_{ct,fl,t=28gün} - f_{ct,fl,fat}\right) + \left(\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40yıl} - \Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28gün}\right)\right] x W \quad \text{(kN.m)} \quad (3.22)$$

$$M_{t,r,pos} = k_t\, x\, M_{k,r,pos} \quad (3.23)$$

$f_{ct,fl,t=28gün}$ 28 günlük travers betonunun yük altında eğilme çekme dayanımı

$f_{ct,fl,fat}$ Yorulmalardan sonra beton dayanımı

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=40yıl}$ 40 yıl sonra traversteki ön germe kayıpları

$\Delta\sigma_{c,c+s+r,t=28gün}$ 28 günlük traverste ön germe kayıpları

W Kesit atalet momenti

Tavsiyeler:

1) C50/60 betonu için çekme gerilmesi $f_{ct,fl,t=28gün}$ = 5,5 N/mm^2 olarak alınabilir.

2) C50/60 betonu için yorulmaya bağlı olarak çekme gerilmesi $f_{ct,fl,fat}$ = 3,0 N/mm^2 olarak alınabilir.

3) Büzülme, sünme ve gevşeme nedeniyle zamana bağlı ön gerilme kayıpları EN 1992 göre hesaplanabilir. EN 10138 gereğince ön germe çeliği için 40 yılın sonunda toplam kayıp ilk ön gerilme kaybının %25' i olarak alınabilir.

4) k_t faktörü, üretim sürecine ve çevresel koşullara bağlı olarak kesit geometrisine, ön gerilme seviyelerine ve eğilme direncine göre hesaplanmalıdır. 28 günlük travers için $k_t = 1{,}1 \sim 1{,}8$ arasında alınabilir.

5) Ön gerilme kayıplarının yaklaşık üçte biri ilk 28 gün içerisinde meydana gelir.

b) Olağan dışı yükler

Olağan dışı yükler, karakteristik tekerlek yüklerinden farklı olarak tekerlek yüklerinden veya çok kötü alt yapı şartlarından dolayı meydana gelebilir. Bu yükler travers üzerinde çatlak oluşumuna neden olabilir. Oluşan çatlaklar yükün kalkmasından sonra ön gerime kuvvetinin etkisiyle kapanır. Yükün kaldırılmasından sonra 0,05 mm' nin altında kalan çatlaklar ise korozyona karşı korunur.

Olağan dışı yüklere örnek olarak; aşırı yükle yüklenen yük vagonları, travers altında ki büyük boşluklar, 2 mm derinliğe kadar olan tekerleklerde ki kısmi düzleşmelerde traverse olması gerekenden daha fazla yük gelir. Tekerlekteki düzleşmeler, trenin ani freni ile tekerleğin belli bölgesi dairesel geometriyi kaybedip düzleşir bu durum tekerleğin her bir dönüşü tamamlamasında raya ve traverse dizayn yükünün haricinde bir yük getirir. Olağan dışı yüklerin etkilerini travers tasarımında dikkate almak için formül 10.22 ve 10.23' teki kat sayıları kullanmak gerekir.

$$k_{1s} = 1,8 \, x \, \frac{0,5}{k_d} \tag{3.24}$$

$$k_{1d} = 1,5 \, x \, \frac{0,5}{k_d} \tag{3.25}$$

c) Kaza yükleri

Kaza sonucu demir yolu araçlarının raydan çıkması ve doğrudan traversin üzerine düşmesi, betonda ki hatalardan dolayı çatlamalar veya kırılmalar gibi normal demir yolu işleyişi haricinde meydana gelen olaylar kaza yüklerini oluşturur. Olağan dışı yüklerde de belirtildiği gibi hareket halinde ki bir demir yolu aracı seyir halindeyken aracın ani fren yapmasıyla birlikte tekerleklerde görülen düzleşmelerin fark edilemeyip trenin yoluna devam etmesiyle raya ve oradan da traverse vuruntu yapar. Bu durumda aslında travers için kaza yükü olarak değerlendirilebilir. Kaza yüklerini karşılayabilmek için formül 10.24 ve 10.25' teki kat sayıları kullanmak gerekir.

$$k_{2s} = 2,5 \, x \, \frac{0,5}{k_d} \tag{3.26}$$

$$k_{2d} = 2,2 \, x \, \frac{0,5}{k_d} \tag{3.27}$$

d) Yorulmadan dolayı oluşan yükler

Ön germe çeliğinin servis yükleri altında betonundaki çatlama ve kırılmalar ile birlikte yorulmasını tasarıma katmak için formül 10.26' teki kat sayıyı kullanmak gerekir.

$$k_3 = 2,5 \, x \, \frac{0,5}{k_d} \tag{3.28}$$

3.4.9. Servis sınır durumu için ön germeli traverslerde gerilmelerin kontrolü

Traversler en az 40 yıllık servis ömrüne göre tasarlanır. Travers taşıma kapasitesi, statik yüklere ilave olarak dinamik yükleri ve düzensiz balast reaksiyonu dikkate alınarak M_k eğilme momenti hesaplanır. Bu yük seviyelerinde traverste herhangi bir çatlak meydana gelmez. Travers servis ömrü boyunca eğilme momenti Mk ve ön gerilmelerin etkileri nedeniyle betonda maksimum çekme gerilmesi $\sigma_{ct,max}$, tekrarlanan yükler altında betonun yorulma mukavemeti $f_{ct,fl,fat}$, kuvvetini aşmayacaktır.

$$\sigma_{ct,\max} = \frac{N_{p(t=40\,yıl)}}{A} + \frac{N_{p(t=40\,yıl)}\ x\, e_p}{W} + \frac{M_k}{W} \langle f_{ct,\,fl,\,fat} \qquad (N/mm^2) \tag{3.29}$$

$N_{p(t=40\,yıl)}$: 40 yıl sonra travers üzerinde ki ön germe kuvveti

A : Travers kesit alanı (mm^2)

e_p : Ön germe kuvvetinde dış merkezlik (mm)

W : Atalet momenti (mm^3)

M_k : Servis yüklerine bağlı olarak eğilme momentleri (N.m)

Tavsiye-1;

Büzülme, sünme gibi nedenlerle zamana bağlı ön gerilme kayıpları EN 1992' ye göre hesaplanabilir. EN 10138' e göre ön gerilme çeliği kullanılırsa toplam kayıp ilk ön germe kuvvetinin %25' i kadar olduğu varsayılabilir.

Tavsiye-2;

Beton yorulma yükleri altında eğilme dayanımı C50/60 beton için $f_{ct,fl,fat} = 3{,}0\ N/mm^2$ olarak alınabilir.

3.5. Dever

Demir yolu araçları kurplarda ilerlerken dairesel hareketin neticesinde merkezkaç kuvvetinin etkisinde kalırlar. Merkezkaç kuvvet araçları kurbun dışına doğru itmeye çalışan bir etki gösterir. Buna bağlı olarak kurbun dış tarafında olan raya tekerlek tarafından daha fazla bir basınç uygulanır. Bu basınç belirli bir değeri geçtiği zaman demir yolu araçları savrularak

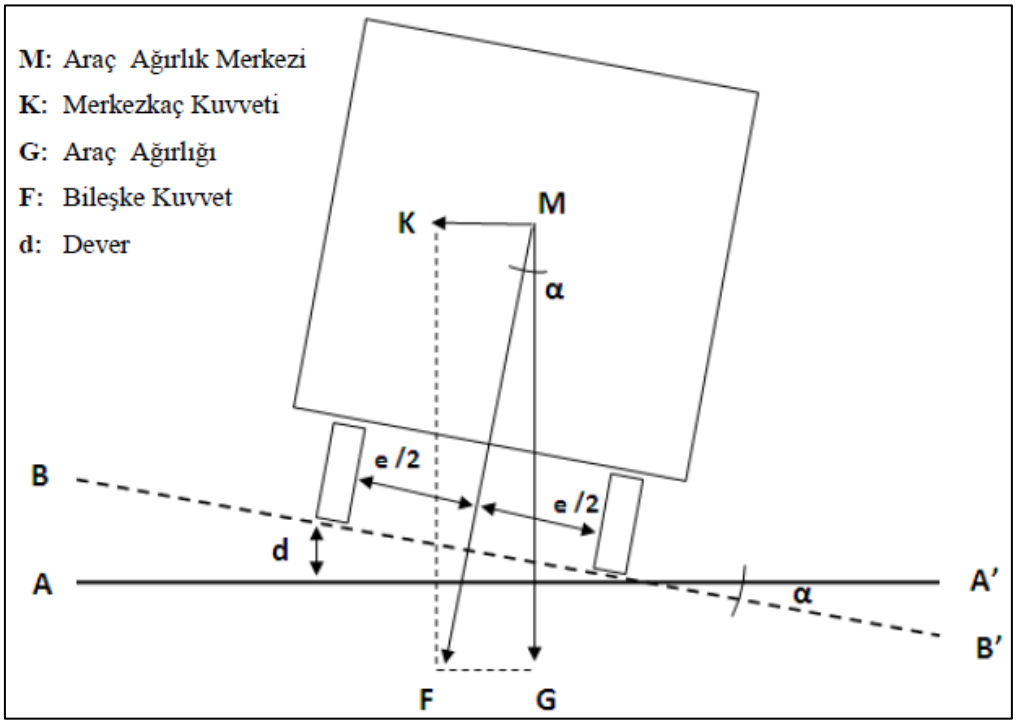
hattın dışına çıkar. Merkezkaç kuvvetin etkilerini yok etmek amacıyla zemine paralel olan yuvarlanma yüzeyi yerine kurbun dış rayına doğru yükselen eğik bir yüzey oluşturulur. Bunun sonucunda vagonları kurp içine doğru devirmeye çalışan bir kuvvet elde edilir. Bu kuvvete merkezcil kuvvet denir. Merkezkaç kuvvetinin etkisi dış rayın daha yüksekte olmasını sağlayan bir eğik yüzey sayesinde merkezcil kuvvet ile sönümlenmiş olur.

Dış rayın iç raydan daha yüksek olduğu bu yükseklik farkına dever adı verilir. Dever hız ile doğru, kurp yarıçapı ile ters orantılıdır. Hız arttıkça dever artar, yarıçap büyüdükçe dever küçülür.

Merkezkaç kuvvetinin yok edilebilmesi için;

“F” bileşkesinin yuvarlanma yüzeyi (B–B’) ile yaptığı açı dik olmalıdır.

“F” bileşkesi ile yol ekseni, yuvarlanma yüzeyinde kesişmelidir.



Şekil 3.13. Demir yolunda dever kuvveti bileşenleri

3.5.1. Dever formülünün oluşturulması

$K\,x\cos\alpha = G\,x\sin\alpha$ Eşitliği sağlandığı zaman merkezkaç kuvvetinin etkisi yok olur.

$$K = \left(\frac{G}{Q}\right) x \left(\frac{V^2}{12,96\,x\,R}\right), \tag{3.30}$$

Formülde araç hızı birimi m/sn'dir. (km/s), (m/sn)'nin 3,6 katı olduğundan, araç hızı birimini (m/sn) yerine (km/s) olarak alabilmek için merkezkaç kuvveti formülü;

$$K = \left(\frac{G}{Q}\right) x \left(\frac{V^2}{12,96\,x\,R}\right) \text{ olur.} \tag{3.31}$$

cos α= yaklaşık "1" ve sin α= d / e (dever / ekartman) dır.

$$\frac{G\,x\,V^2}{Q\;x12,96\,x\,R}\,x\cos\alpha = G\,x\sin\alpha \tag{3.32}$$

$$\frac{G\,x\,V^2}{Q\;x12,96\,x\,R} = G\,x\,\frac{d}{e} \tag{3.33}$$

$$d = \frac{G\,x\,V^2\;xe}{Q\;x12,96\,x\,R\,xG} \tag{3.34}$$

$$d = \frac{V^2\;xe}{Q\;x12,96\,x\,R} \tag{3.35}$$

Ekartman = 1500 mm ve Q = 9,81 m/sn^2 olarak yerine konulduğunda;

$$d = \frac{V^2\left(\frac{m^2}{sn^2}\right)x1500\,(mm)}{9,81\left(\frac{m^2}{sn^2}\right)x12,96\,x\,R\,(m)} \tag{3.36}$$

$$d\;(mm) = \frac{11,8\,xV^2}{R} \tag{3.37}$$

3.5.2. Teorik dever

Demir yolu araçlarının yol tasarım hızlarını aşmayan hızlarda çalışması durumunda aracı dışa doğru itmeye çalışan merkezkaç kuvveti ile onu raylarda tutmaya çalışan merkezcil kuvvetin bileşkesinin "0" olduğu dever miktarıdır.

Ancak, çeşitli sebeplerden dolayı pratikte tüm trenlerin dever hesabında esas alınan hızla çalışması mümkün değildir. Özellikle büyük eğimler sebebiyle trenlerin düşük süratle

çalışmak zorunda kaldığı yollarda, merkezcil kuvvetlerde artış ve buna bağlı olarak ta kurbun iç raylarında normalden fazla aşınma gibi sakıncalar doğar. Dever hesabında dikkate alınan hızdan daha yavaş seyreden demir yolu araçlarının oluşturacağı merkezcil kuvvetlerin zararlı etkilerinden yolu korumak için, teorik dever yolda uygulanmaz.

Teorik dever aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$d = \frac{11,8\,x{V_{\max}}^2}{R} \tag{3.38}$$

3.5.3. Normal dever (uygulama deveri)

Teorik deverin uygulanmasındaki sakıncalar nedeniyle Demir yolu İşletmeleri, raylardaki aşınmayı asgariye indiren ve değişik hızlarda çalışan demir yolu araçlarının emniyetle seyirlerini temin eden dever formüllerini kullanıp tatbik etmektedir. Uygulama deveri belirlenirken, düşük hızla çalışan demir yolu araçlarının sebep olduğu merkezcil kuvvetlerin ve devere esas azami hızla çalışan demir yolu araçlarının sebep olduğu merkezkaç kuvvetlerinin yola dengeli bir şekilde tesir etmesine özen gösterilir. TCDD' de normal dever hesaplamasında teorik deverin yaklaşık 2 / 3'ü alınmış ve aşağıdaki dever formülü ortaya çıkmıştır.

$$d = \frac{8\,xV^2}{R} \tag{3.39}$$

3.5.4. Minimum dever

Normal deverin verilmesi mümkün olmayan hallerde demir yolu araçlarının emniyet içinde seyredebilmeleri için verilmesi gereken en az dever miktarıdır. Minimum deverden daha az dever verilmesi durumunda yola etki eden merkezkaç kuvvetleri kabul edilen sınır değerini aşar ve demir yolu araçlarının trafik emniyeti tehlikeye düşer. Bu nedenle yolda uygulanacak dever miktarı hiçbir zaman minimum deverden daha az olamaz. Minimum dever hesaplanırken, daha önceden belirlenen kriterlere göre teorik deverden bir miktar indirim yapılır.

TCDD İşletmesinde bu indirim; [(e/Q) x y)] = 100 mm olarak belirlenmiştir.

e = Ekartman (mm)

Q= Yer çekimi ivmesi (m/sn^2)

y = Maksimum yanal ivme (Fransa'da= 1, Almanya'da= 0,6 ve TCDD İşletmesinde = 0,65 olarak kabul edilmektedir.)

$$d_{\min} = \frac{11,8\,x V^2}{R} - 100 \qquad (3.40)$$

3.5.5. Maksimum dever

Demir yolu araçları kurplarda yavaşlamak ya da durmak zorunda kaldığında, merkezcil ivmenin yola belirlenen sınır değerden daha fazla etki etmemesi ve yandan esen rüzgârlar gibi dış etkenlerin araçları devirememesi için dever miktarının belirlenen bir değeri aşmaması benimsenmiştir. Bu miktar ülkelere göre farklılıklar göstermekte ve 120 ile 180 mm. arasında değişmektedir.

TCDD hatlarında dever uygulamasında sınır değer olarak 130 mm. kabul edilmiş olup bu değere maksimum dever adı verilir. Yolda uygulanacak dever miktarı hiçbir zaman maksimum deverden daha fazla olamaz.

4. DENEYİN AMAÇ VE METEDOLOJİSİ

4.1. Deneyin Amacı

Bu deney her geçen gün gerek yolcu gerek yük taşımacılığında talebin arttığı ve ağların genişlediği demir yollarının ana unsurları olan travers ve balast ilişkisini, yük altındaki davranışlarını, travers altında balast eksilmesi durumunda oluşan yatay ve düşey yer değiştirmelerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Demir yoluna hasar veren doğa olaylarının başında gelen sel ile ilgili aşağıda gösterilen fotoğraflar balastı traversin altında tutmanın demir yollarında önemli bir konu olduğunu açıkça göstermektedir.



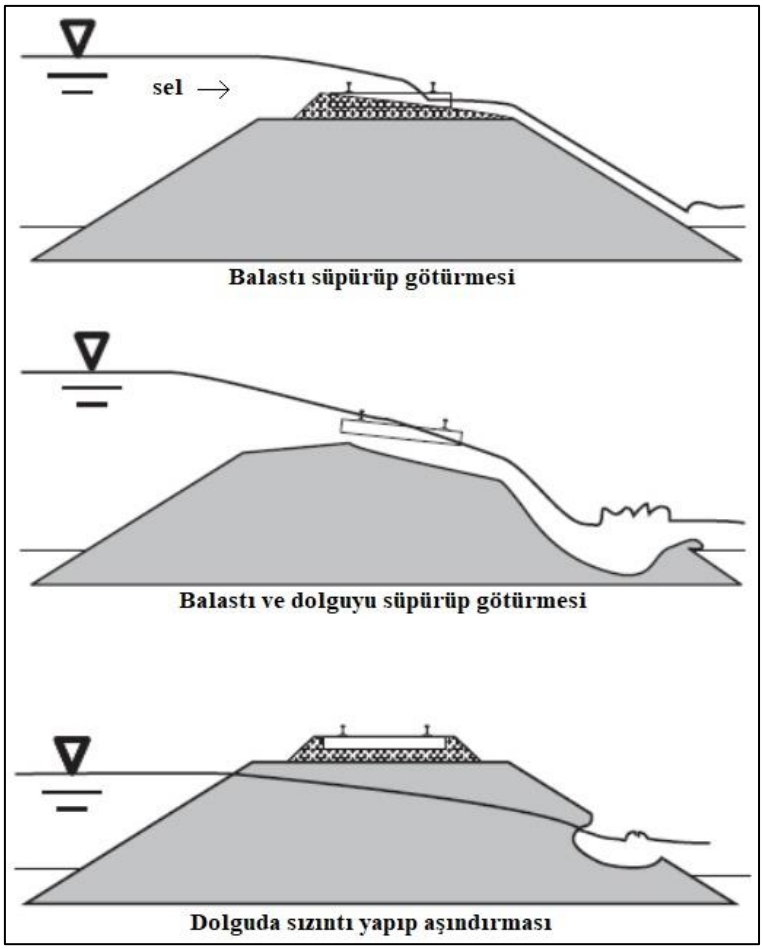
Resim 4.1. Demiryolunda sel suları ile birlikte balastın boşalması-1



Resim 4.2. Demiryolunda sel suları ile birlikte balastın boşalması-2

Şekil 4.1.'de sel sularının demiryoluna verdiği zararların farklı tipleri gösterilmeye çalışılmıştır. Bu üç gösterim arasında sel sularının balastı süpürüp götürmesi bizim deneyde üzerinde durmaya çalıştığımız demir yolu hasar tipidir. Özellikle ova tarzı düz ve geniş arazilerde bu tarz balast göçmesi, travers altı balast boşalması sıkça görülmektedir. Maalesef hareket halindeki demir yolu aracı boşalan veya çöken balasttan dolayı çoğu zaman raydan çıkmaktadır.

Demiryolu yüklerinin dinamik etkileri açısından başarılı bir performans sergilese de doğa koşullarına karşı savunmasız kalan balastın farklı yağış rejimlerinde uğrayacağı erozyon şekil 4.1. açıkça gösterilmektedir.

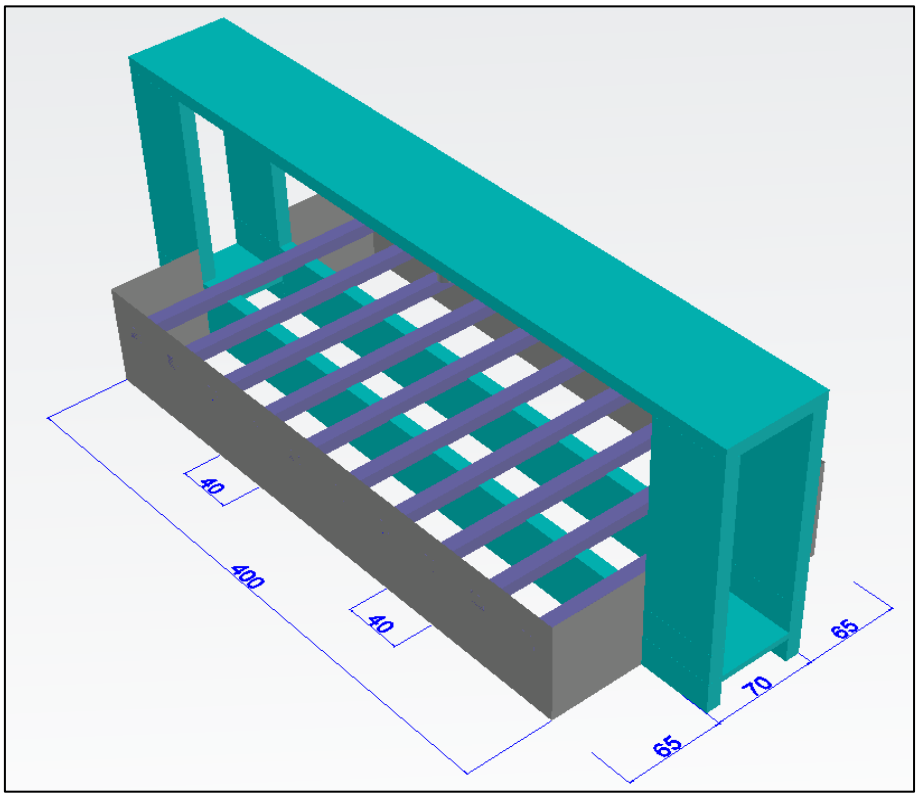


Şekil 4.1. Selin demir yolunda meydana getirdiği zararlar

Bir adet beton traversin demir yolundaki doğal koşulları laboratuvar ortamında oluşturulmaya çalışılmış ve balast altındaki subbalast tabakasını demir yollarında ki kalınlığı olan 30 cm den farklı olarak subbalast tabakası azaltılıp geocell ve geogrid kullanılmıştır. İlk deneyde 3,5 cm kum + geogrid + 3,5 cm kum ve üzerine 30 cm balast tabakası ile traversin alt yapısı oluşturulmuştur. İkinci deneyde ise 7 cm kumdan subbalast ve üzerine içi balast ile doldurulmuş geocelli balast tabaka ile traversin alt yapısı oluşturulmuştur. İlk deneyde balasttan aktarılan yükleri daha geniş bir ortama yayması için geogrid kullanılması araştırılmak istenmiştir. İkinci deneyde geocell sayesinde balastları bir arada tutarak yük altında hareketlerinin kısıtlanmasıyla taşıyacağı yük ve yapacağı hareketler araştırılmak istenmiştir. Her iki deneyde de travers altındaki balast kademe kademe eksiltilerek her kademe için verilen yük ile birlikte deney başlangıcından itibaren çekilen fotoğrafların matlab programı ile her bir yükleme değerine karşılık gelen fotoğrafların analizi yapılıp traversteki stabilite ve statik değişimler gözlenmiştir.

4.2. Deneyin Metodolojisi

Deney düzeneği, bir traversin demir yolundaki doğal şartları göz önünde bulundurularak laboratuvar ortamında modellenmeye çalışılmıştır. Resim 4.3.'te laboratuvar ortamında hazırlanacak deney düzeneği laboratuvarda hazır bulunan tek noktalı yük yükleme çerçevesinin traversin ve travers altında kalan balast yatağının boyutlarının traversin doğal koşullarına uygunluğu teyit edildikten sonra taslak niteliğinde bir çizim oluşturulmuştur.

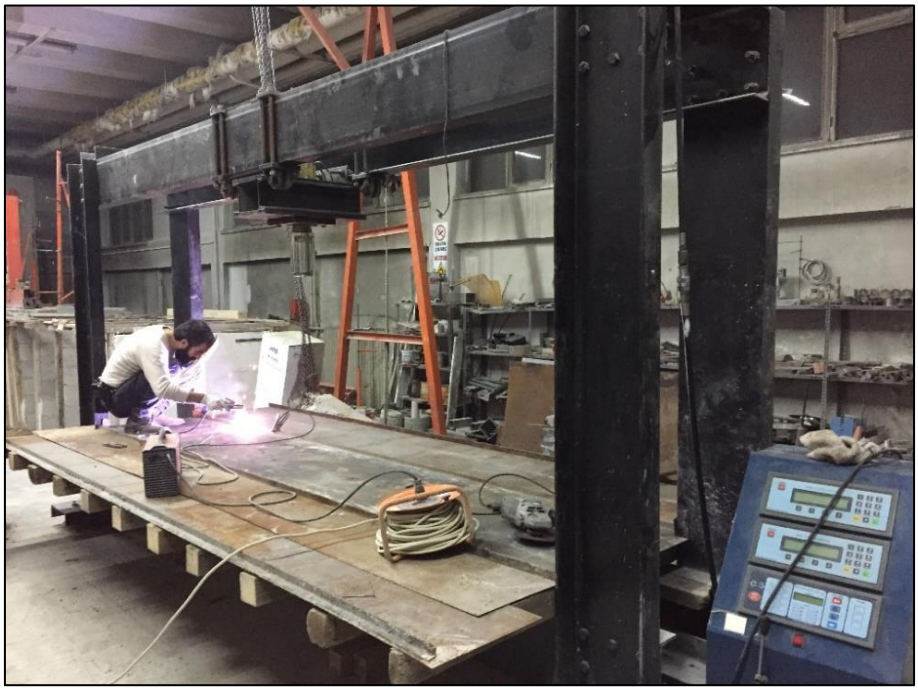


Resim 4.3. Deney düzeneği boyutları

Ardışık iki travers arası net mesafe 60 cm olduğundan deney yapılacak traversin kendi taban genişliği Şekil 3.4.'te de görüldüğü gibi 30 cm'dir. Deney traversinin kendi taban genişliği ve komşularına olan uzaklıkları toplamı 150 cm'dir. Oluşturulacak deney düzeneği minimum 150 cm olacağı göz önünde bulundurularak geogrid ve geocell deneyleri için rahat çalışma alanı olarak deney düzeneğinin genişliği 200 cm olarak düşünülmüş ve 200 cm uzunluğunda 10cm x 10 cm boyutlarında ki ahşaplardan 30 cm net aralıklarla Resim 4.4 'te görülen platform altı oluşturulmuştur. Bu ahşaplar üzerine Resim 4.5.'te de görülen metal saç levhalar döşenmiştir. Bu levhalar ve ahşaplar sayesinde rijit bir zeminden daha çok elastik bir zemin oluşturulmaya çalışılmıştır.

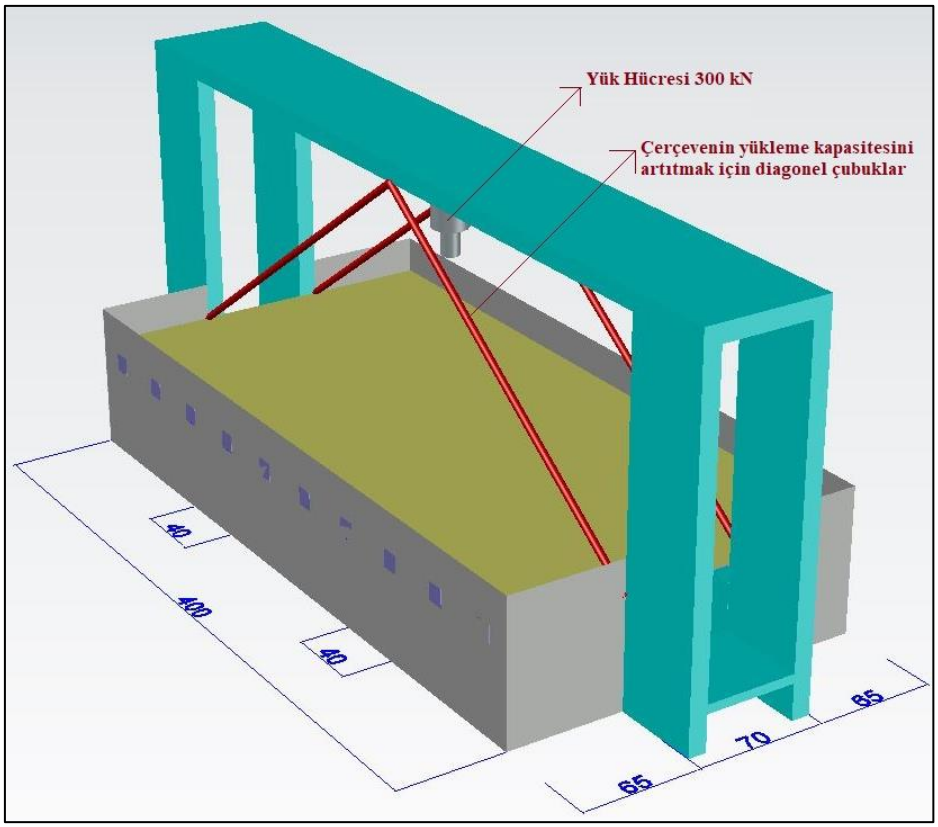


Resim 4.4. Deney düzeneği hazırlık aşamaları



Resim 4.5. Deney düzeneği hazırlık aşamaları_1

Resim 4.5.'te görülen platform oluşturulduktan daha sonra Resim 4.6. ve 4.7.de görüldüğü gibi düzeneğin yanları saç levhalarla kapatılarak balastın dökülmesi önlenmiştir.



Resim 4.6. Deney düzeneği hazırlık aşamaları-2



Resim 4.7. Deney düzeneği hazırlık aşamaları-3



Resim 4.8. Travers yüzeyinin deneye hazırlanması

B70 traversinin yüzeyini görüntüleme metoduyla analiz yapmak için önce kireç veya beyaz boya kullanarak temiz düzgün bir zemin hazırladık daha sonra düz beyaz zemin üzerine sprey boya ile rastgele siyah noktalar saçarak traversi deneye hazır hale getirdik. Rastgele saçarak oluşturduğumuz siyah noktalar her bir deney aşaması için çekilen fotoğraflarda bir referans fotoğrafa göre diğer fotoğraf üzerinde ki her bir noktanın referans fotoğrafındaki aynı noktalara göre değişimini analiz ederek deplasman ve birim şekil değiştirmeler ölçülecektir. Resim 4.8. de traversin bir kısmı üzerinde yukarıda bahsedilen işlemler yapılmıştır.

Laboratuvarda hazır bulunan yükleme çerçevesinin kapasitesini artırmak için Resim 4.9.'da görülen dört adet çelik çubuk yük hücresinin olduğu noktaya ve köşe noktalara bağlanmıştır. Yük hücresindeki yükü rayın bastığı noktalara aktarmak için NPI 180 profil kullanılmıştır.

Bu profil deney öncesi kontrollerde yük altında sehim yaptığı gözlenince gövdesinin her bir yüzüne sekiz milimetre kalınlıkta 11 adet levhayı kaynak yaparak ekleyip sehim yapması engellendi.



Resim 4.9. Tamamlanmış deney düzeneği

Traversin her iki ucundaki balast Resim 4.9.’ de görülen travers altı balastın doğal ortamında olduğu gibi 30 cm omuz genişliği oluşturulmuş ve devamında ki balast, subbalast tabakasına kadar şevli bir şekilde bitirilmiştir.

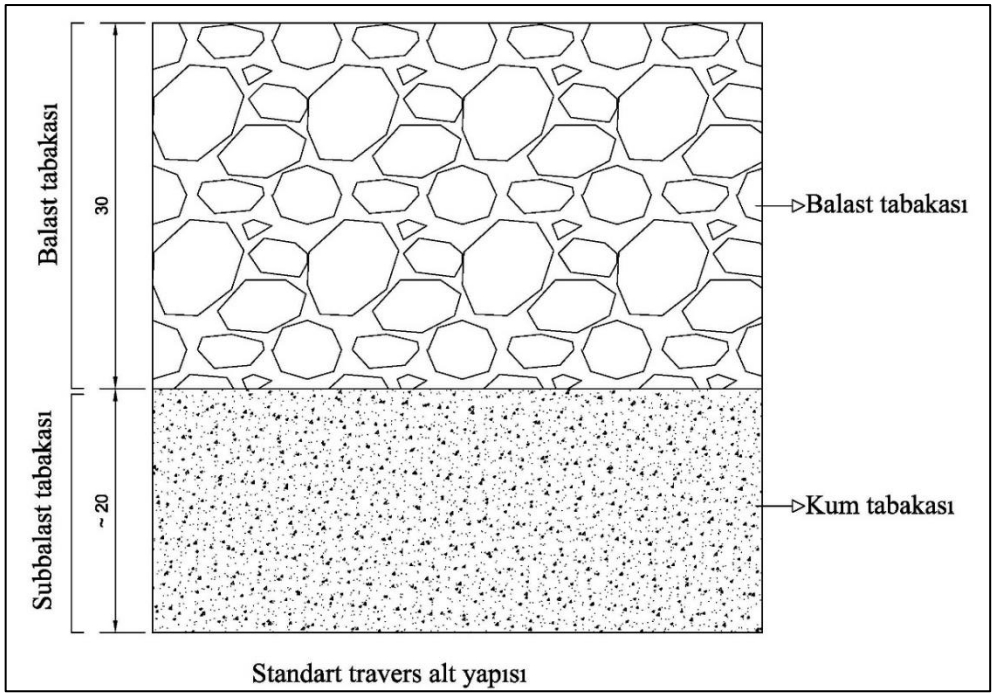
Deney düzeneğinin yapıldığı laboratuvar demirbaşı yükleme çerçevesinin kapasitesini artırmak için yükleme hücresinin olduğu noktadan çerçeve köşelerine montajlanacak şekilde dört adet çelik çubuk çerçeveye ilave edilerek kapasite artırılmıştır. Bu dört adet çubuk çerçeveye eklenmeseydi laboratuvarda yapılan eski deneylerden edinilen bilgilere göre en fazla 100 kN yük yüklenebilirdi. 100 kN yükten sonra çerçeve orta noktaları üste ve alta doğru açılıp daha fazla yükleme yapılamazdı.

Travers üzerine yük, yük hücresinden NPI 180 profili vasıtasıyla aktarıldı. Yük hücresinin çalışması ise hidrolik yük yükleme makinası ile yapılmıştır. Bu makine elektronik olup operatörün belirli hızlarla yükleme ve boşaltma yapmasına imkân veren ve Resim 4.5.’te de

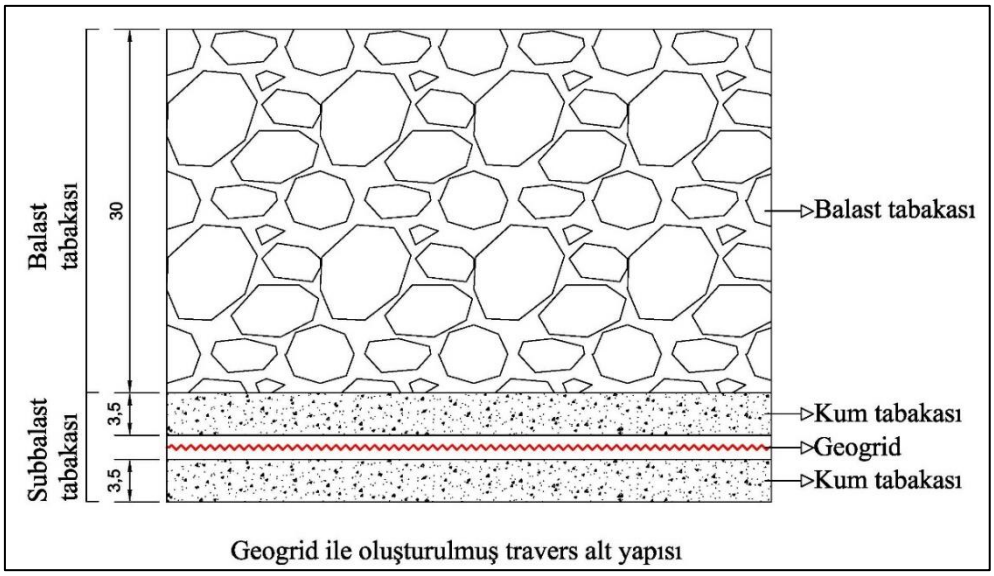
görülen elektrikle ile çalışan bir makinadır. Yük yüklemesi ve boşaltması dijital bir kontrol mekanizması içerisinde gerçekleştiğinden deneye ait grafiklerde belirli bir düzen oluşturulmuş ve tüm deney bu düzen çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Deney ortamında travers yüzeyinin aydınlatması iki adet birbirinin aynısı led lamba traversin sağ ve sol uçlarına, boyutu daha büyük bir adet led lamba ise yükleme çerçevesinin tam ortasına gelecek şekilde yük hücresinin hizasına yerleştirildi ve uygun diyaframla fotoğraf çekimi yapıldı. Fotoğraf çekimi Nikon D7000 dijital fotoğraf makinası ile Nikon DX AF S Nikkor 18 105mm 1 3.5 5.6g ED lensi kullanılmıştır. Fotoğraf çekim işlemi deney sırasında traverse yük yüklenmeye başlaması ile birlikte her beş saniyede bir fotoğraf çekecek şekilde deney sonuna kadar otomatik çekim gerçekleştirilmiştir. Yükleme çerçevesine 300 kN kapasiteli yük hücresi aracılığı ile hidrolik sistemli yük uygulanmıştır. Yük hücresinden bilgisayara data aktaran kablolardan Control And Data Acquisition yazılımı vasıtasıyla yüklerin bilgisayar ortamında kaydı alındı ve analiz yaparken bu yük verileri her beş saniyede çekilen fotoğraf ile zamansal olarak eşleştirilip deplasman ve birim deformasyon analizi yapılmıştır.

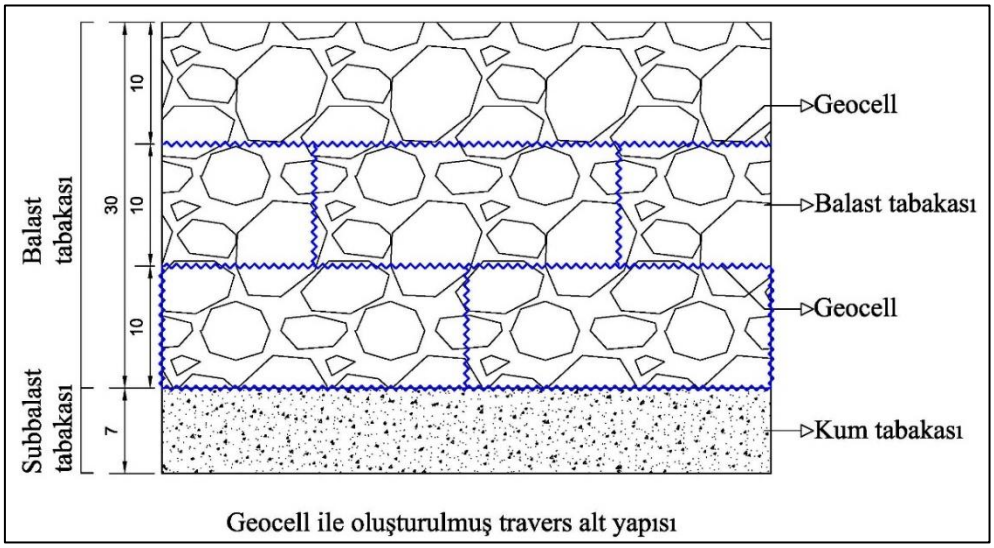
4.3. Travers Altı Balast Katmanları



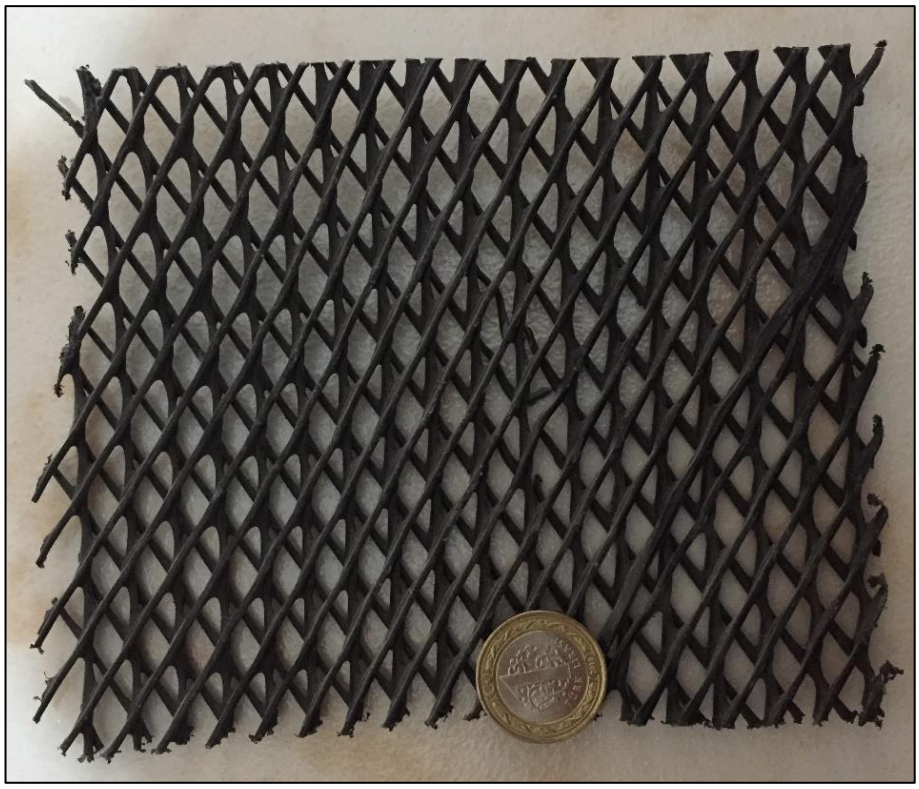
Şekil 4.2. Standart travers altyapısı



Şekil 4.3. Geogrid ile oluşturulmuş travers alt yapısı



Şekil 4.4. Geocell ile oluşturulmuş travers alt yapısı



Resim 4.10. Deneyde Kullanılan Geogrid

Şekil 4.3.’ te subbalast tabakası arasında kullanılan ve deneylerde geogridli aşamalarda kullanılan geogrid malzemesi Resim 4.10.’ da gösterilmektedir. Bu malzemenin grid göz aralığı yaklaşık 1 cm’ dir. Bu dar göz aralıkları balastın geogrid ile etkileşimini artıracağı ön görülmektedir.



Resim 4.11. Deneyde Kullanılan Geocell

Şekil 4.4.’ te balast tabakası içerisinde iki katman şeklinde şaşırtmalı bir şekilde kullanılan geocell Resim 4.11.’ de gösterilmektedir. Geocell malzemesi ilk olarak ABD ordusu tarafından 1975’ te tasarlanmış ve zeminin zayıf olduğu yollarda zemini güçlendirerek yol alt yapısına güçlü bir temel imkânı sağlayıp askeri araçlarının geçişine imkân vermesi amacıyla kullanılmıştır. O günden beri geocell kullanımı birçok alanda yaygınlaşmıştır. Bu alanlardan bazıları şunlardır; tarımda toprak erozyonunu önlemek, yollarda şevlerin kaymasını önlemek, zeminin yumuşak olduğu ve alt yapı için ideal olmadığı yerlerde binalarda temeli güçlendirmede kullanılmaktadır. . Geocell’ in ilk kullanımına da bakarak deneyde demir yolu alt yapısını güçlendirmek amacıyla geocell kullanımın deneye başlamadan önce henüz fikir aşamasında bile doğru bir tespit olduğunu göstermektedir.

5. DENEYLER VE SONUÇLARI

5.1. Geogrid ile Oluşturulan Deney Ortamı

Balast altında yer alan subbalast tabaka için 3,5 cm kum tabaka + geogrid +3,5 cm kum tabaka şeklinde bir subbalast tabaka oluşturulmuştur. Üzerine ise 30 cm yüksekliğinde 31,5 mm ile 63 mm dane çaplı balast taşlarından oluşan bir balast tabaka oluşturulmuştur. Travers altı ortam hazır edildikten sonra B70 tipi ön germeli beton travers balast tabakasının üzerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği tamamlanmıştır



Resim 5.1. Geogrid ile oluşturulmuş subbalast tabaka

Deney aşamaları, ilk olarak tam dolu havuzda balastın sıkışıp yerine oturması için ölçümler alınmadan yüklemeler yapılmış ve balast boşluğu alınarak gerçeğe en yakın balast yatağının oluşması sağlanmıştır. Daha sonra yedi aşamada traversin ortasında 25 cm mesafe kalana kadar travers altındaki balast kademe kademe boşaltılarak ölçümler alınmıştır. Birinci aşama tam dolu havuz, ikinci aşama travers omuz genişliği, üçüncü aşama travers ucundan 25 cm travers ortasına doğru, dördüncü aşama rayın traverse bağlandığı noktaya kadar balast boşaltılmıştır. Beşinci aşamada rayın traverse bağlandığı yerden 25 cm içe doğru bir önceki aşamadan itibaren 25 cm daha balast boşaltılmış. Altıncı aşamada rayın traverse bağlandığı yerden 37,5 cm içe doğru bir önceki aşamadan itibaren 12,5 cm daha boşaltılmış ve yedinci son aşama da rayın traverse bağlandığı noktadan 50 cm içe doğru bir önceki aşamadan itibaren 25 cm daha balast boşaltılmış ve ölçümler alınmıştır. Geogrid kullanımı sayesinde deney havuzunun kapama levhalarında herhangi bir zorlanma ve deformasyon meydana gelmemiştir. Özellikle rayın traverse bağlandığı yere kadar olan dördüncü aşama ve

sonrasında balastın boşaltma yapılan bölgeye doğru yük aldıkça az da olsa aktığı gözlemlenmiştir. Bu akma balastın kitlesel olarak tabandan travers altına kadar kayması şeklinde değil traversin hemen altında bulunan, traverse temas eden balastın tabana doğru dökülmesi şeklinde olmuştur. Bu da gösteriyor ki geogrid balasttan aldığı gerilmeyi gayet iyi karşılamakta ve daha geniş bir alana yaymaktadır.

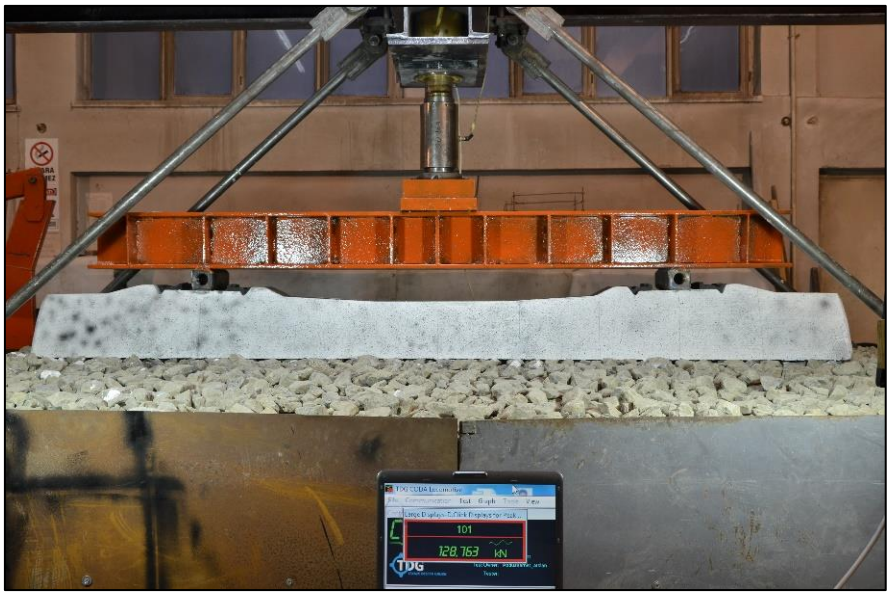


Resim 5.2. Analizde belirtilen B70 traversi üzerindeki P1, P2, P3, P4, P5 noktaları

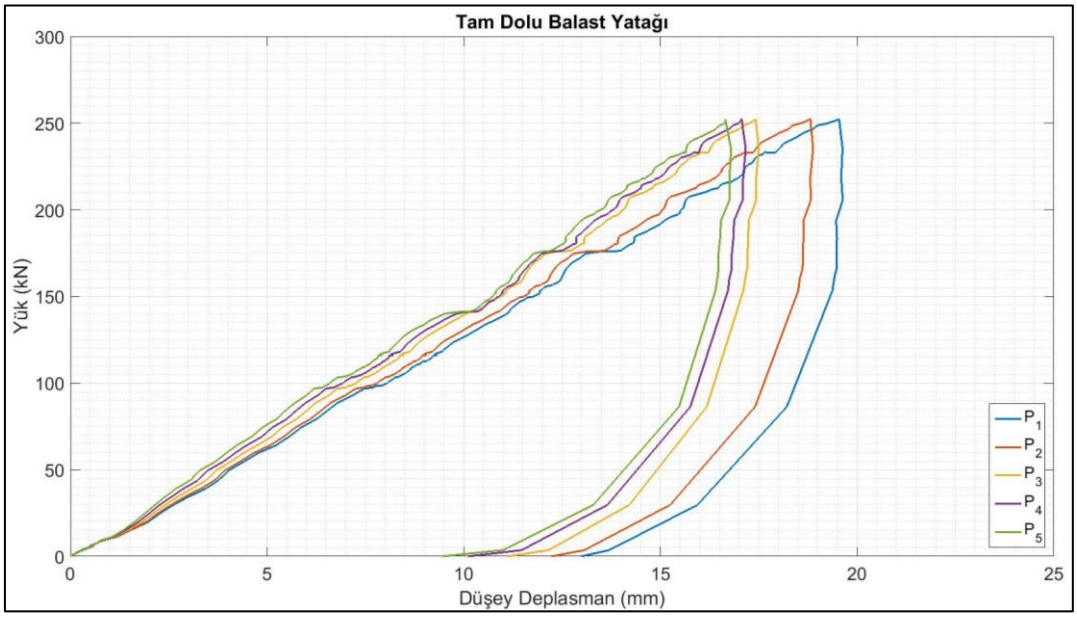
5.1.1. Geogrid ile deney aşamaları ve analiz sonuçları

a) Geogrid ile yapılan birinci aşama deney

Bu aşamada traversin doğal ortamı, altında 30 cm balast tabakası, 30 cm sağındaki ve solundaki omuz genişlikleri eksiksiz bir şekilde hazırlanmış ve 30 cm omuz genişliğinin bitiminde oluşturulan şevlere de dikkat edilmek suretiyle tam dolu balast yatağıyla deney yapılmıştır. Deneyde demir yollarında, trenden raylara aktarılan dingil yükü 225 kN aşılarak traverse iki noktadan toplam 250 kN yük verilmiştir. Yükler P2 ve P4 noktalarından traverse aktarılmaktadır.

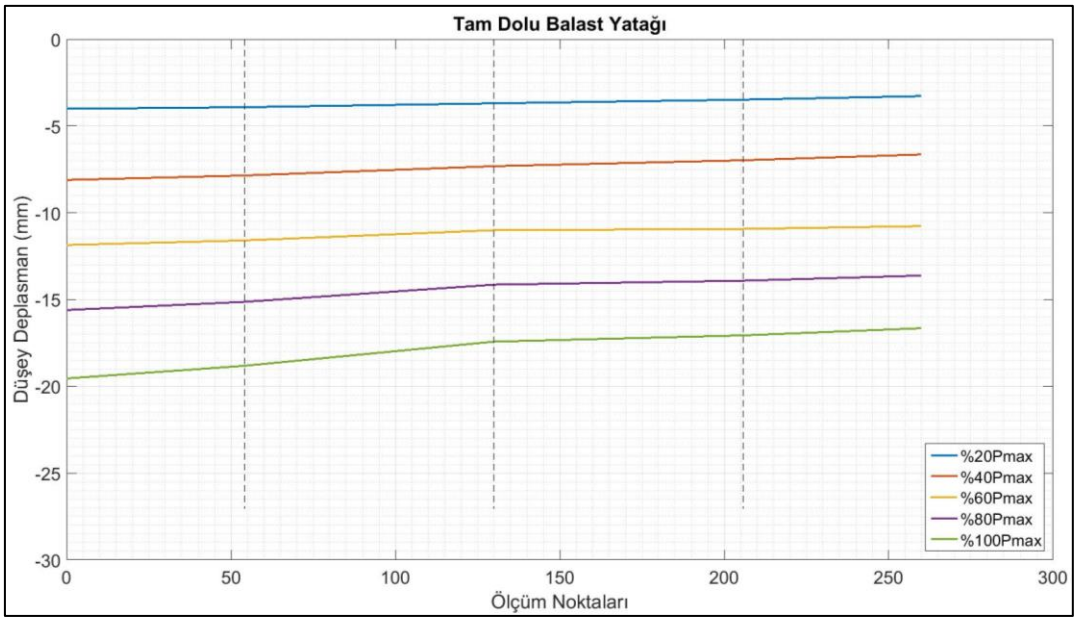


Resim 5.3. Geogrid ile birinci deney aşaması



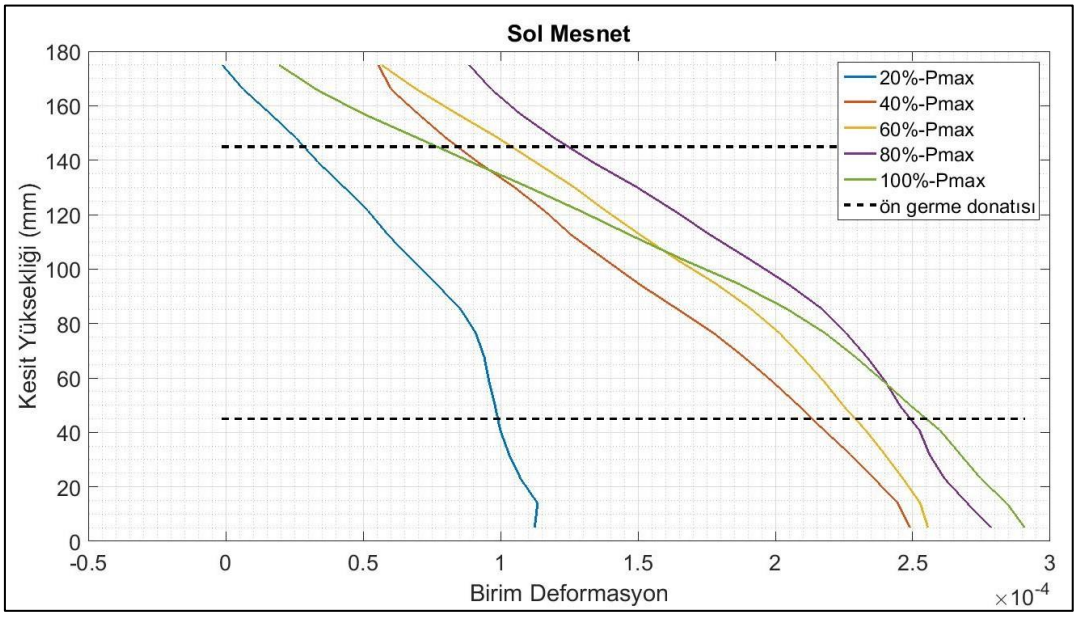
Şekil 5.1. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Yük-düşey deplasman grafiğinde 250 kN yük verildikten sonra yük yavaş yavaş boşaltıldığında ortalama 12 mm balast oturması gerçekleşmiştir. Bu oturma demir yollarında balast serilmesinden sonra yapılan sıkıştırma işlemini laboratuvar ortamında gerçekleştiremediğimiz için meydana gelmiştir. Tam dolu balast yatağıyla yapılan bu aşamadan sonraki deneylerde balastın sıkışmış olduğunu ve yükün tekrar boşaltılmasından sonraki kalıcı deplasmanın daha az miktarlarda olduğunu gözlemlendi

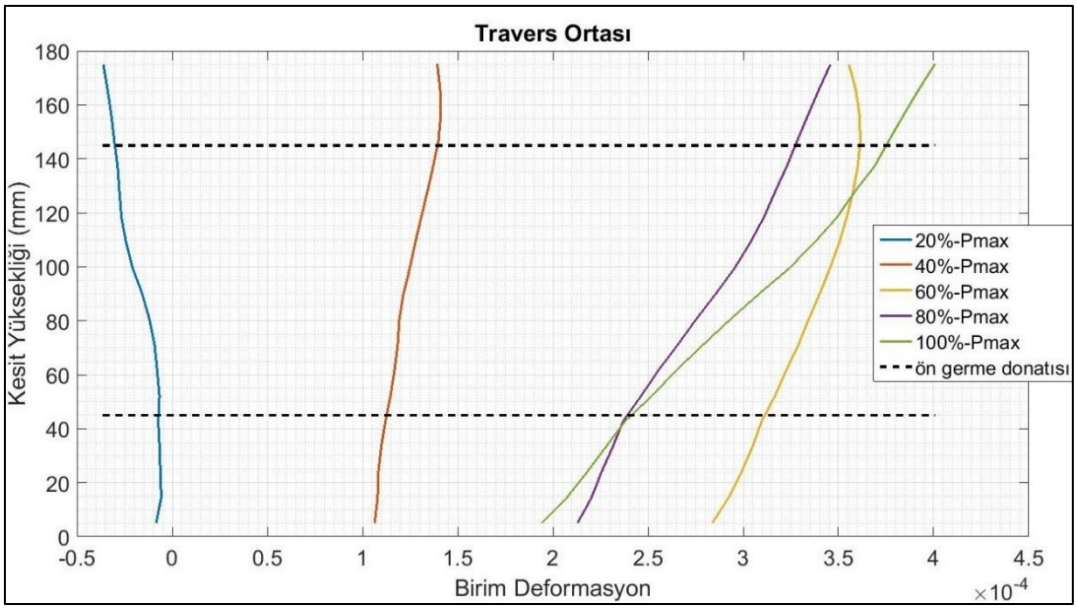


Şekil 5.2. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

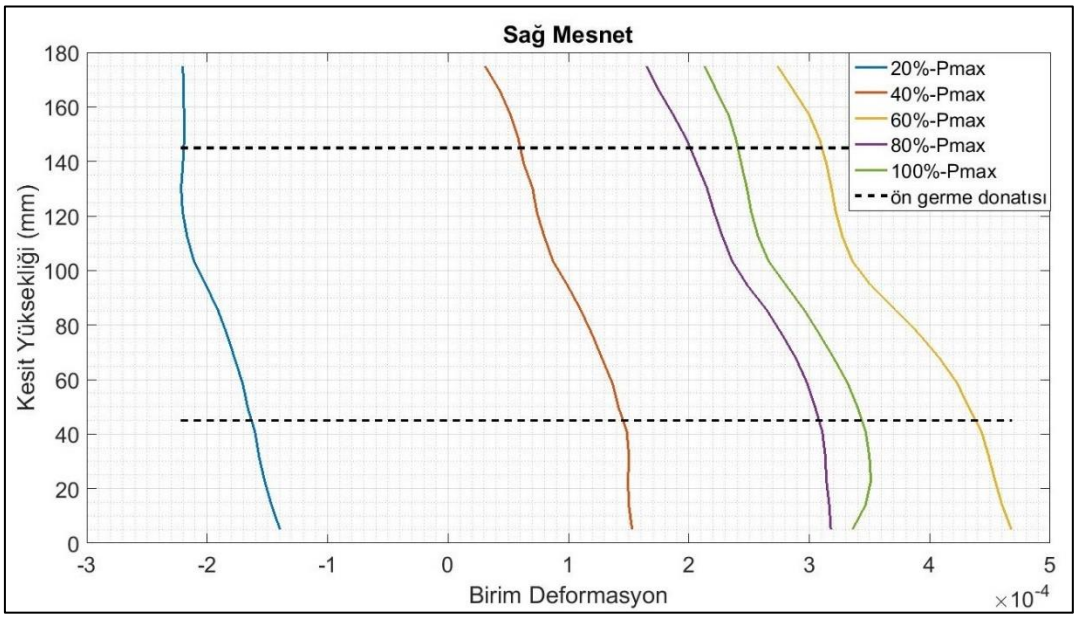
P1 noktasındaki çökmeden dolayı travers P3 noktasında zorlanmakta ve travers ortasında üst bölgede çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Traversteki bu zorlanma, balastta herhangi bir eksilme meydana gelmediği için tam oturma gerçekleşene kadar her bir %20 yükleme kademesinde eşit bir açısal dönmeyle devam etmektedir.



Şekil 5.3. Sol mesnet birim deformasyonlar



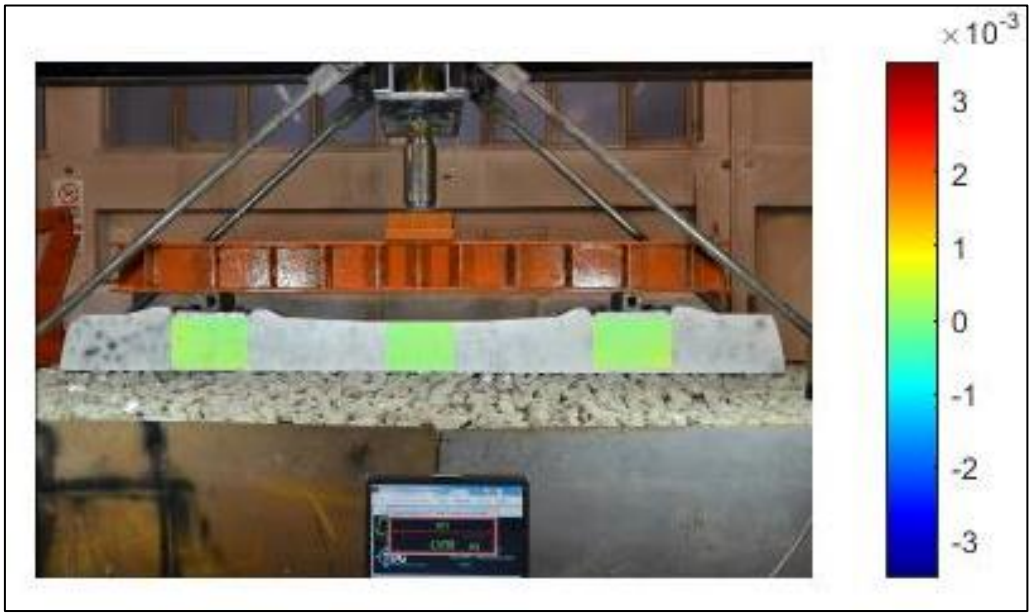
Şekil 5.4. Travers ortası birim deformasyonlar



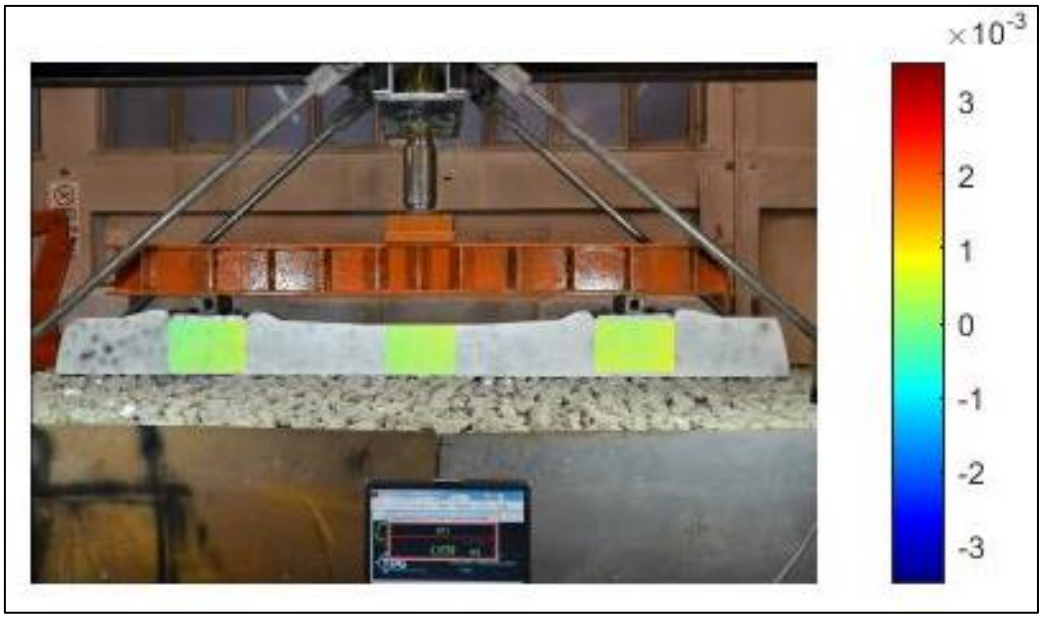
Şekil 5.5. Sağ mesnet birim deformasyonlar



Resim 5.4. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.5. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.6. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

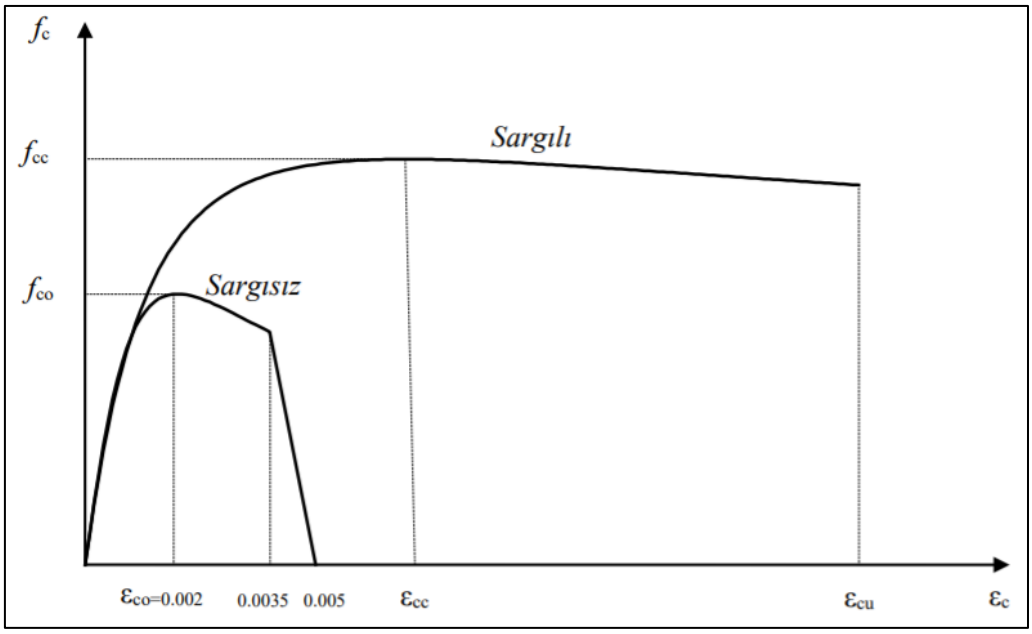


Resim 5.7. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.8. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

Betonda birim şekil değiştirme değerleri TBDY-2018 de aşağıdaki grafikte gösterilen değerlerle ifade edilmektedir.



Şekil 5.6. Beton birim şekil değiştirme değerleri

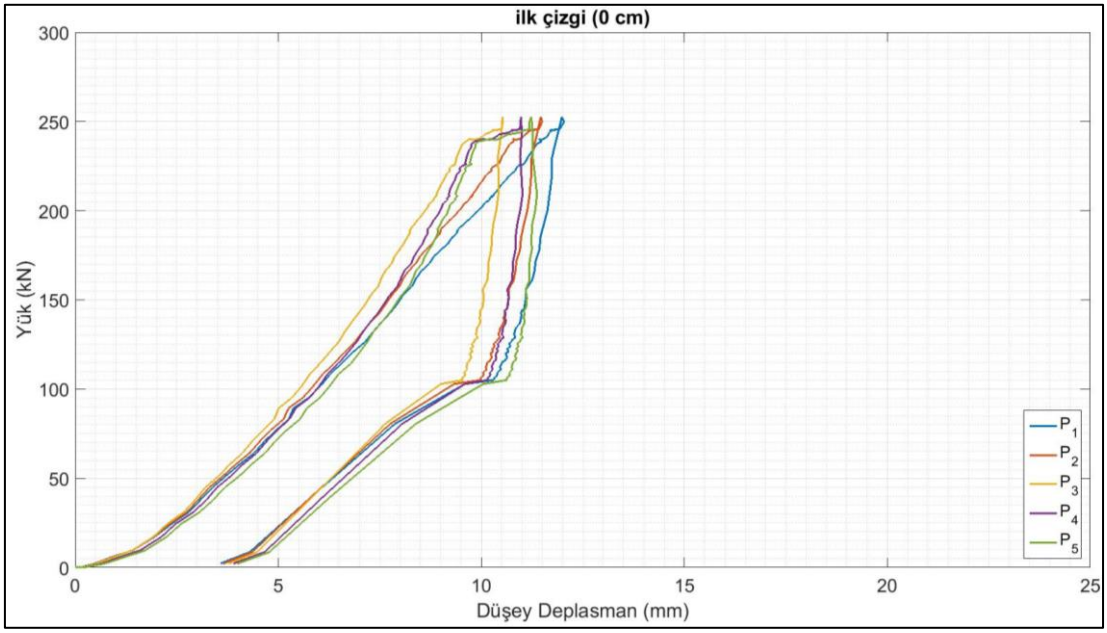
Grafikte de görüldüğü gibi ε_c= 0,0035 değeri betonda birim şekil değiştirme sınırıdır. Bu değerden sonra beton fonksiyonunu kaybetmektedir. Bu deney aşamalarında ise grafiklerde de görüldüğü gibi birim deformasyon sınır değerini aşılmamıştır.

b) Geogrid ile yapılan ikinci aşama deney

Bu aşamada traversin omuz kısmındaki 30 cm balast tabakası boşaltılmış ve travers üzerine 250 kN yük yüklenmiştir. Grafikler üzerinde yük artık yatay seyretmeye başlayıp deplasmandaki artış devam edince yükleme sonlandırılmıştır.

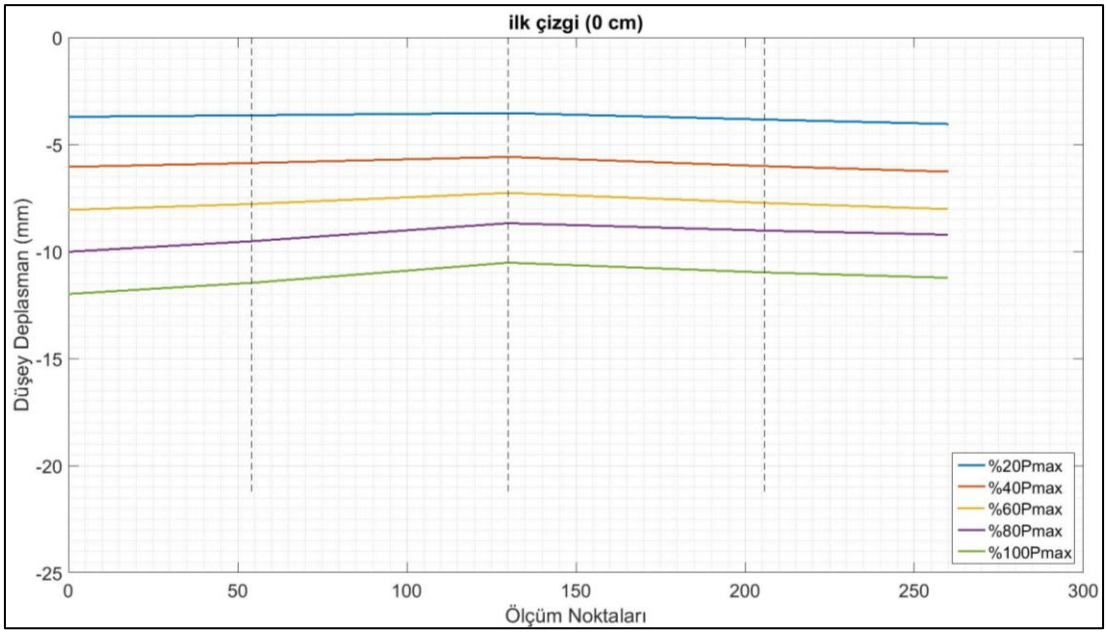


Resim 5.9. Geogrid ile ikinci deney aşaması



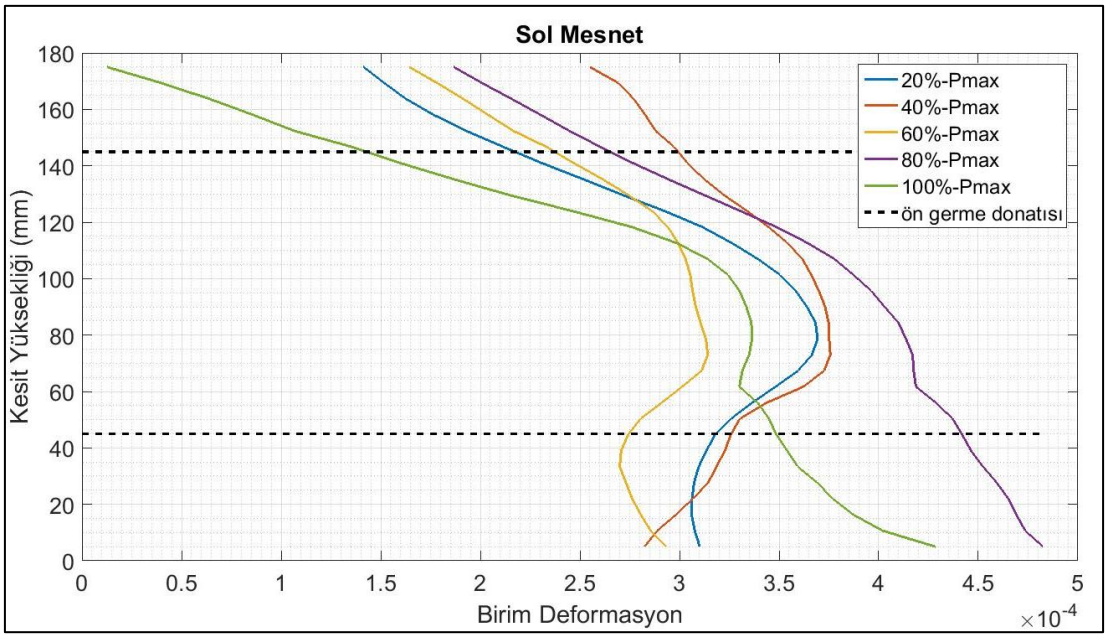
Şekil 5.7. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Yükleme 230 kN seviyelerine geldiğinde düşey deplasmandaki artış devam ederken yüklemede yatay seyir başlamıştır. Biraz daha yük yüklenmiş ve 250 kN yük yüklendiğinde yükleme sonlandırılmış ve yük yavaş yavaş boşaltılmıştır. Balasttaki oturma traversin her iki ucunda da eşit miktarda bir önceki aşamadaki kalıcı oturmanın yaklaşık %30 u kadar gerçekleşmiştir.

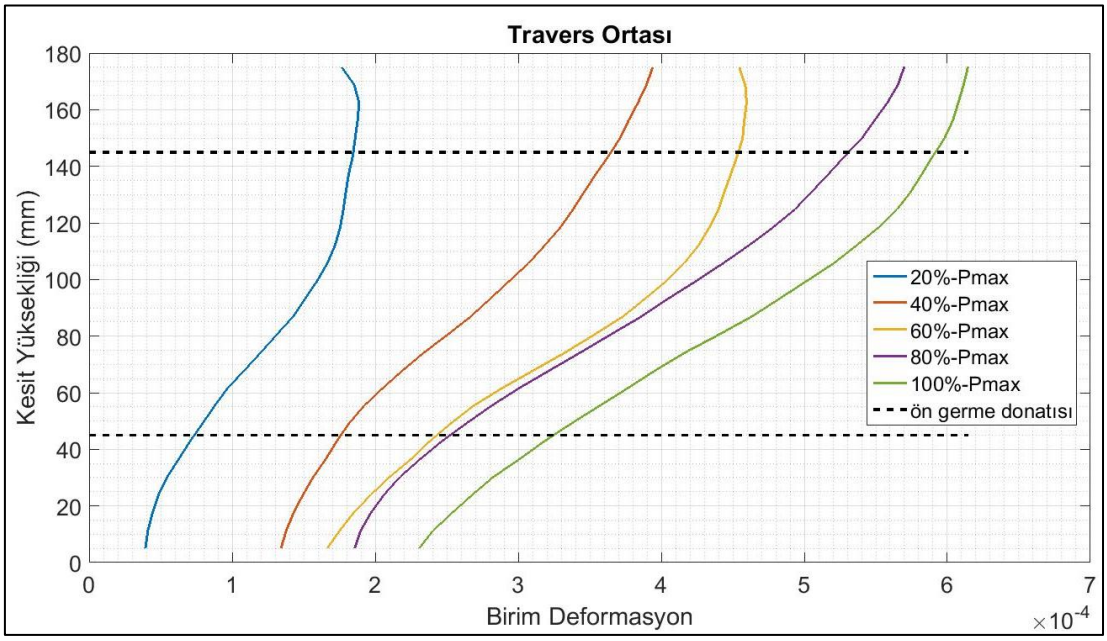


Şekil 5.8. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

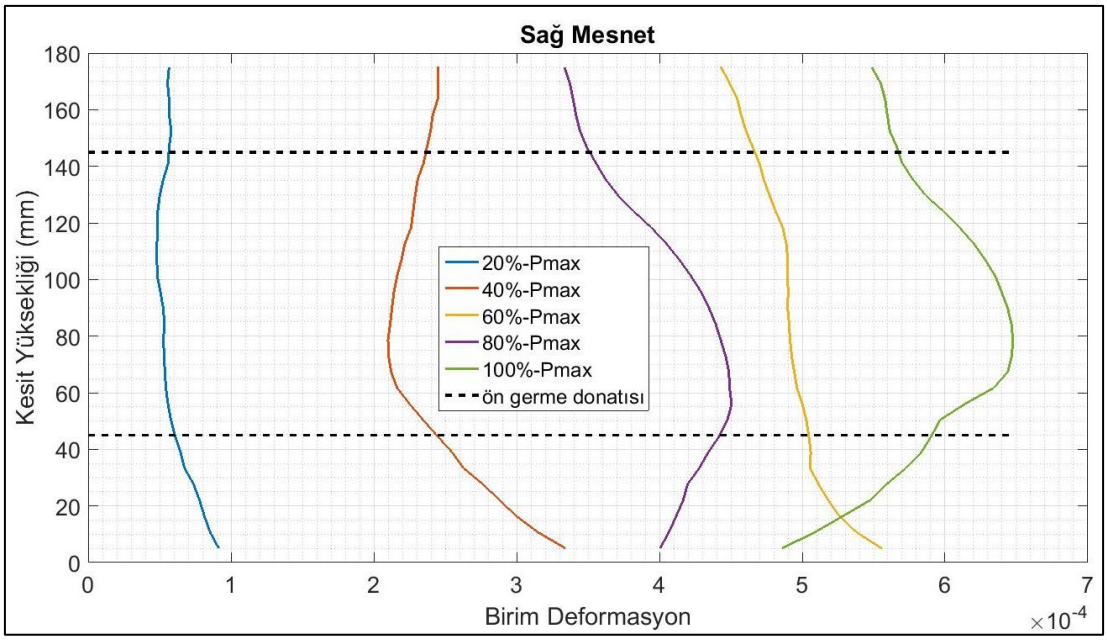
Yük -düşey deplasman grafiğinde travers üzerinde işaretli 5 adet noktanın deney boyunca aldığı yük ve yaptığı düşey deplasmanlar Şekil 5.8.'de gösterilmektedir. Düşey deplasmanların travers üzerindeki 5 adet ölçüm noktasındaki değerlerine baktığımızda traversin iki ucu arasında yüklemenin her %20' lik aşamasında farklı oturmalar gözlemlenmektedir. Bu durum bize sadece balastın yük altında zorlanmadığını aynı zamanda travers ortasında üste çekme altta basınç şeklinde bir gerilmenin olduğunu göstermektedir. Bu durum ilerleyen deney aşamalarında balasttaki boşalmayla birlikte daha net gözlemlenecektir.



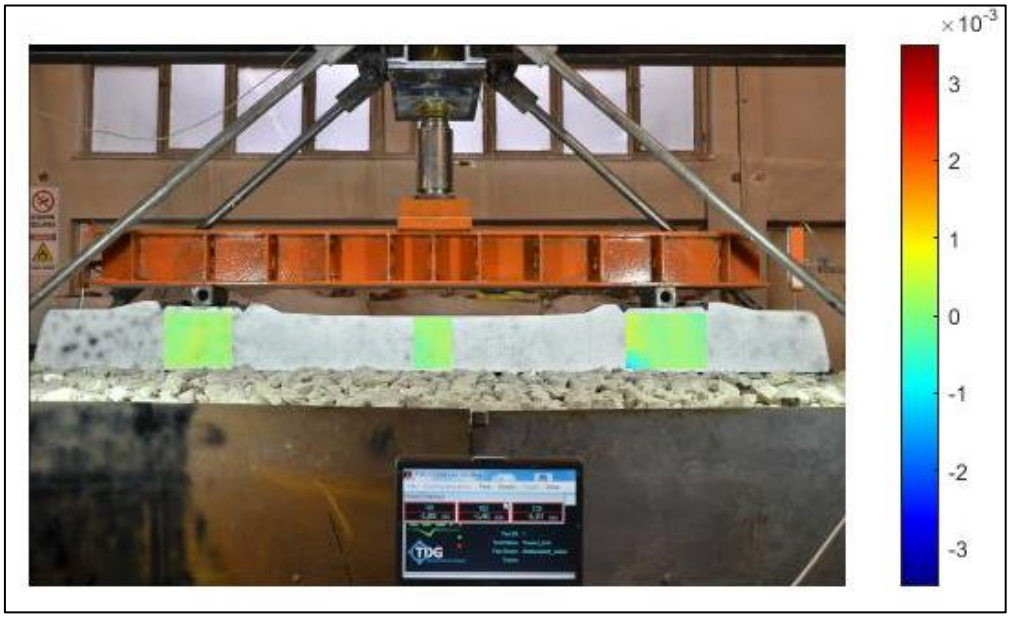
Şekil 5.9. Sol mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.10. Travers ortası birim deformasyonlar



Şekil 5.11. Sağ mesnet birim deformasyonlar



Resim 5.10. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.11. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.12. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.13. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

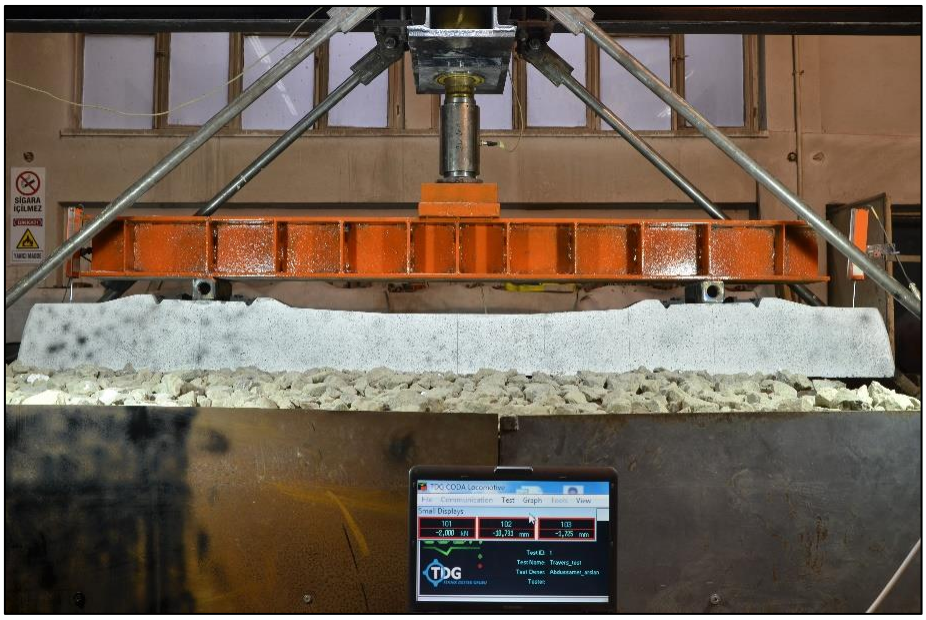


Resim 5.14. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

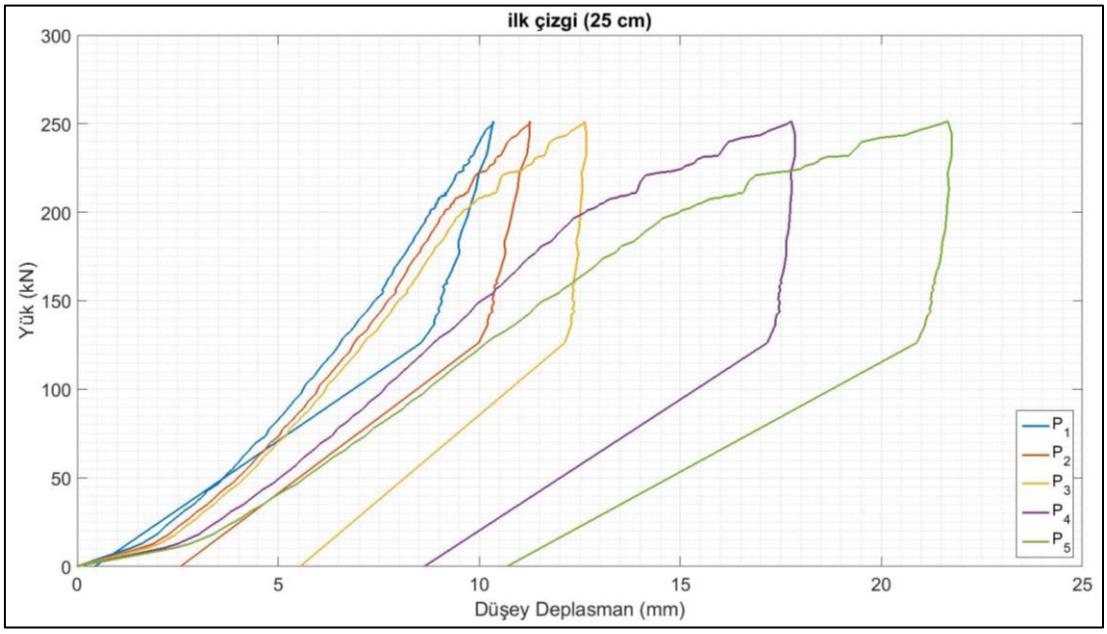
Yükleme birim deformasyon analizlerinin olduğu resimlere bakıldığında maksimum birim deformasyon değeri aşılmamış ve traverste herhangi bir çatlama oluşmamıştır.

c) Geogrid ile yapılan üçüncü aşama deney

Bu aşamada traversin sağ ucundan traversin ortasına doğru olan bölgedeki 25 cm uzunluğunda ki balast tabakası boşaltılmış ve 252 kN yük yüklenmiştir.

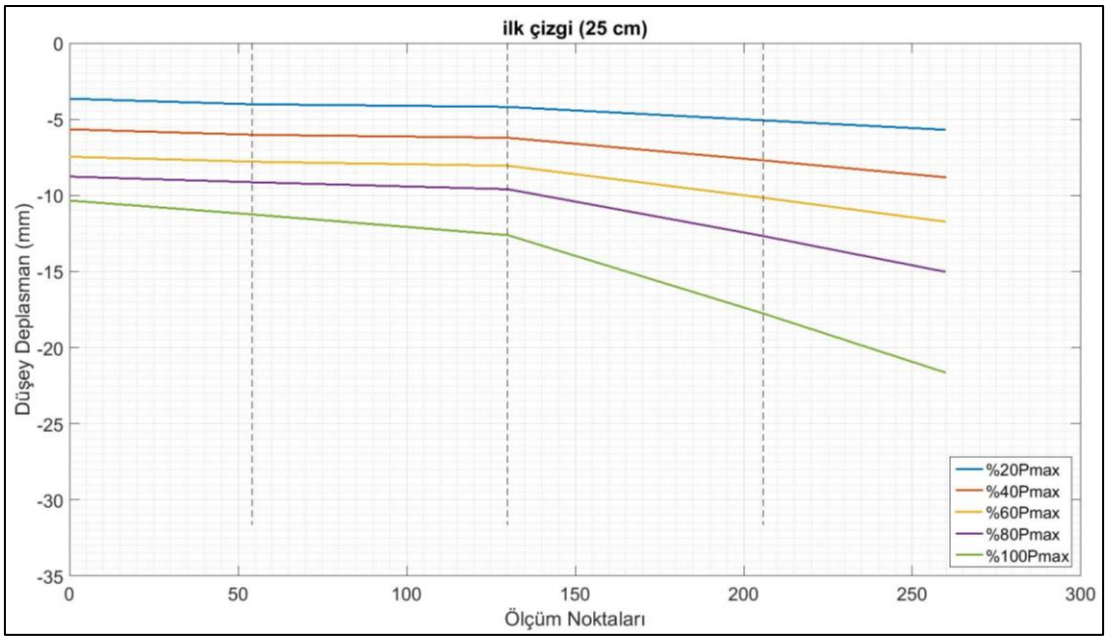


Resim 5.15. Geogrid ile üçüncü deney aşaması



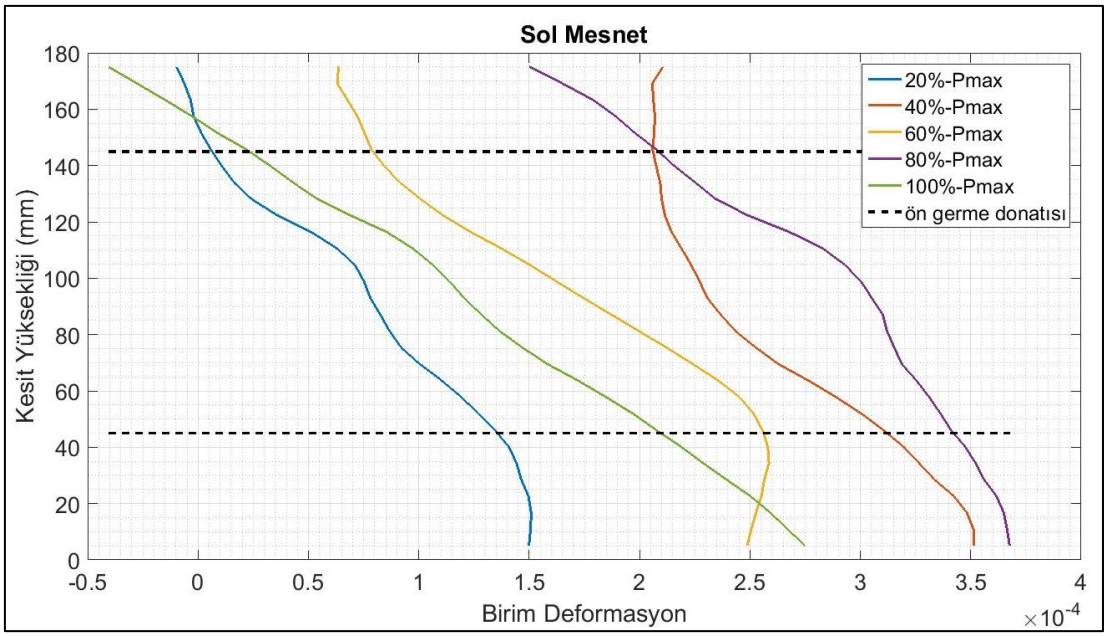
Şekil 5.12. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Traversin sol ucunda ki P1 noktasında yükleme boşaltma elastik bir bitiş sergilerken sağ ucuna doğru artık plastik bir bitiş görülmektedir. Henüz rayın traverse bağlandığı mesnet noktasına kadar balast boşaltması gerçekleşmemişken balastın boşaltıldığı uçtaki bu kalıcı deformasyon balasttaki her bir boşalma seviyesinde daha büyük değerlerde deplasmanların gerçekleşeceğini göstermektedir . Bundan önceki deney aşamalarında travers altında her bir noktada balast oturmasında kalıcı deformasyonlar, bu deneydeki P1 noktasında gözlemlenmemiştir. Bu durum artık balastın tam oturma yaptığını ideal bir yatak durumuna kavuştuğunu göstermektedir. Boşaltmaların gerçekleştirileceği bu aşama ve sonraki deneylerde bu durumun gerçeklemesi deney için çok olumlu bir durumdur.

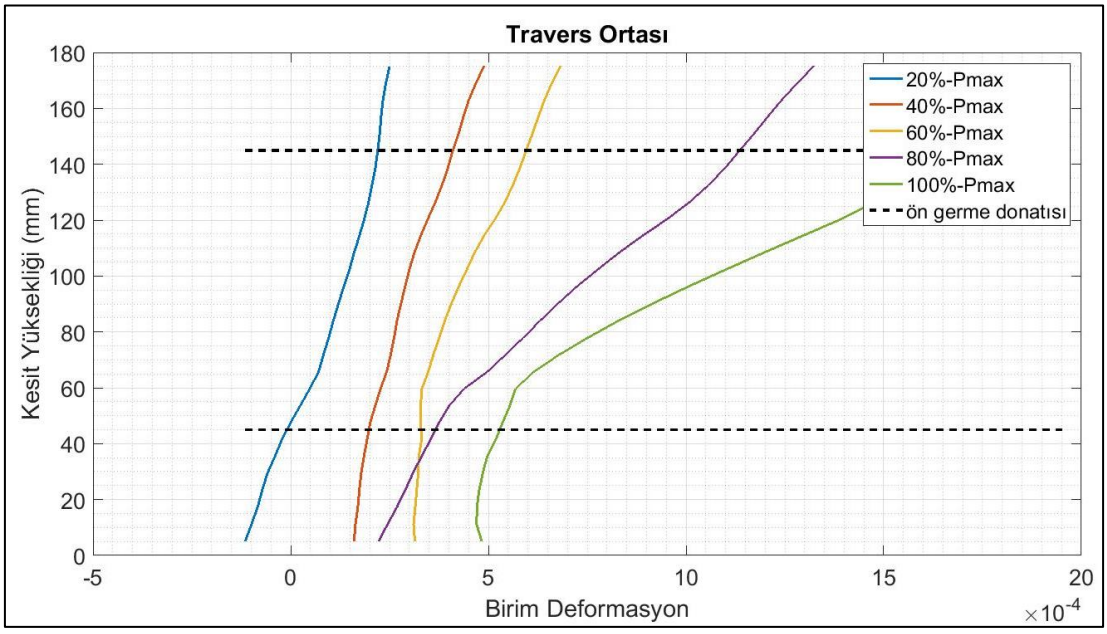


Şekil 5.13. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

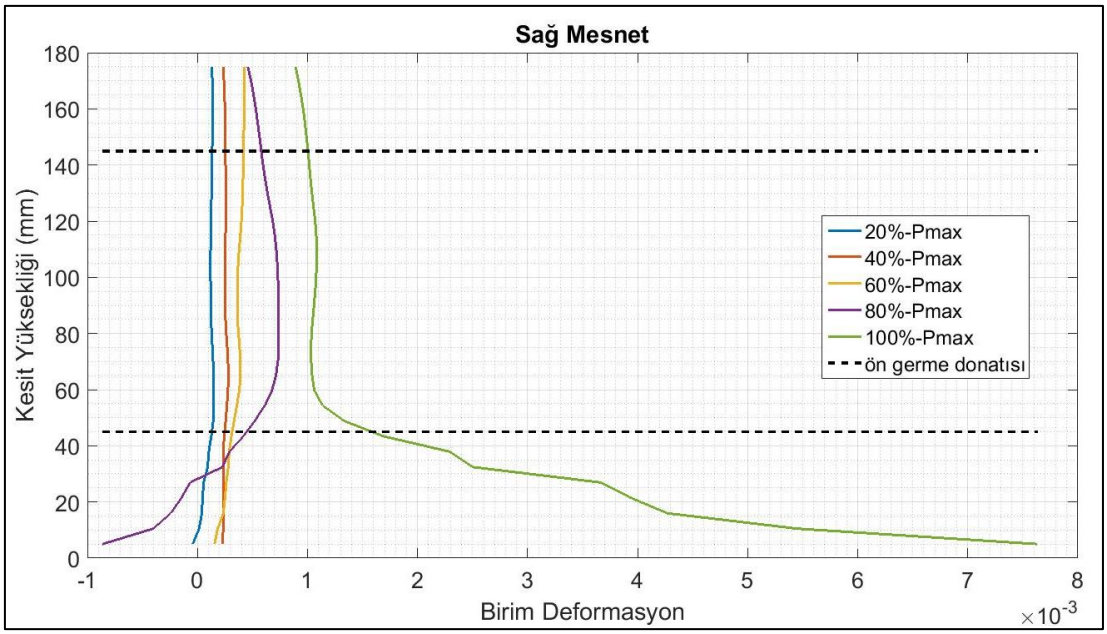
Traverste yüklemenin %20 ile %80 lik aşamasında traversin orta noktasında ki deplasman değişimindeki farklılık traverste bir zorlanma gerçekleştiğini göstermektedir. Yükleme %100 olduğunda deplasmandaki değişim travers ortasından itibaren daha büyük bir değişim göstermektedir. Traversteki zorlanmanın arttığını gösteren bu değişim yine üstte çekme altta basınç şeklindedir.



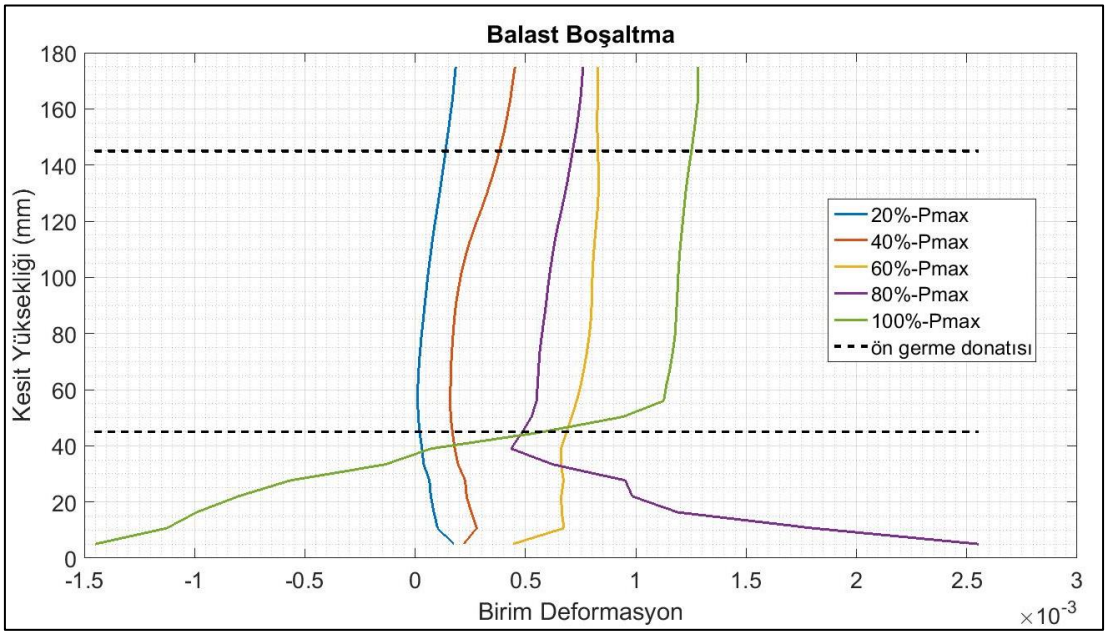
Şekil 5.14. Sol mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.15. Travers ortası birim deformasyonlar



Şekil 5.16. Sağ mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.17. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



Resim 5.16. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.17. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.18. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.19. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

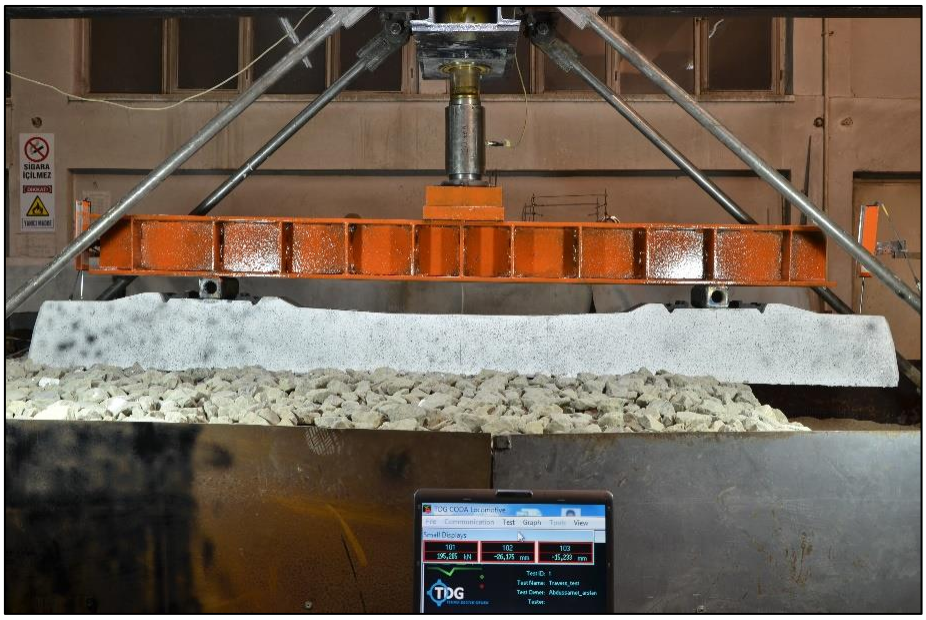


Resim 5.20. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

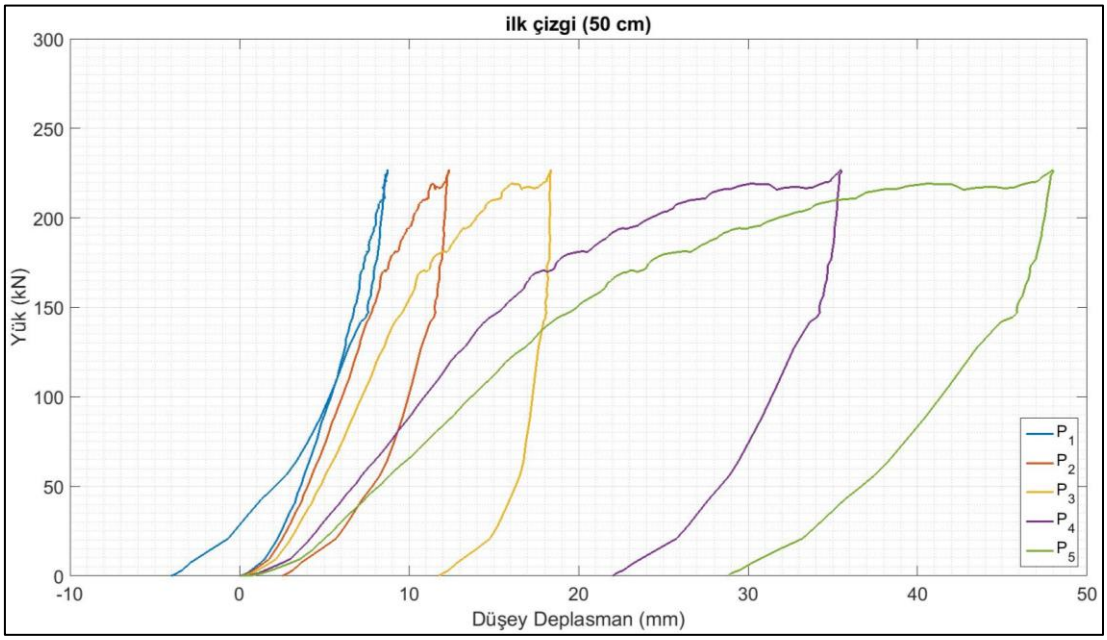
Travers altında ilk boşalmanın gerçekleşmesi ile birlikte artık birim deformasyonda maksimum değer aşılmaya başlanmış ve sağ mesnet altında çatlakların oluştuğu analizler neticesinde görülmektedir.

d) Geogrid ile yapılan dördüncü aşama deney

Bu aşamada traversin raya bağlandığı noktaya kadar olan bölgedeki balast tabakası boşaltılmış ve 225 kN yük yüklenmiştir.

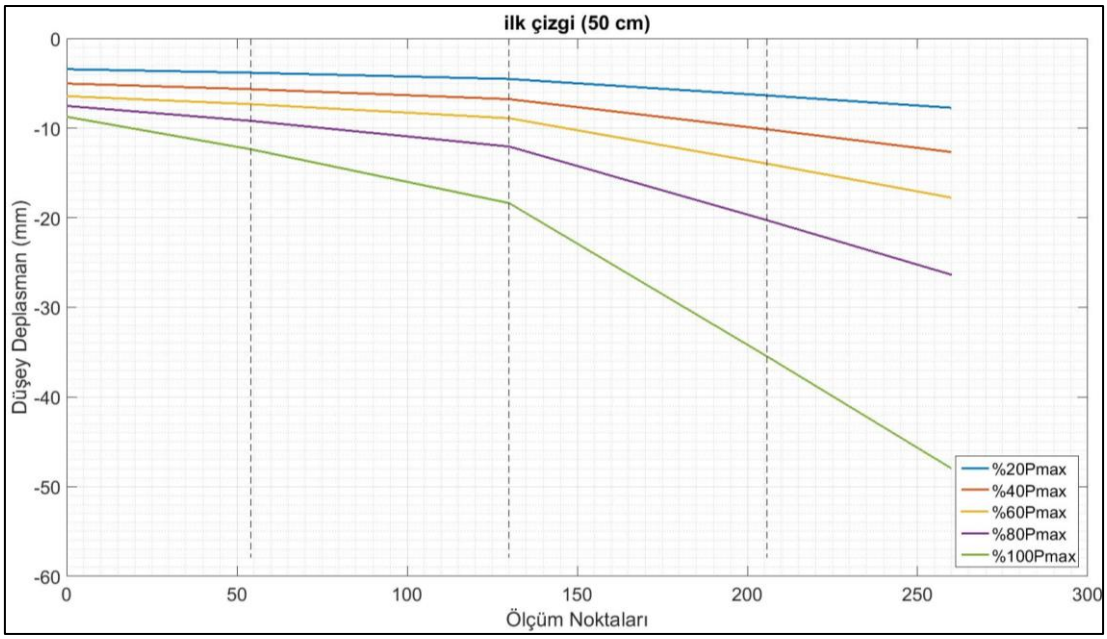


Resim 5.21. Geogrid ile dördüncü deney aşaması



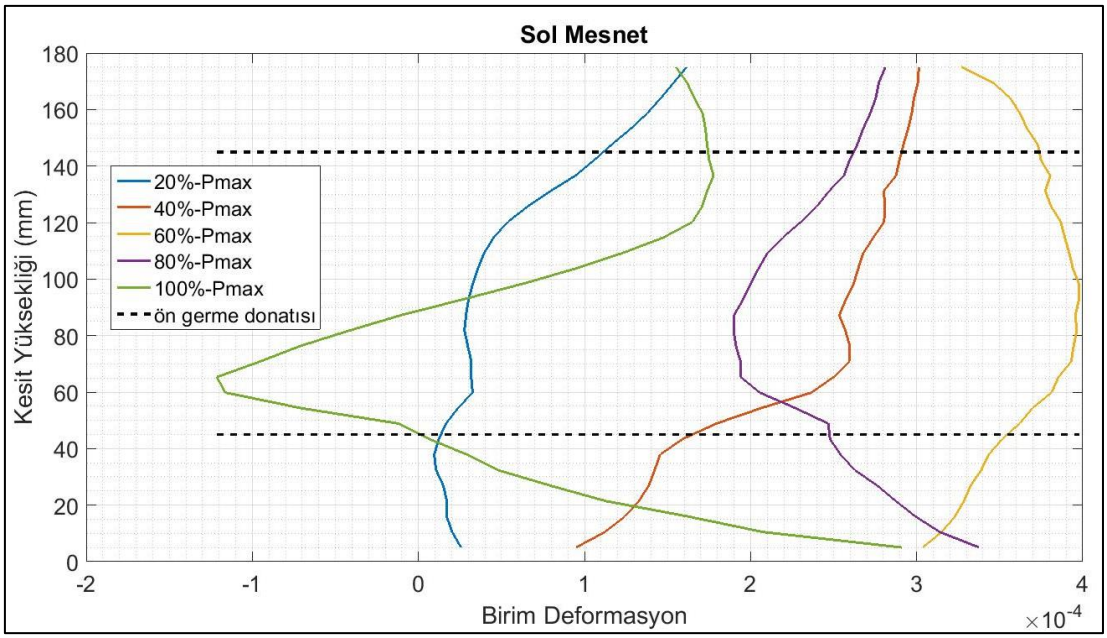
Şekil 5.18. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Bu yüklemede boşaltılan travers ucunda deplasman artışı devam ederken yük artık yatay seyredince yükleme sonlandırılmış ve P5 noktasında yüklemenin sonlandırıldığı ana kadar gerçekleşen deplasman 47 mm olmuştur. Yükleme sonlandırıldığında gerçekleşen kalıcı deformasyonlar traversin sol ucunda yükleme boşaltımı 100 kN seviyelerine gerilediğinde artık P1 noktasında yukarı yönde bir deformasyon gerçekleştiği görülmektedir. P2 noktasında ki yükün elastik geri dönüşü balastta oturmanın tamamlandığını ve balastın tabanda geogrid ile bir etkileşim içinde olduğunu, bu sayede boşalan bölgeye doğru bir yatay balast hareketinin olmadığını, aşağıdaki grafikte de görüldüğü üzere traversin zorlandığını görmekteyiz.

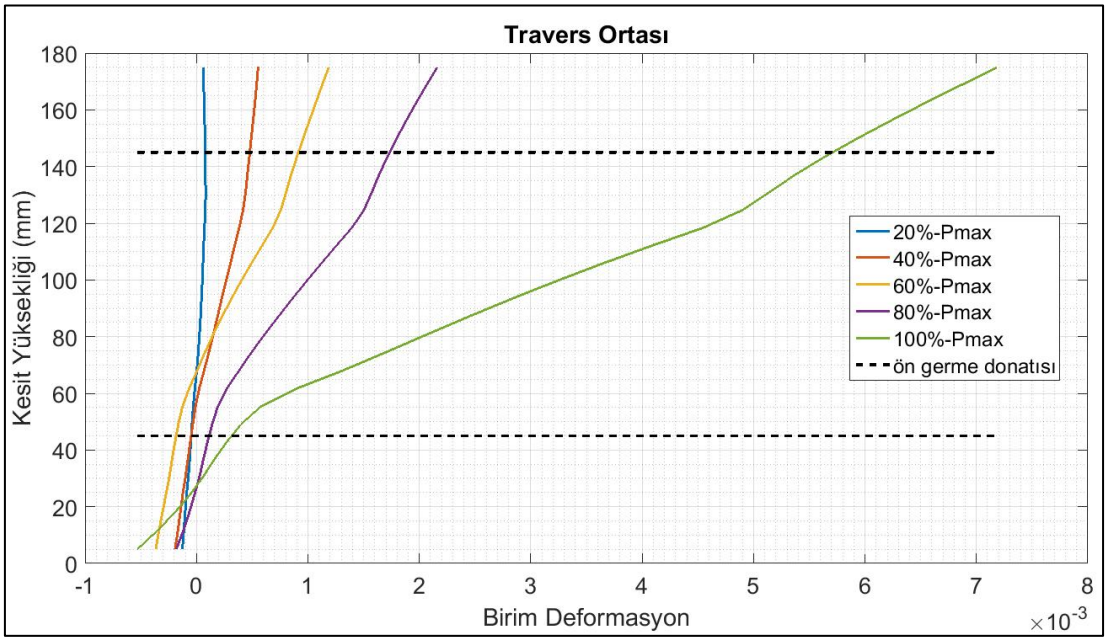


Şekil 5.19. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

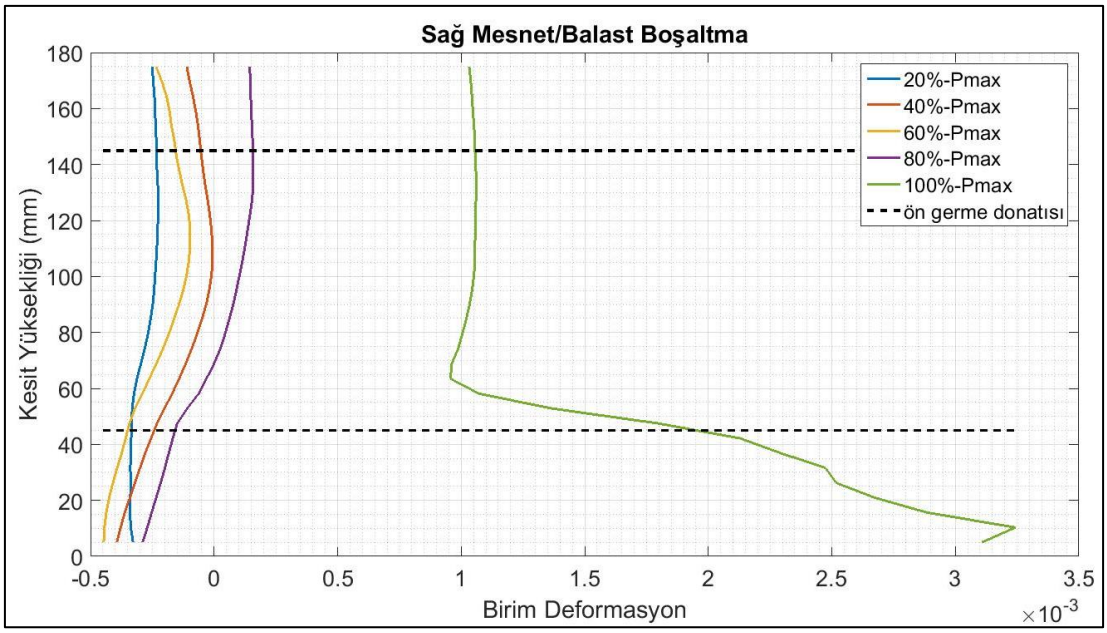
Travers üzerine yüklenen yükün artan her %20’ lik diliminde traversin boşta kalan ucunda ki düşey deplasman ve açısal deformasyon miktarı sürekli artmıştır. Yükleme 170 kN seviyelerine geldiğinde traversin boşta kalan ucunda düşey deplasmandaki artış hızı yükleme hızından daha fazla olmuştur. Yükleme işlemi başladığından itibaren travers ortasında ve yükün traverse aktarıldığı ray bağlantı noktaları olmak üzere üç noktalı yük yüklemesi şeklinde bir durum oluşmuştur. Bu durumda travers altındaki balast boşalmaya uğramadan sabit kaldığı ölçüde travers ortasında ki zorlanmanın artacağını göstermektedir.



Şekil 5.20. Sol mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.21. Travers ortası birim deformasyonlar



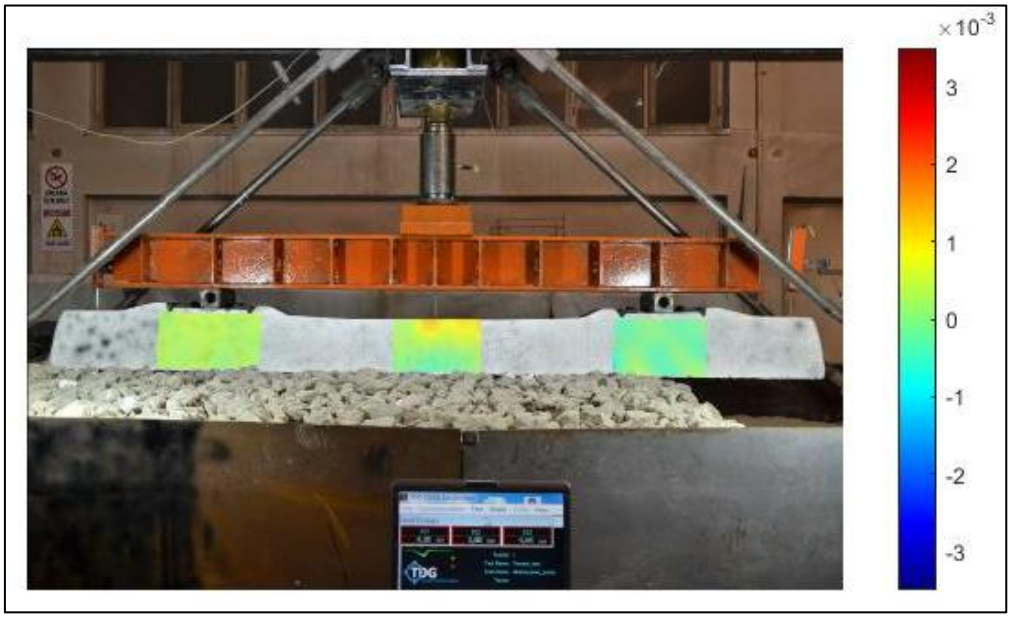
Şekil 5.22. Sağ mesnet + boşaltma çizgisi birim deformasyonlar



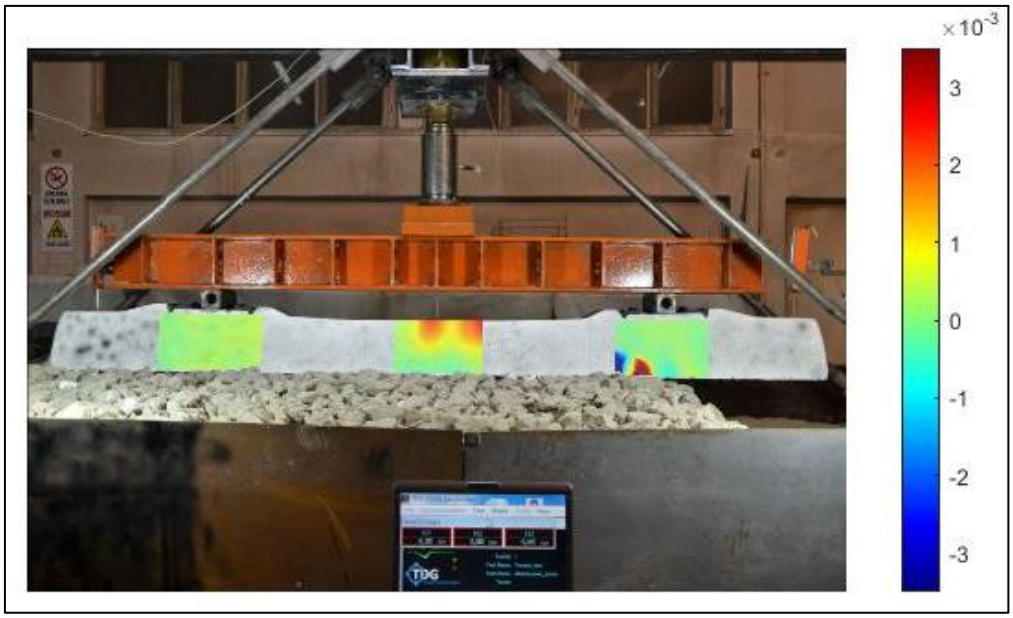
Resim 5.22. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.23. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.24. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.25. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.26. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

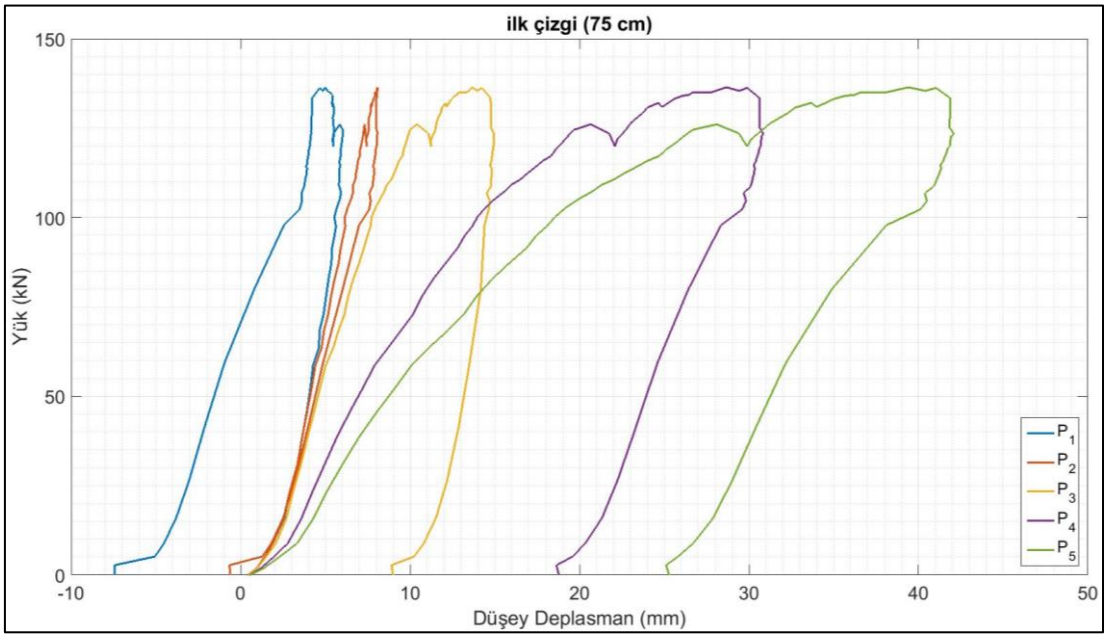
Yüklemenin %80 ve sonra ki her bir aşamasında travers ortasında ve sağ mesnet altında traverste birim deformasyon değeri aşılmakta ve traverste çatlaklar oluşmaktadır.

e) Geogrid ile yapılan beşinci aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 25 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 137 kN yük yüklenebilmiştir.

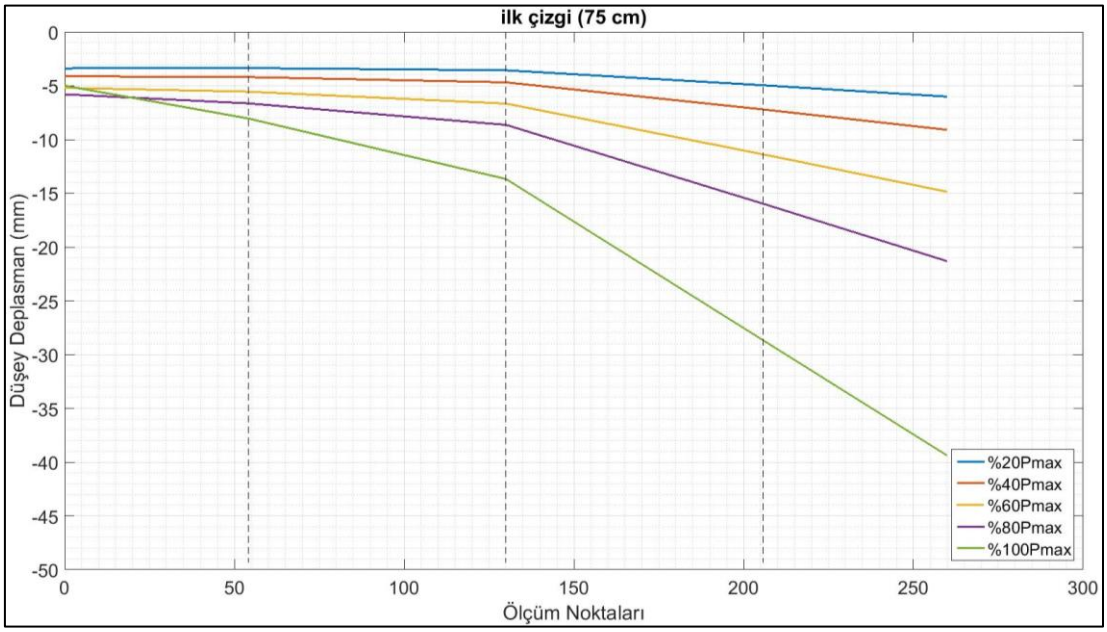


Resim 5.27. Geogrid ile beşinci deney aşaması



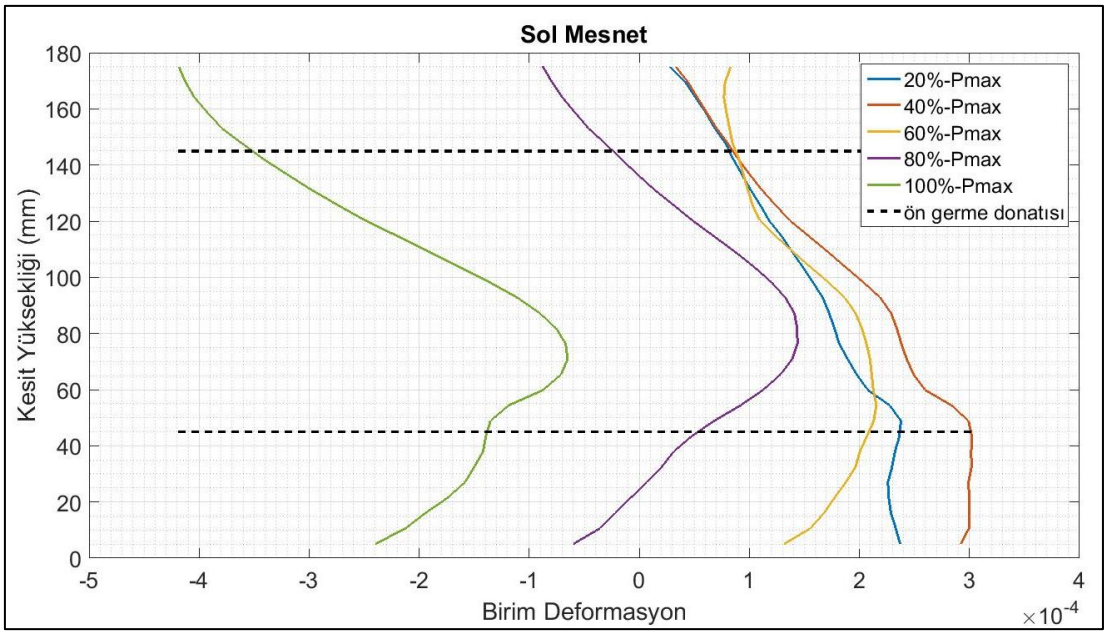
Şekil 5.23. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Bu yüklemede boşaltılan travers ucunda deplasman artışı devam ederken yük artık yatay seyredince yükleme sonlandırılmış ve P5 noktasında deplasman 41 mm seviyelerine kadar çıkmıştır. Sırasıyla travers üzerindeki P1 noktasında Şekil 5.23. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar'te de görüldüğü gibi deplasman yukarı yönlü gerçekleşmiştir. P2 noktasında yükleme öncesinde ve sonrasında durum elastik bir bitiş sergilemiştir. P2 noktasındaki bu durum balastta herhangi bir oturmanın gerçekleşmediğini ve artık yüklemenin travers altındaki boşalmayla birlikte hareketlerin traverste gerçekleştiğini göstermektedir.

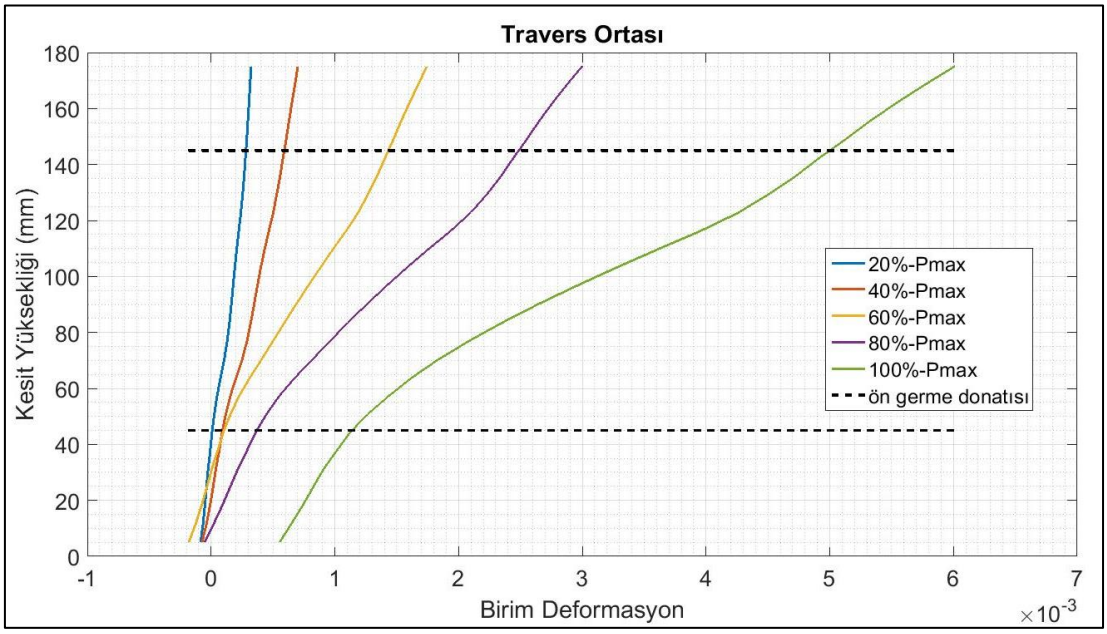


Şekil 5.24. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

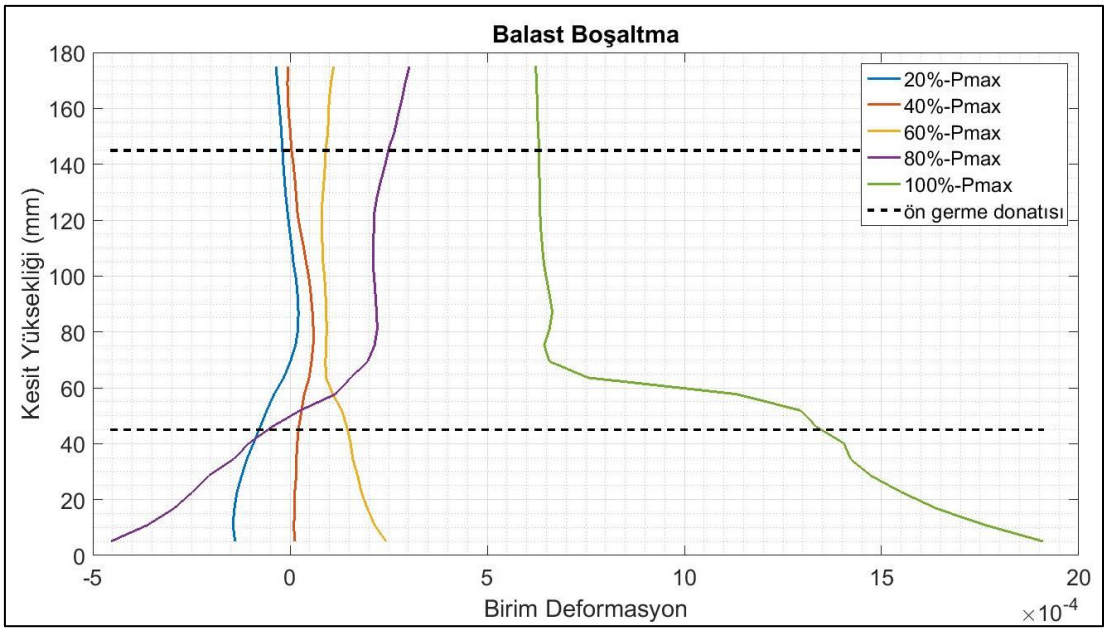
Yük-deplasman grafiğinde yükün yüklenip boşaltılması sonrasında bir önceki deney aşamasına da bakılarak söylenebilir ki artık yük travers üzerinden kalksa bile deplasmanlar plastik tarafta kalmakta ve traversin stabilitesi bozulmuş durumdadır. Bu plastiklik mertebe olarak boşalmanın gerçekleştiği uçta daha fazla olmaktadır. Tabanda serili olan geogridin balast danelerini tuttuğunu düşündüğümüzde boşalmadaki her bir artış traversteki zorlanmanın da artacağını göstermektedir. Geogrid sayesinde en altta bulunan balastların yatay hareketi kısıtlanmış olduğundan üstteki balast daneleri düşey yönde hareket edememektedir. Bunun neticesinde travers balast içerisine gömülmüyor ve yine orta noktasından ve ray bağlantı noktalarından olmak üzere üç noktalı yüklemenin bu deney aşamasında da gerçekleştiği bu deney aşamasında da rahatlıkla gözlemlenmektedir.



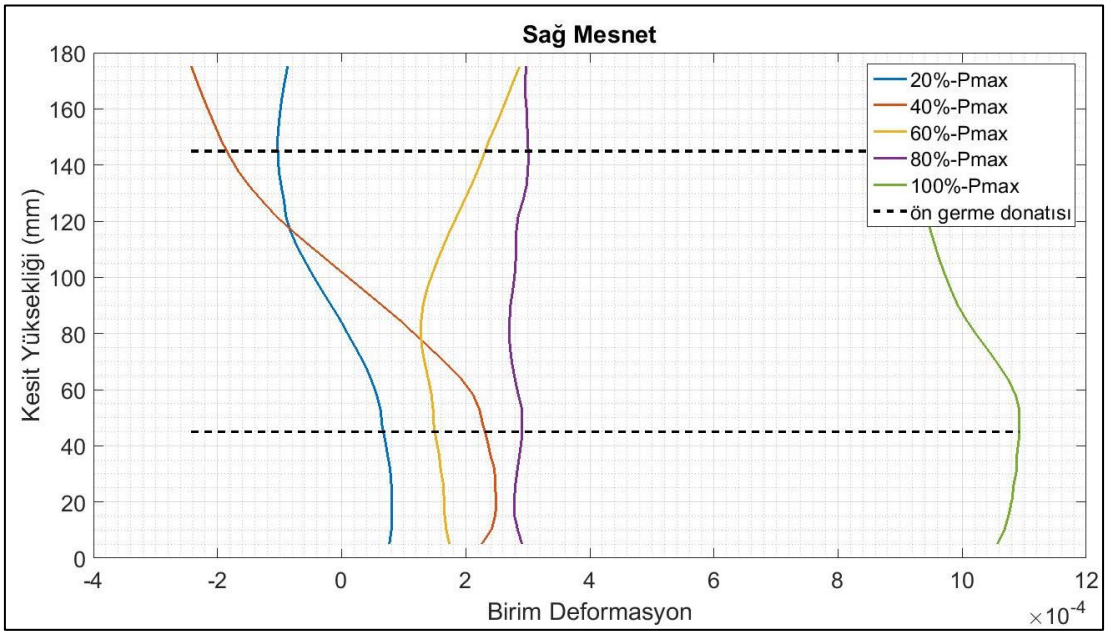
Şekil 5.25. Sol mesnet birim deformasyonlar



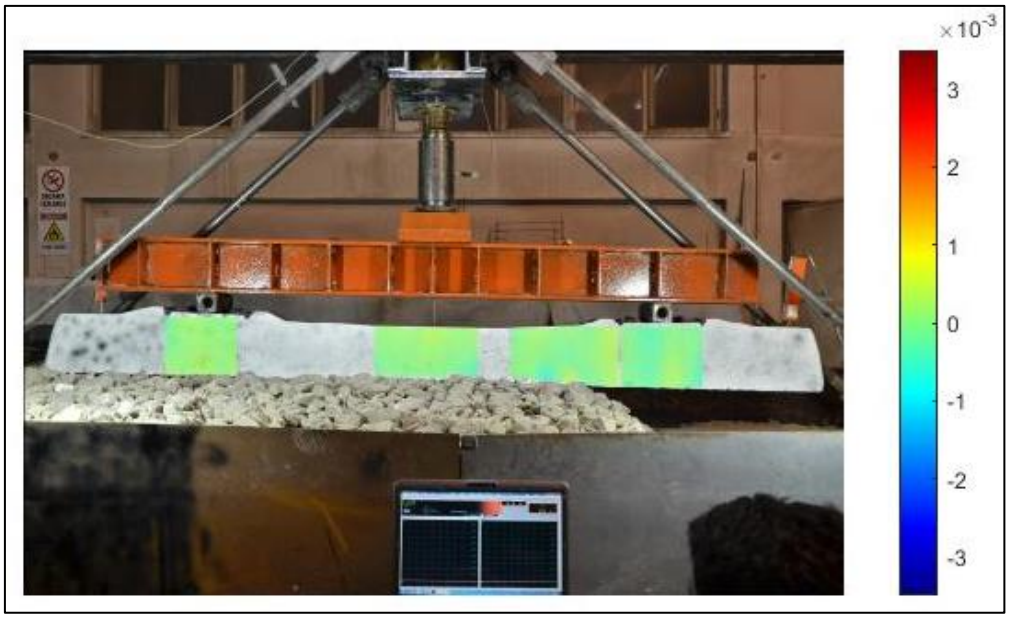
Şekil 5.26. Travers ortası birim deformasyonlar



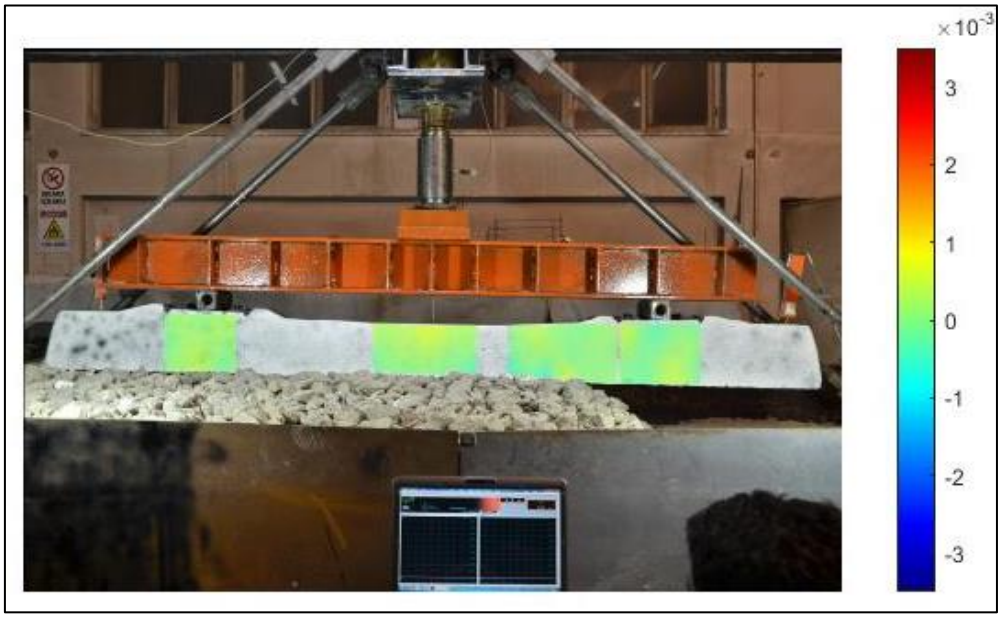
Şekil 5.27. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



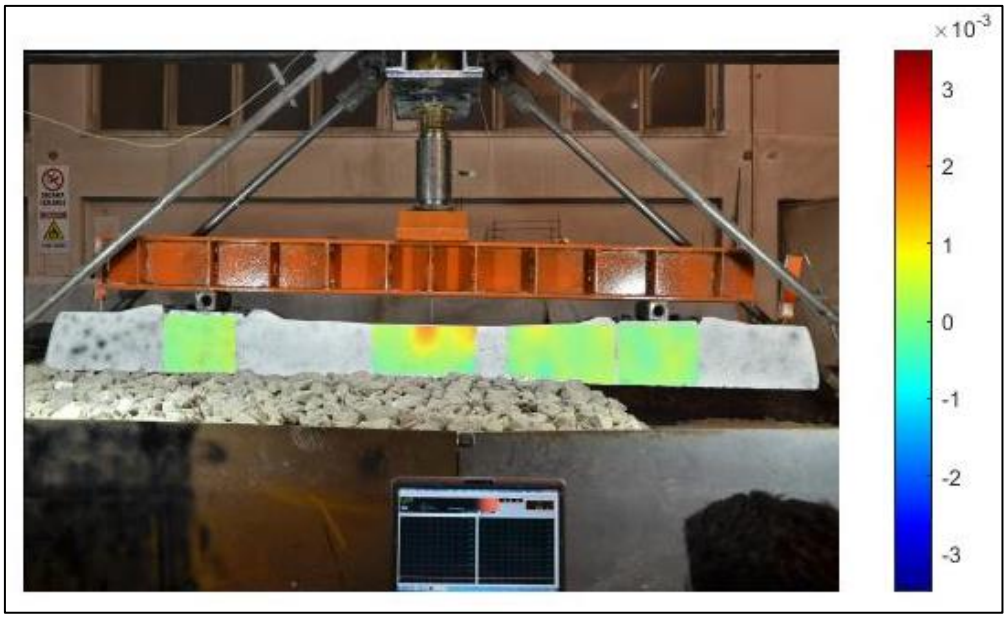
Şekil 5.28. Sağ mesnet birim deformasyonlar



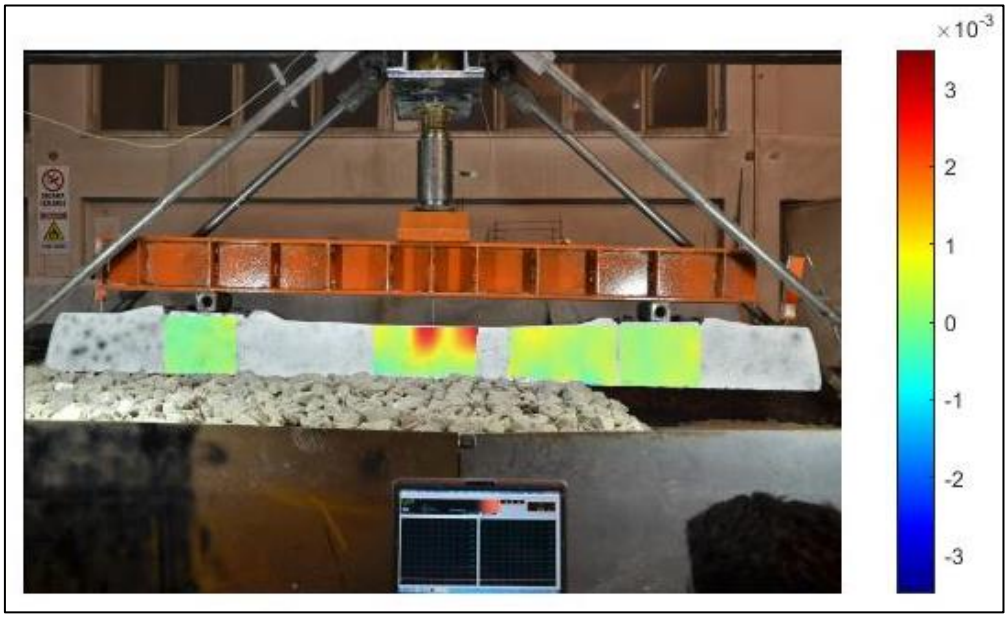
Resim 5.28. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



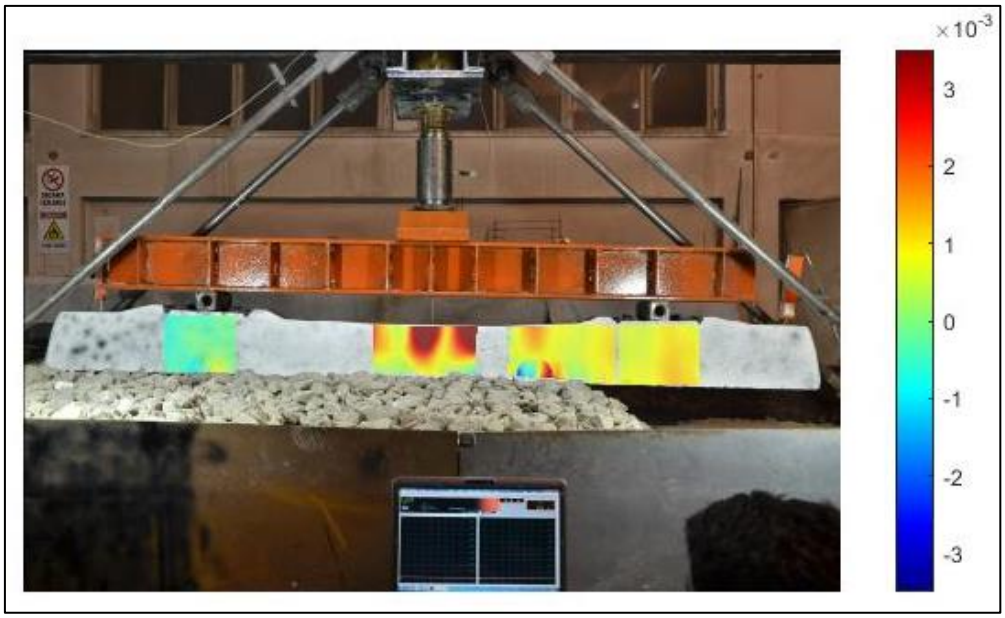
Resim 5.29. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.30. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.31. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.32. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

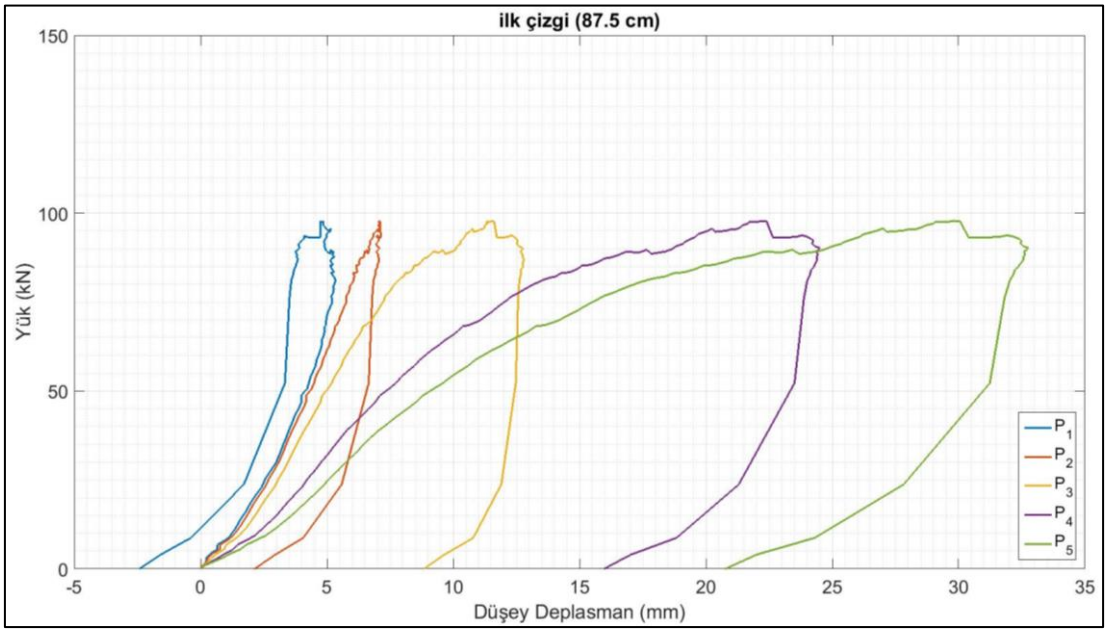
5. aşamada artık traversin en çok zorlandığı yer travers ortasıdır. Travers ortasında üst kısımda çekme gerilmeleri görülmektedir. Çatlaklarında artık gözle görülür olduğu bu aşamadan sonra travers tasarım kriterlerinin üzerinde çalışmakta ve bu döngüsel yükler altında servis ömrünün kısalacağını göstermektedir.

f) Geogrid ile yapılan altıncı aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 12,5 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 98 kN yük yüklenmiştir.

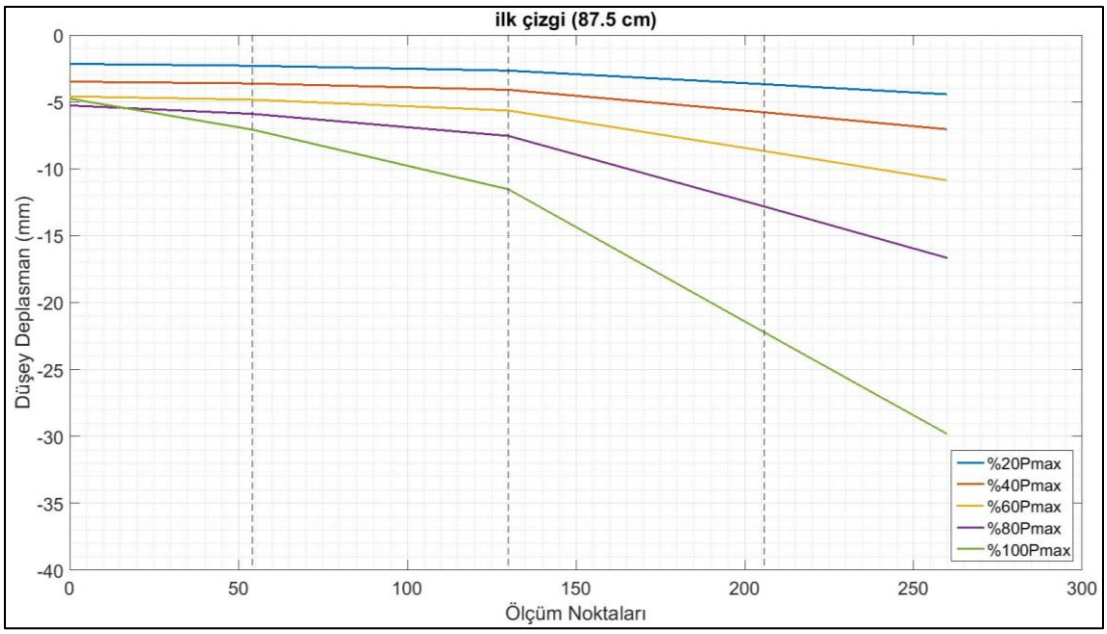


Resim 5.33. Geogrid ile altıncı deney aşaması



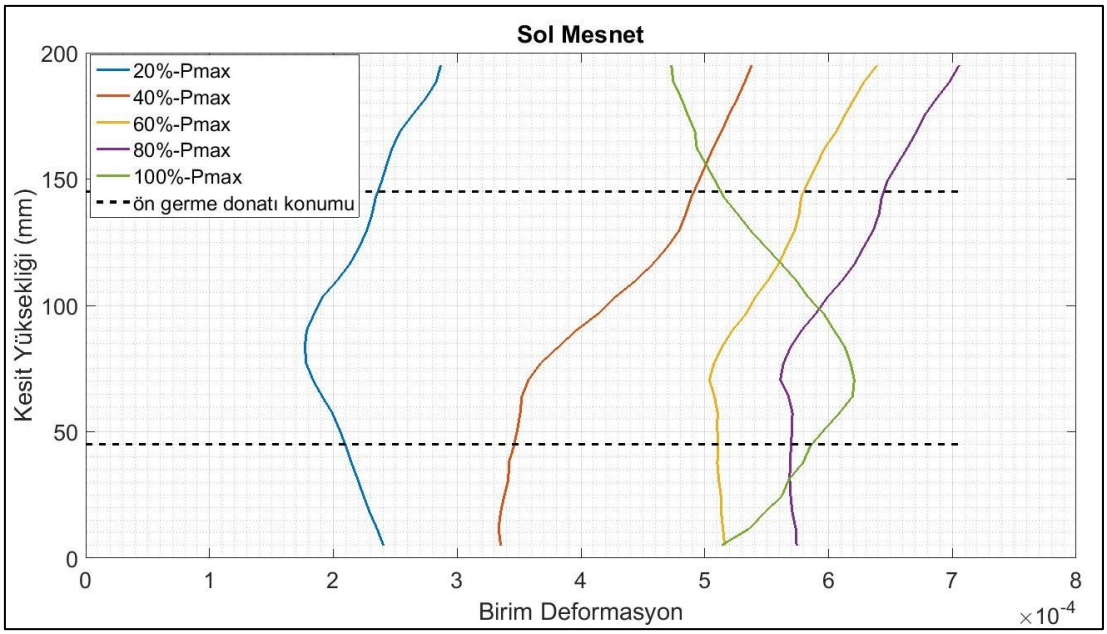
Şekil 5.29. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Bir önceki deneyden devralınan düzenekte yapılan 12,5 cm daha balast boşaltma işleminin ardından 95 kN yük yüklendikten sonra boşta kalan uç düşeyde deplasman yapmaya devam etmiş fakat traversin balast yatağındaki plastiklik seviyesi ve deplasman miktarı bir önceki aşamaya göre azalmıştır. Bunun nedeni bir önceki aşamada balast 25 cm boşaltılmışken bu aşamada balast 12,5 cm boşaltılmıştır. Aynı azalma yüklenen yüktede gerçekleşmiş ve 135 kN yük 95 kN olarak yüklenebilmiştir. Travers üzerinde daha fazla deney yapabilmek için balast boşalması 12,5 cm olarak gerçekleştirilmiştir ancak deplasmandaki artış hızı yükteki artış hızını geçtiğinden dolayı yük 95 kN‘ da bırakılmıştır.

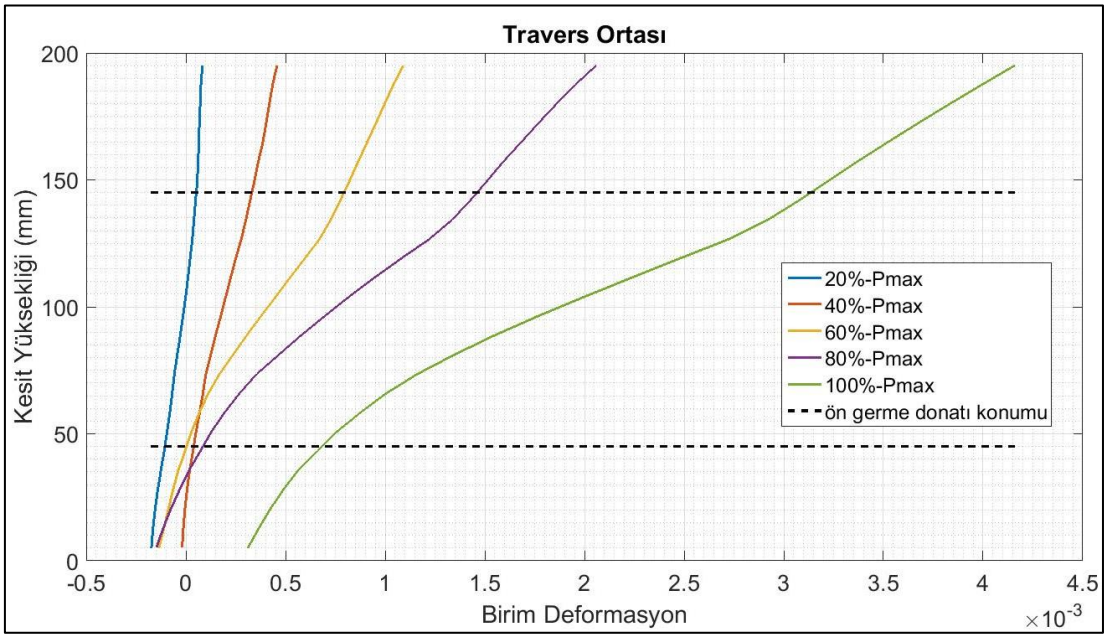


Şekil 5.30. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

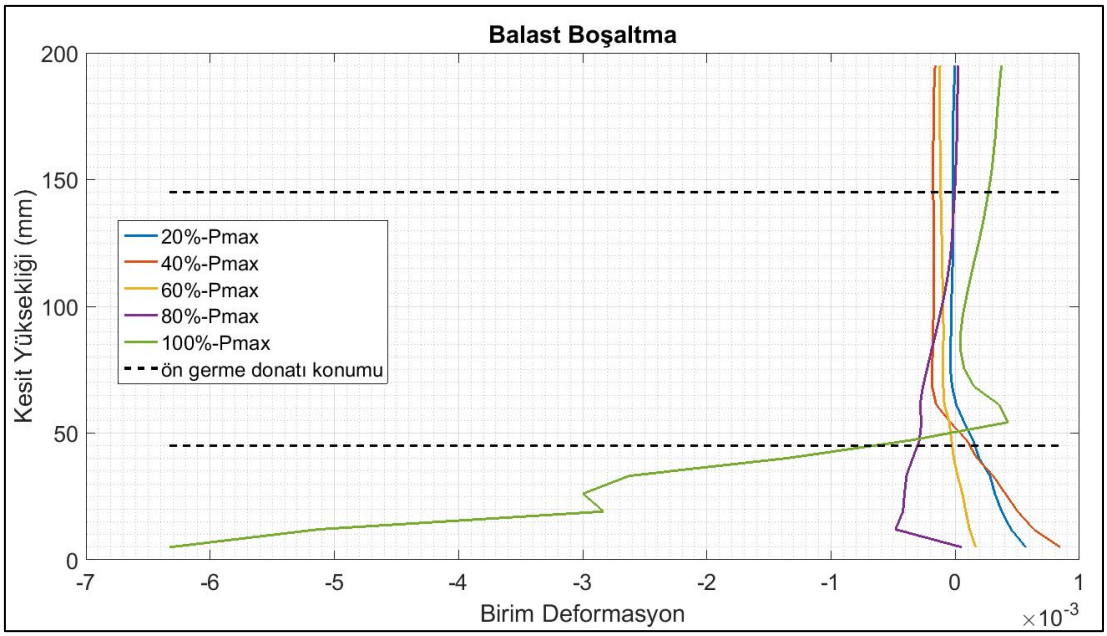
Her bir boşalmada balast geogrid etkileşiminin korunduğu ve bunun sonucunda üç noktalı yüklemenin oluştuğu grafiklerde rahatça görülmektedir. Traverse yüklenen yük, daha fazla inceleme yapabilmek için dingil yükü olan 22,5 tondan daha az yüklenmesine rağmen deformasyonlardaki seviyeler ciddi boyutlardadır. Demir yolundaki dingil yükü 22,5 tonun altına inmeyeceğine göre zemindeki iyileştirme ile birlikte travers tasarımının da gözden geçirilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.



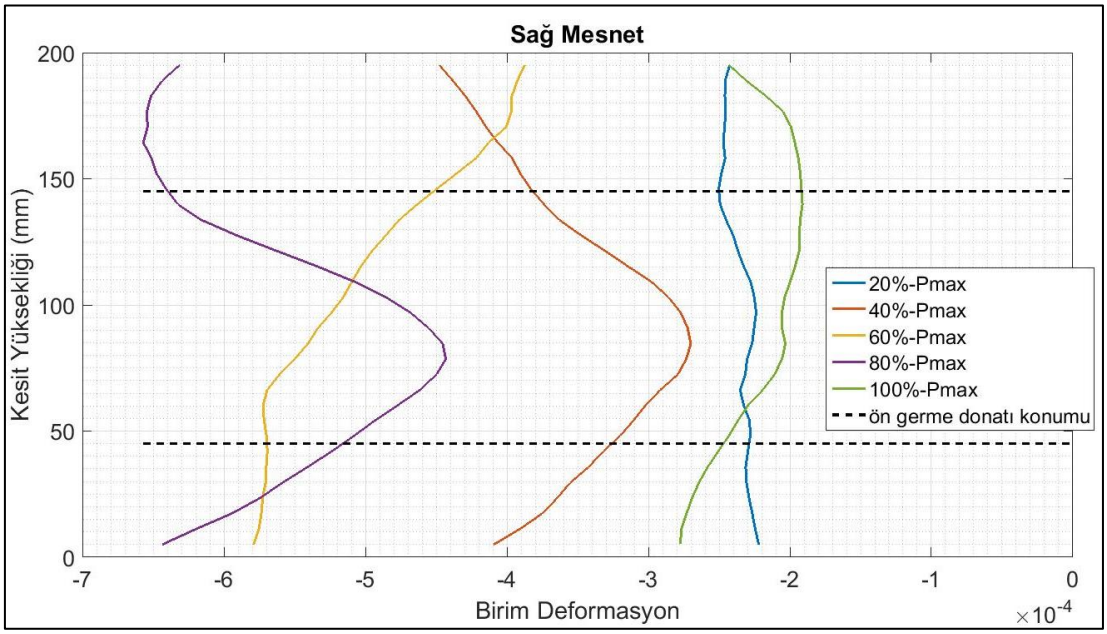
Şekil 5.31. Sol mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.32. Travers ortası birim deformasyonlar



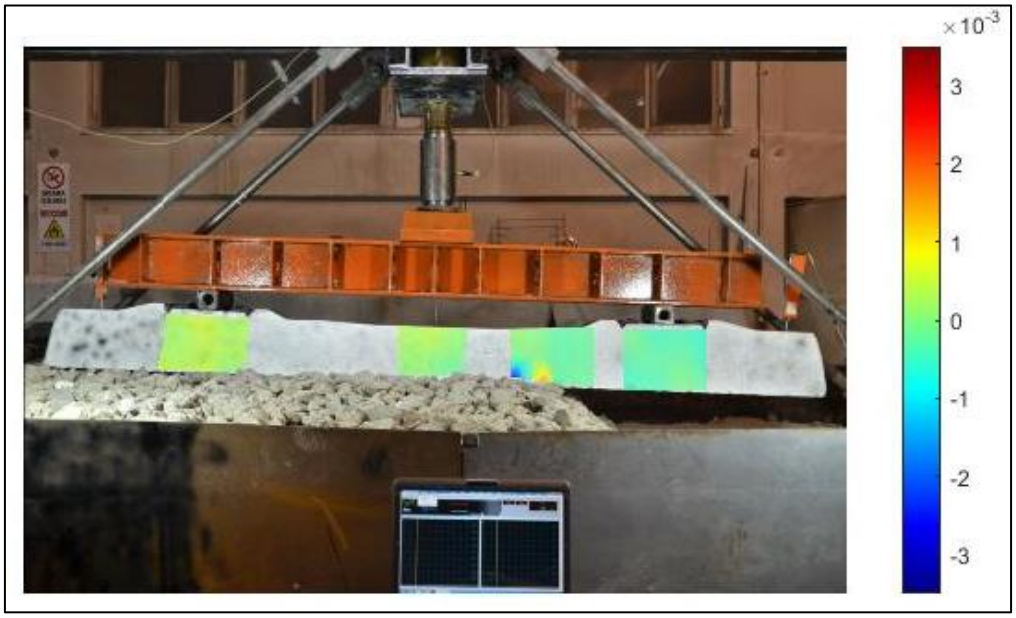
Şekil 5.33. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



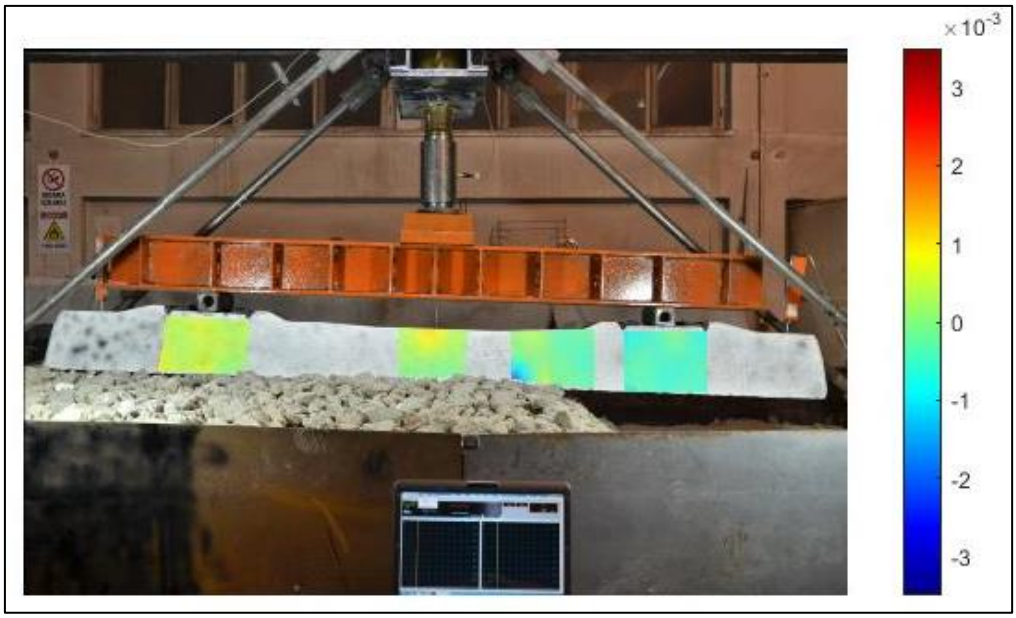
Şekil 5.34. Sağ mesnet birim deformasyonlar



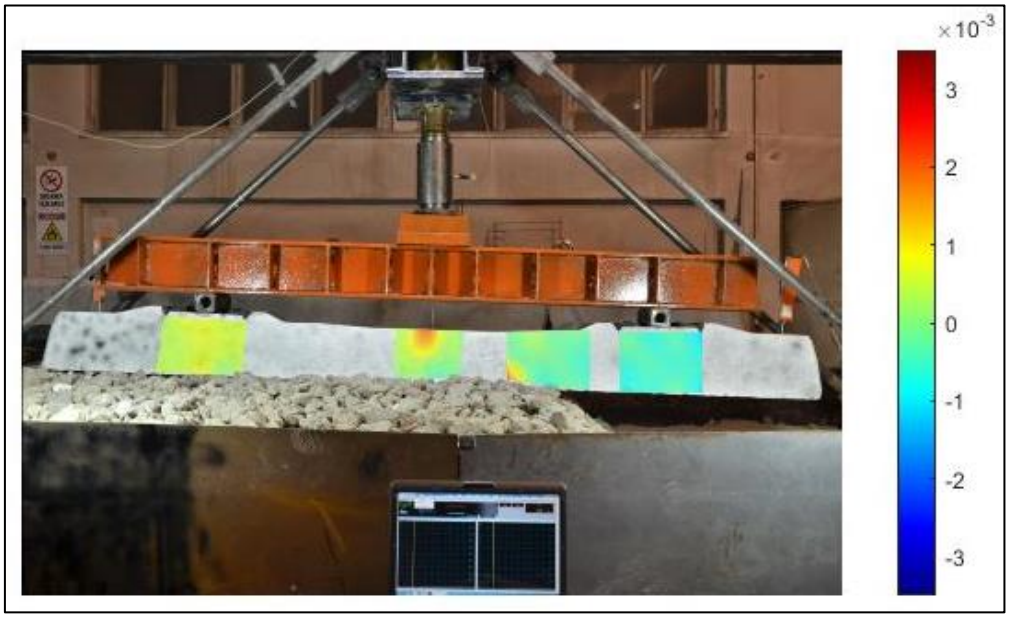
Resim 5.34. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



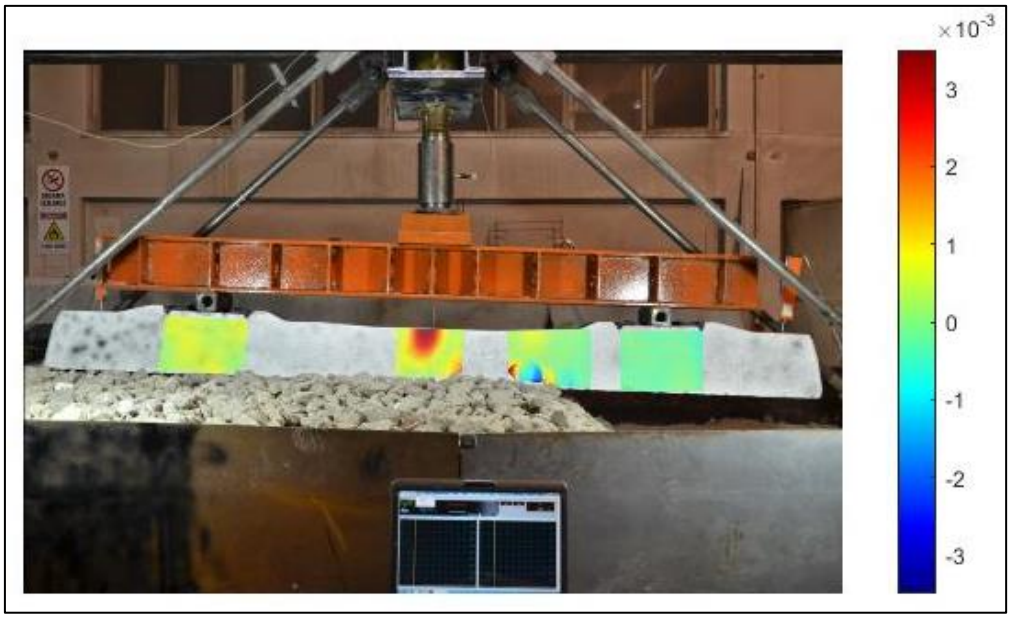
Resim 5.35. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.36. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.37. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

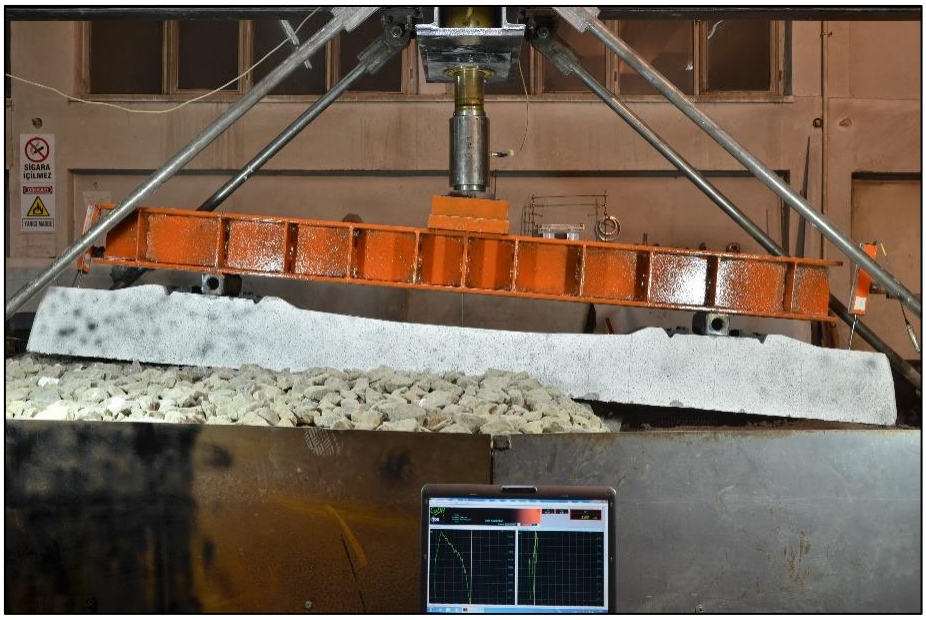


Resim 5.38. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

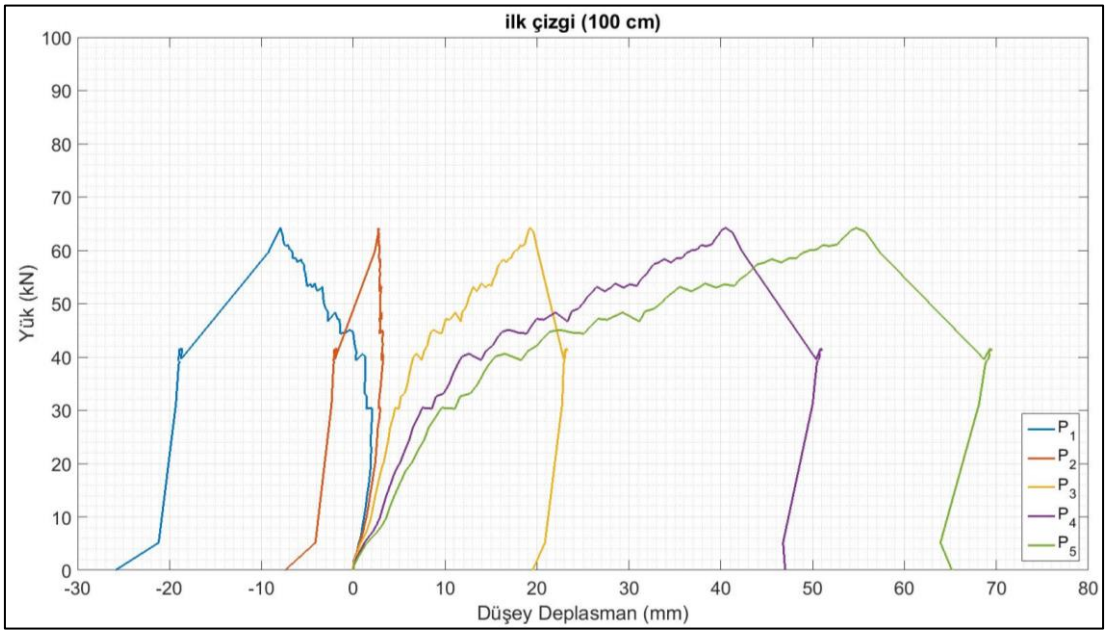
Balastın travers altında eksilmesi durumunda travers ortasının daha çok zorlandığı Resim 5.38’ de traversin tam ortasında ki birim deformasyon değerinden de açıkça görülmektedir. Orta noktadaki birim deformasyon değeri üstteki ön germe halatına kadar çatlak oluşum sınır değerini aşmıştır.

g) Geogrid ile yapılan yedinci aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 12,5 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 65 kN yük yüklenebilmiştir.

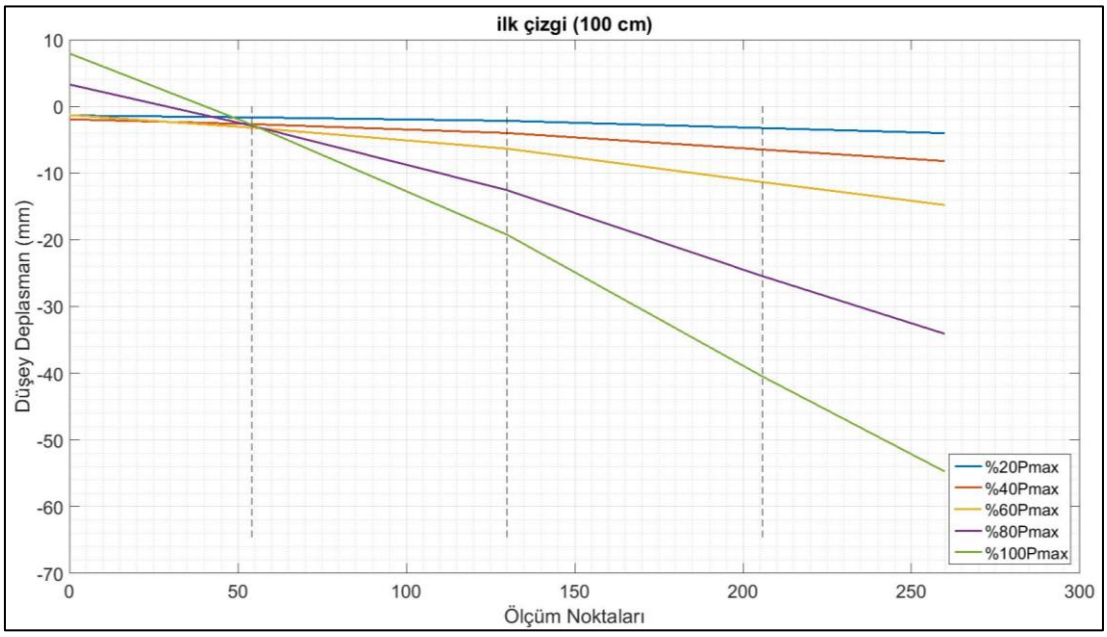


Resim 5.39. Geogrid ile yedinci deney aşaması



Şekil 5.35. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

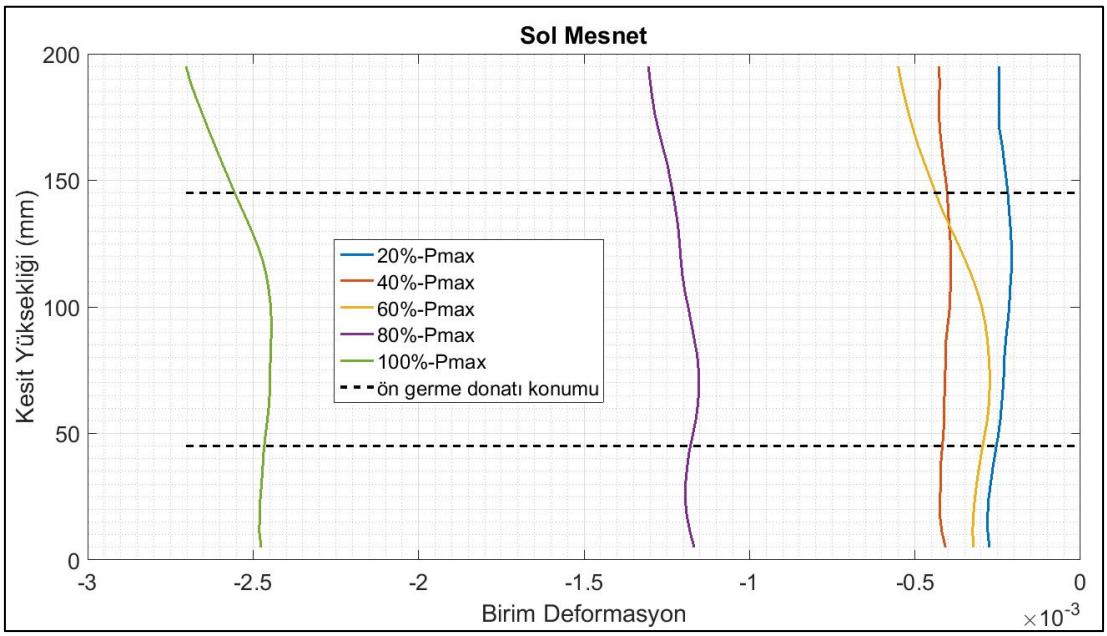
Geogrid tabanlı deneyde artık son aşamaya gelinmiş ve travers üzerinde artan her bir yük aşamasında traversin gözle görülür ölçüde açısal deformasyona uğradığı yüklemenin artık deplasmanın arttığı ölçüde artmadığından dolayı 65 kN seviyelerinde deney sonlandırılmıştır. Traversin hiçbir noktasındaki yüklemenin boşaltılması aşaması elastik olmayıp travers yeni bir zemin bulana kadar düşey deplasman yapmaya devam edeceği anlaşılmıştır. Bu son yüklemede boşaltılan travers ucunda deplasman artışı devam ederken yük artık yatay seyredince yükleme sonlandırılmış ve deplasman 68 mm seviyelerine kadar çıkmıştır. Şekil 5.35. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar' da görüldüğü gibi artık traversin sağ ucundaki P1 noktasının yukarı yönlü deplasmanı mesneti ifade eden P2 noktasında da yukarı yönlü gerçekleşmiştir. Bu durumda travers artık rayın traverse bastığı noktadan balasta yük aktarmıyacak traversin ortasında yük aktarmaya başlayacaktır.



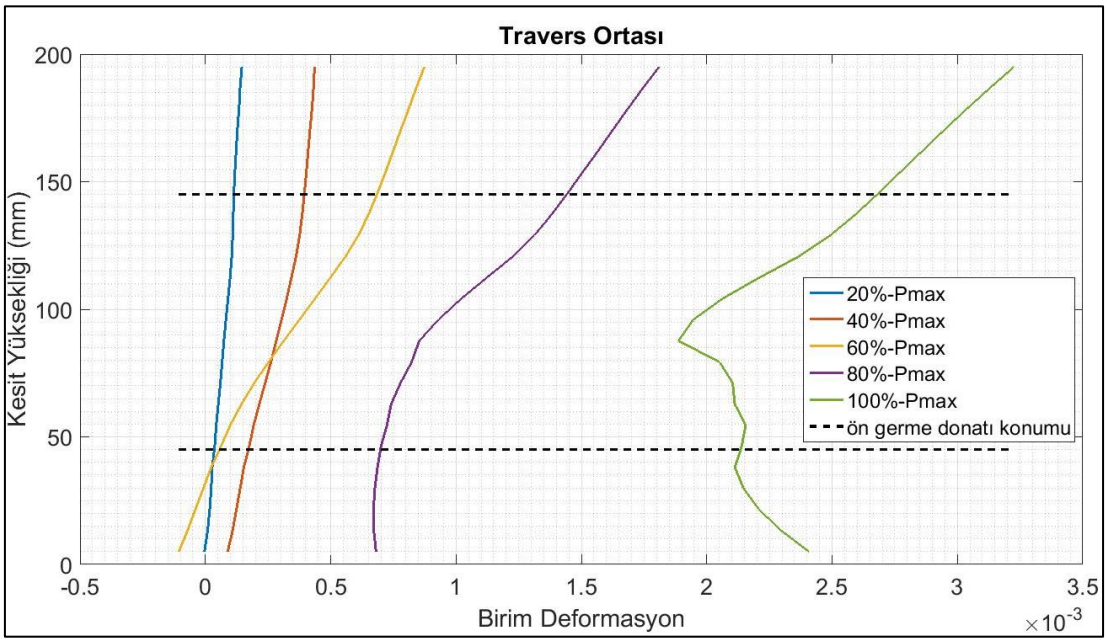
Şekil 5.36. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

Bu deney aşamalarının hiçbirisinde travers üzerinde gözle görülür bir çatlak meydana gelmemiştir. Demir yolu hattı boyunca sel gibi doğal afetlerden dolayı balastın adım adım boşaldığı düşünüldüğünde travers ve ray ağırlığının balast ve geogrid etkileşimini korumaya yardımcı olacağı düşünülmektedir. Fakat selin akış doğrultusunda yavaş yavaş erozyona uğraması ihtimaline karşı geogridin sel sularına karşı boşalmaya karşı koyması tek başına zor olacaktır.

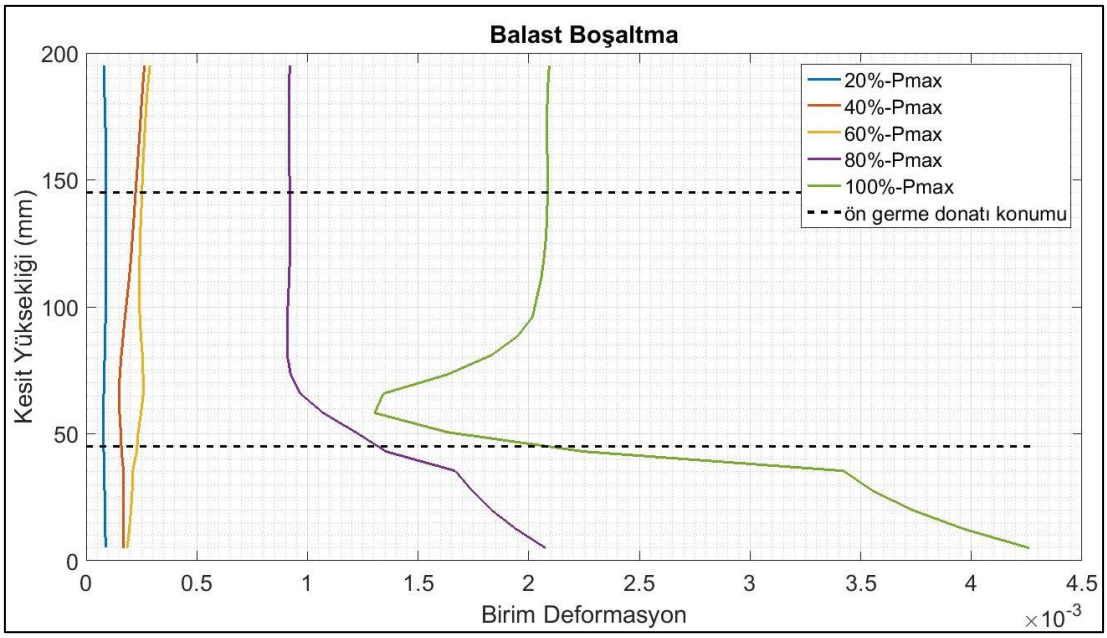
Bu son aşamaya kadar Yük - Düşey Deplasman grafiklerinden alınan ölçümlerde P5 noktasında toplam kalıcı düşey deplasman aşağı yönlü 165 mm olarak gerçekleşmiştir. P1 noktasında ise yukarı yönlü 25 mm olarak gerçekleşmiştir.



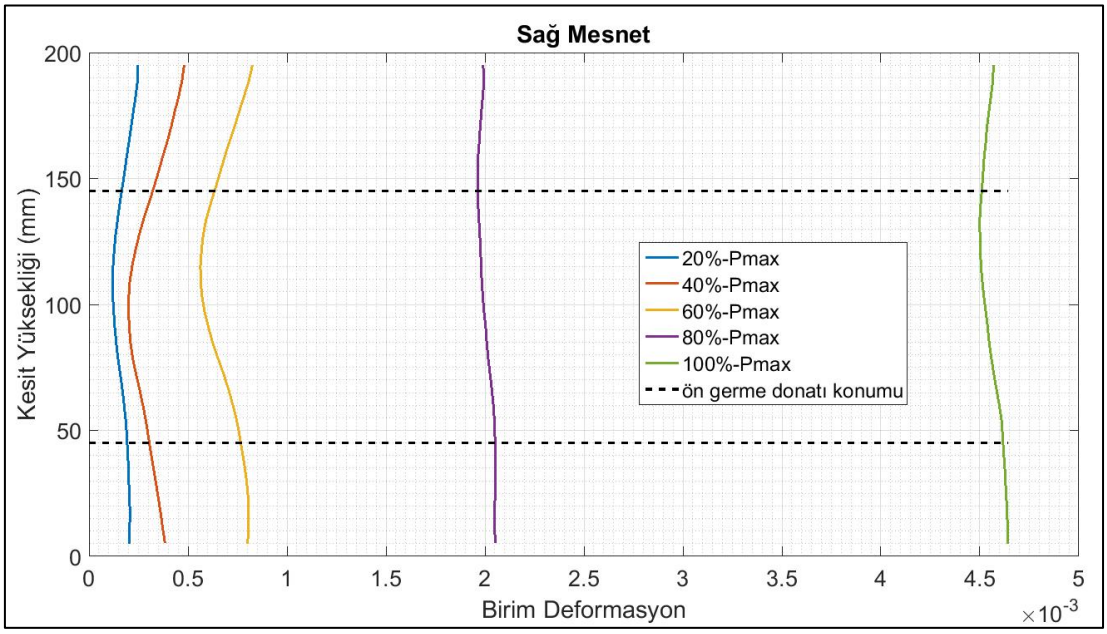
Şekil 5.37. Sol mesnet birim deformasyonlar



Şekil 5.38. Travers ortası birim deformasyonlar



Şekil 5.39. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



Şekil 5.40. Sağ mesnet birim deformasyonlar



Resim 5.40. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.41. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.42. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.43. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.44. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

5.2. Geocell' li Balast Yatağı Deney Ortamı

Balast altında yer alan subbalast tabaka için Resim 5.45. te görüldüğü gibi 7 cm kum tabaka şeklinde subbalast tabaka oluşturulmuştur. Üzerine ise Resim 5.46. da görülen 10 cm yüksekliğinde iki sıra şaşırtmalı geocell serilerek içleri 31.5 mm ile 63 mm dane çaplı balast taşları doldurulmuştur. Oluşan 20 cm yükseklikteki tabaka üzerine 10 cm daha balast tabaka serilerek travers yatağı tamamlanmıştır. Travers altı ortam hazır edildikten sonra Resim 5.47. görülen B70 tipi ön germeli beton travers balast tabakasının üzerine yerleştirilmiş ve deney düzeneği tamamlanmıştır.

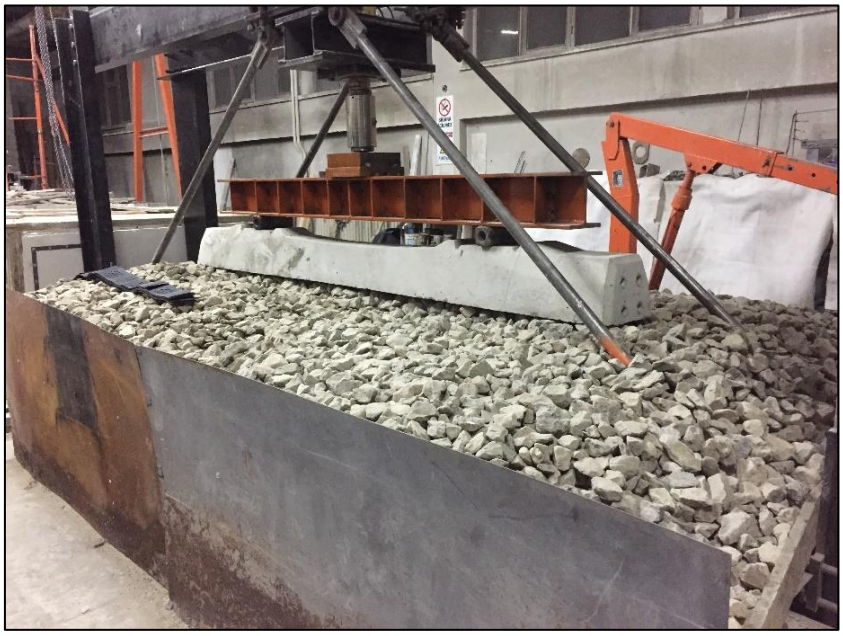


Resim 5.45. Subbalast tabakası (7 cm kum tabakası)

Deney başlamadan önce ilk olarak tam dolu havuzda balastın sıkışıp yerine oturması için ölçümler yapılmadan yüklemeler yapılmış ve balastın boşluğu alınarak gerçeğe en yakın ortamın oluşturulması sağlanmıştır. Daha sonra sekiz aşamada traversin ortasına kadar travers altında balast boşaltılarak ölçümler alınmıştır. Birinci aşama tam dolu havuz, ikinci aşama travers omuz genişliği, üçüncü aşama travers ucundan 25 cm içe doğru, dördüncü aşamada rayın traverse bağlandığı yere kadar boşaltma yapılmıştır. Beşinci aşama rayın traverse bağlandığı yerden 25 cm içe doğru, altıncı aşamada bir önceki aşamadan itibaren 12.5 cm daha içe doğru boşaltma yapılmıştır. Yedinci aşama da bir önceki aşamadan itibaren 25 cm daha boşaltma yapılarak rayın traverse bağlandığı yerden 50 cm içe doğru boşaltılmış ve sekizinci son aşama da bir önceki aşamadan itibaren 15 cm daha boşaltma yapılarak travers ortasına kadar balast boşaltması yapılarak ölçümler alınmıştır.



Resim 5.46. Şaşırtmalı olarak serilmiş geocell ile hazırlanmış düzenek



Resim 5.47. Deneye hazır tamamlanmış geocell içi balast dolgulu düzenek

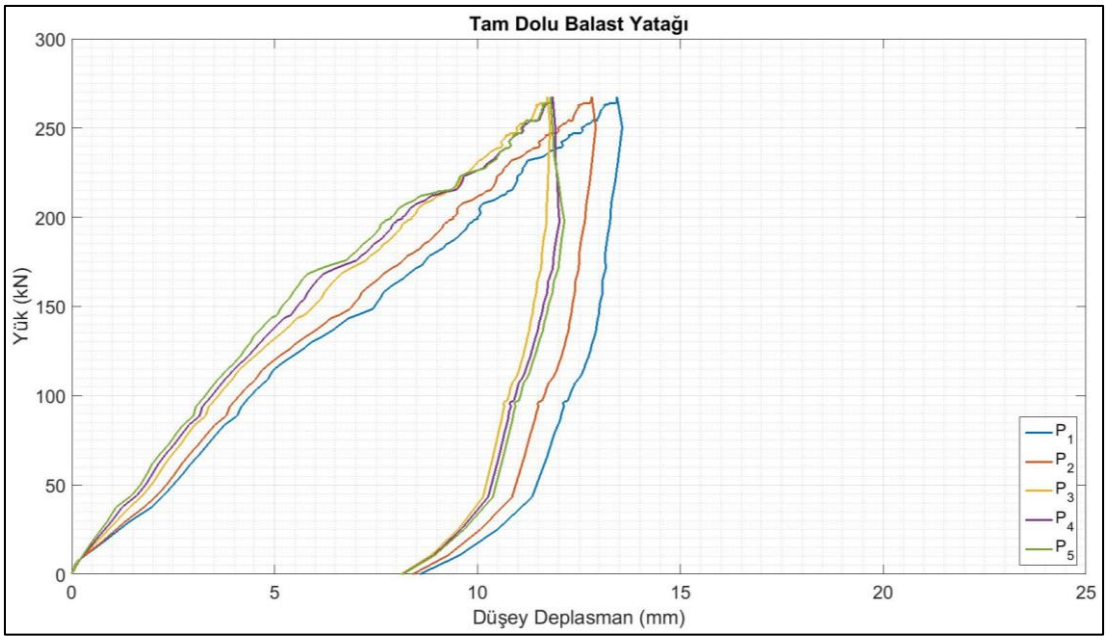
5.2.1. Geocell ile deney aşamaları ve analiz sonuçları

a) Geocell ile yapılan birinci aşama deney

Çift sıra şaşırtmalı geocell ile oluşturulan bu deney düzeneği traversin doğal ortamında 30 cm balast tabakasını 2 sıra şaşırtmalı 10 cm içi balast dolu geocell tabaka + 10 cm içi balast tabaka olmak üzere 30 cm yüksekliğinde bir balast yatağı oluşturulmuştur. Sağında ki ve solunda ki omuz genişlikleri eksiksiz bir şekilde hazırlanmış ve 30 cm omuz genişliğinin bitiminde oluşturulan şevlere de dikkat edilmek suretiyle tam dolu balast yatağıyla deney yapılmıştır. Deneyde demiryollarında raylara aktarılan dingil yükü 225 kN aşılarak traverse iki noktadan toplam 271 kN yük verilmiştir.

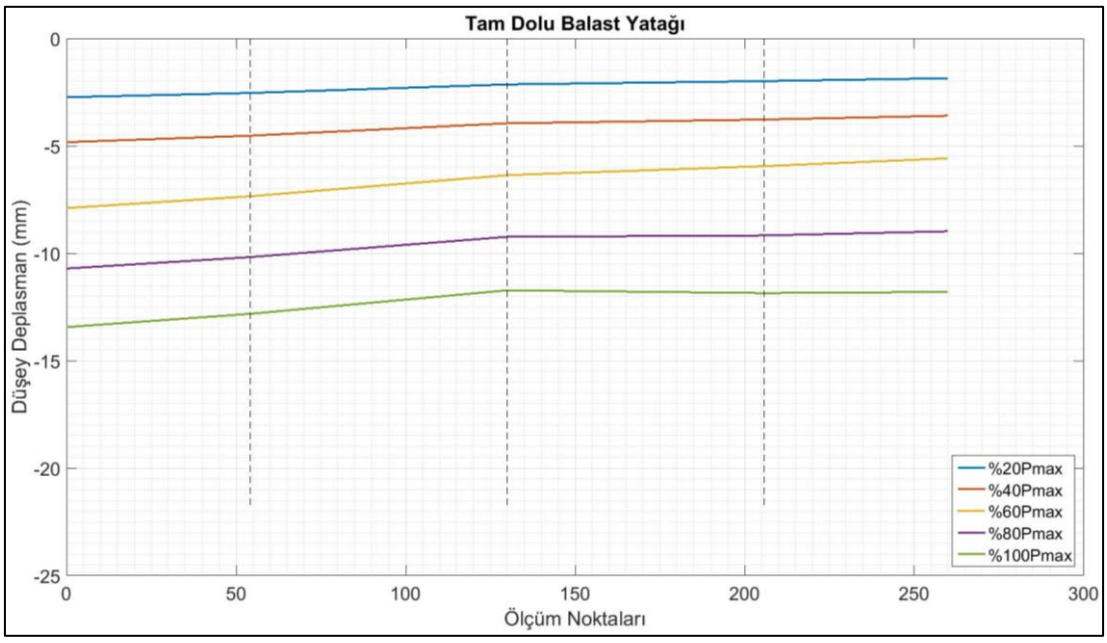


Resim 5.48. Geocell ile birinci deney aşaması



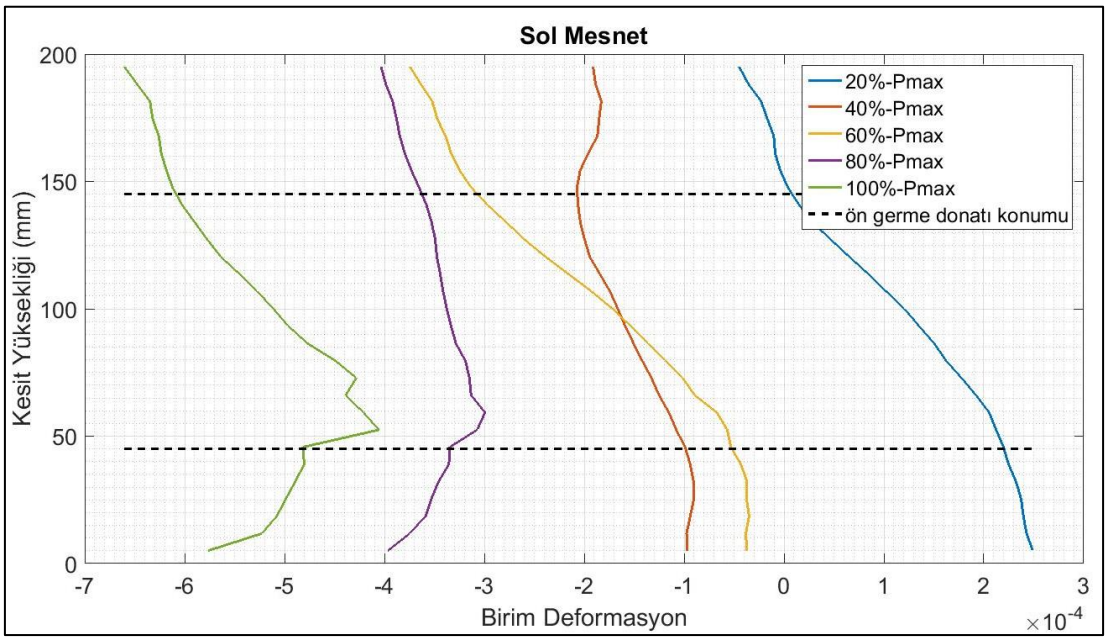
Şekil 5.41. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Balast oturmaların gerçekleştikten sonra yaklaşık 8 mm bir balast çökmesi gerçekleşmiş ve bu çökme traversin tabanının her yerinde yükün tekrar boşaltılması ile aynı seviyede gerçekleşmiştir. Travers sağ ucunda P1 ve P2 noktaları yükün maksimum değerinde biraz daha fazla oturma yaptığı ancak yük boşaltıldıktan sonra diğer üç noktayla aynı noktada bittiği gözlemlenmektedir.

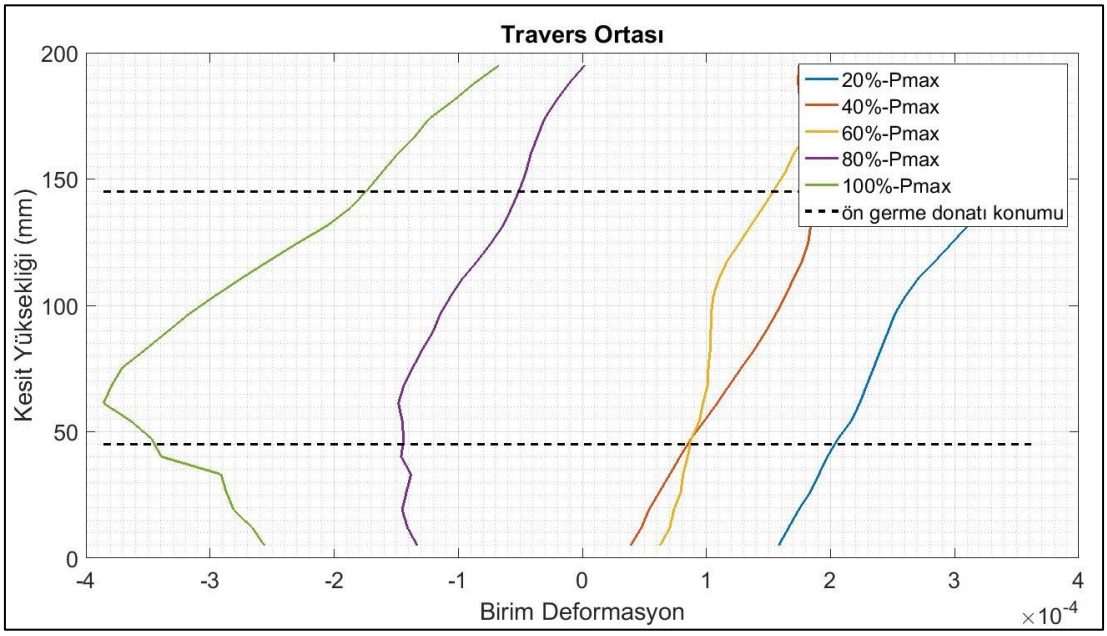


Şekil 5.42. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

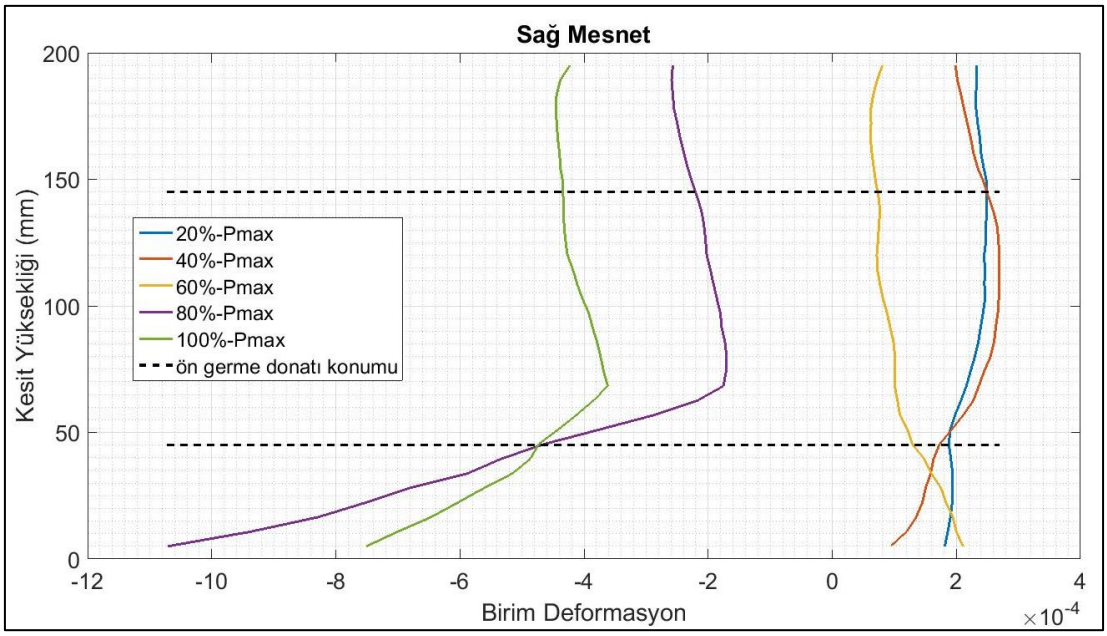
P1 ve P2 noktalarının diğer uçtaki P4 ve P5 noktalarına göre daha fazla oturması traverste de zorlanmanın olduğu göstermektedir. Travers ortasında üstte çekme altta basınç meydana getirmiştir.



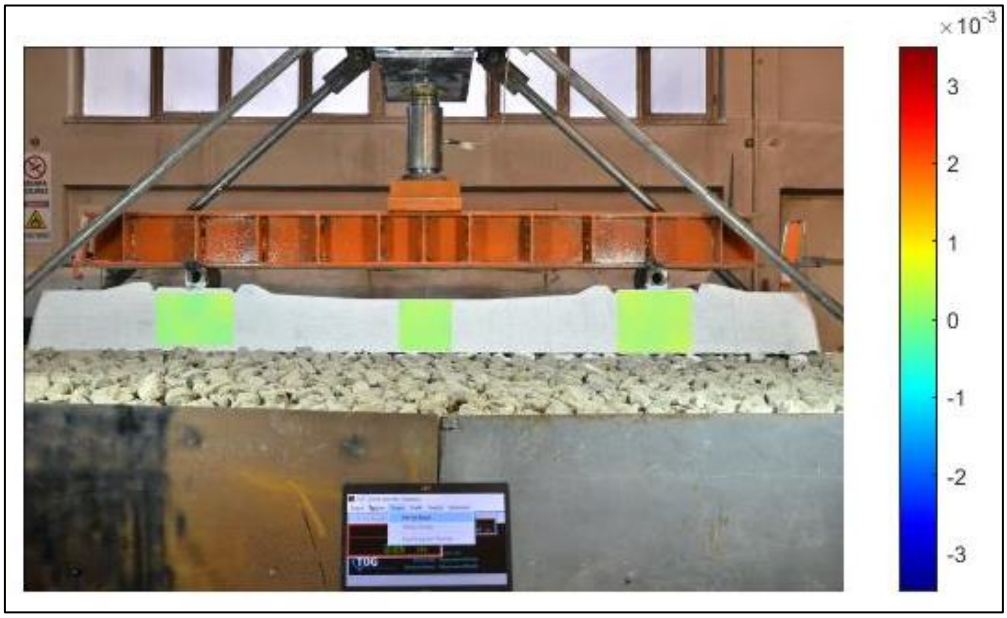
Şekil 5.43. Sol mesnet birim deformasyonlar



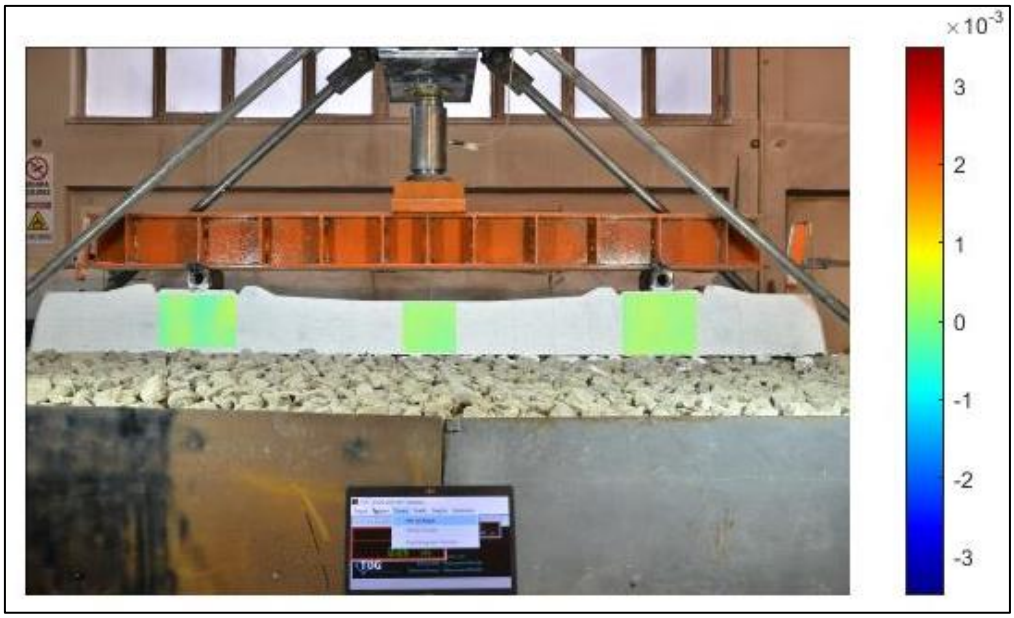
Şekil 5.44. Travers ortası birim deformasyonlar



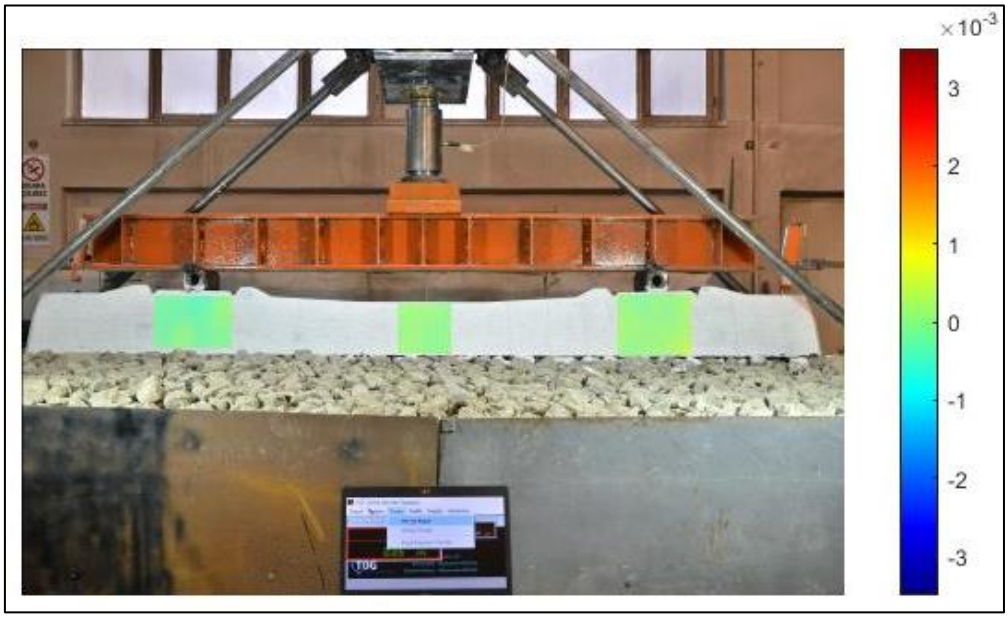
Şekil 5.45. Sağ mesnet birim deformasyonlar



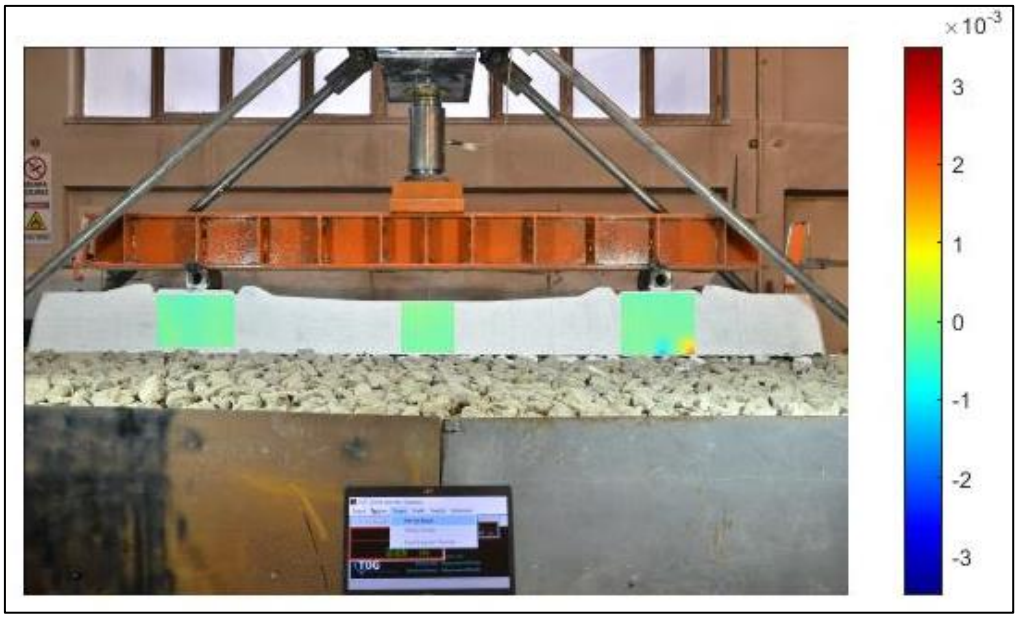
Resim 5.49. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



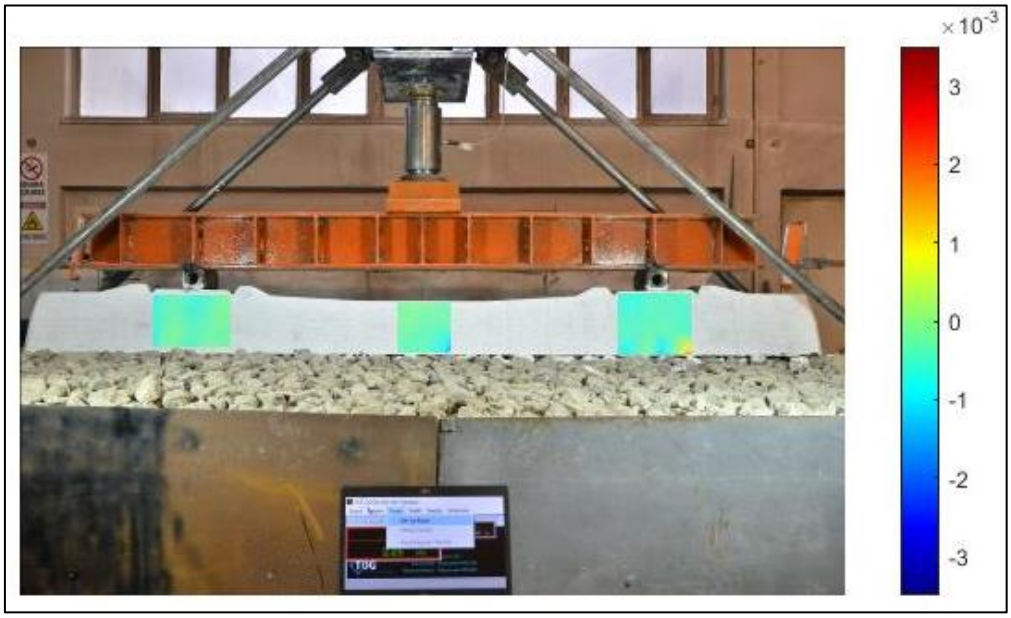
Resim 5.50. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.51. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



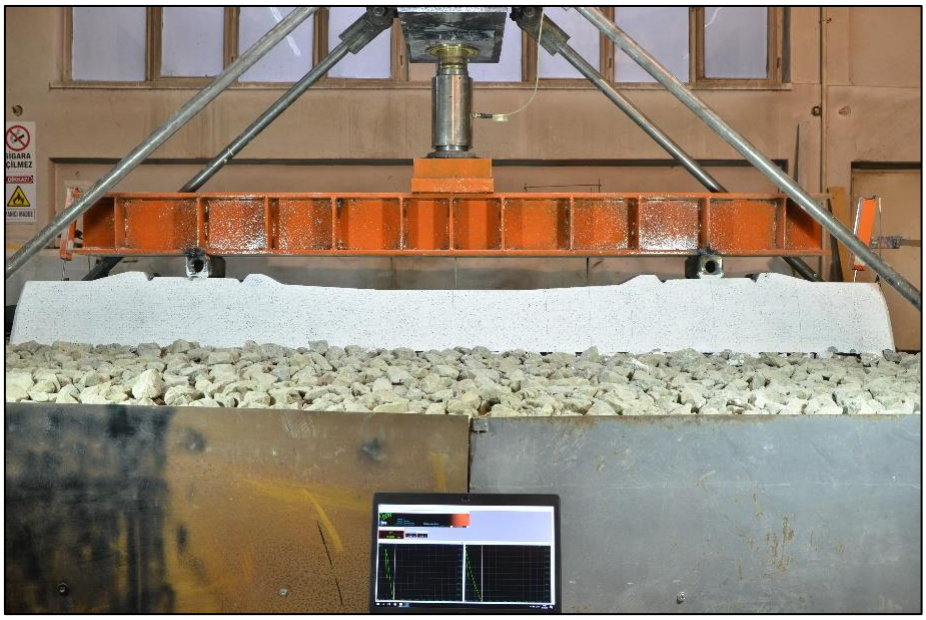
Resim 5.52. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



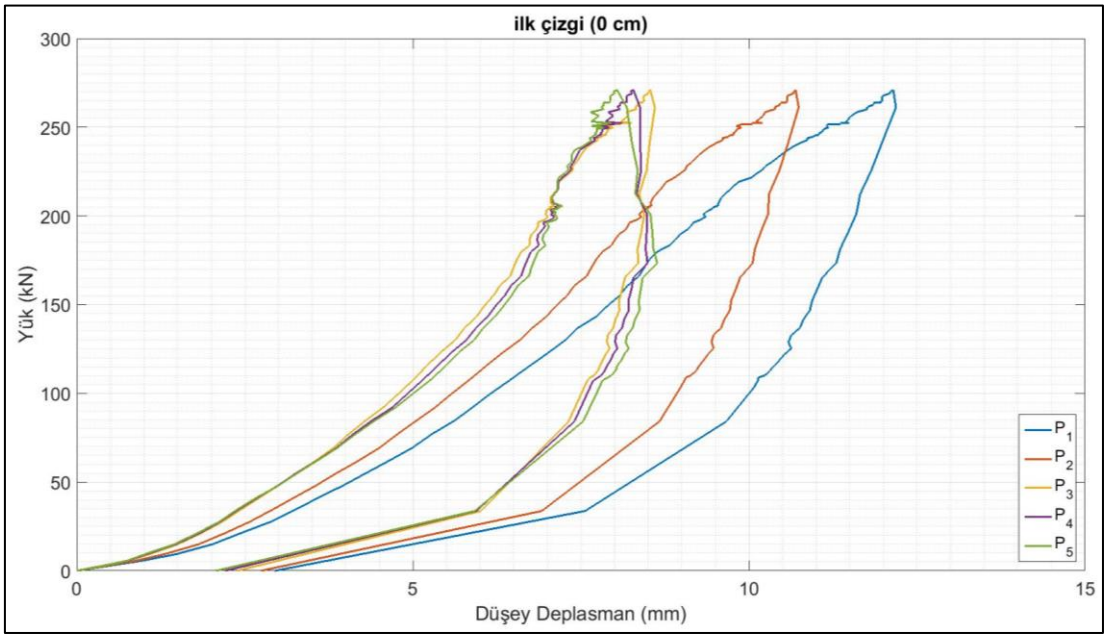
Resim 5.53. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

b) Geocell ile yapılan ikinci aşama deney

Yüklemenin 270 kN olarak gerçekleştiği bu deneyde traversin sağ tarafında ki balast travers ucuna kadar boşaltılmış ve yük yüklenmiştir.

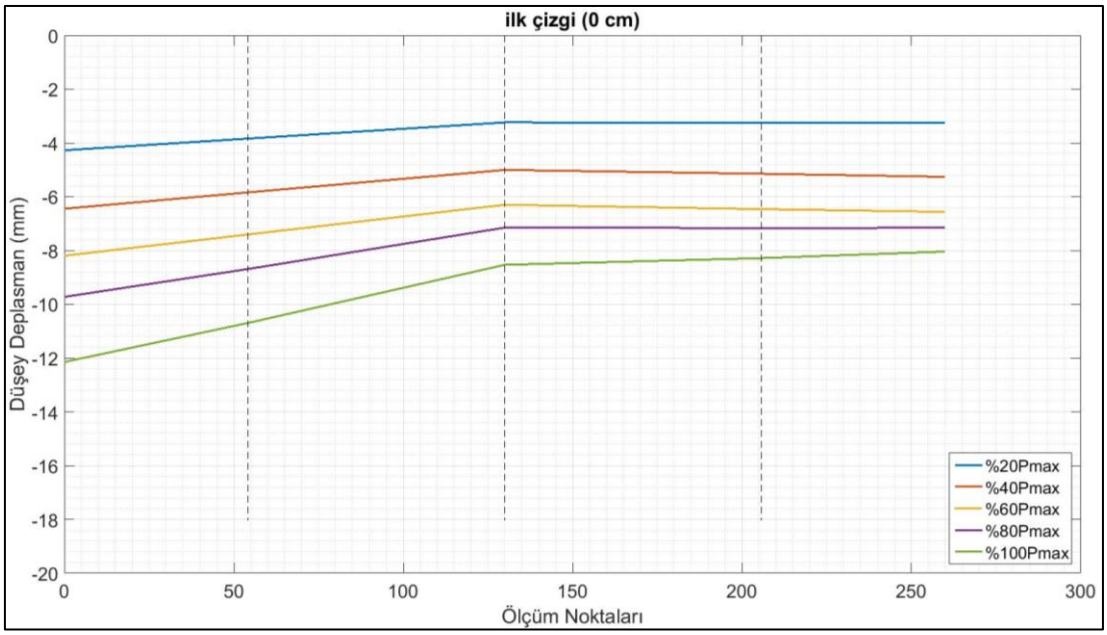


Resim 5.54. Geocell ile ikinci deney aşaması



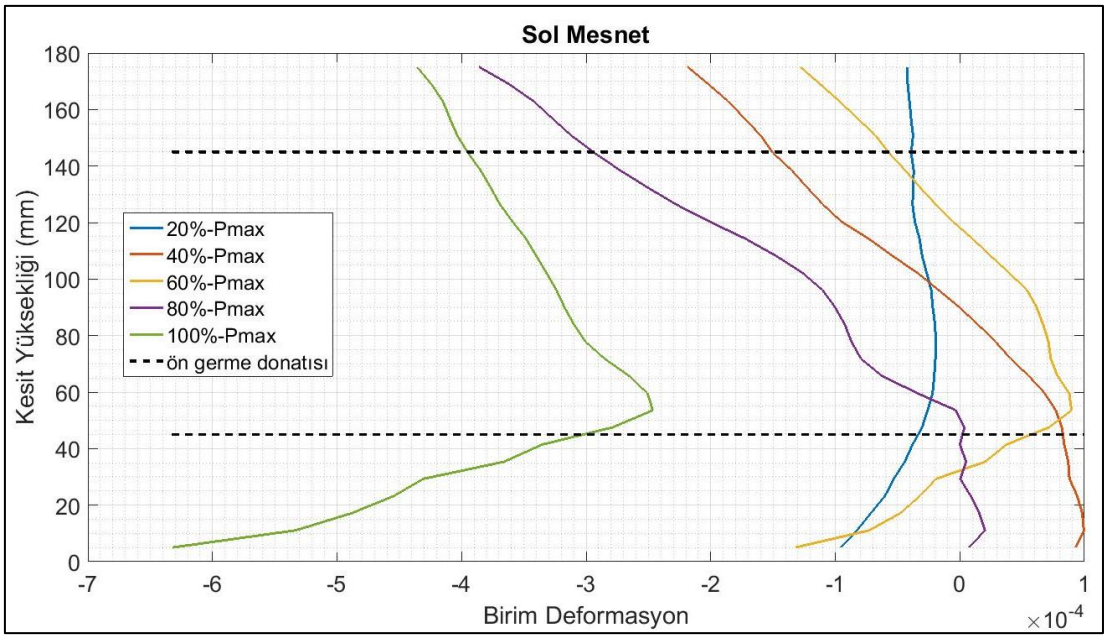
Şekil 5.46. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Yükleme bittikten sonra yaklaşık 2.5 mm daha balastın tüm travers altında çökme yaparak oturduğu gözlemlenmiştir. Yükleme maksimum seviyelerdeyken P1 ve P2 noktaları P4 ve P5 noktalarına göre 4 mm daha fazla oturma yapmıştır. Bu farklı oturma balastın geogrid deneyinde olduğu gibi yeterince sıkıştırılamadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

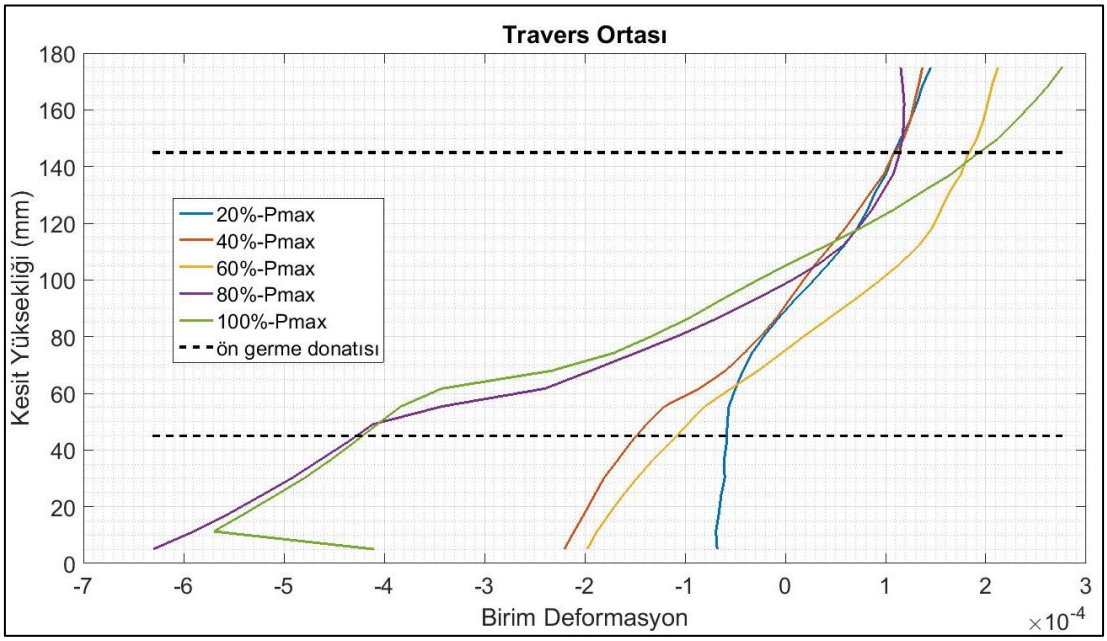


Şekil 5.47. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

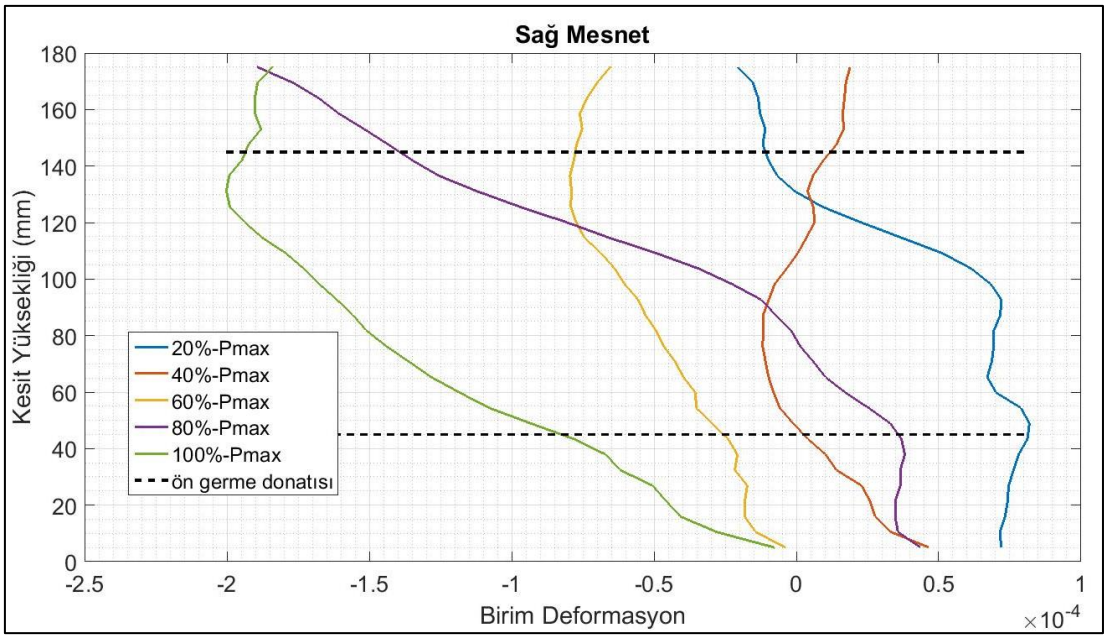
Her %20’ lik yükleme aşamalarında sol uçta traverste açısal deformasyonun giderek arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum demir yolu hattında balast boşalmasının olmaması durumunda bile hattın bir tarafında meydan gelebilecek en ufak zemin hareketlerinde bile traverste bir negatif eğilme momentini meydana getirmektedir. İki uç arasında meydana gelen 4 mm’ lik farklı deplasmanlar tekrar eden dinamik yükler altında ön germeli traverste performans kaybına neden olacaktır.



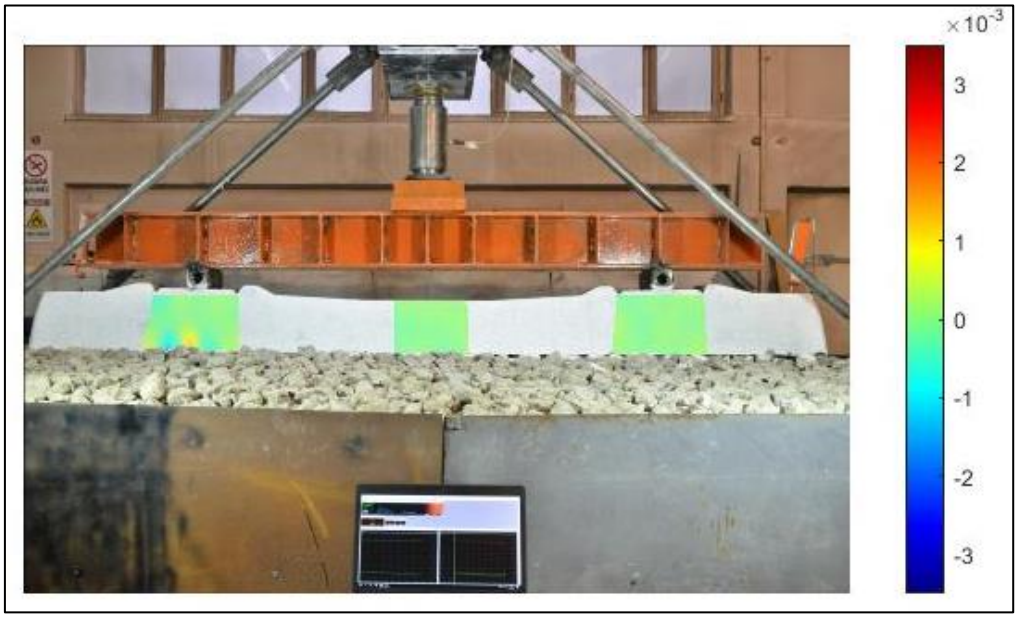
Şekil 5.48. Sol mesnet birim deformasyonlar



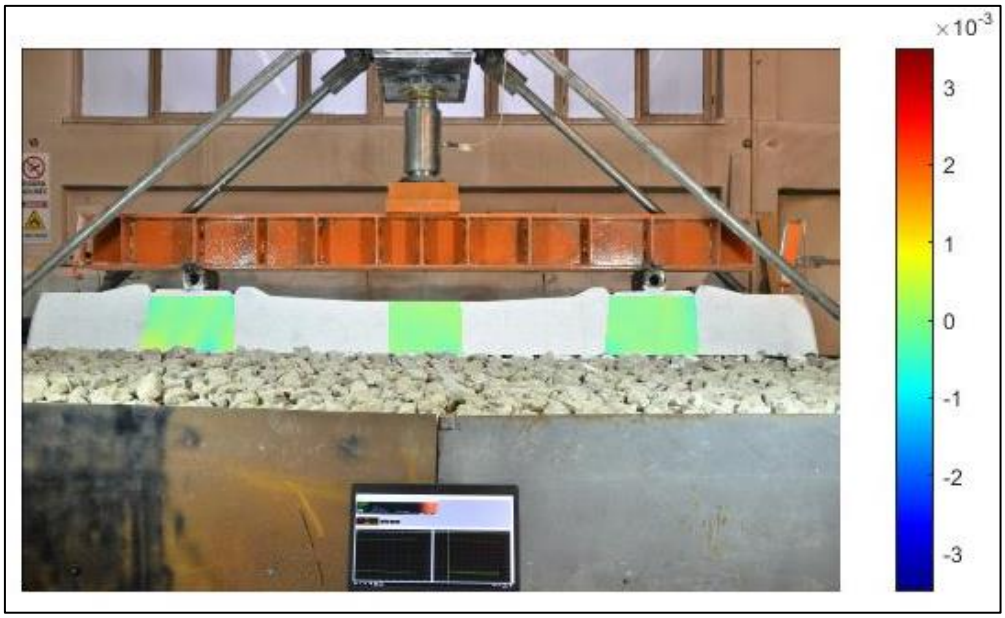
Şekil 5.49. Travers ortası birim deformasyonlar



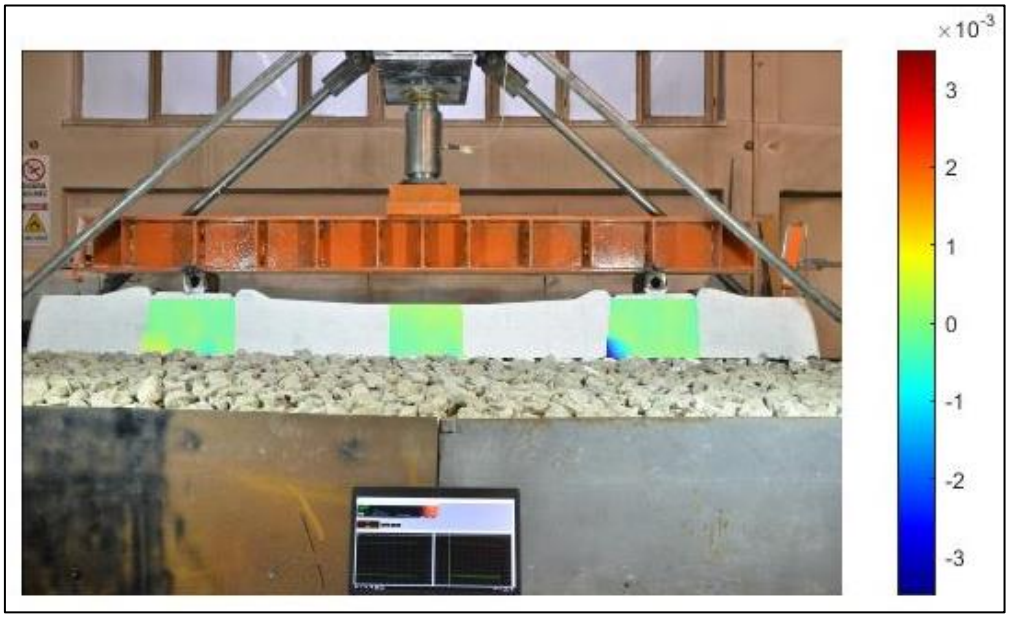
Şekil 5.50. Sağ mesnet birim deformasyonlar



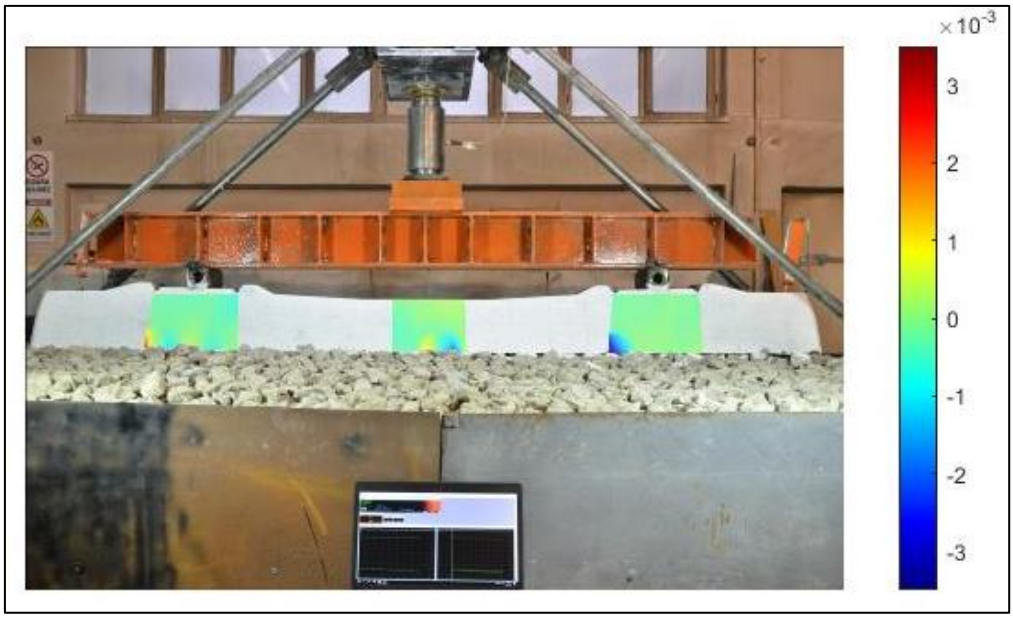
Resim 5.55. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



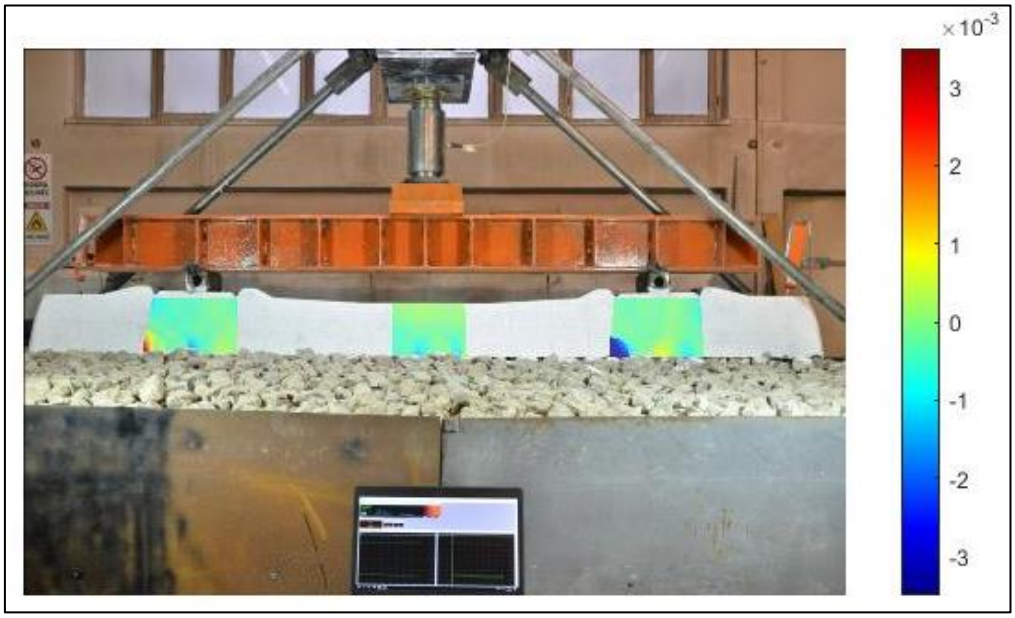
Resim 5.56. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.57. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



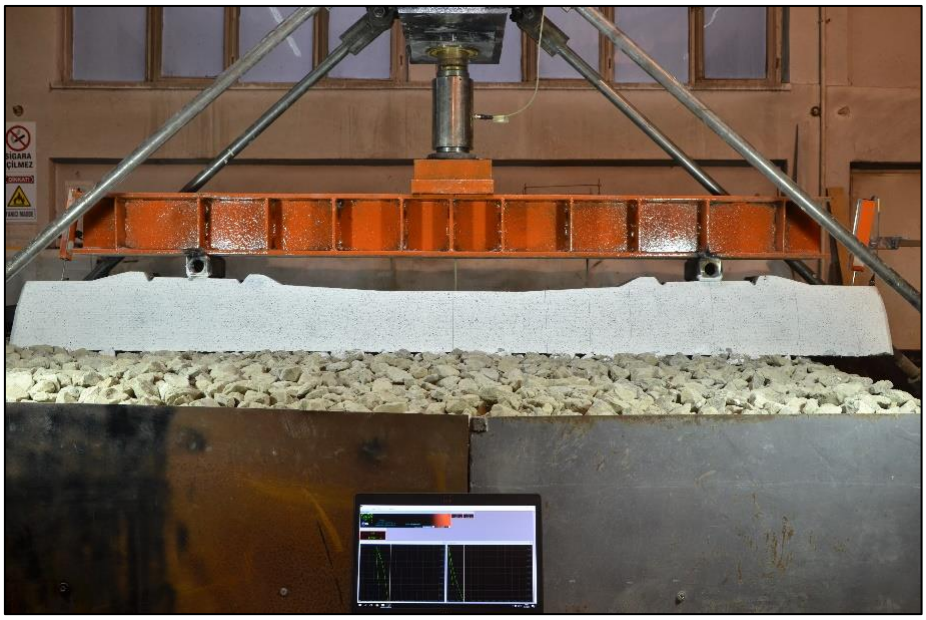
Resim 5.58. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



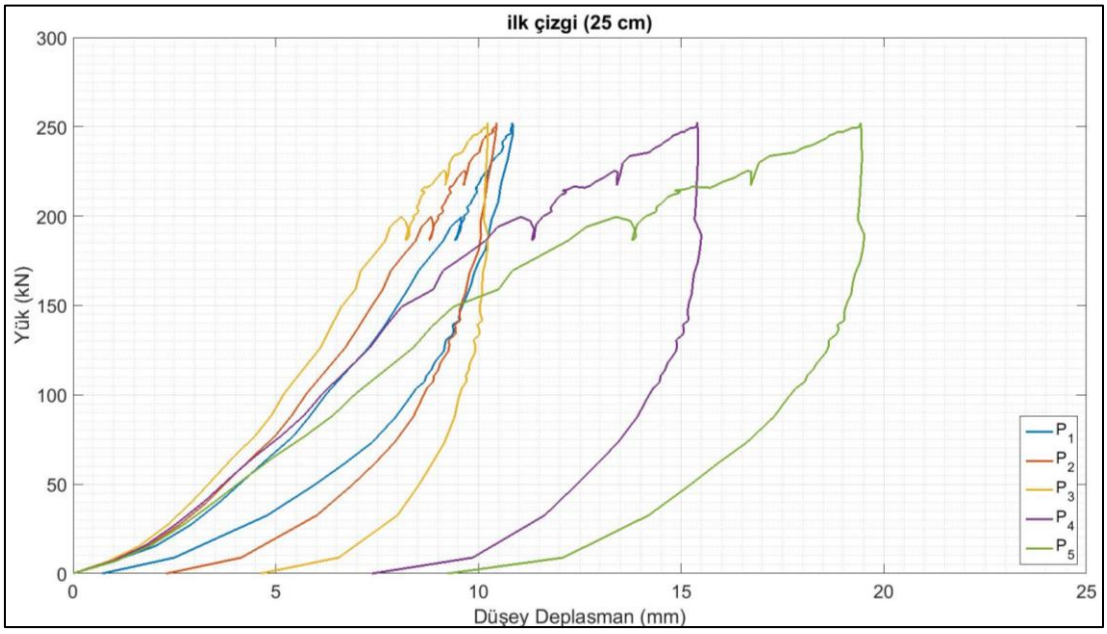
Resim 5.59. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

c) Geocell ile yapılan üçüncü aşama deney

Bu aşamada traversin sağ ucundan traversin ortasına doğru olan bölgedeki 25 cm uzunluğunda ki balast tabakası boşaltılıp 251 kN yük yüklenmiştir.

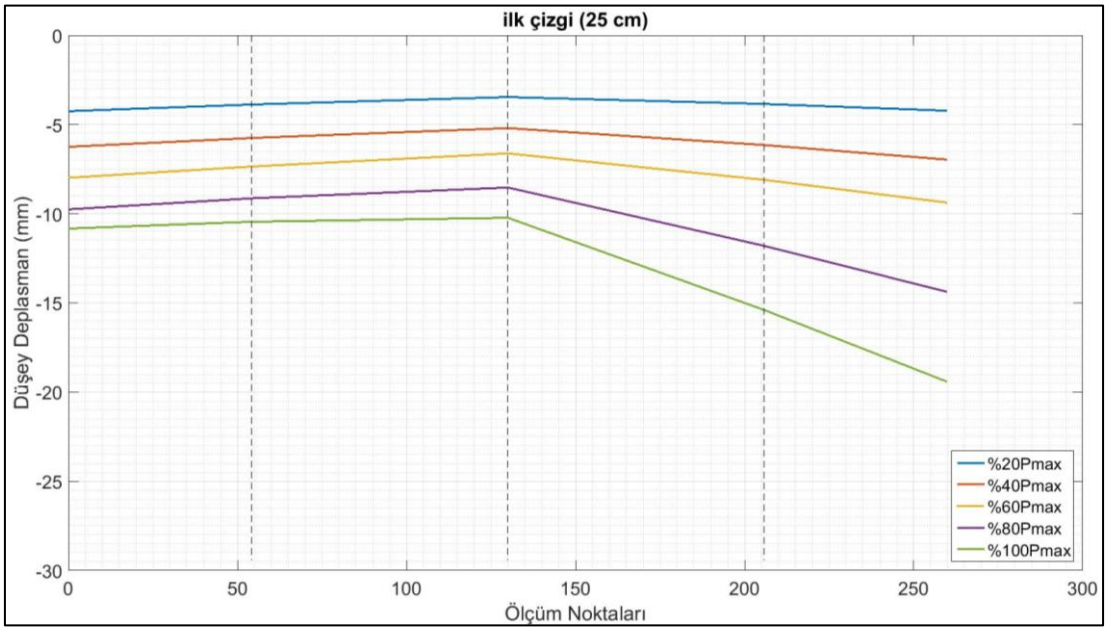


Resim 5.60. Geocell ile üçüncü deney aşaması



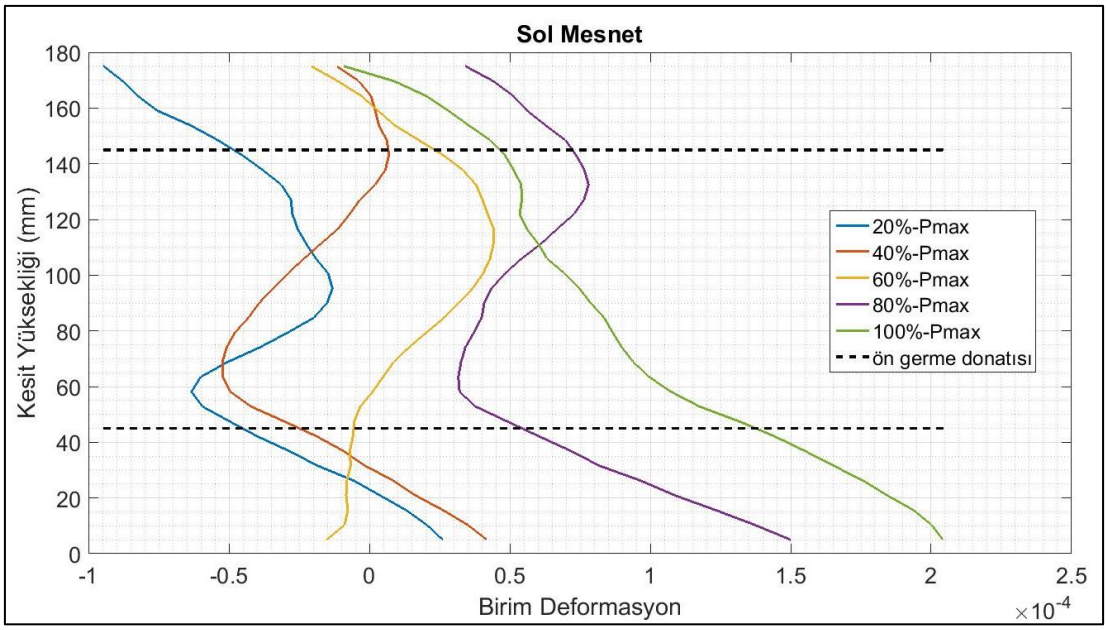
Şekil 5.51. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

P1 noktasından P5 noktasına doğru her bir yüklemeden sonra ki geri dönüşte açısal deformasyonlar ve kalıcı oturmalar plastik bir durumdadır. Birinci ve ikinci aşamalarda balast oturmalarında ve bu aşamada ki yükün yüklenip boşaltılması aşaması benzerlik göstermektedir. Özellikle bu aşamada geocell içerisinde hareketi sınırlandırılmış balast yine de P5' te kalıcı bir düşey deplasman yapmaktadır. Buda gösteriyorki traversin omuz kısmında ki balastın genişliği balastın yataydaki hareketinde önemli bir kısıtlama getirmektedir.

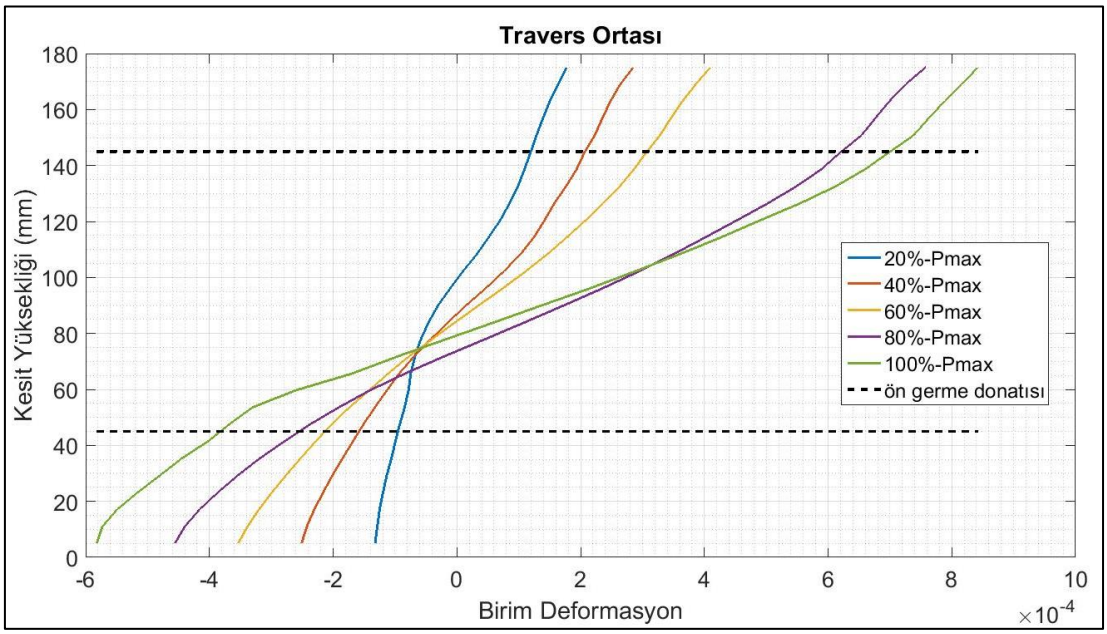


Şekil 5.52. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

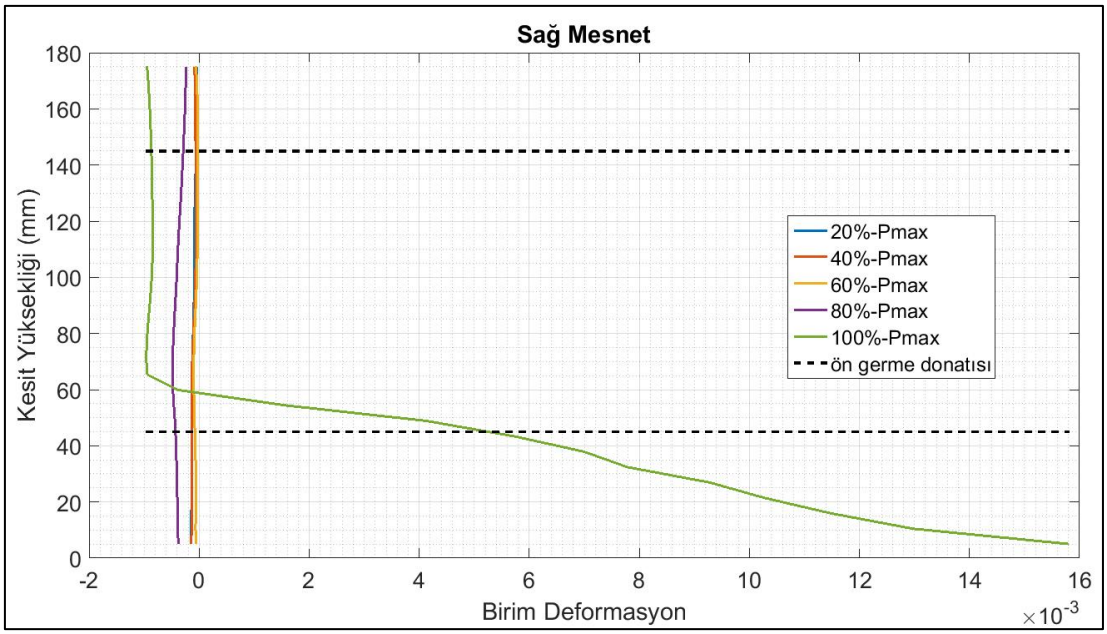
Geogrid ile oluşturulmuş aynı seviye boşaltma deney aşamasında traversin üzerinde ki düşey deplasman ölçümlerinde ki grafik Resim43 teki grafikten farklılık göstermektedir. Bu farklılık balastın geocell içerisinde hareketinin kısıtlanması ile birlikte traverse etkiyen yük traverste ciddi gerilme meydana getirmektedir. Traversin balast içerisine çökmemesi balasttaki kısıtlamanın ve balast danelerinin yatayda hareketsizliğinin sonucu olarak gerilmelerde artışı meydana getirmektedir. İlerleyen deney aşamalarında bu oluşan gerilmenin daha da büyüyeceği daha şimdiden açıkça görülmektedir.



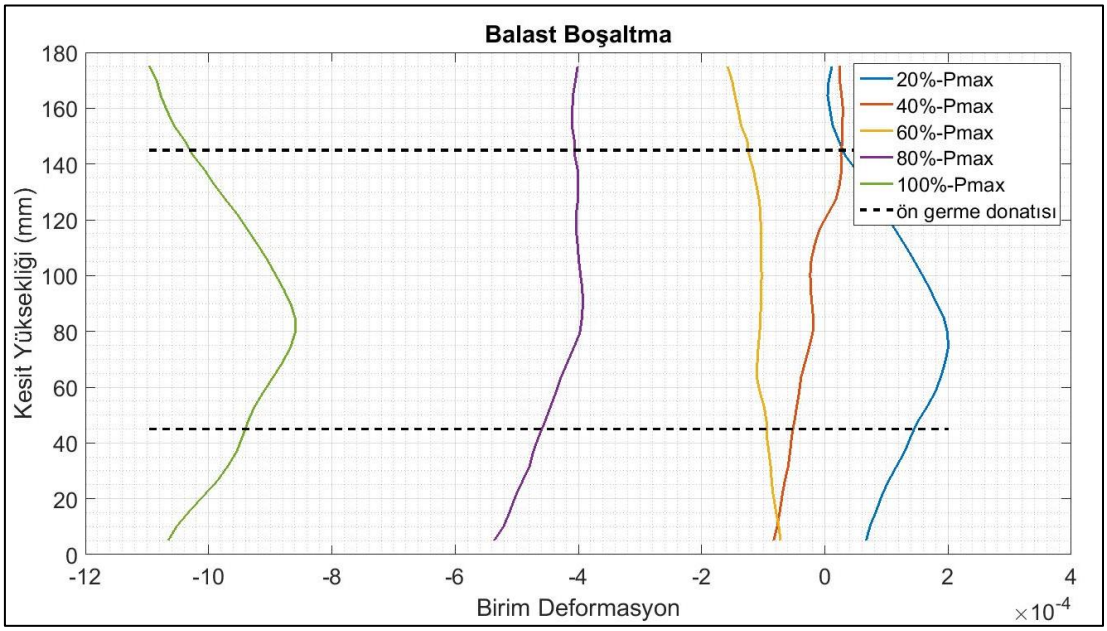
Şekil 5.53. Sol mesnet birim deformasyonlar



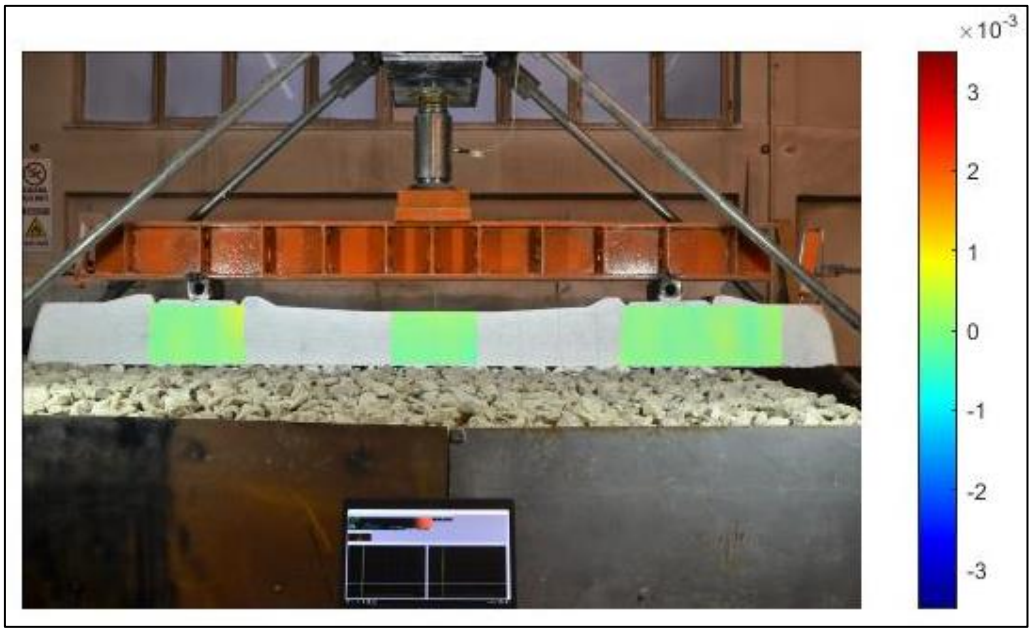
Şekil 5.54. Travers ortası birim deformasyonlar



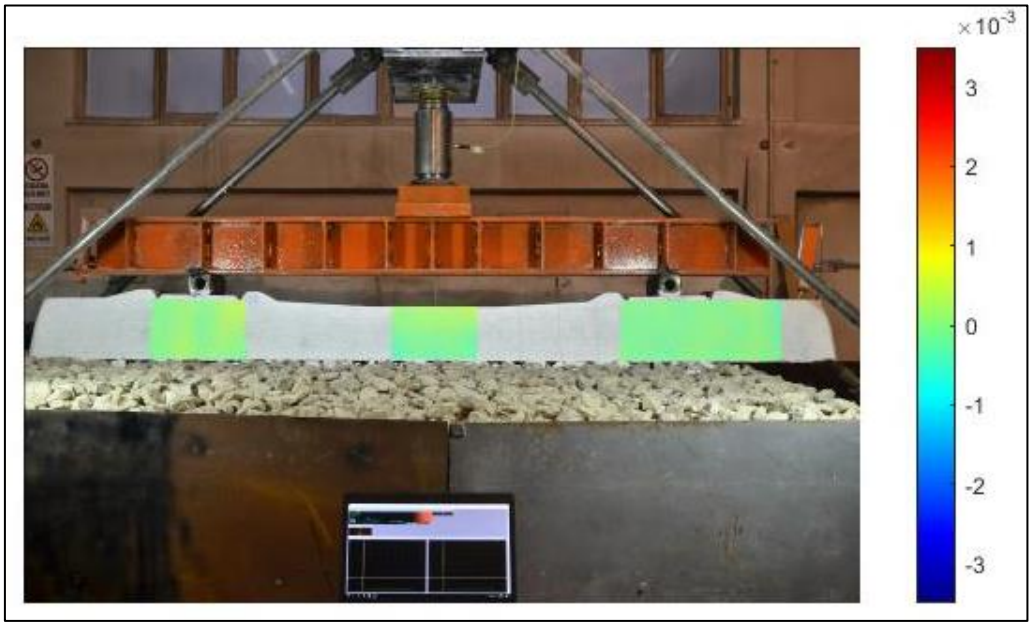
Şekil 5.55. Sağ mesnet birim deformasyonlar



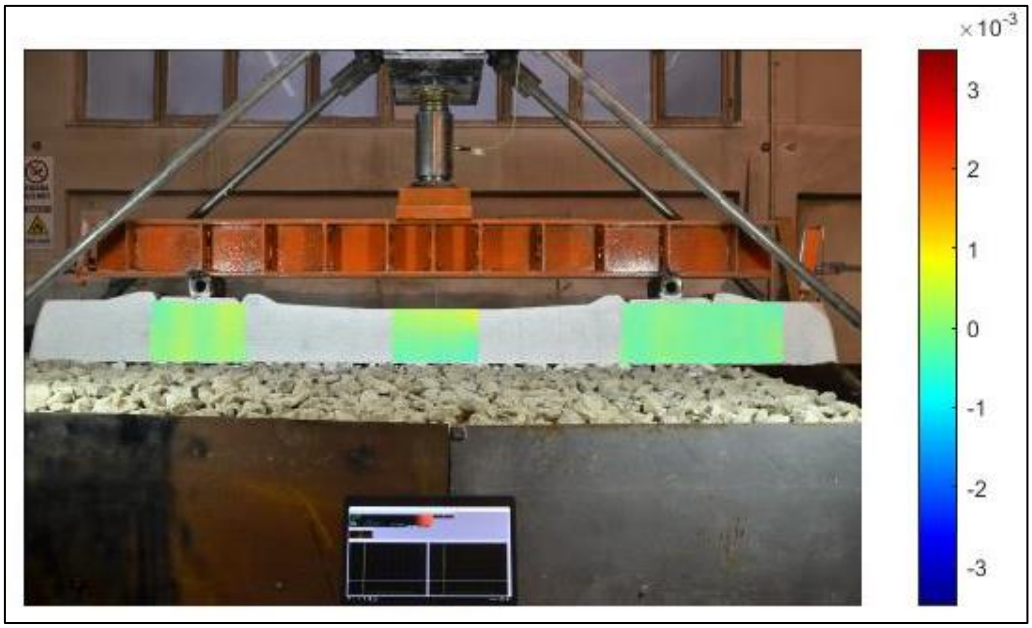
Şekil 5.56. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



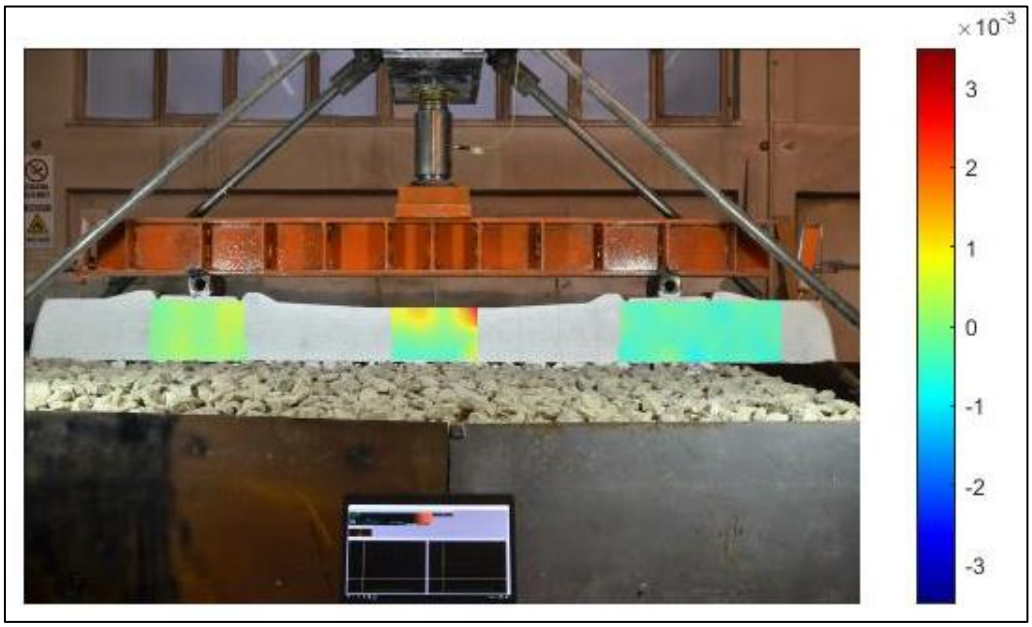
Resim 5.61. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



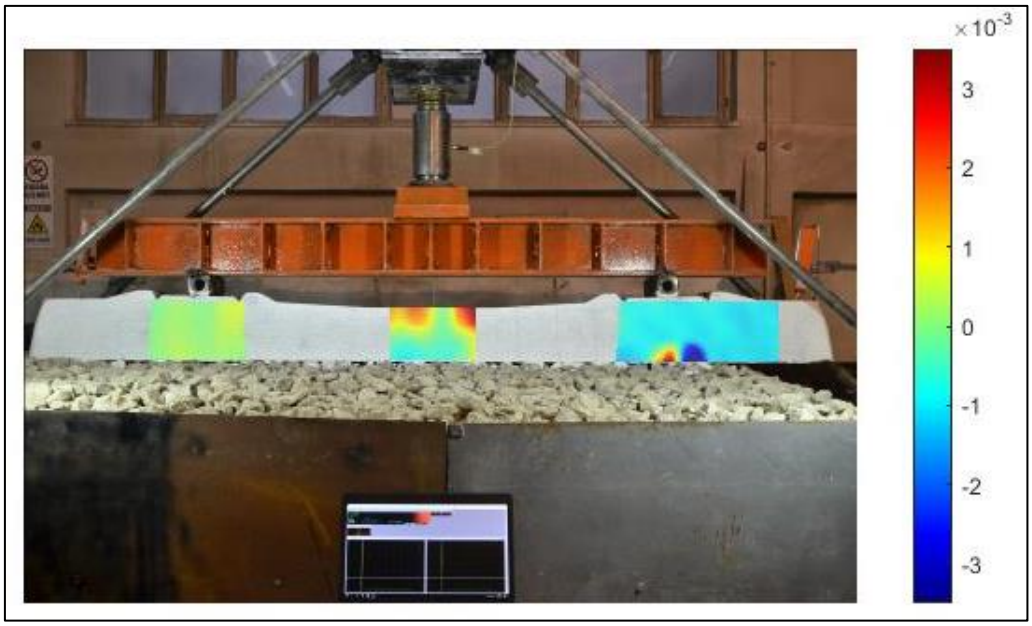
Resim 5.62. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.63. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



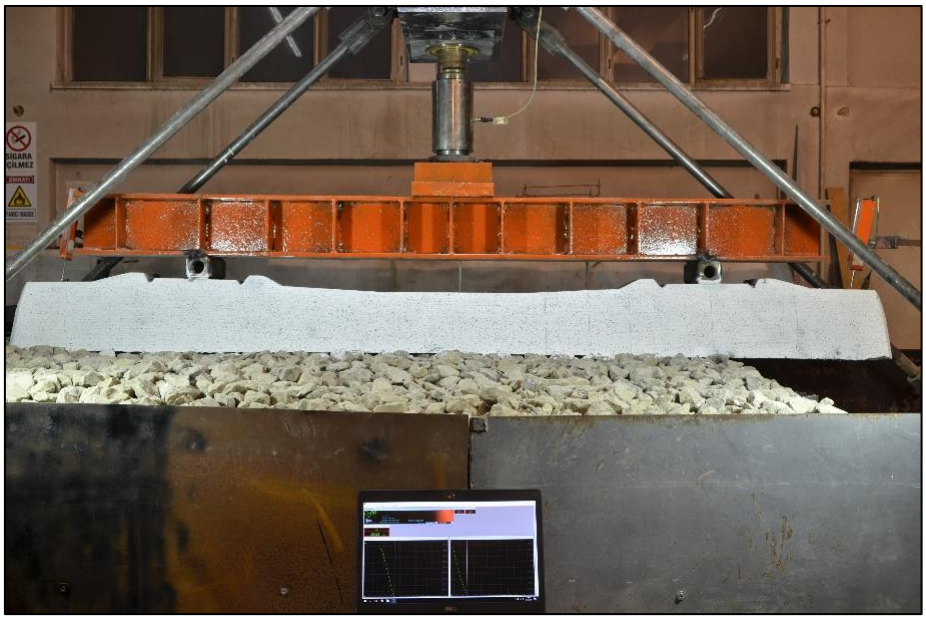
Resim 5.64. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



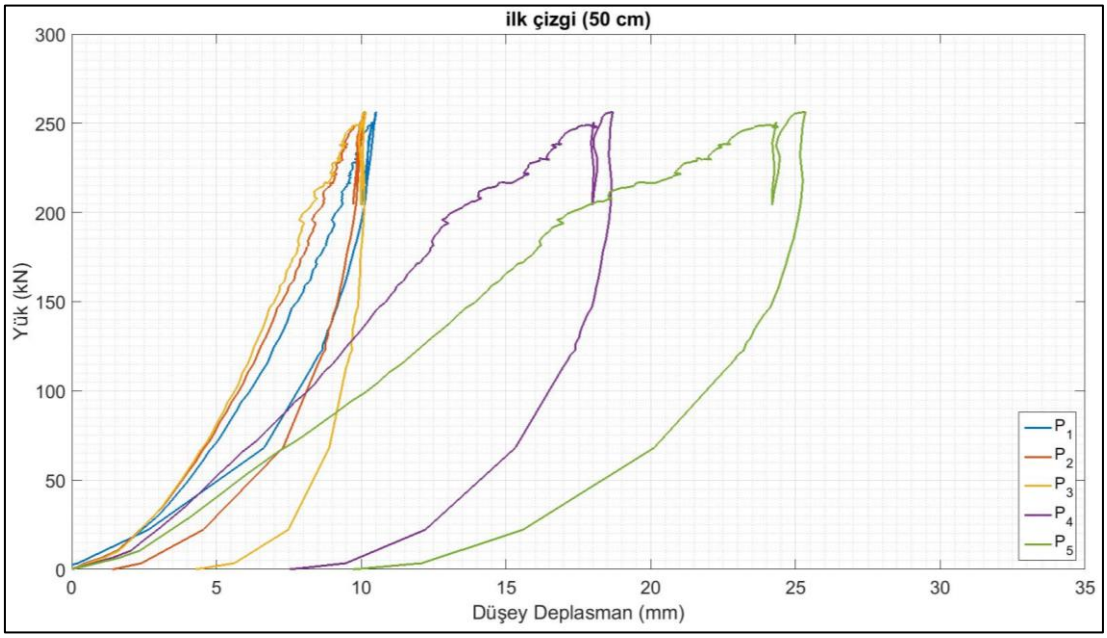
Resim 5.65. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

d) Geocell ile yapılan dördüncü aşama deney

Bu aşamada traversin raya bağlandığı noktaya kadar olan bölgede ki balast tabakası boşaltılmış ve 250 kN yük yüklenmiştir.

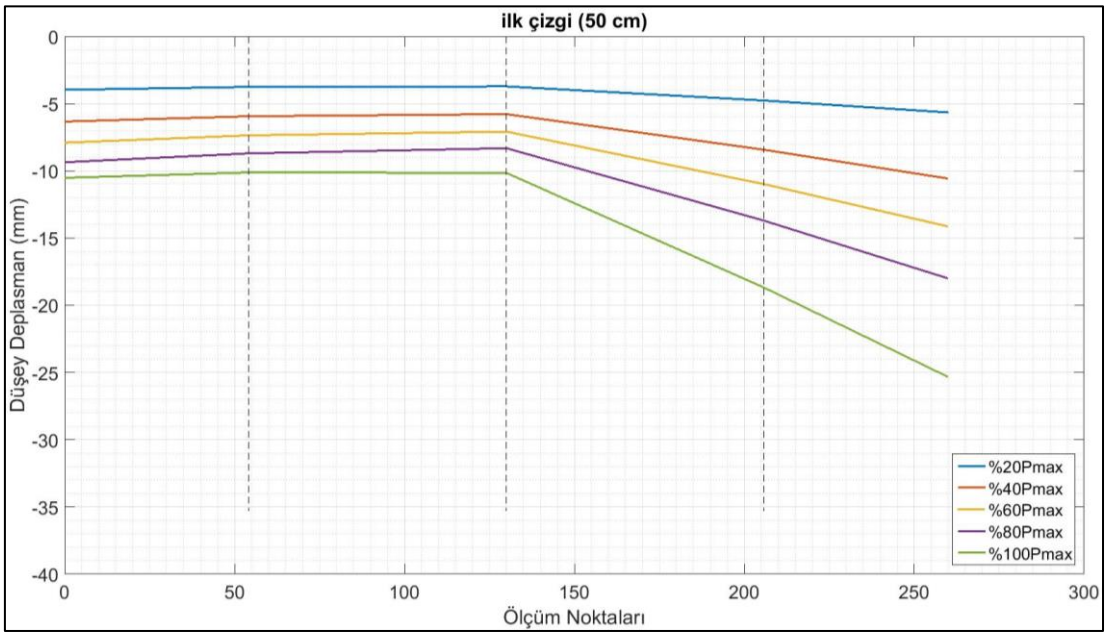


Resim 5.66. Geocell ile dördüncü deney aşaması



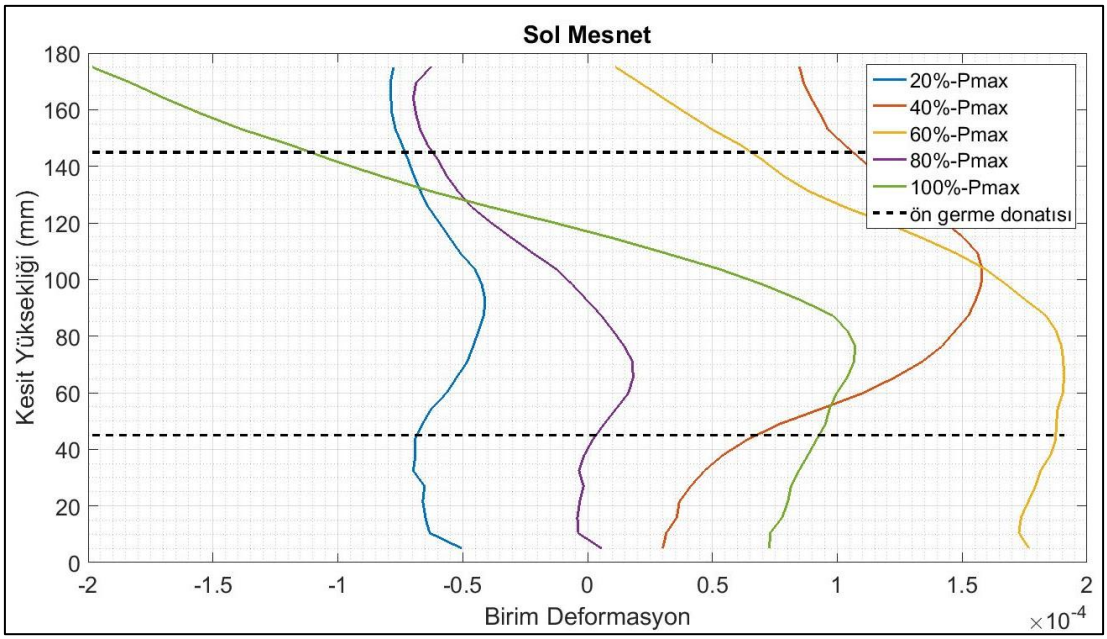
Şekil 5.57. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

Yükleme P5 noktasında yükün yatay hareket etmeye başlamasından dolayı sonlandırılmıştır. Kullanılan geocell artık geogrid ile aynı deney aşamasına göre daha iyi performans sergilemeye başlamıştır. Geogrid dördüncü aşama deneyde P1 noktasında yukarı yönlü 4.5 mm' lik bir kalıcı deplasman gözlemlenirken burada yüklemenin boşaltılması ile geri dönüş elastik bir davranış sergilemektedir. P5 noktası yine geogrid ile yapılan deneyde 29.5 mm kalıcı deplasman yapmışken burada bu 10 mm olarak gerçekleşmiştir.

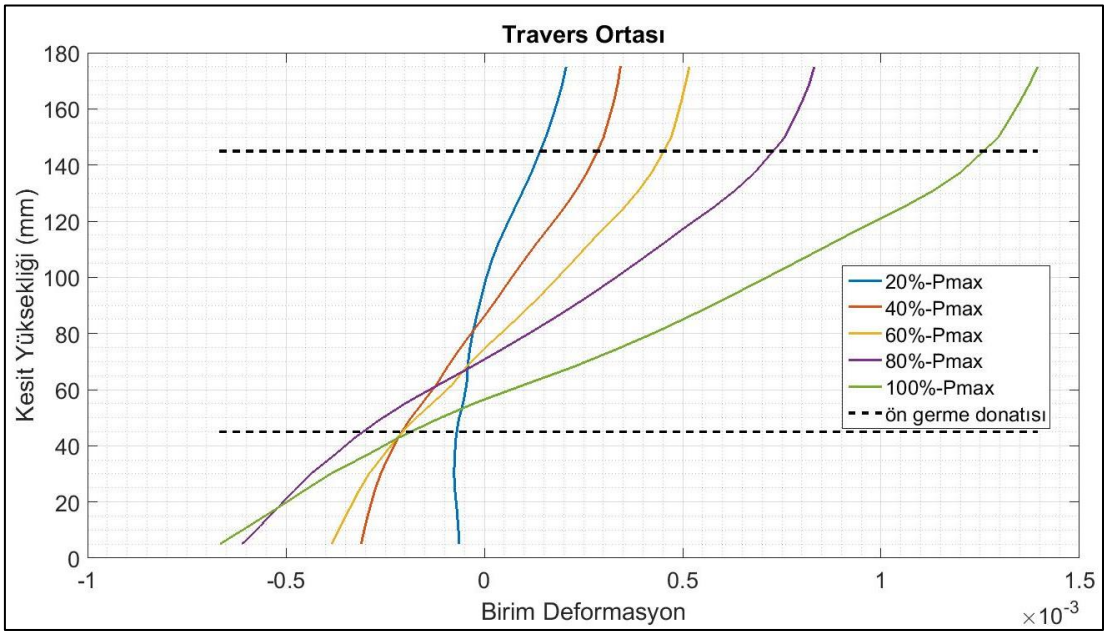


Şekil 5.58. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

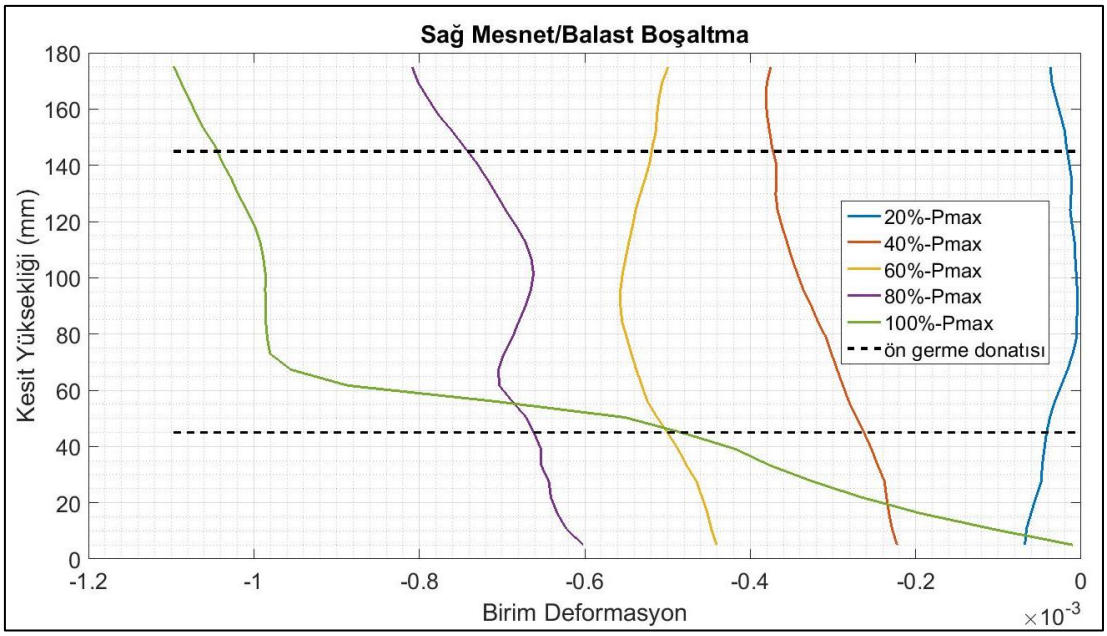
Bir önceki deney aşamasında P1 ve P5 arasında ki deplasman farkı 8.5 mm olarak gerçekleşmişken bu aşamada deplasman farkı 15 mm olarak gerçekleşmiştir. Artık travers üzerinde çatlaklar gözle görülür bir seviyeye gelmiştir. Bu çatlaklar travers üst kısmından yanlara doğru akmış ve aşağılara doğru ilerlemeye başlamıştır. Çatlaklar üst kısımda ki ön germe çubuklarına kadar inmiştir. Bu aşamadan sonraki balast boşaltmalarında yapılacak yüklemelerde çatlakların daha da aşağılara inece açıkça görülmektedir. Bu durumda travers üst kısımda çekme gerilmelerini karşılayan ön germe çubuklarına dikkat etmek gerekmektedir.



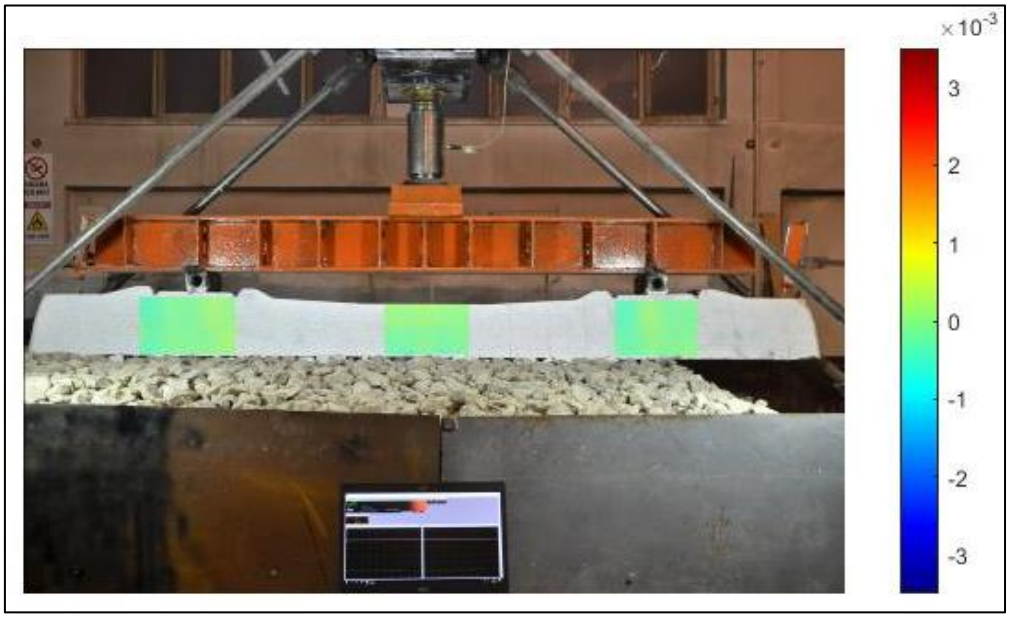
Şekil 5.59. Sol mesnet birim deformasyonlar



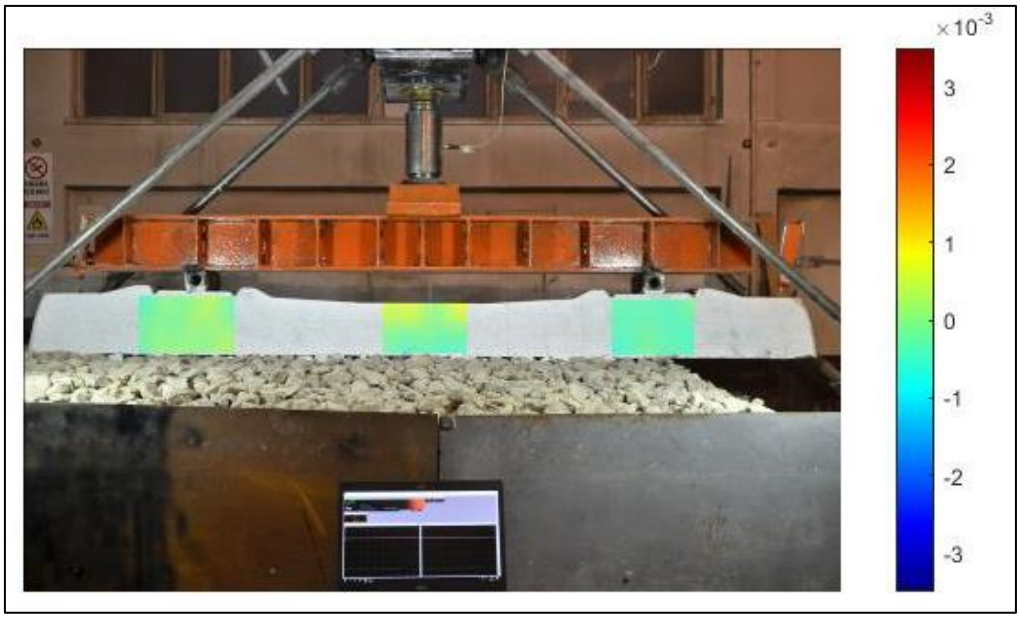
Şekil 5.60. Travers ortası birim deformasyonlar



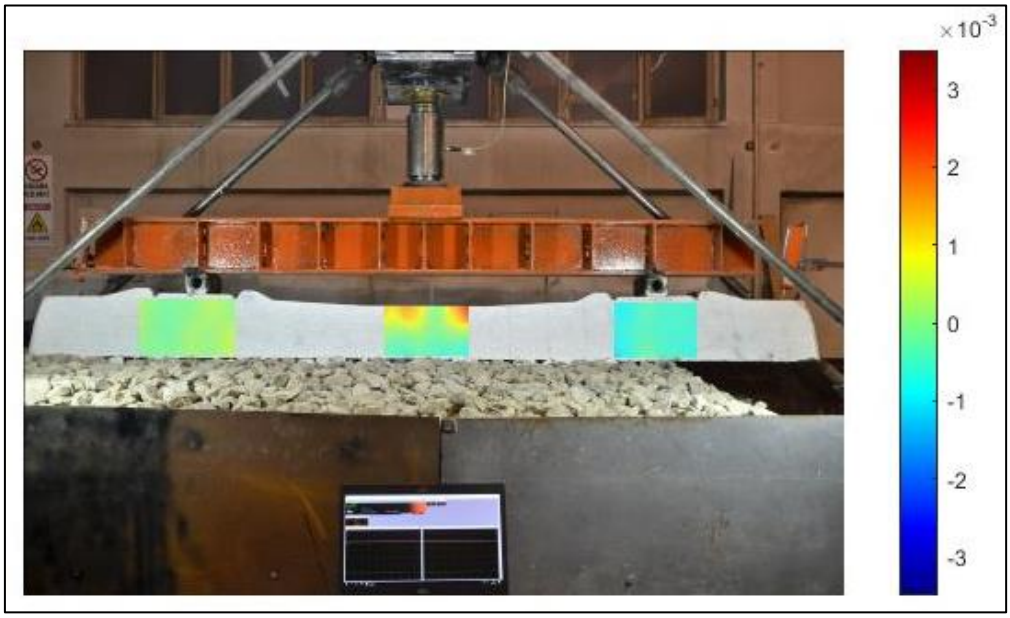
Şekil 5.61. Sağ mesnet + balast boşaltma çizgisi birim deformasyonlar



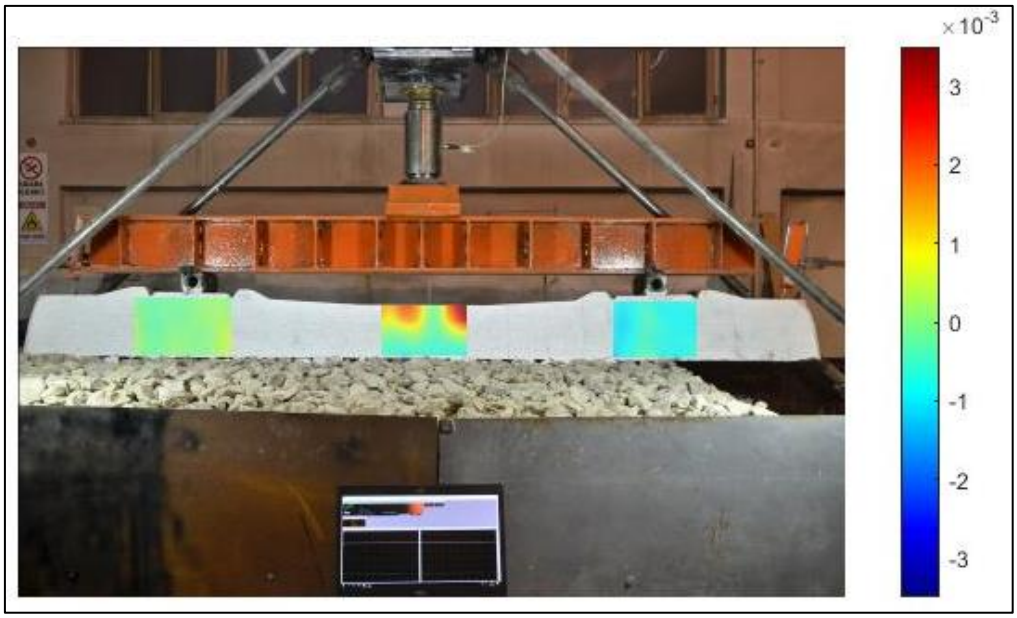
Resim 5.67. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



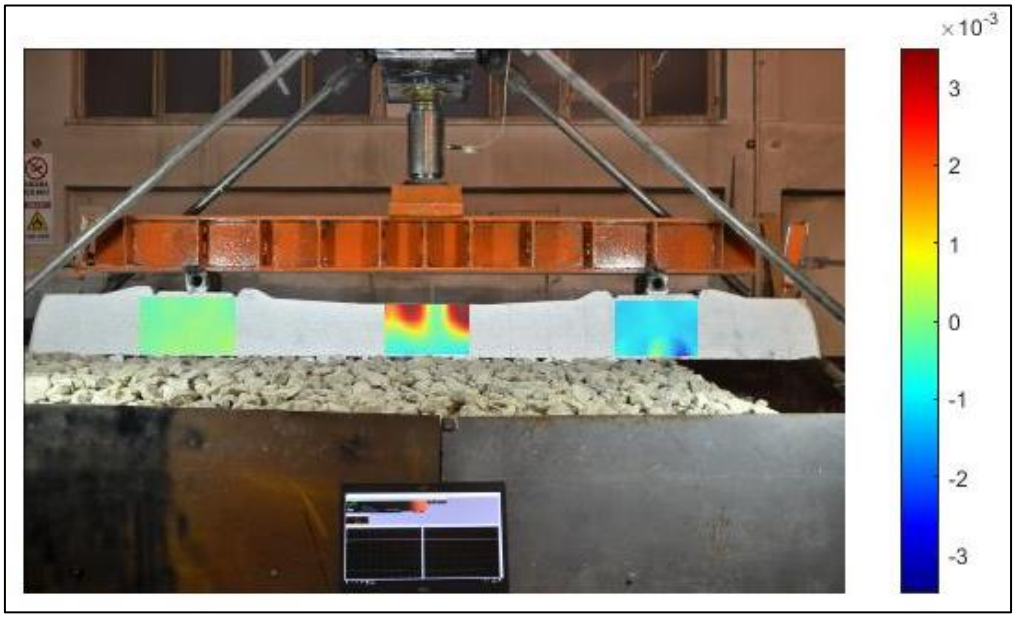
Resim 5.68. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.69. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.70. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



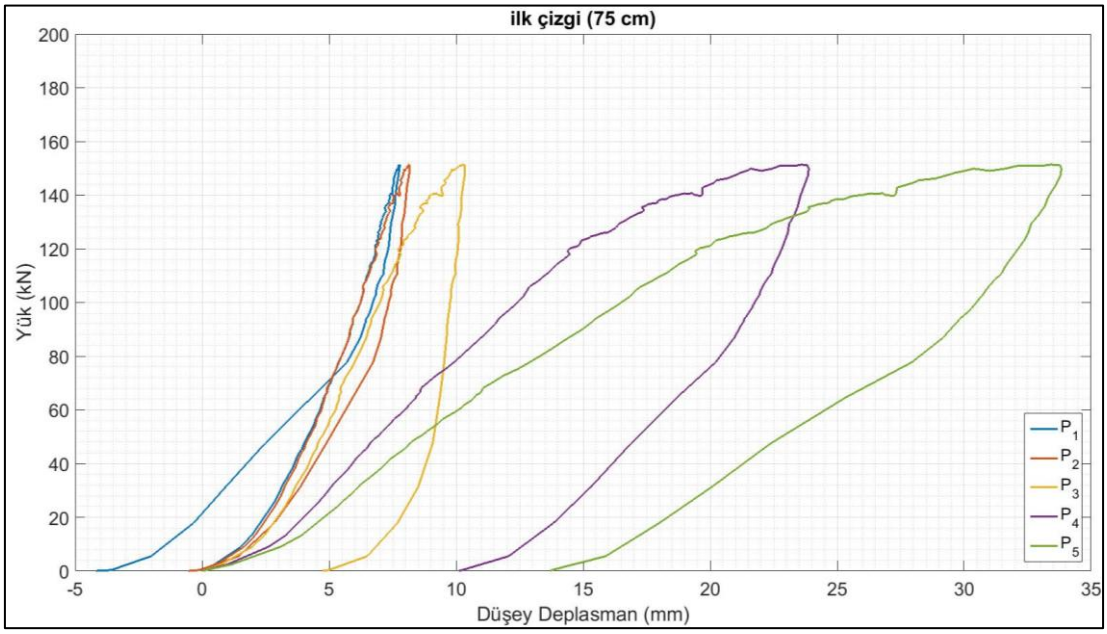
Resim 5.71. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

e) Geocell ile yapılan beşinci aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 25 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 150 kN yük yüklenebilmiştir.

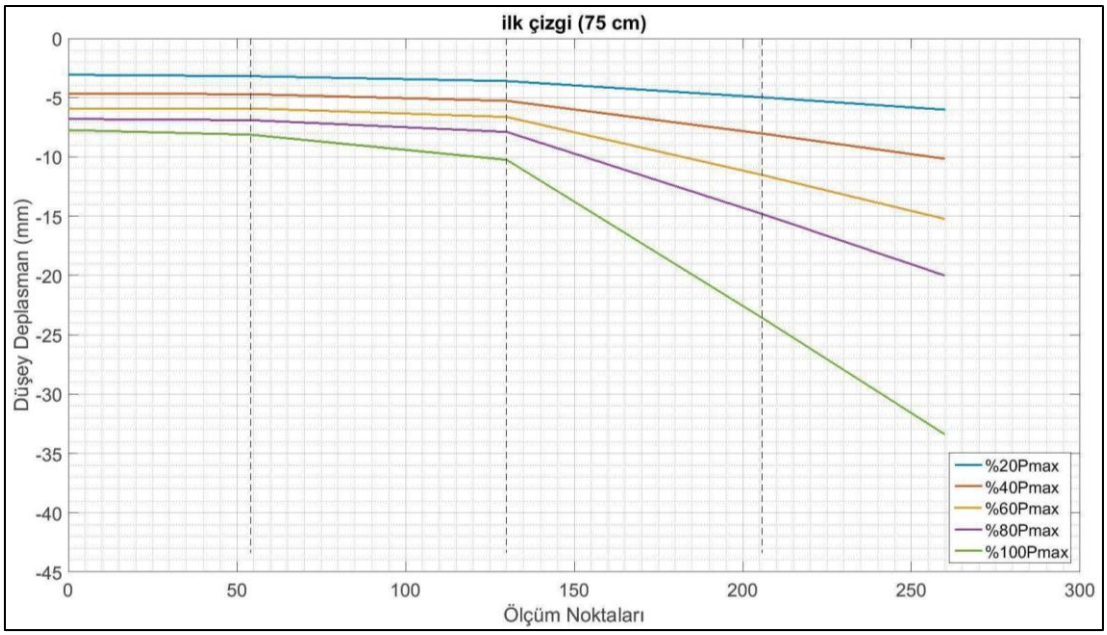


Resim 5.72. Geocell ile beşinci deney aşaması



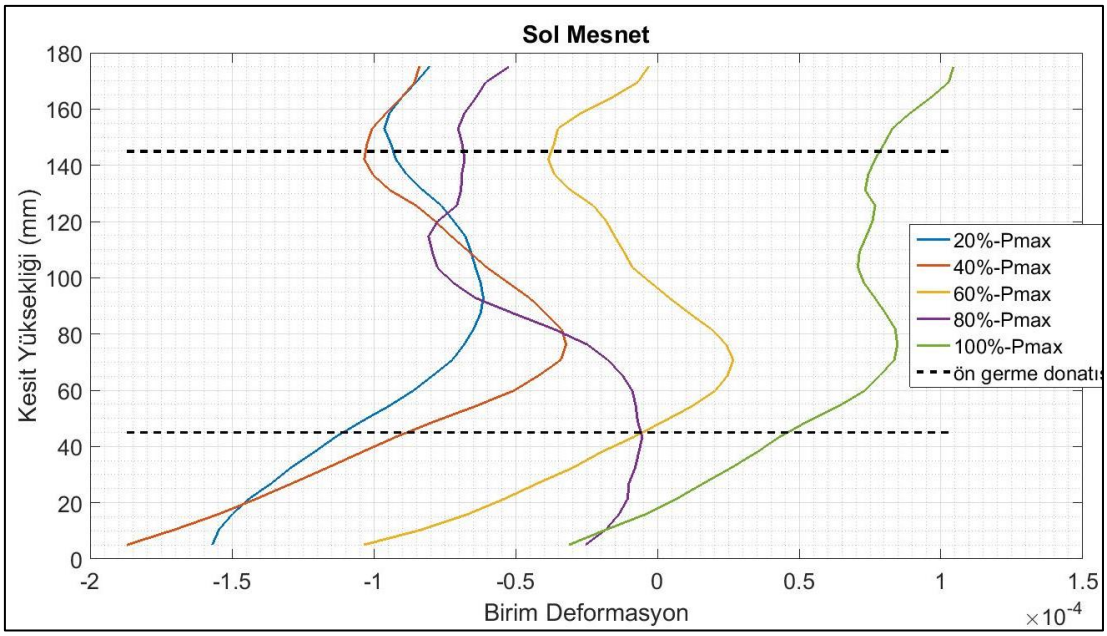
Şekil 5.62. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

P1 noktasında yüklemeden sonra geri dönüş yukarı yönde 4 mm, P5 noktasında ise aşağı yönde 14 mm kalıcı bir deplasman gerçekleşmiştir. Bu durumda traversin döndüğü anlaşılmaktadır. P2 noktası ise elastik bir dönüş sergileyerek traversin hala mesnettin hemen altından balasta yük aktardığını göstermektedir. Aynı aşama geogrid deneyinde P5 noktasında deplasman 41 mm seviyelerine kadar çıkıp 25 mm de kalıcı hale gelmişken burada 34 mm seviyelerinde maksimum yapıp 14 mm seviyesinde kalıcı hale gelmiştir. P4 noktasında yani sağda ki mesnet altında ise bu değer geogrid ile yapılan aynı aşama deneyde 30,5 mm maksimum değerden sonra 19,5 mm kalıcı deplasmanla sonlanmışken burada 24 mm maksimum değerden sonra 10 mm deplasmanla sonlanmıştır.

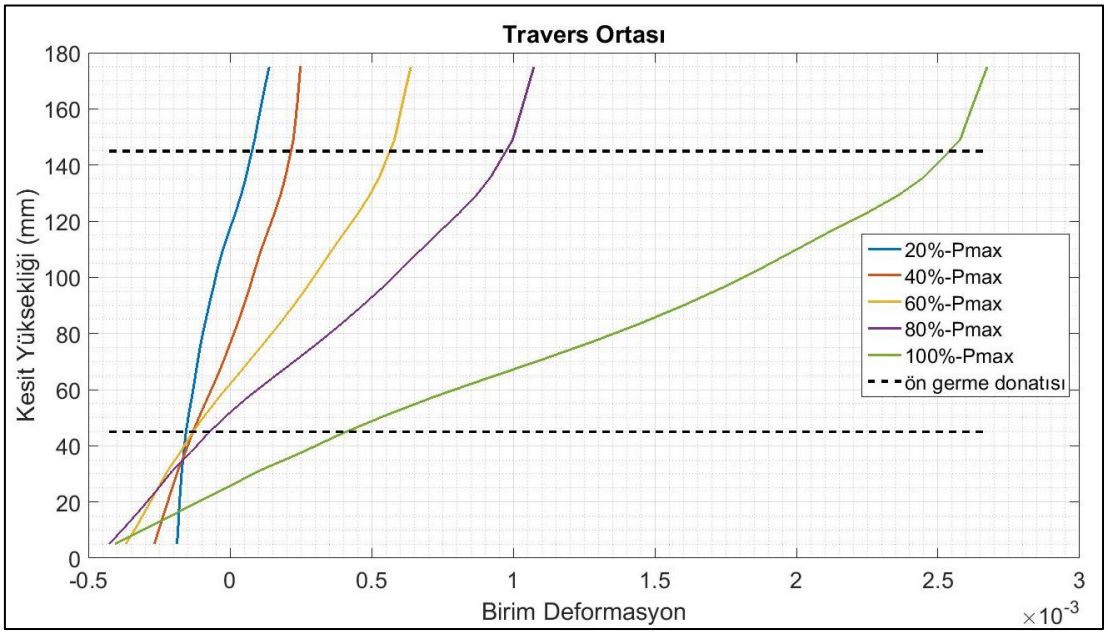


Şekil 5.63. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

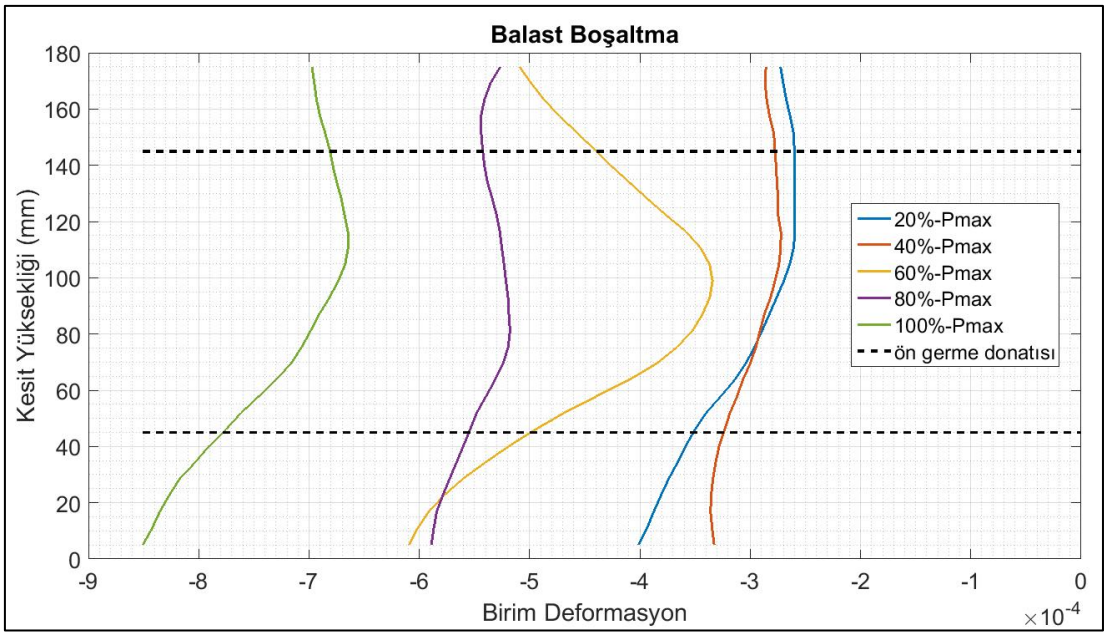
Geogrid ile yapılan deneyde yükleme arttıkça travers kendisine bir denge ortamı aradığından boşaltma yapılan tarafta, traverse temas eden balastlarda bir miktar balast erozyonu gerçekleşmişti ancak geocell içerisinde hareket edemeyen balastta bu erozyon gerçekleşemediği için travers gittikçe zorlanmakta ve gerilmelerin artışıyla birlikte çatlakların boyutu da artmaktadır. Yükleme burada %100 olduğunda P5 noktası P3 noktasına göre aşırı bir deformasyon yapmaktadır.



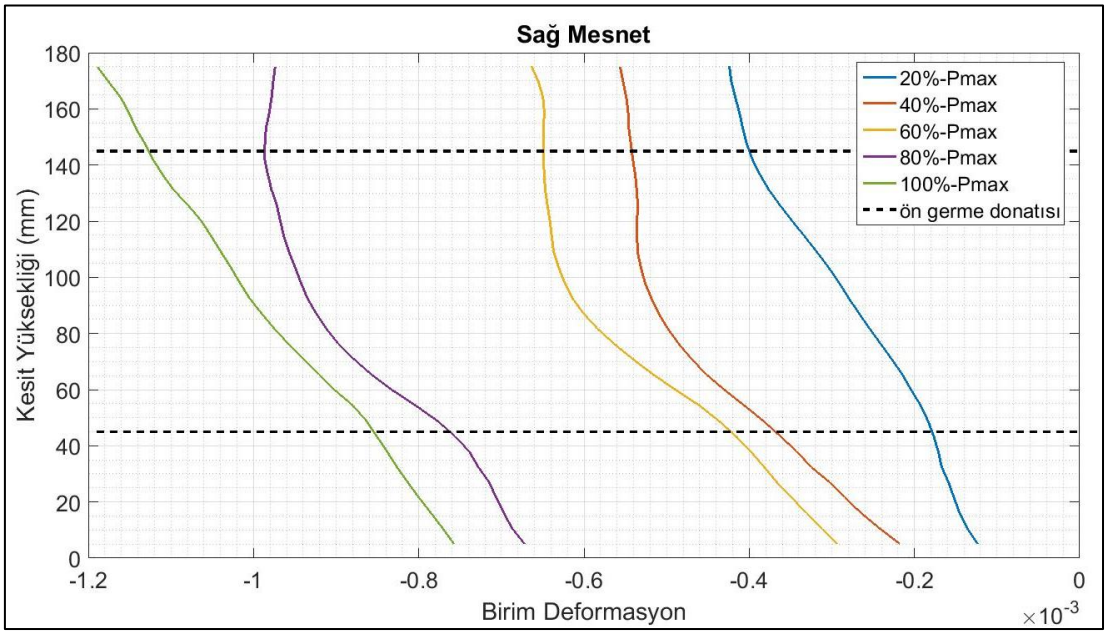
Şekil 5.64. Sol mesnet birim deformasyonlar



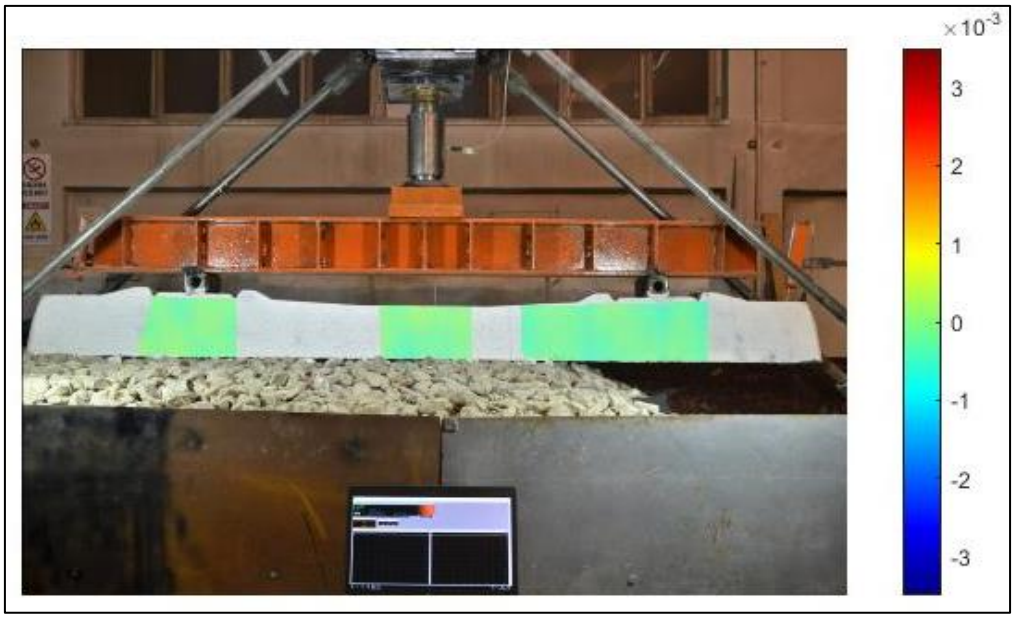
Şekil 5.65. Travers ortası birim deformasyonlar



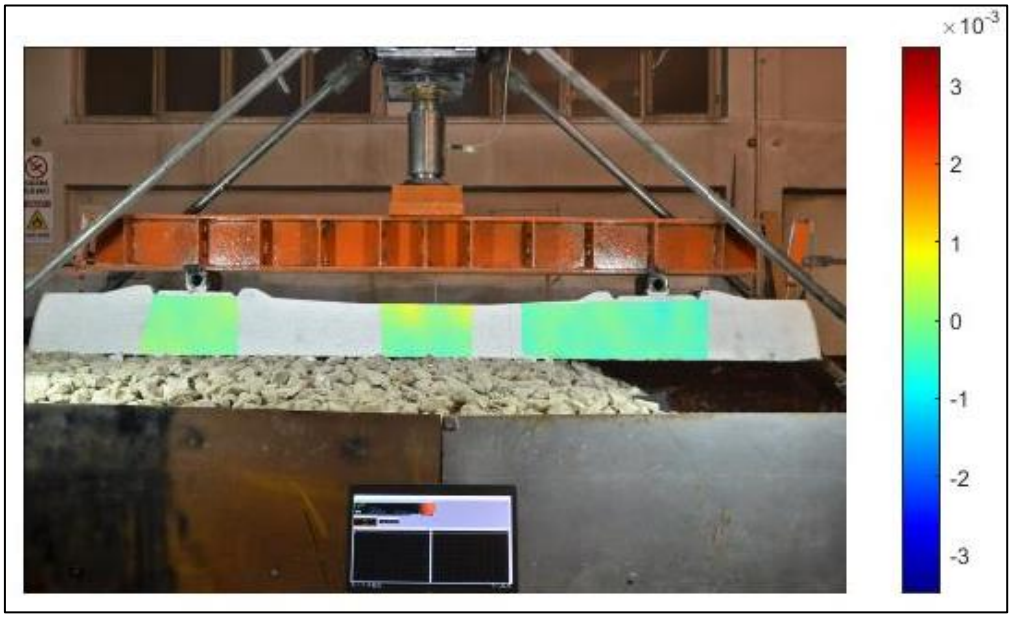
Şekil 5.66. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



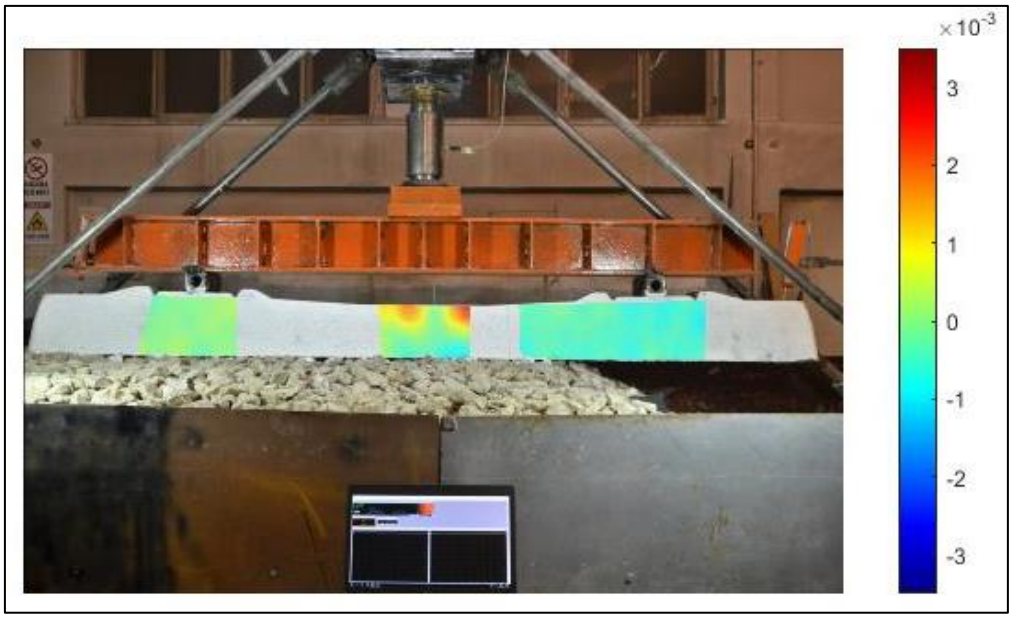
Şekil 5.67. Sağ mesnet birim deformasyonlar



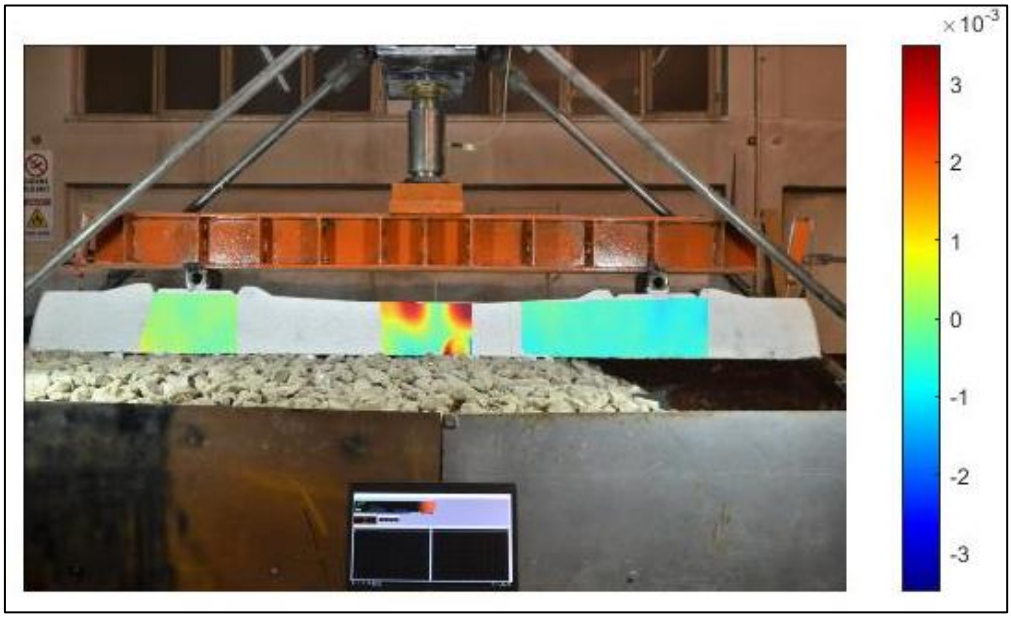
Resim 5.73. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



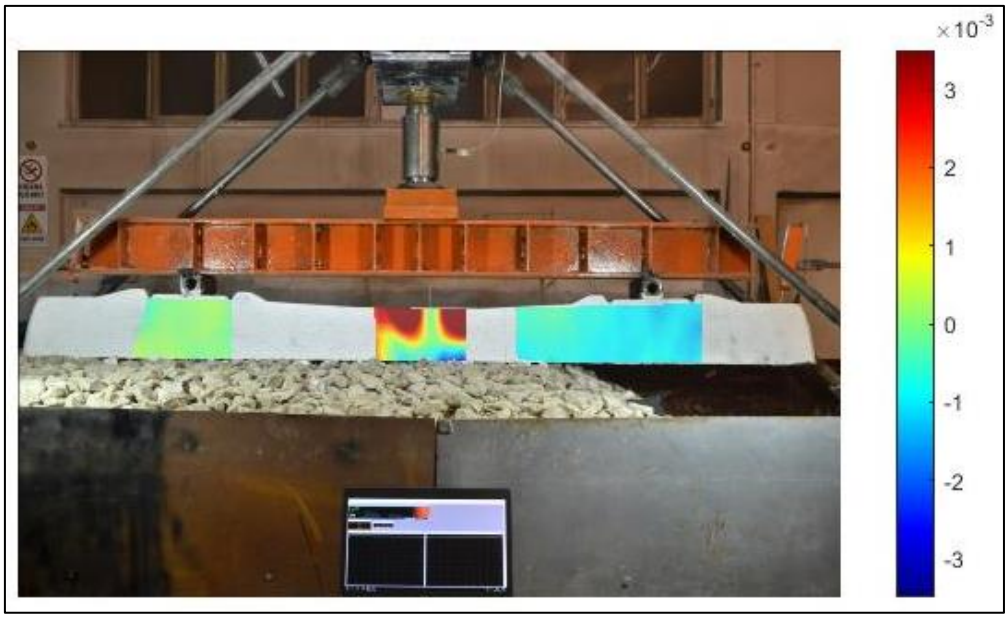
Resim 5.74. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.75. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.76. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



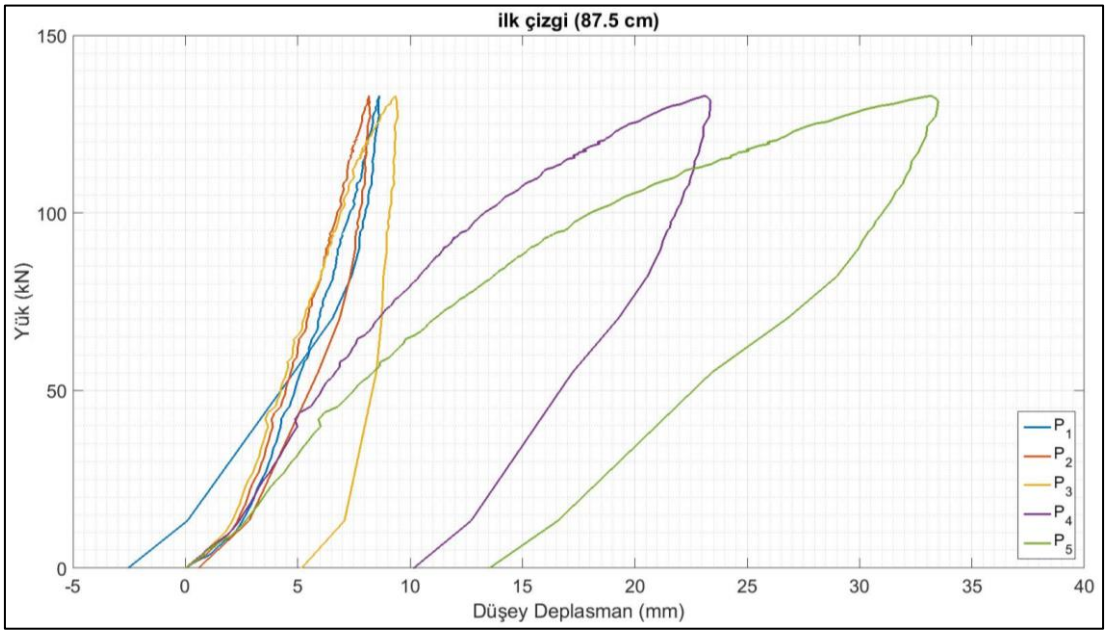
Resim 5.77. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

f) Geocell ile yapılan altıncı aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 12,5 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 132 kN yük yüklenebilmiştir.

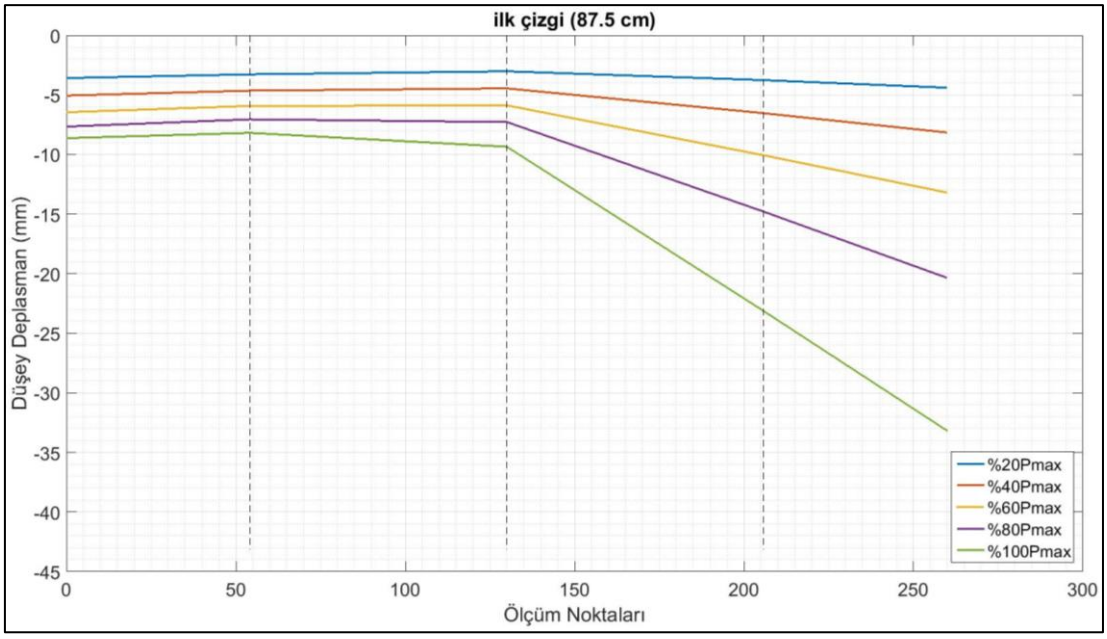


Resim 5.78. Geocell ile altıncı deney aşaması



Şekil 5.68. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

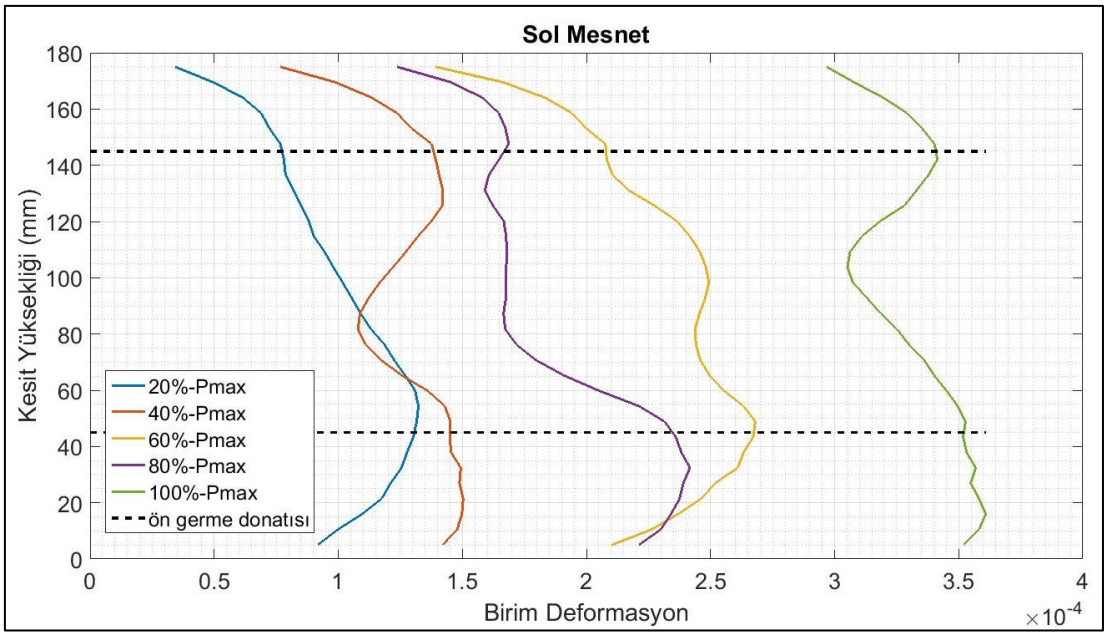
P1 noktasında yükün yüklenip tekrar boşaltılmasından sonra yaptığı deplasman yukarı yönlü 2.5 mm olmuştur. P5 noktasında ise 34 mm maksimum düşey deplasmandan sonra 13,5 mm kalıcı deformasyonla deney tamamlanmıştır. Bu deneyde P2 noktası hala mesnetten balasta direkt yük aktarmaktadır. Bu geogrid ile yapılan aynı deney aşamasına bakıldığı zaman çok olumlu bir durumdur.



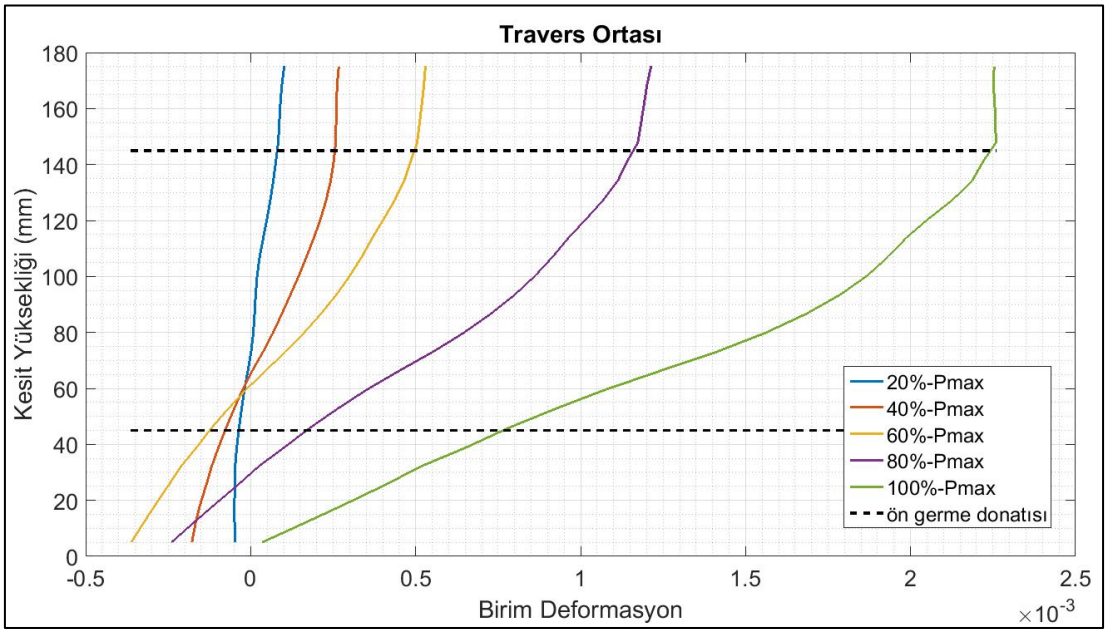
Şekil 5.69. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

Yüklemenin 130 kN' a ulaşmasıyla birlikte çatlak oluşumu artık üstte bulunan ön germe çubuklarından daha aşağılara doğru inmiştir. Travers ucundan toplam 87.5 mm boşalmanın gerçekleştiği bu durumda 130 kN yükte bile çatlakların travers ortasından daha aşağılara kadar inmesi, dingil yükü olan 225 kN yükün demiryolunda etkimesi traverste daha ciddi hasarların oluşacağını göstermektedir.

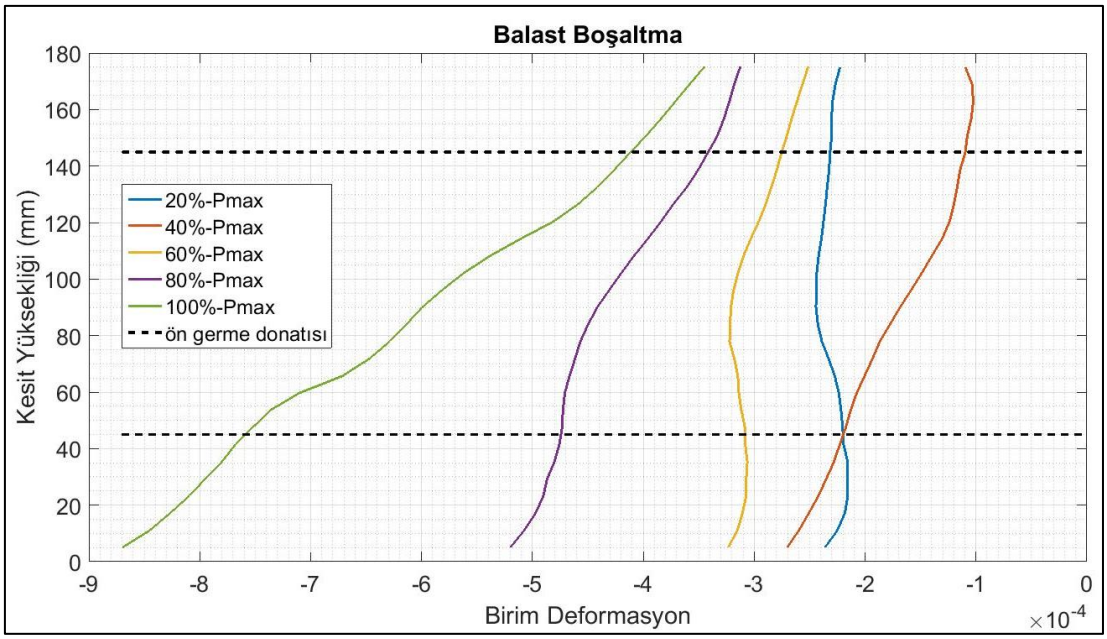
Resim 5.84' te 130 kN yükle birlikte oluşan travers üzerindeki çatlakların bittiği noktaların gözle görülür hali kırmızı oklarla gösterilmeye çalışılmıştır.



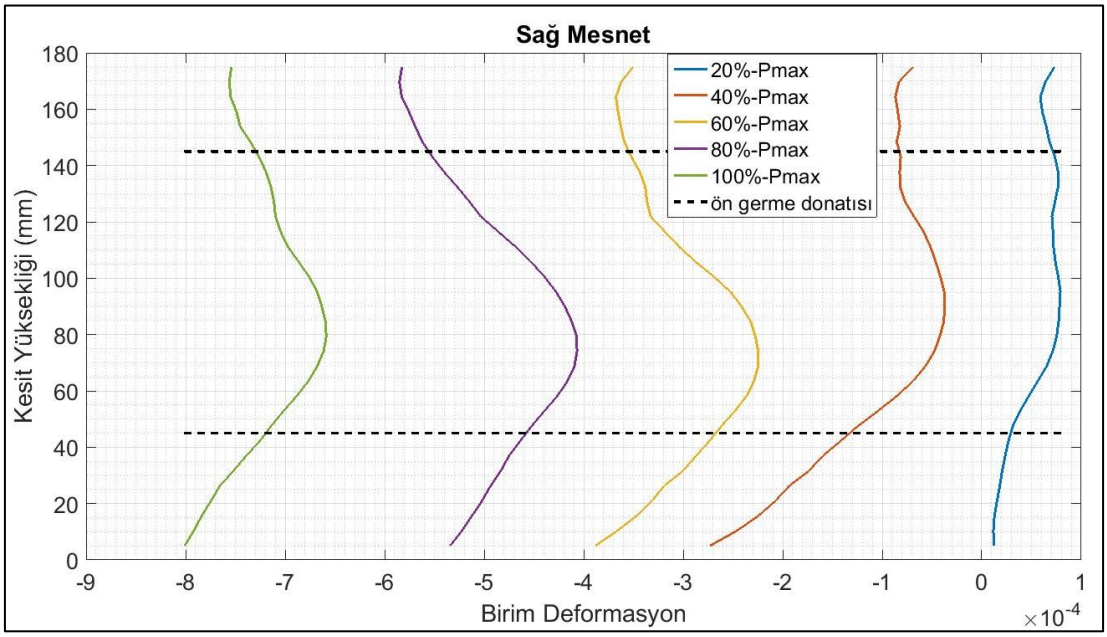
Şekil 5.70. Sol mesnet birim deformasyonlar



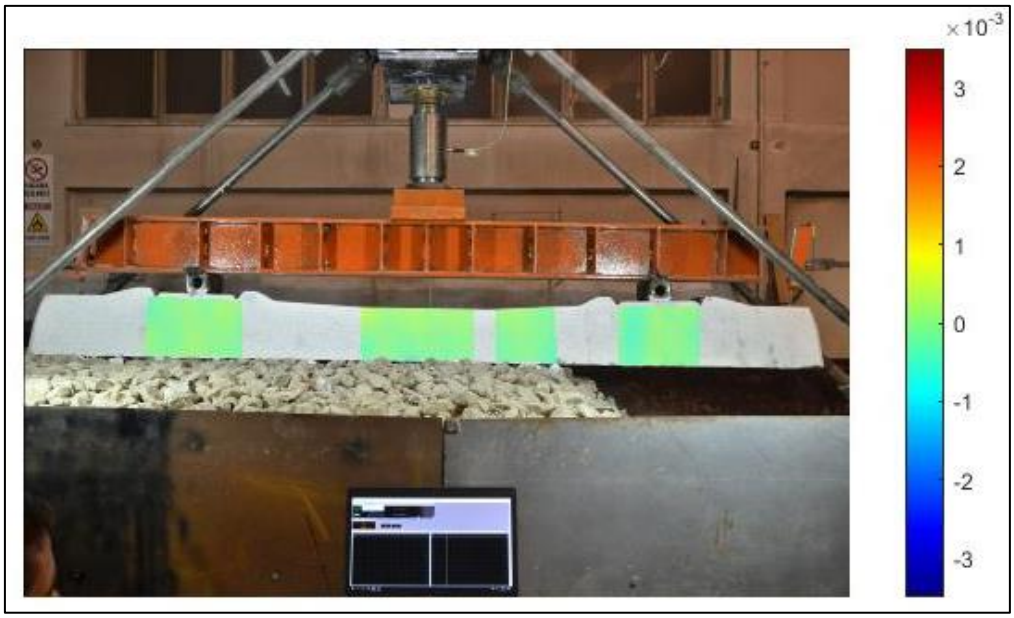
Şekil 5.71. Travers ortası birim deformasyonlar



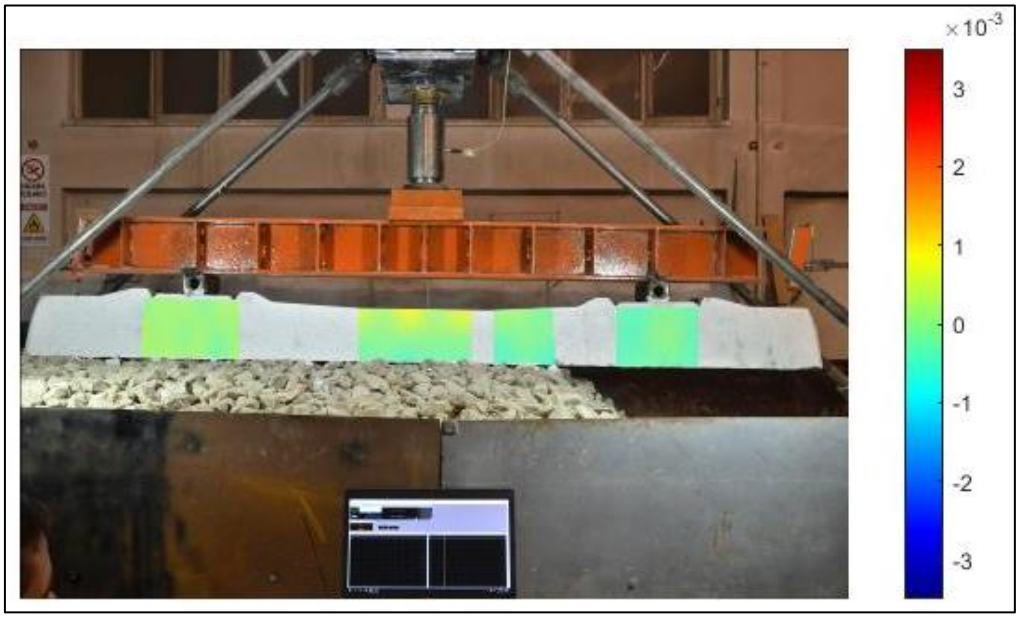
Şekil 5.72. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



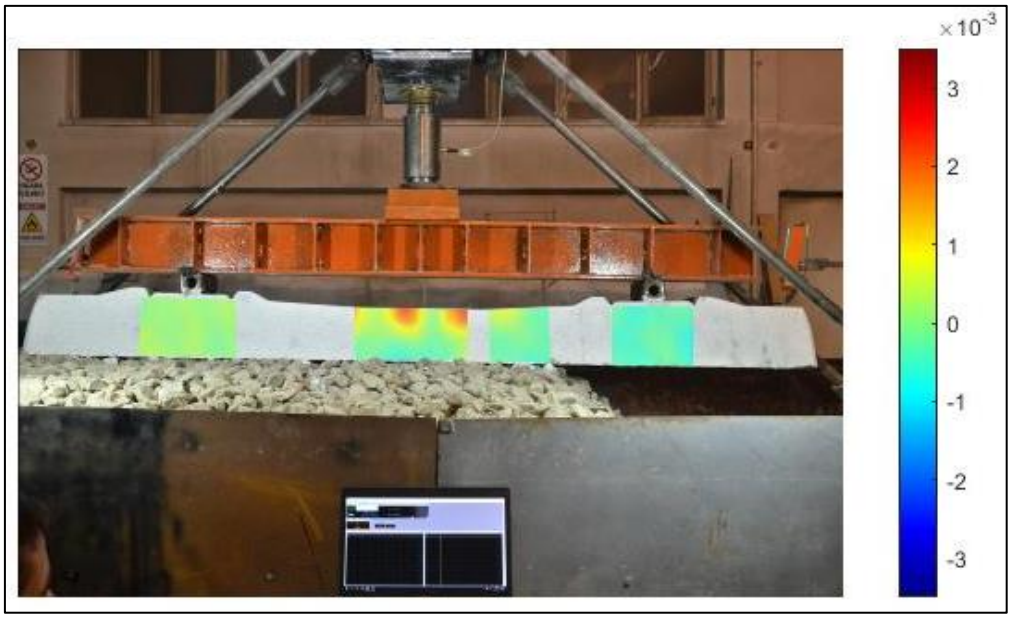
Şekil 5.73. Sağ mesnet birim deformasyonlar



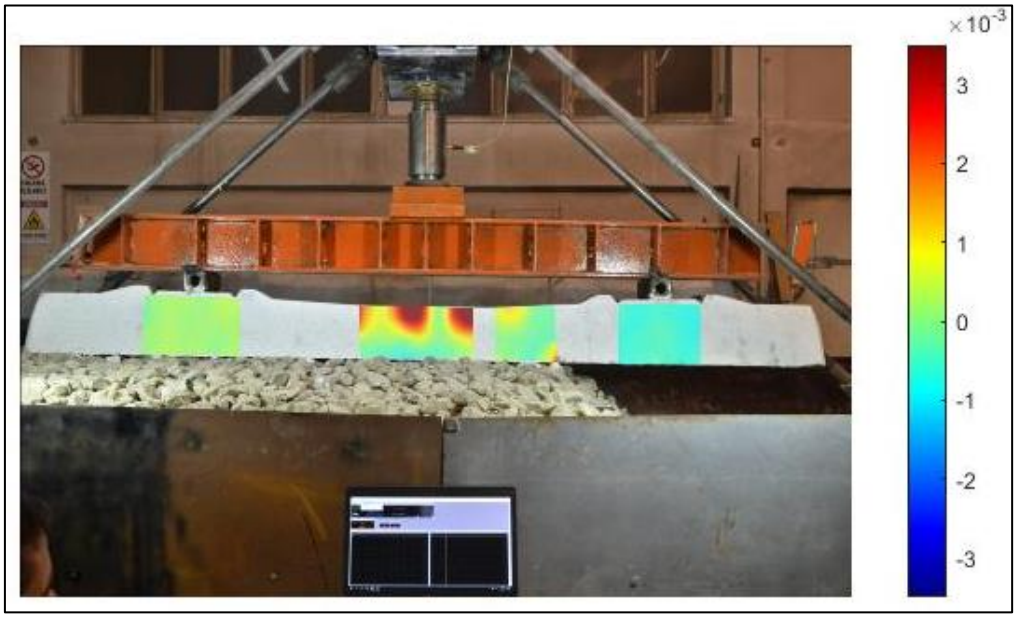
Resim 5.79. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



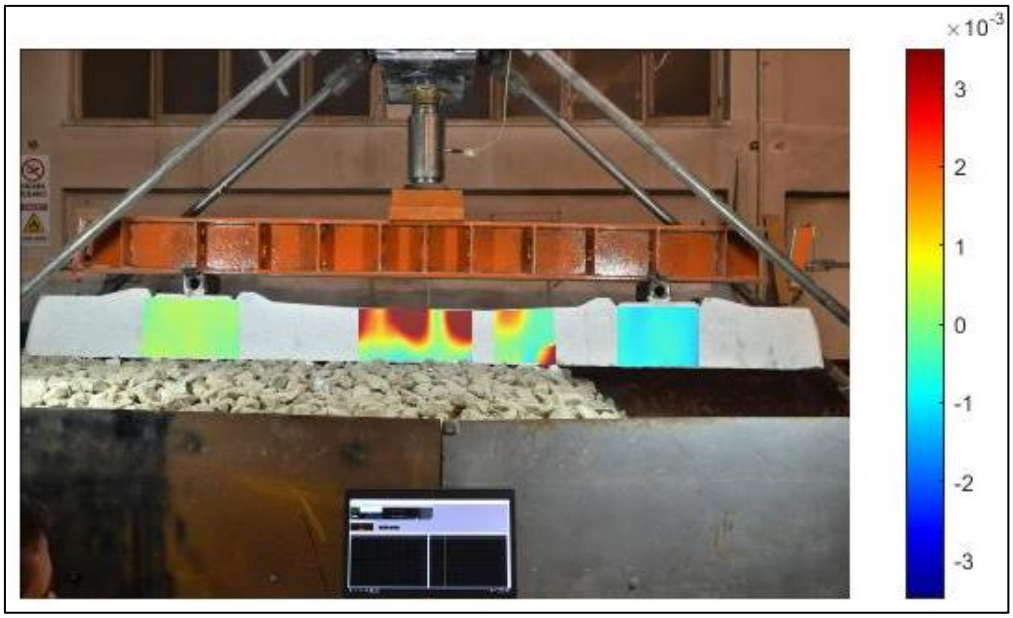
Resim 5.80. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



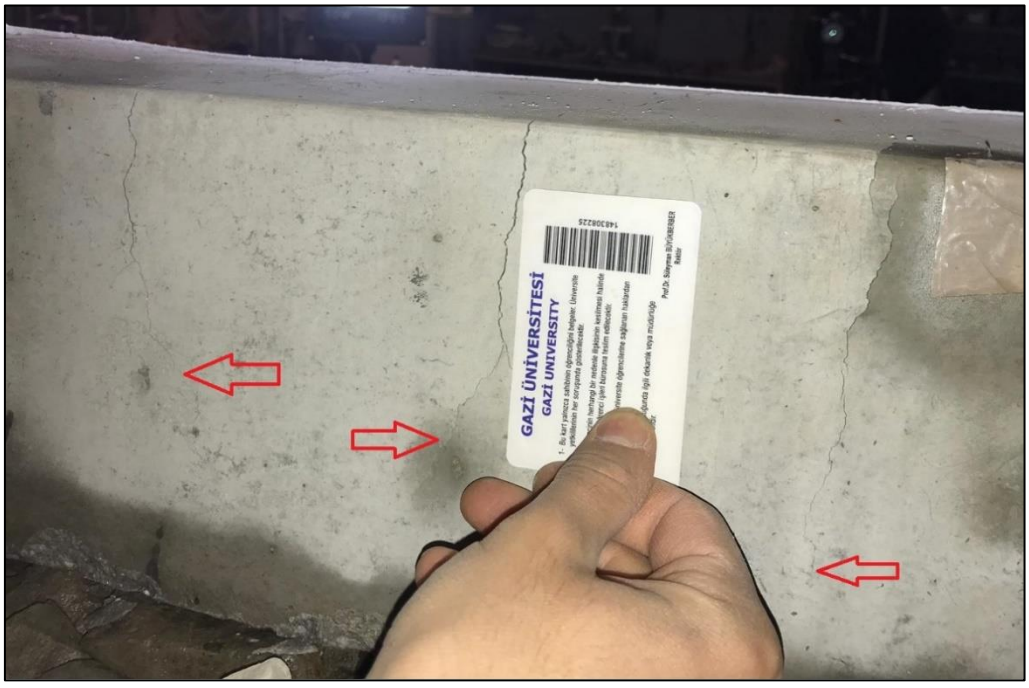
Resim 5.81. %60Pmax yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.82. %80Pmax yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.83. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



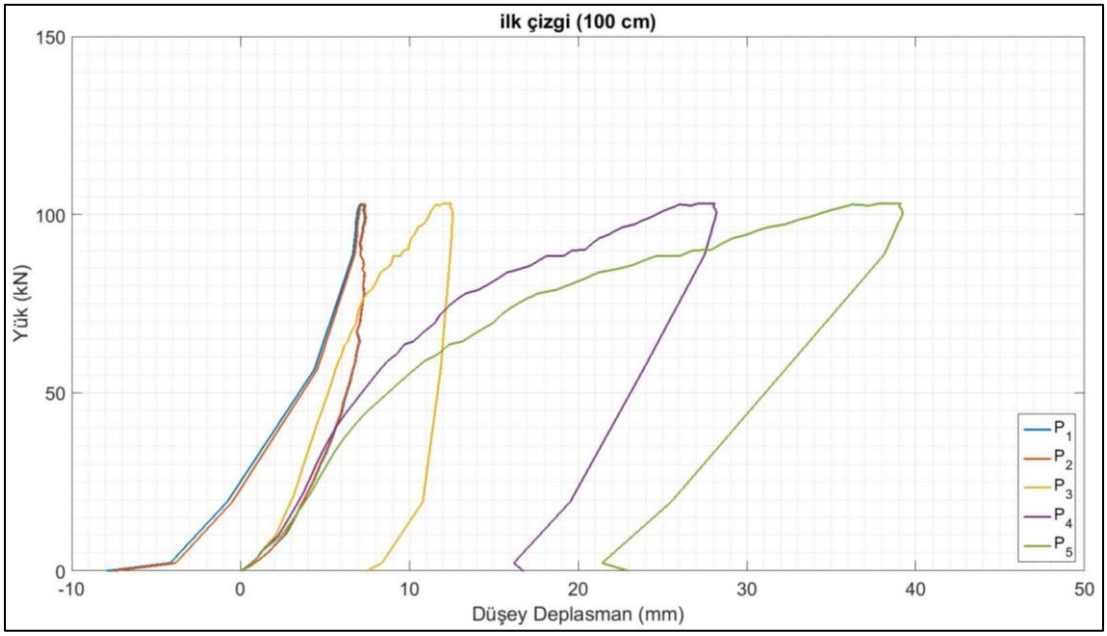
Resim 5.84. Travers üzerinde oluşan çatlaklar

g) Geocell ile yapılan yedinci aşama deney

Bu aşamada traversin ortasına doğru 12,5 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 102 kN yük yüklenmiştir. Bu yük geogrid ile yapılan deneyde aynı aşamada 65 kN olarak gerçekleşmiştir.

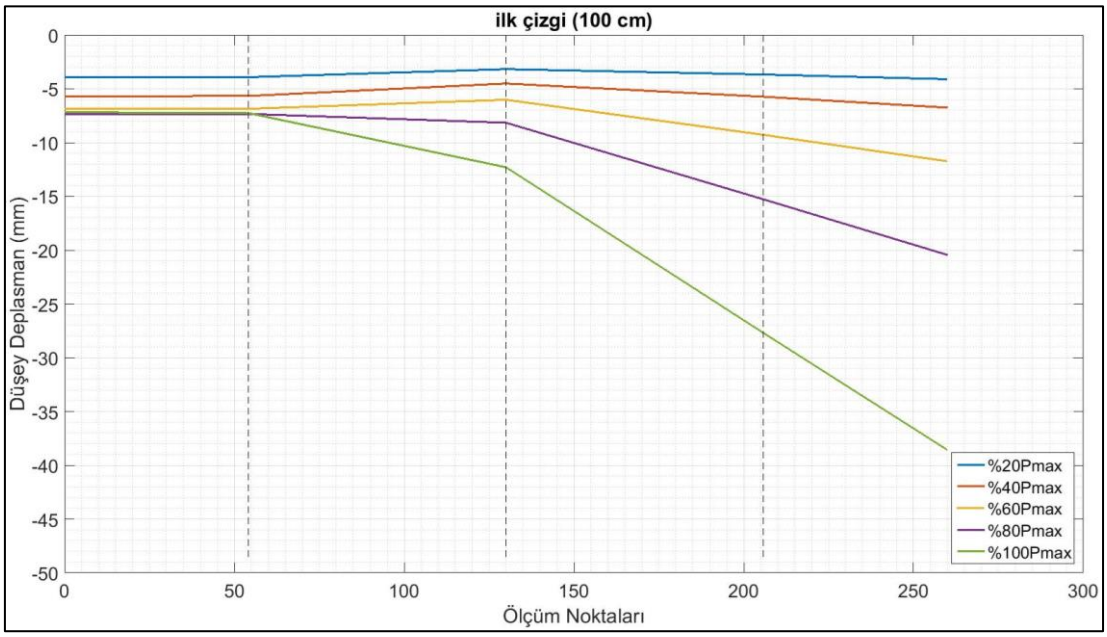


Resim 5.85. Geocell ile yedinci deney aşaması



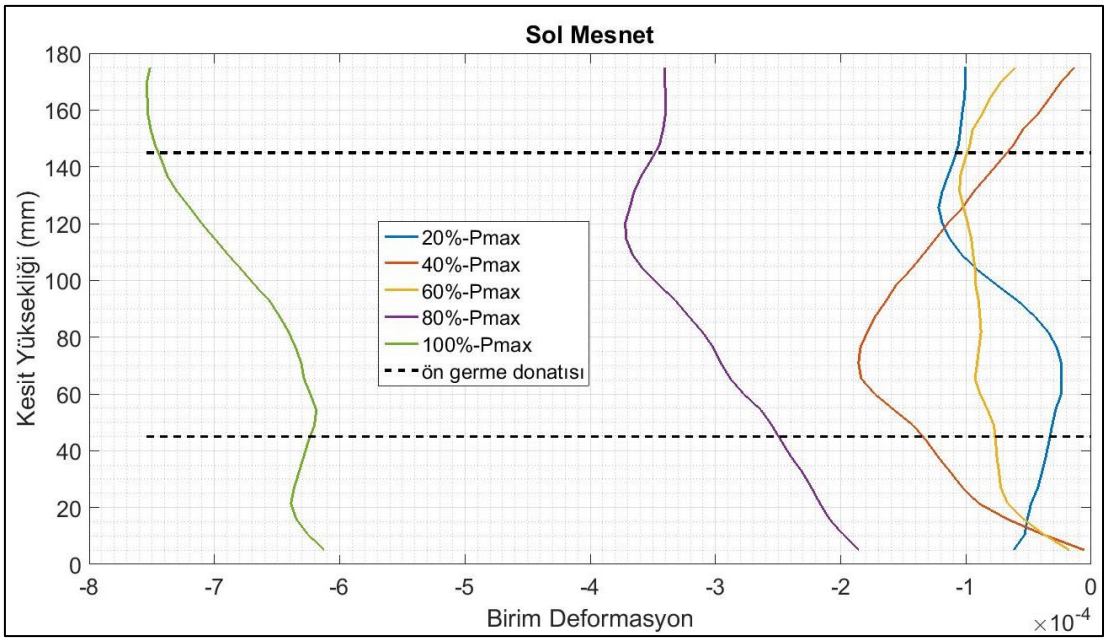
Şekil 5.74. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

P1 ve P2 noktaları yüklemenin tekrar boşaltılması ile birlikte artık yukarı yönde deplasman yapmış ve bu durumda artık yükler mesnetten balasta aktarılmayacaktır. Bu durumda artık traverste üç noktalı yükleme daha belirgin hale gelmiştir. Geogrid ile yapılan aynı aşamada P5 noktasının kalıcı deformasyon 65 mm olarak gerçekleşmişken geocell her bir boşaltmadan sonra kendisini daha iyi ispat etmiş ve bu kalıcı deformasyon 21,5 mm olarak gerçekleşmiştir.

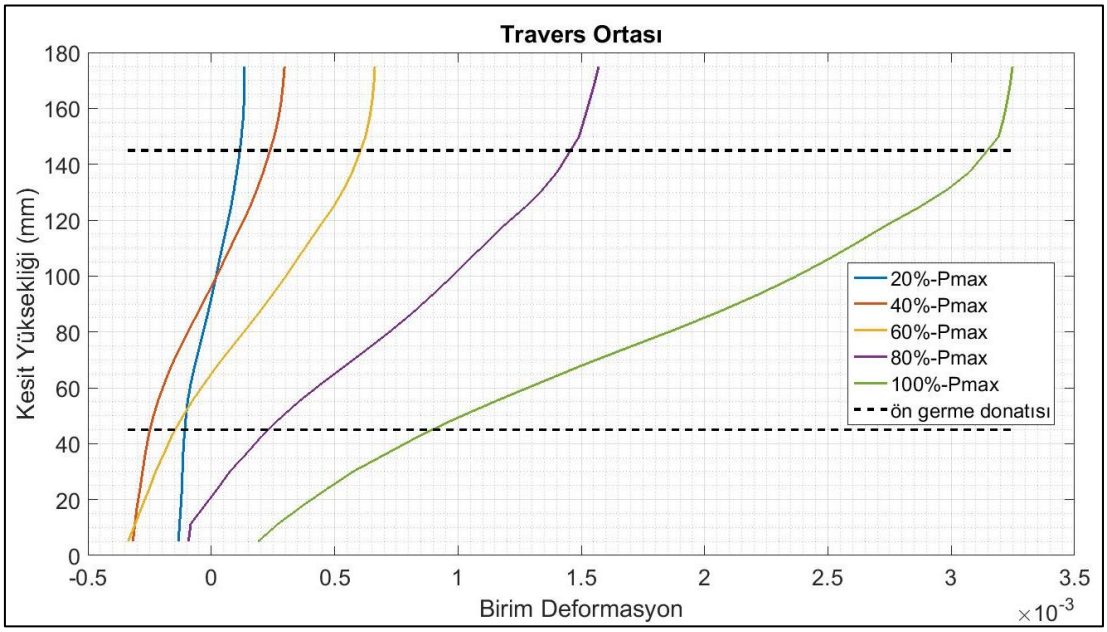


Şekil 5.75. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

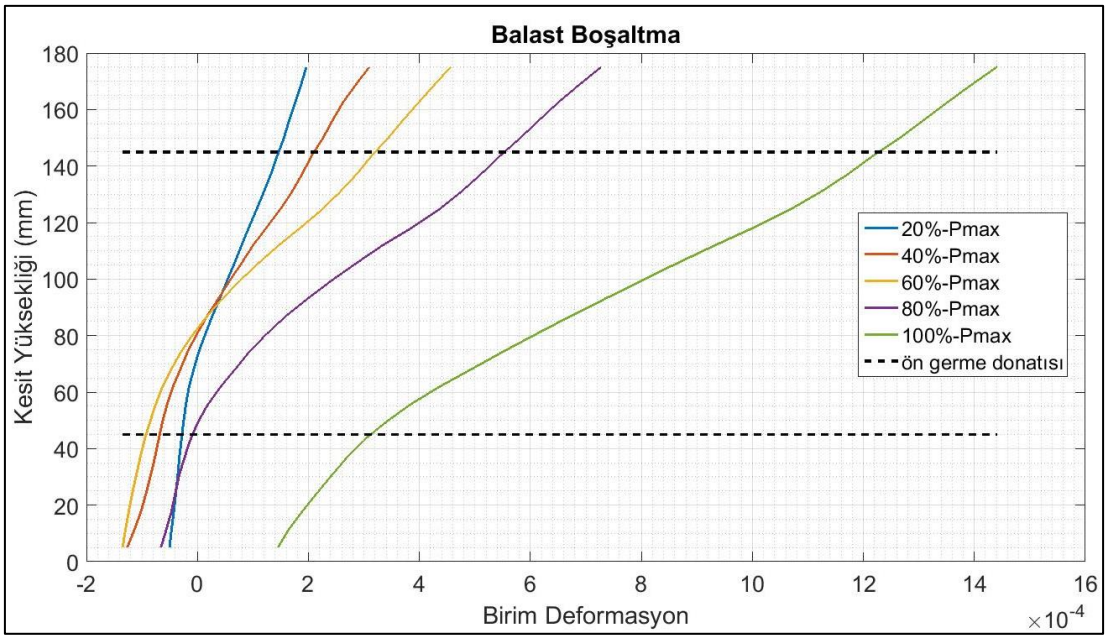
105 kN yük ile birlikte oluşan deformasyon P3 ve P5 noktaları arasında yaklaşık 24 mm seviyelerine ulaşmıştır. Travers üst kısmında ki ön germe çubuklarında ciddi bir çekme gerilmesi meydan gelmekle birlikte yükün daha artırılması durumunda traversin beton kısımlarında kalıcı deformasyonlar kaçınılmaz olacaktır. Bu durumda travers servis kabiliyetini kaybedecektir.



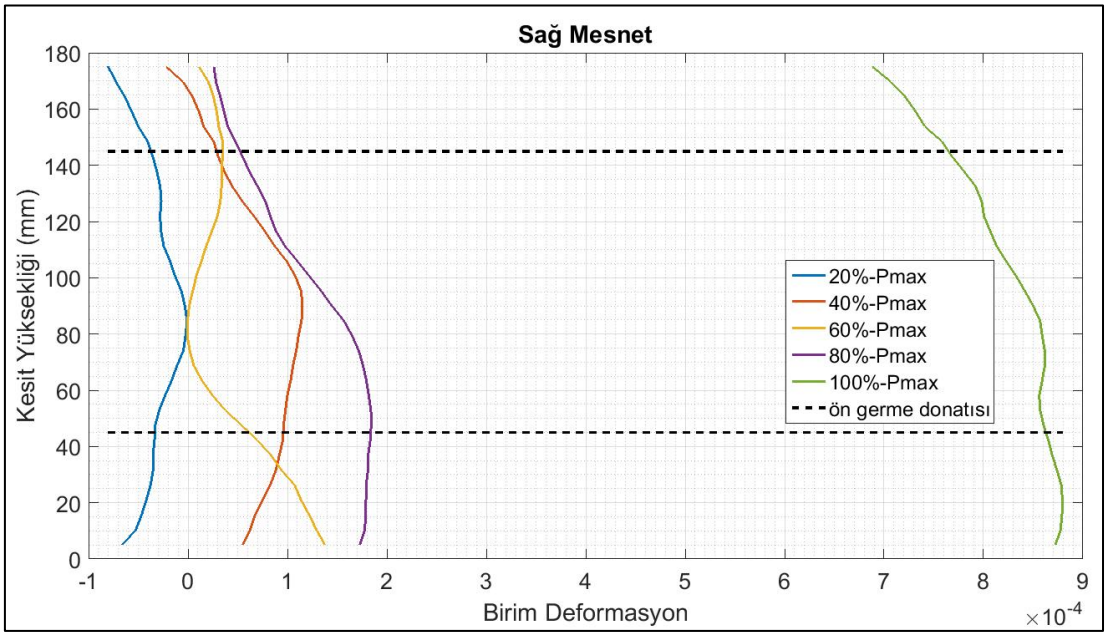
Şekil 5.76. Sol mesnet birim deformasyonlar



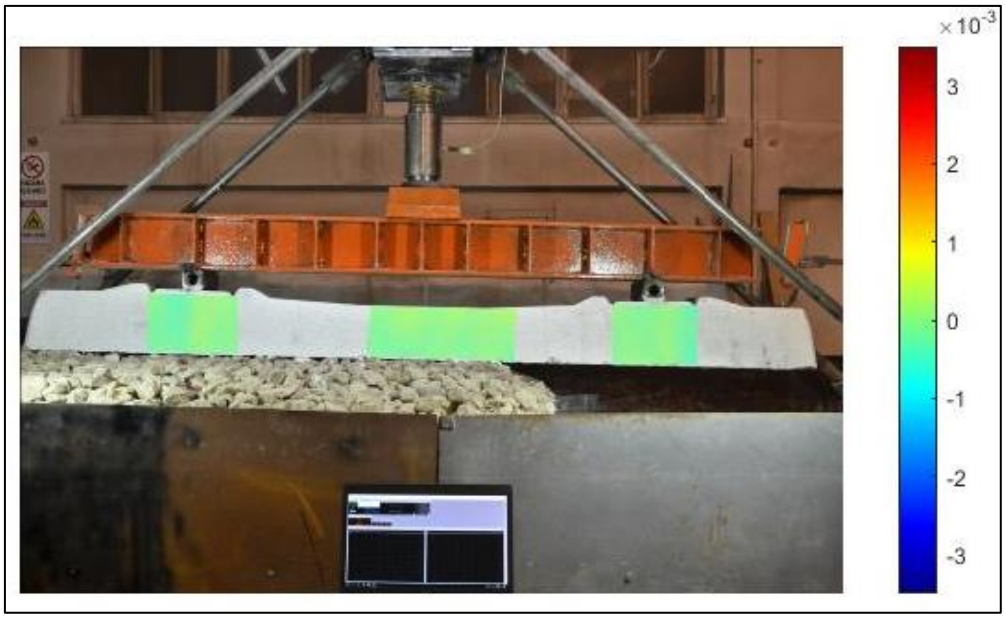
Şekil 5.77. Travers ortası birim deformasyonlar



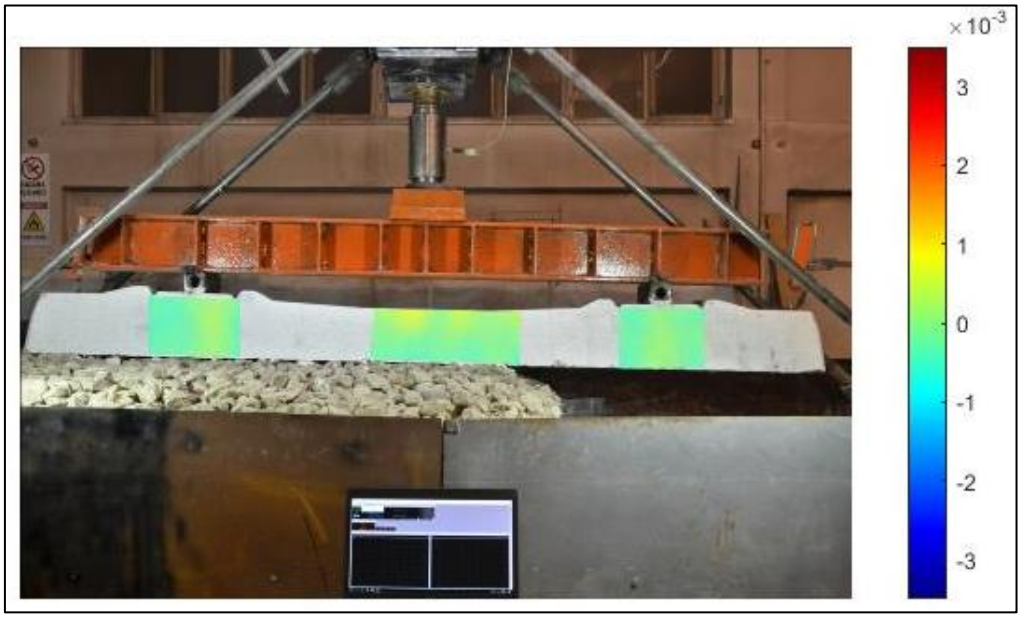
Şekil 5.78. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



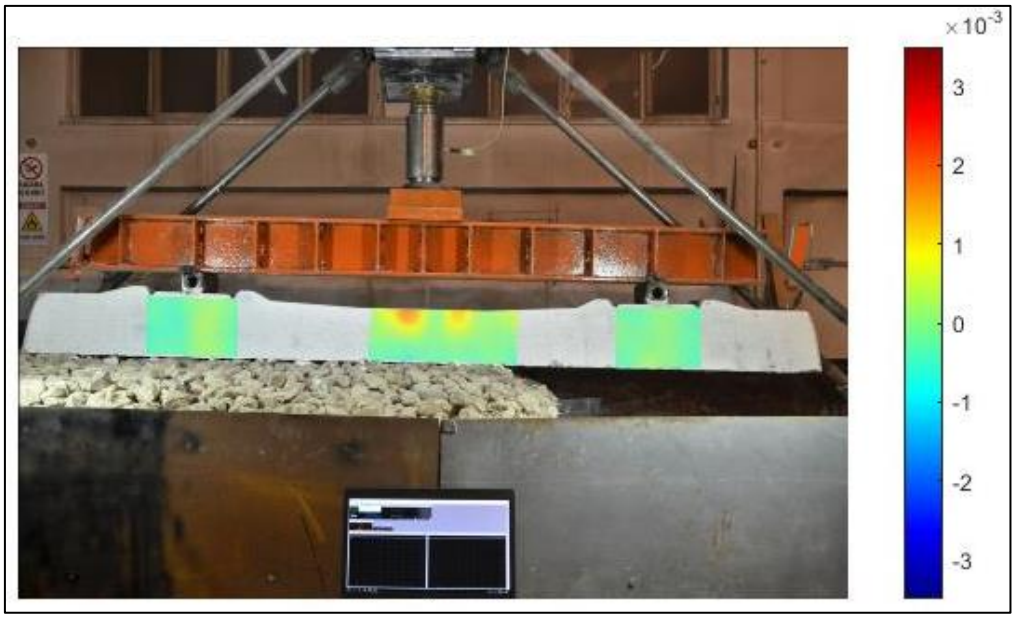
Şekil 5.79. Sağ mesnet birim deformasyonlar



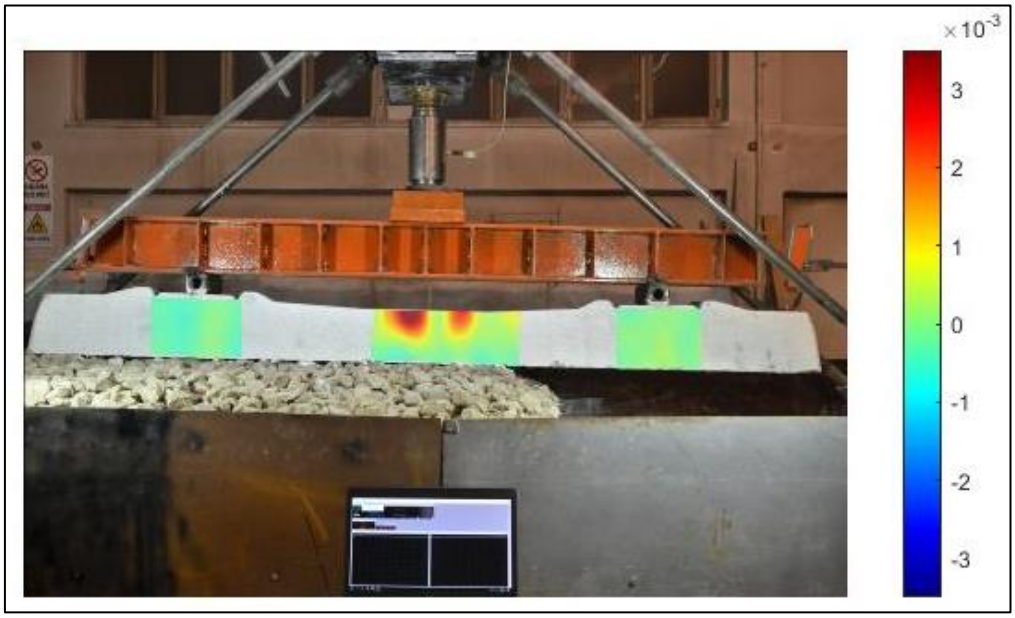
Resim 5.86. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



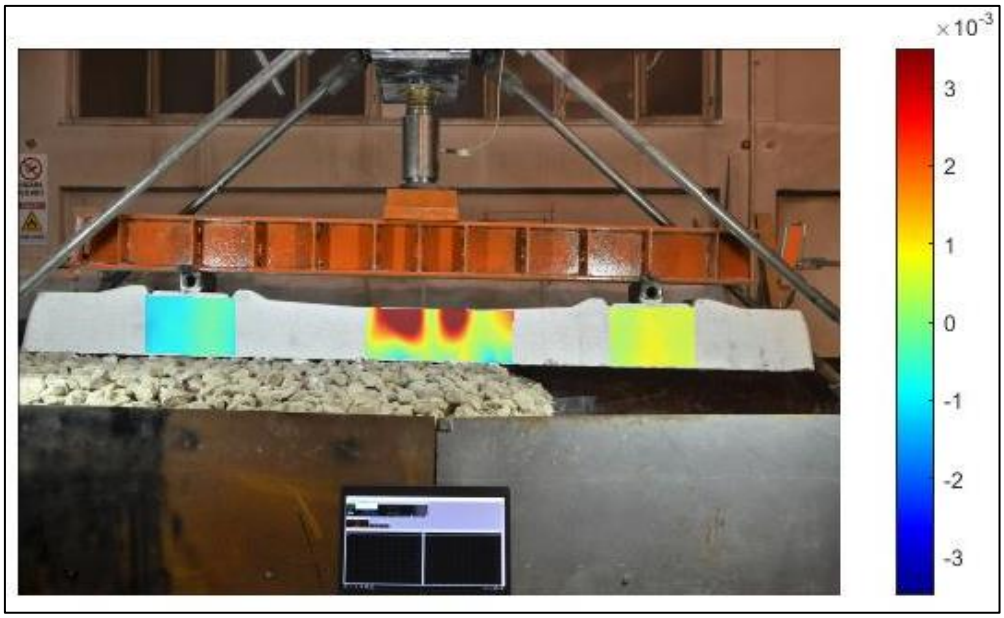
Resim 5.87. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.88. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.89. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



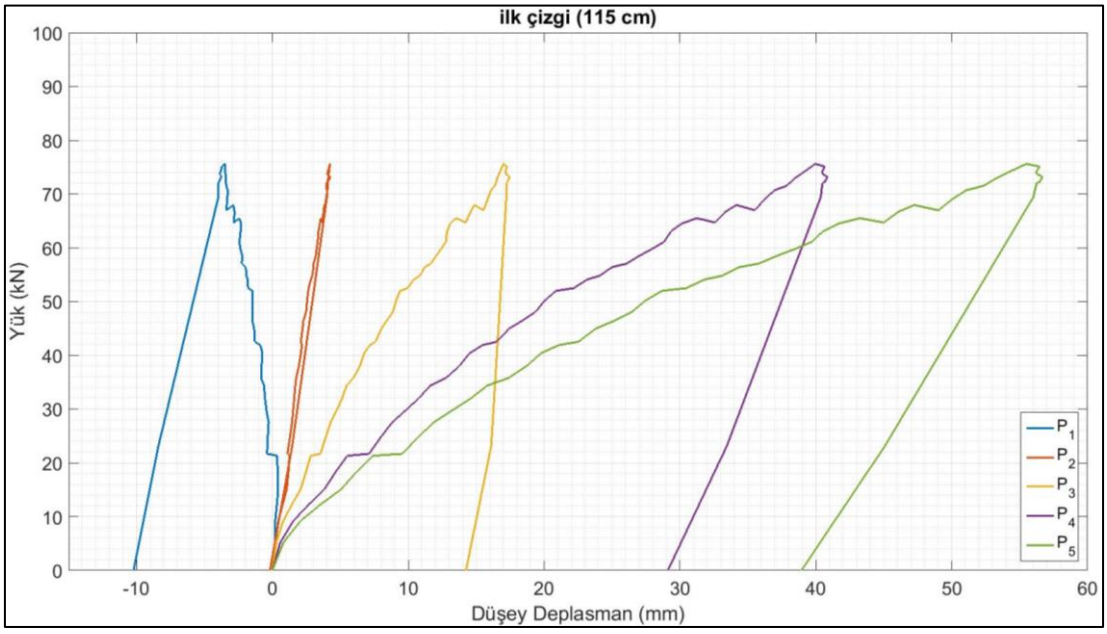
Resim 5.90. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

h) Geocell ile yapılan sekizinci aşama deney

Bu son aşamada traversin raya bağlandığı yerden traversin ortasına doğru 15 cm daha balast tabakası boşaltılmış ve 75 kN yük yüklenmiştir.

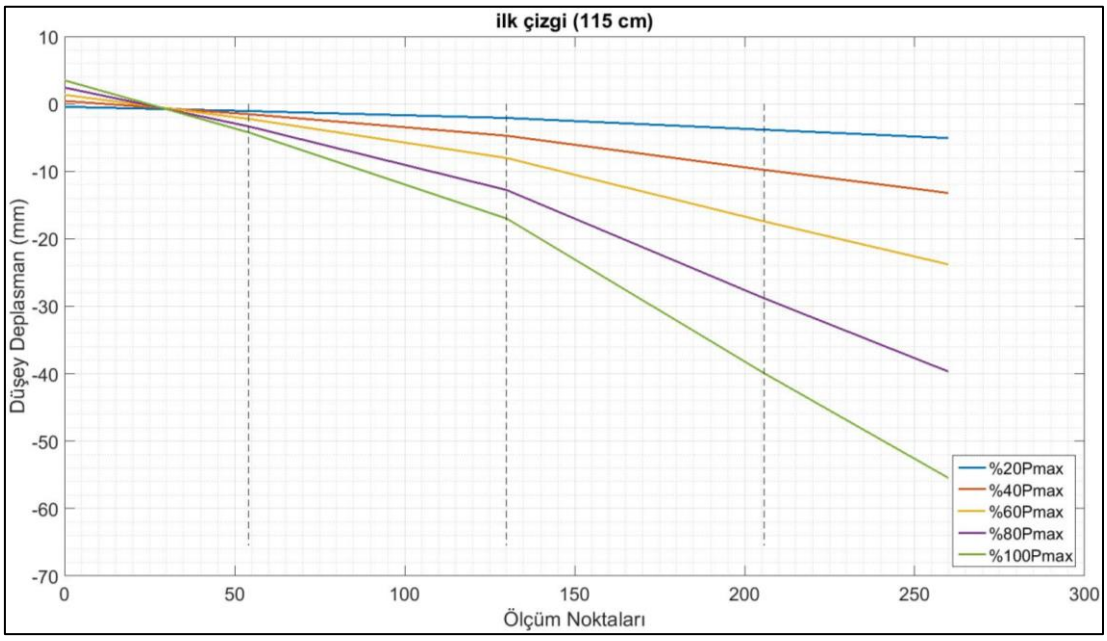


Resim 5.91. Geocell ile sekizinci deney aşaması



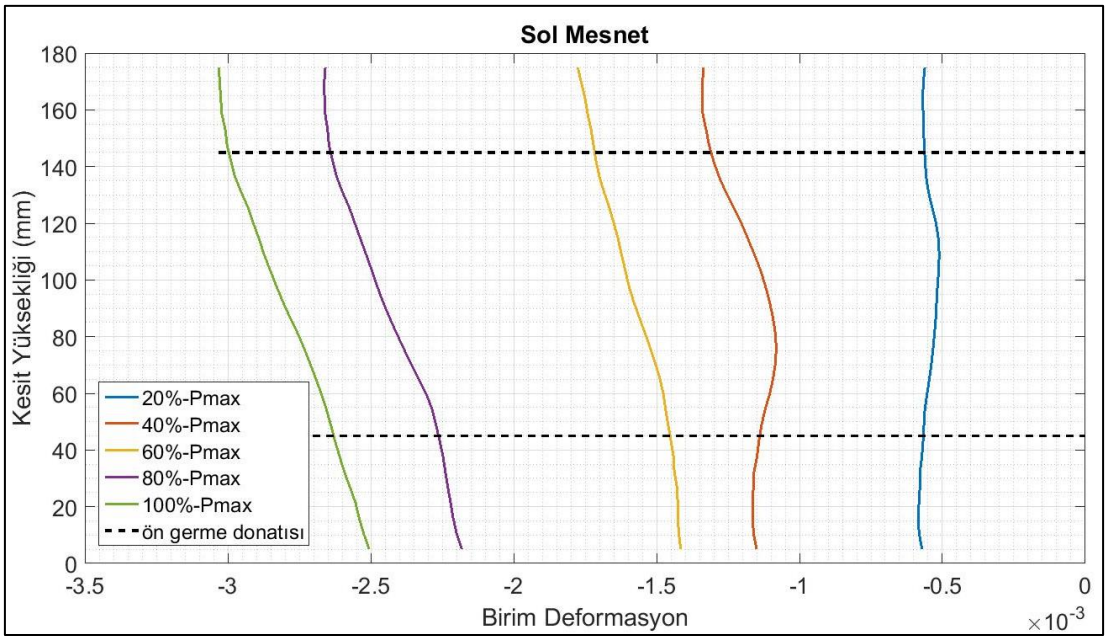
Şekil 5.80. Traverste ölçülen düşey deplasmanlar

P1 noktası bu deney aşamasında ki başlangıç durumuna göre 10 mm daha yukarı yönlü deformasyon gerçekleştirmiştir. P2 noktası bu deney aşamasında ki başlangıç durumuna geri dönmüştür. Diğer üç nokta ise aşağı yönlü kalıcı bir deformasyonla geri dönmüştür.

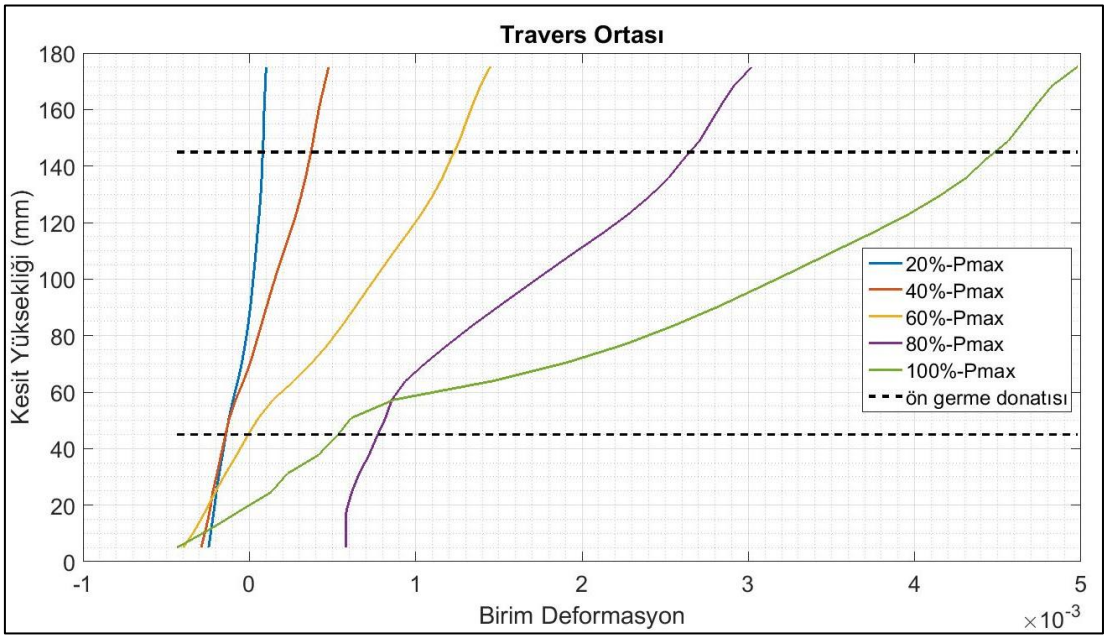


Şekil 5.81. Travers üzerinde yükleme sırasında görülen düşey deplasmanlar

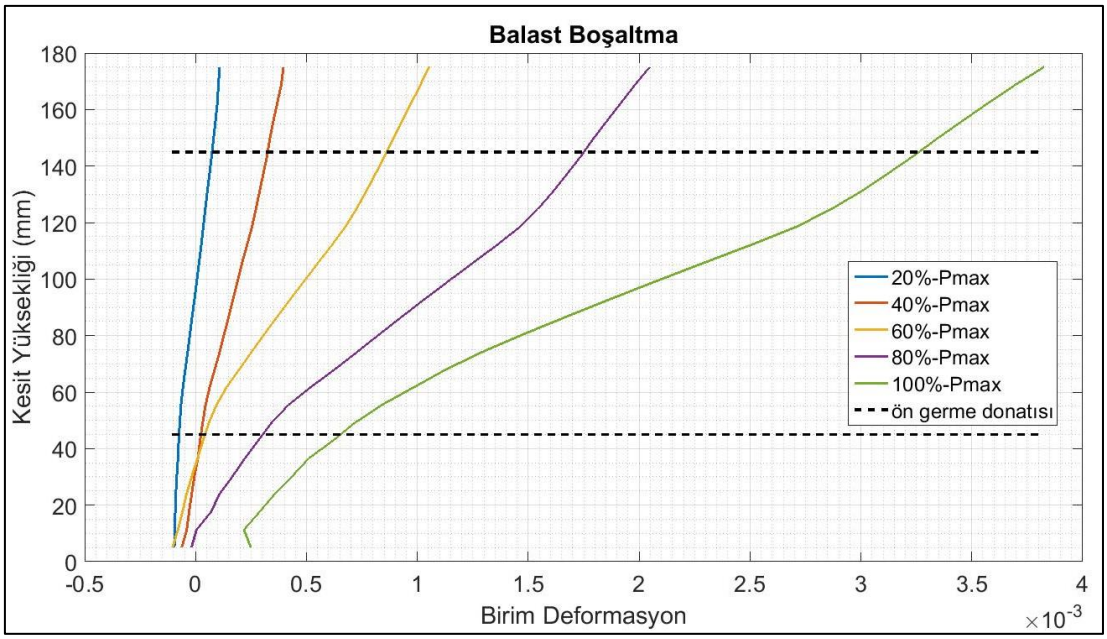
Geocell ile oluşturulan bu balast yatağı geogrid ile oluşturulan deney aşamalarından bir aşama daha fazla deney yapmamızı sağlamıştır. Bu fazladan yapılan bir aşamada bile yüklenen yük daha büyüktür. Bu son aşamaya kadar Yük - Düşey Deplasman grafiklerinden alınan ölçümlerde P5 noktasında toplam kalıcı düşey deplasman aşağı yönlü 120 mm olarak gerçekleşmiştir. P1 noktasında ise yukarı yönlü yaklaşık 25 mm olarak gerçekleşmiştir.



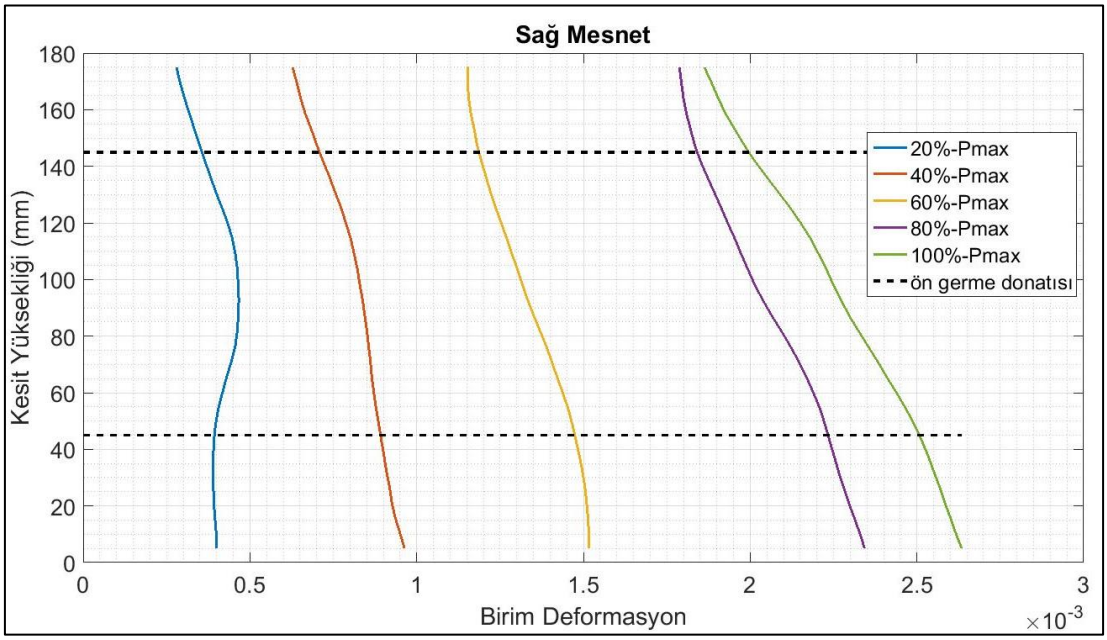
Şekil 5.82. Sol mesnet birim deformasyonlar



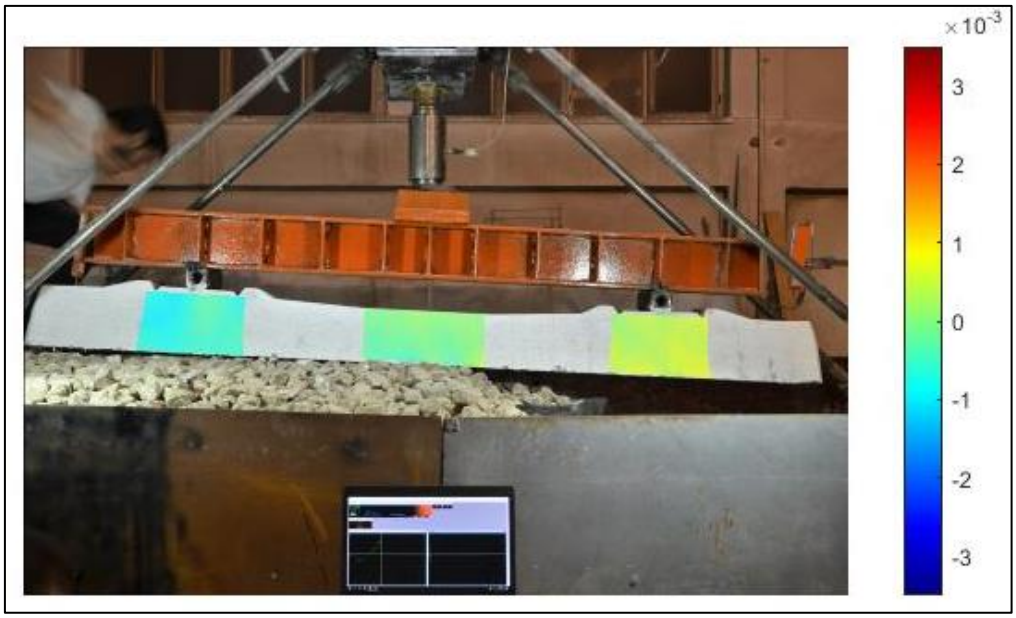
Şekil 5.83. Travers ortası birim deformasyonlar



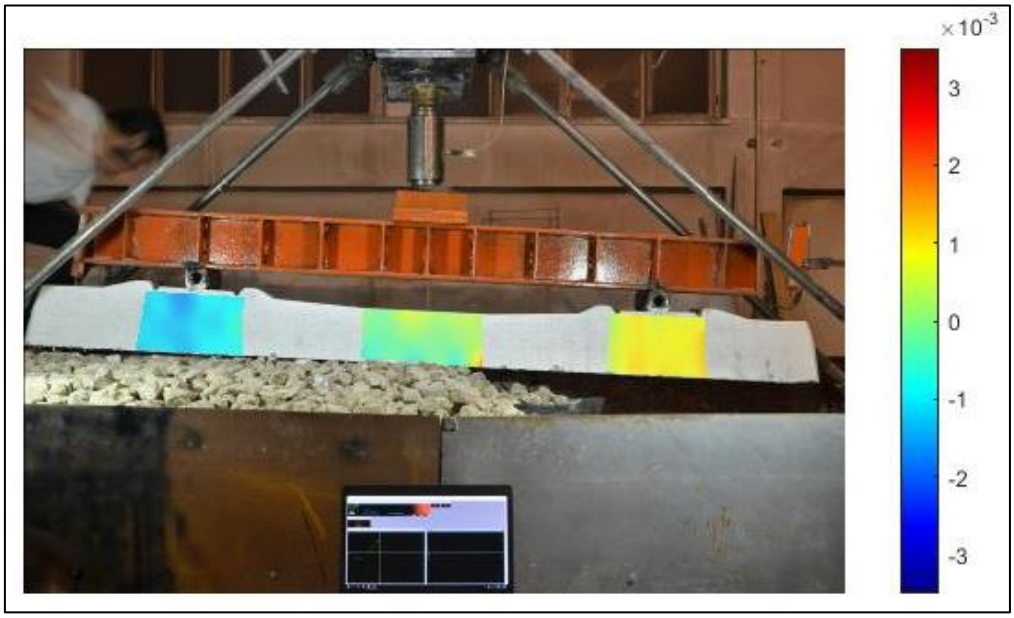
Şekil 5.84. Balast boşaltma çizgisinde birim deformasyonlar



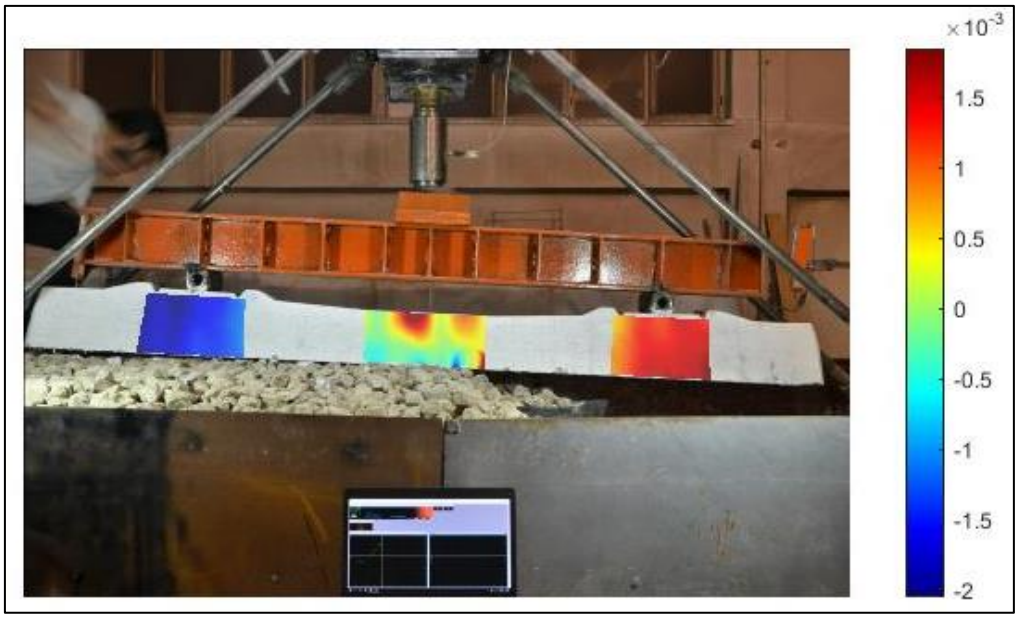
Şekil 5.85. Sağ mesnet birim deformasyonlar



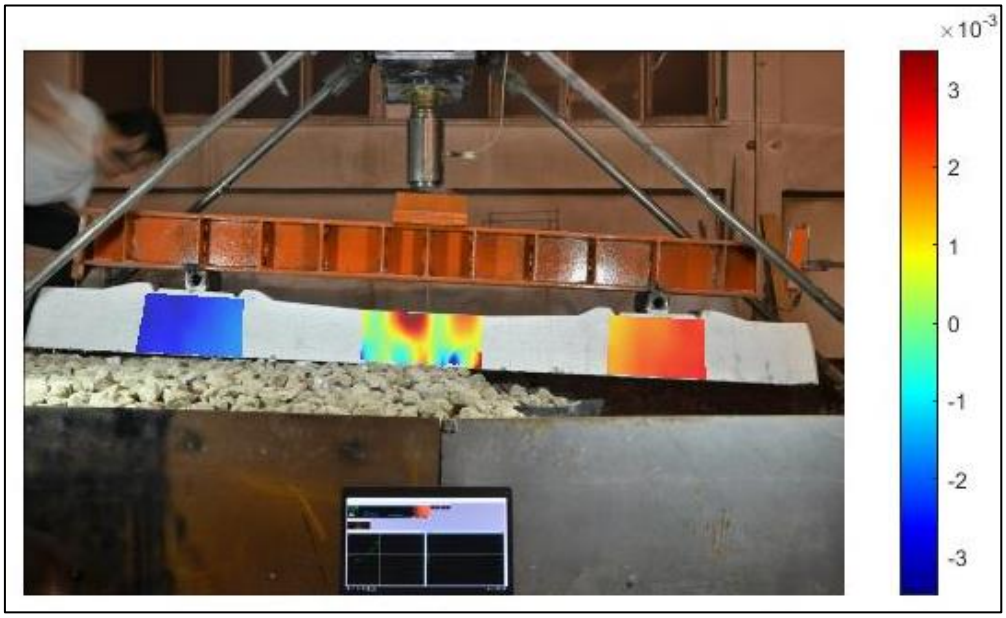
Resim 5.92. %20P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



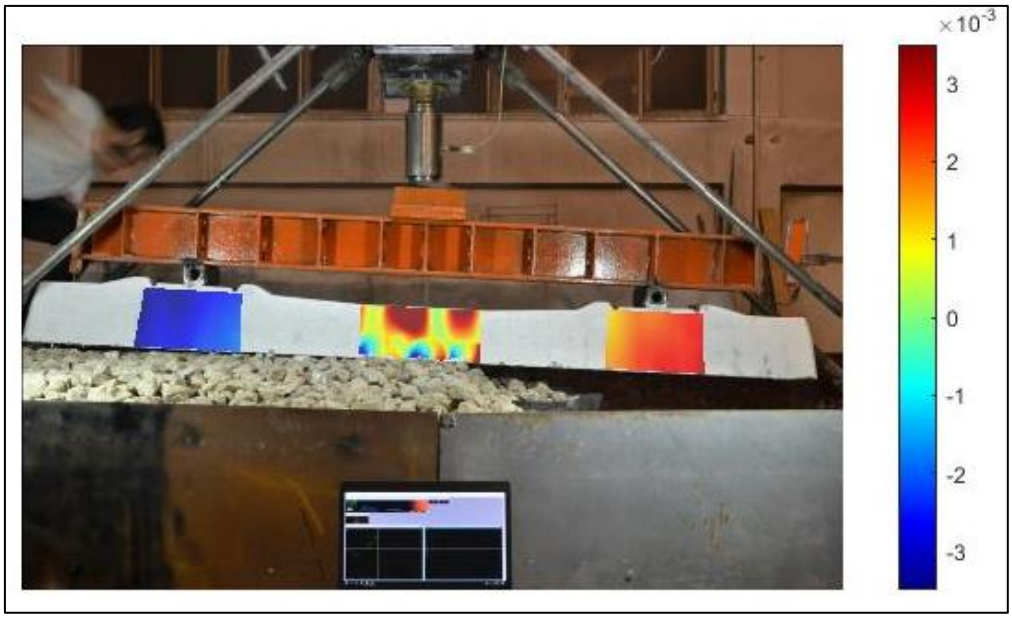
Resim 5.93. %40P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.94. %60P_{max} yüklemede birim deformasyonlar



Resim 5.95. %80P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

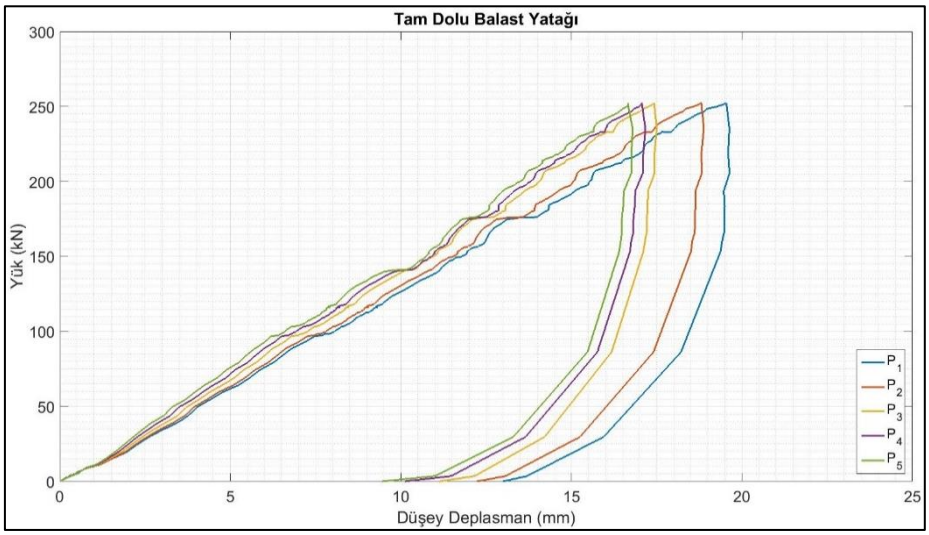


Resim 5.96. %100P_{max} yüklemede birim deformasyonlar

5.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırması

Geogrid ve geocell deneylerinde yapılan analizler neticesinde yük - deplasman grafikleri bir araya getirilerek aynı aşamalarda taşınan yüklerin karşılaştırmalarını yapmak, iki farklı geosentetik malzemenin demir yolunda ki performansını görmek için grafikler bir arada verilmiştir. Balastın hareketinin sınırlandırıldığı döngüsel yükler altında yayılmanın önlendiği geocell deneylerinde yük daha fazla yüklenebilmektedir.

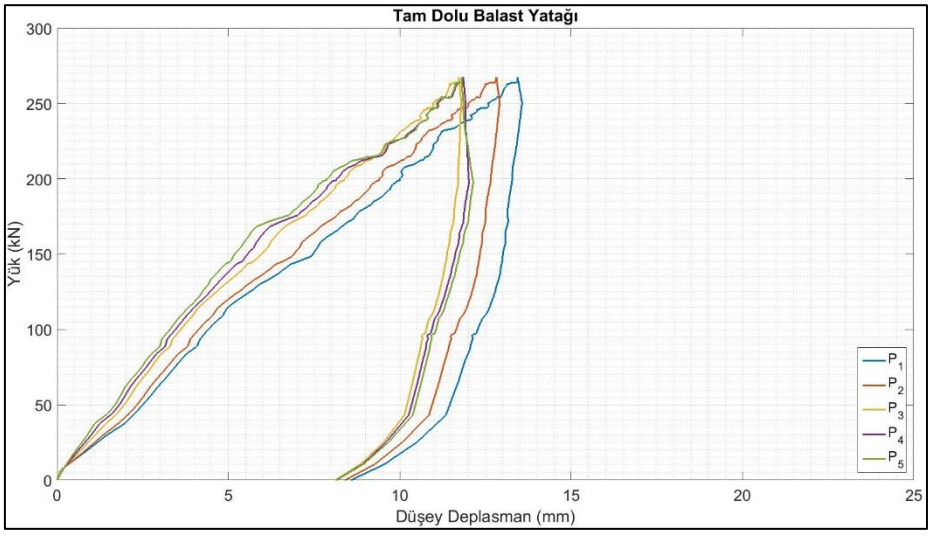
Geogrid ile yapılan 1. aşama deney:



Şekil 5.86. 1. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

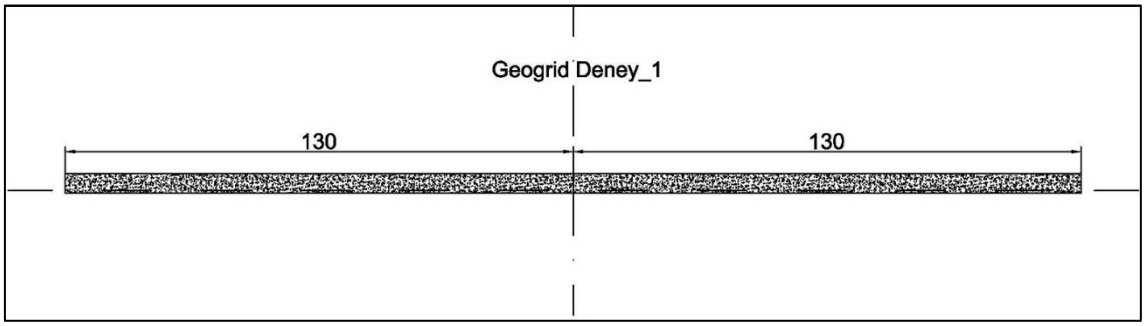
Geocell deneylerine göre deplasman hareketleri noktalar arasında birbirine yakın olmasa da geogrid, subbalast tabakasının standart kalınlık değeri olan en az 20 cm değerinin 7 cm kadar düşürülmesini sağlamıştır.

Geocell ile yapılan 1. aşama deney:

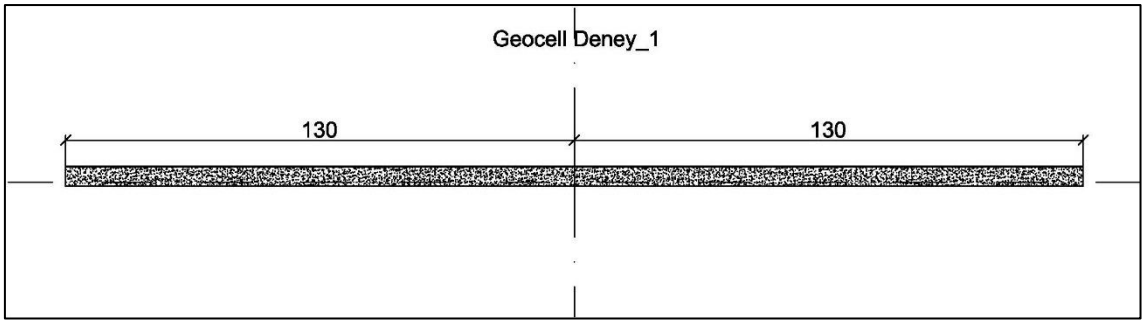


Şekil 5.87. 1. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Geocell destekli deneyde travers üzerinde ki noktaların deplasman hareketleri birbirine yakın şekilde gerçekleşmiştir.



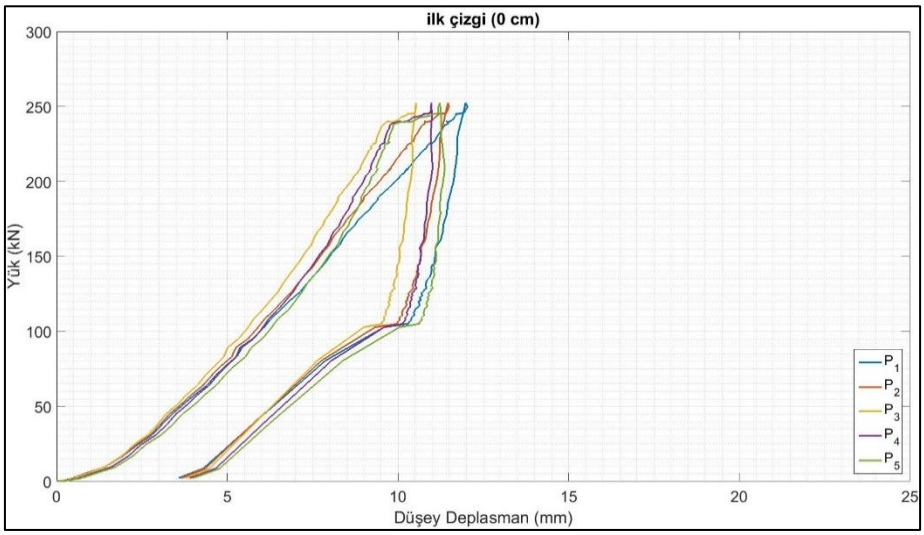
Şekil 5.88. Geogrid deney_1 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.89. Geocell deney_1 traverste dönme açısı ve travers son durumu

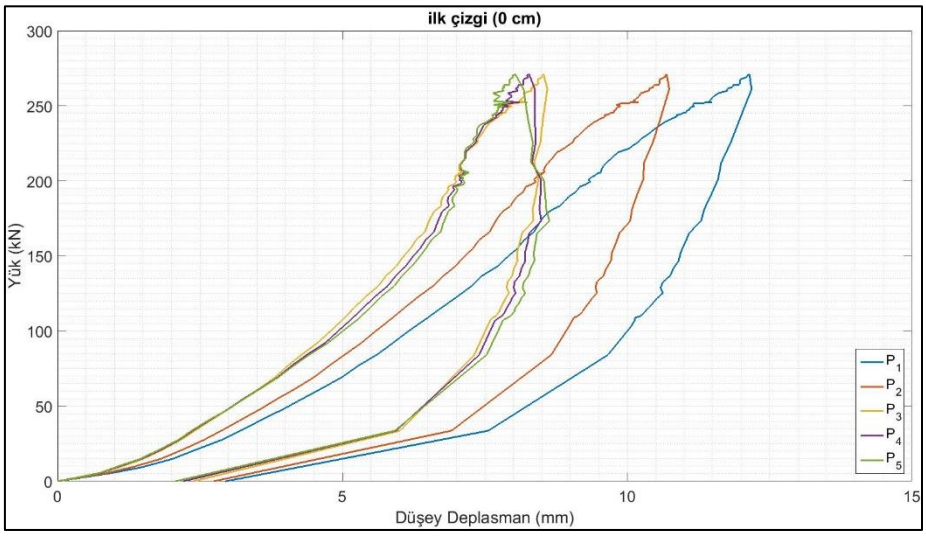
Geocell ve geogrid deneylerinde tam dolu havuz yüklemelerinde yüklenen yük tekrar boşaltıldıktan sonra traverste kalıcı düşey deplasmanlar gerçekleşirken herhangi bir kalıcı dönme meydana gelmemiştir.

Geogrid ile yapılan 2. aşama deney:



Şekil 5.90. 2. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

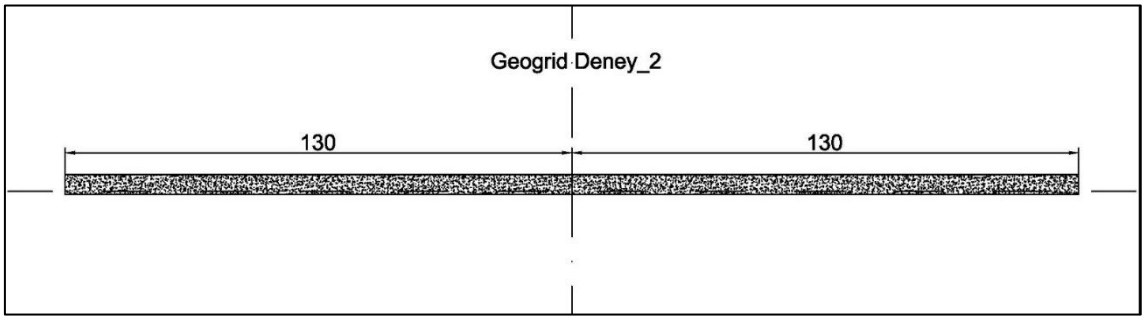
Geocell ile yapılan 2. aşama deney:



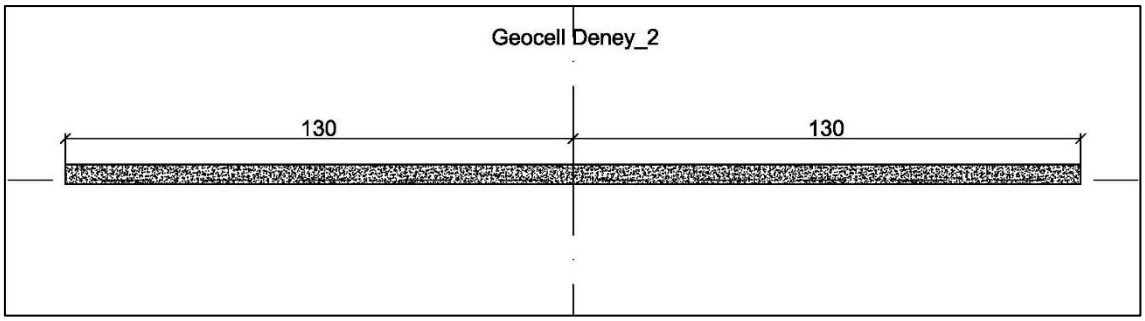
Şekil 5.91. 2. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Geocell 2. aşama deneyinde P5 ve P4 noktalarında maksimum yüklemede 10 mm üzerinde gerçekleşen düşey deformasyonlar geocell sayesinde yük boşaltıldıktan sonra tekrar elastik bir dönüşle tüm noktalar neredeyse aynı ölçüde düşey deplasman yapmıştır. Geogrid deneyinde ise 5 noktada da maksimum yükte düşey deformasyonlar birbirine yakın olmuş ve yük boşaltıldıktan sonra 4 mm kalıcı deplasman gerçekleşmiştir. Bu aşamada da geocell,

yüklemenin maksimum değerlere ulaşıp tekrar kalkmasından sonra travers altının stabilitesini yatayda daha iyi korumuştur.



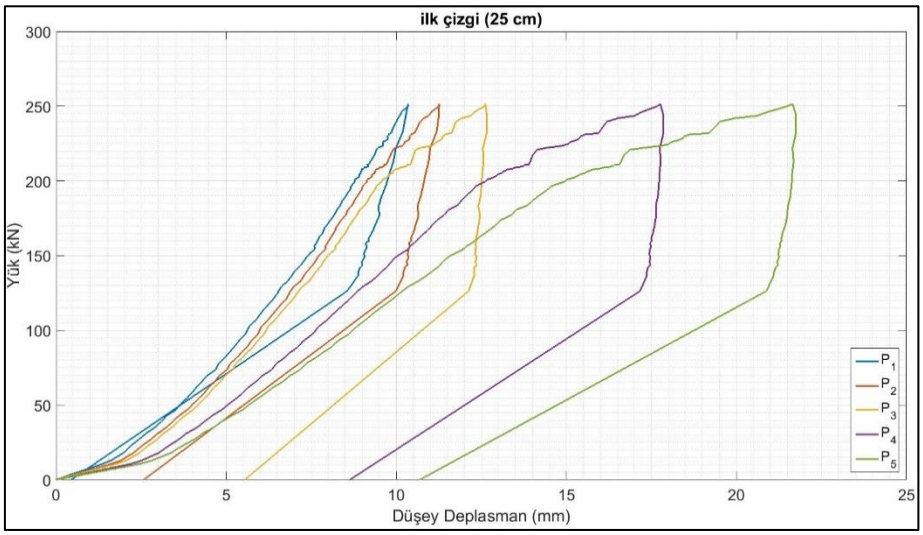
Şekil 5.92. Geogrid deney_2 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.93. Geocell deney_2 traverste dönme açısı ve travers son durumu

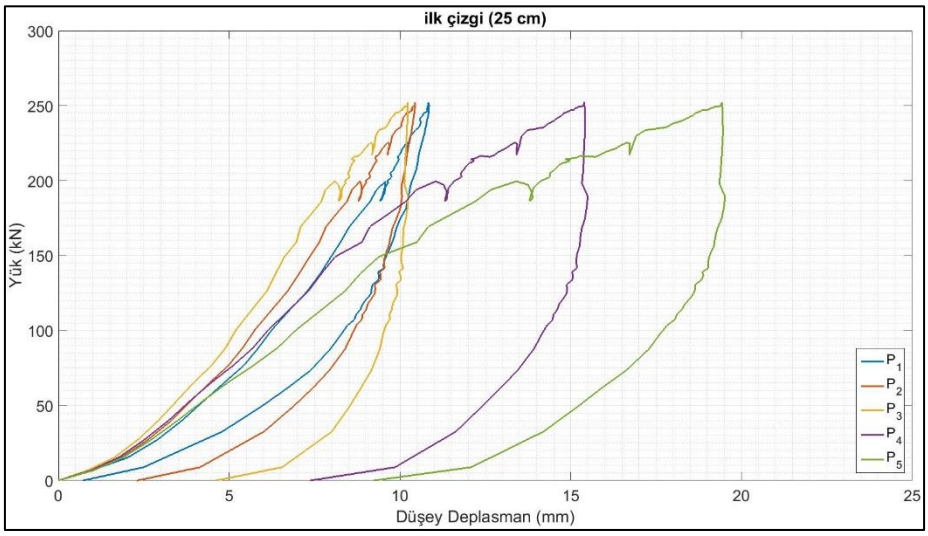
Travers ucuna kadar yapılan boşaltma sonrasında yüklenen yük tekrar boşaltıldıktan sonra traverste kalıcı düşey deplasmanlar gözlenmiş fakat kalıcı dönme meydana gelmemiştir.

Geogrid ile yapılan 3. aşama deney:



Şekil 5.94. 3. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

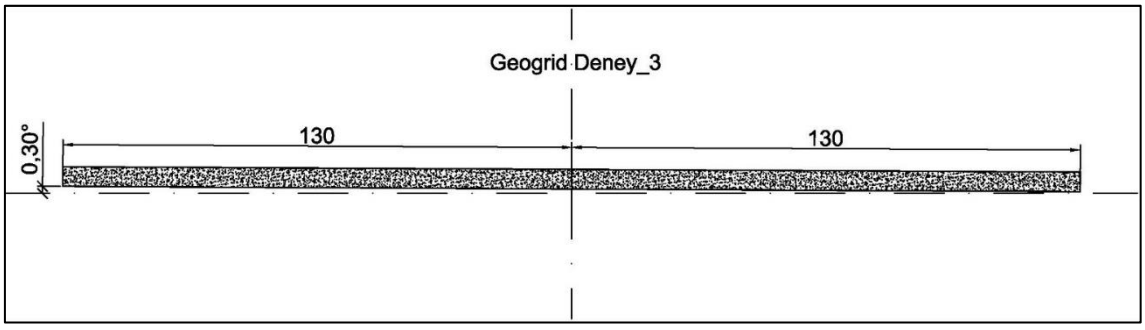
Geocell ile yapılan 3. aşama deney:



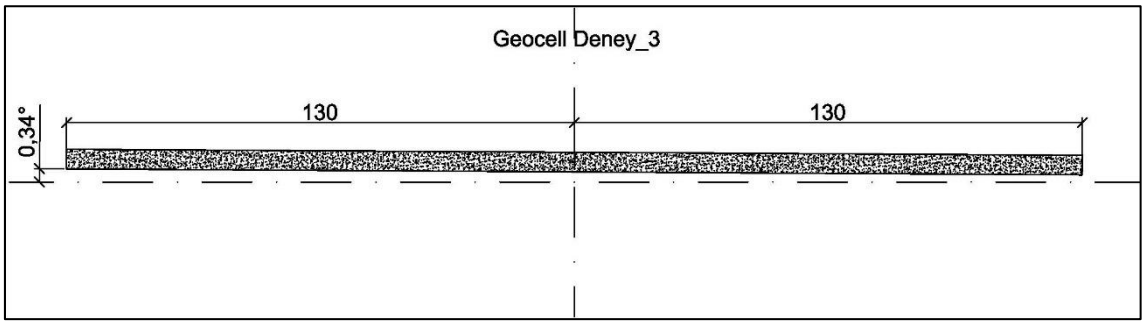
Şekil 5.95. 3. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Geocell deneyi 3. aşama artık balastın travers altında eksildiği ilk aşamadır. Bu aşamada yüklemenin 200 kN' a ulaşması ile birlikte balastta yayılma yönlü bir hareket gözlemlenmekte ve travers yük almayıp düşey deplasman yapmaya çalışmakta ancak bu duruma geocell engel olduğundan tekrar yük artmaktadır. Geogrid için böyle bir durumdan söz etmek mümkün değil. Travers üzerindeki beş noktanın yük maksimum seviyeye çıkıp

tekrar boşaltılması ile birlikte geocell deneylerinde ki geri dönüş geogrid deneylerine göre daha elastik bir tutum sergilemiştir. Bu durum balastın yayılmasının geocell tarafından engellendiğine açıkça kanıttır.



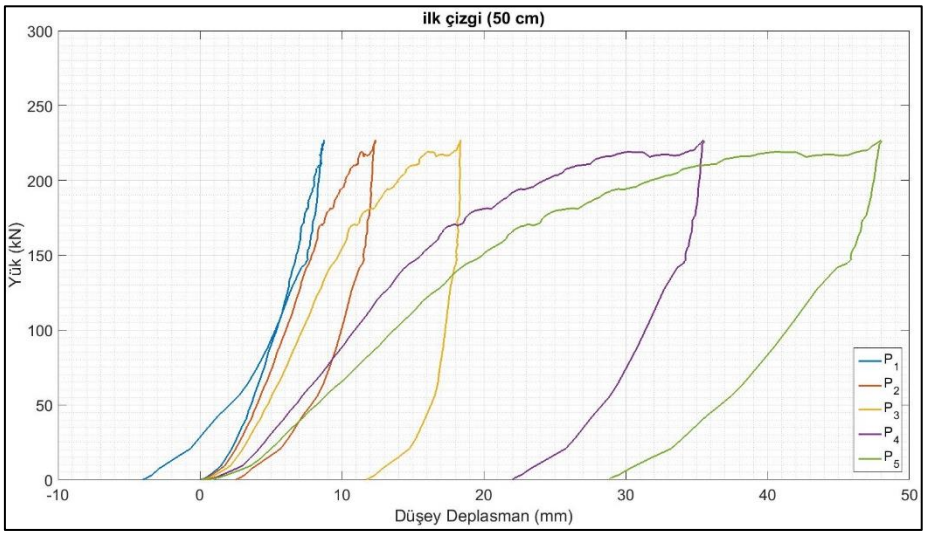
Şekil 5.96. Geogrid deney_3 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.97. Geocell deney_3 traverste dönme açısı ve travers son durumu

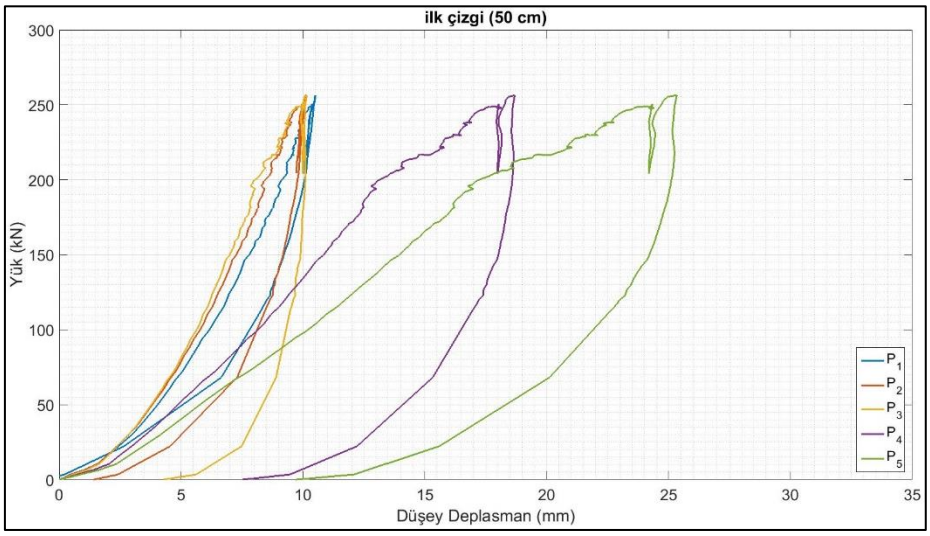
Üçüncü deney aşamaları, balastın travers ucundan itibaren 25 cm travers ortasına doğru boşaltıldığı ilk deneydir. Bu boşalma açıkça göstermektedir ki yüklenen yükler tekrar boşaltıldıktan sonra traverste balast eksilmesinden dolayı geogrid deneyinde 0,30º, geocell deneyinde 0,34º kalıcı dönme meydana gelmiştir. Bu dönme açılarının tekrarlayan yükler altında artacağı öngörülmekte olup travers her bir balast hareketliliğinde performansından fazla zorlanacaktır.

Geogrid ile yapılan 4. aşama deney:



Şekil 5.98. 4. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

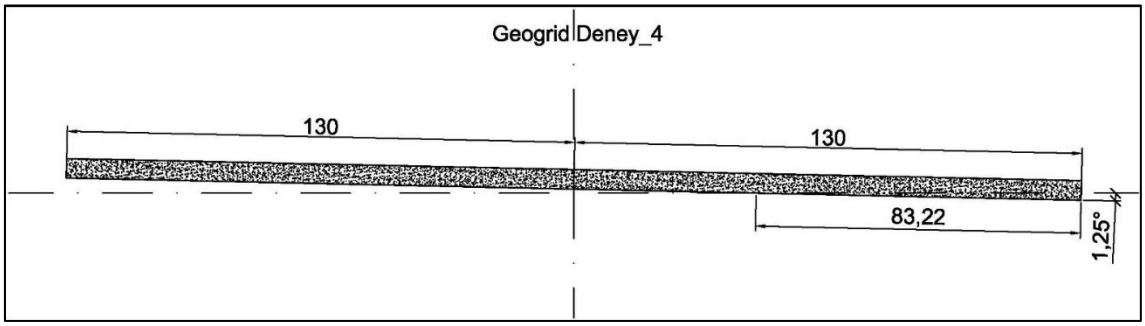
Geocell ile yapılan 4. aşama deney:



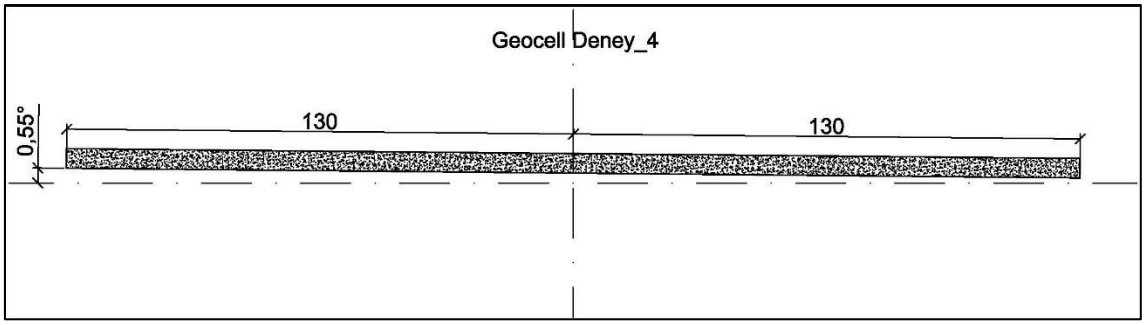
Şekil 5.99. 4. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Üçüncü deney aşamasında olduğu gibi balastın artık travers altında boşalmaya başlamasıyla birlikte geocell deneyinde yük 250 kN seviyelerdeyken balastın yayılma yönlü hareketinden dolayı travers üzerindeki yük bir an düşmeye başlayıp balastın geocell içerisinde tekrar sıkışmasıyla birlikte yük artmaktadır. Ayrıca yükün tekrar boşaltılması ile birlikte geocell deneyinde beş adet işaretli noktanın geri dönüşü geogrid deneyine göre daha elastiktir.

Traversin en sağ ucu P5 noktasında kalıcı deplasmanlar; geocell deneyinde 10 mm, geogrid deneyinde 29 mm olarak gerçekleşmiştir.



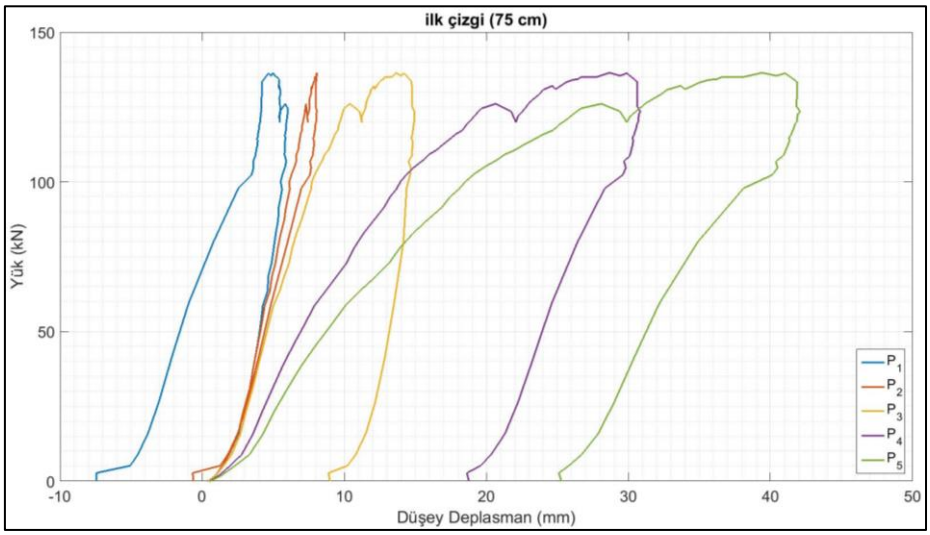
Şekil 5.100. Geogrid deney_4 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.101. Geocell deney_4 traverste dönme açısı ve travers son durumu

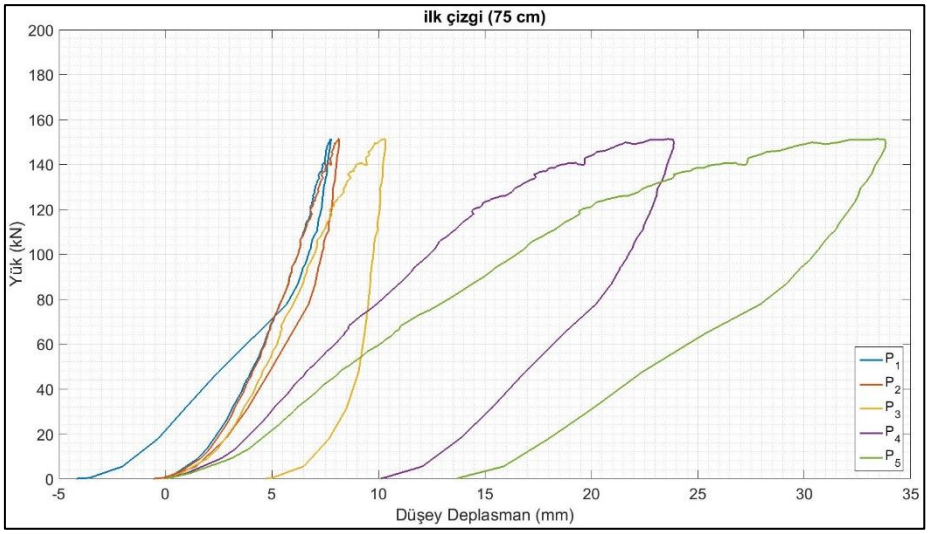
Dördüncü deney aşaması, balastın travers ucundan itibaren 50 cm travers ortasına doğru boşaltıldığı deneydir. Bu boşalma rayın traverse mesnetlendiği noktadır. Traverste balast eksilmesinden dolayı geogrid deneyinde 1,25º, geocell deneyinde 0,55º dönmüştür. Geocell dolu havuzda balast akması önlendiği için yükleme tekrar boşaltıldıktan sonra kalıcı dönme açısı geogridde daha büyük olmuştur.

Geogrid ile yapılan 5. aşama deney:



Şekil 5.102. 5. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

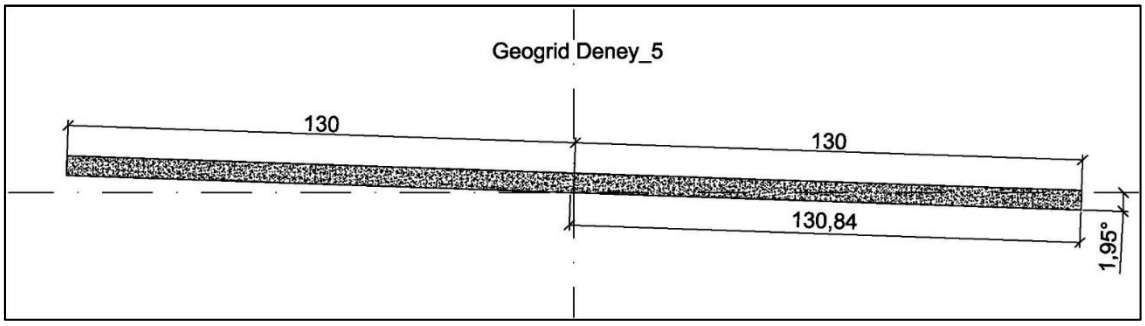
Geocell ile yapılan 5. aşama deney:



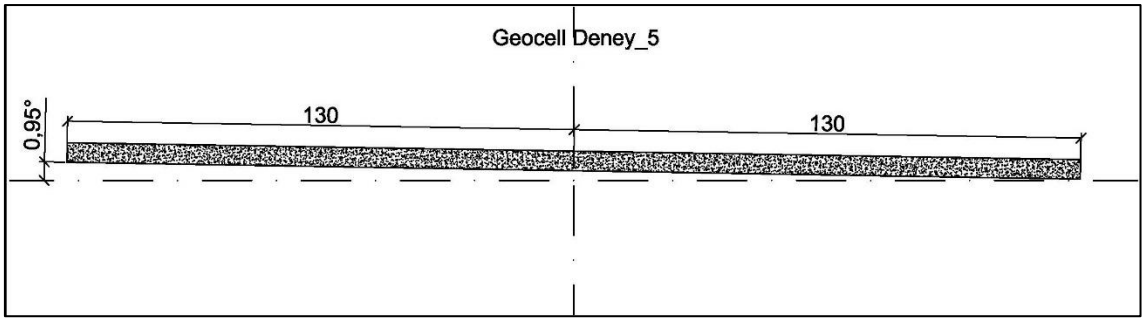
Şekil 5.103. 5. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Geocell deneyinde 150 kN yükte P5 noktasında düşey deplasman 34 mm, yük boşaltıldıktan sonra 14 mm kalıcı deplasman olarak gerçekleşmiştir. Traversin düşey deplasman miktarı balast hareketinin kısıtlı olmasından dolayı 20 mm geri dönüşle travers eski haline gelmeye çalışmıştır. Geogrid deneyinde ise 137 kN yükte P5 noktasında düşey deplasman 42 mm, yük boşaltıldığında ise 26 mm olarak kalıcı deplasman gerçekleşmiştir. Geogrid deneyinde

ise 16 mm geri dönüş gerçekleşmiştir. Geocell deneyinde yük altında maksimum deplasman geogrid deneyine göre daha düşük ve elastik geri dönüş daha büyüktür.



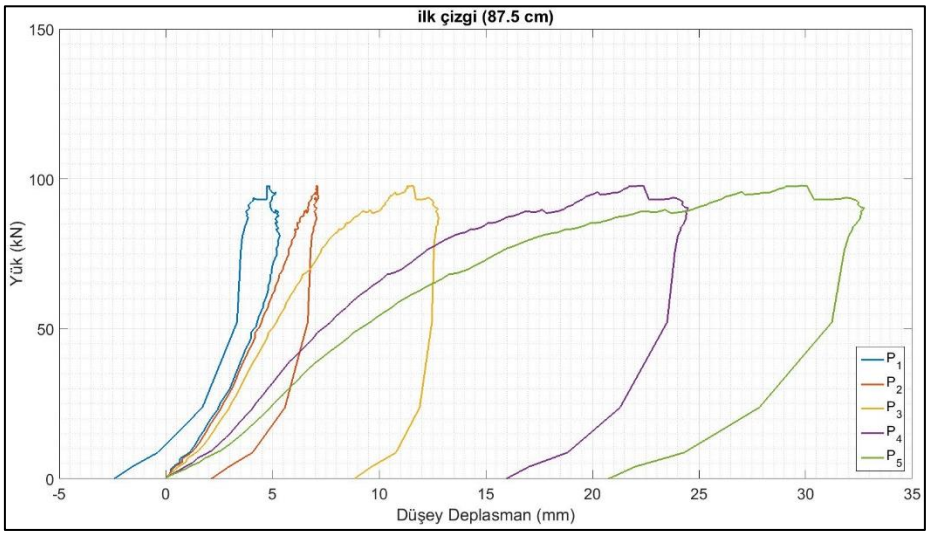
Şekil 5.104. Geogrid deney_5 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.105. Geocell deney_5 traverste dönme açısı ve travers son durumu

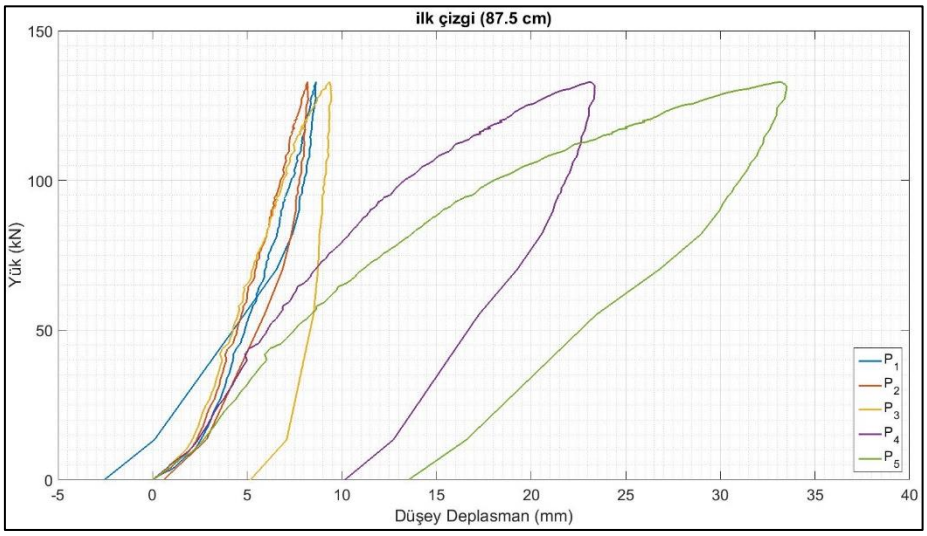
Beşinci deney aşaması, balastın travers ucundan itibaren 75 cm travers ortasına doğru boşaltıldığı deneydir. Traverste balast eksilmesinden dolayı geogrid deneyinde 1,95º, geocell deneyinde 0,95º dönmüştür. Travers bu dönmeler ile birlikte üç noktadan noktasal yük alıyormuş gibi davranmaktadır. Nokta yüklerden ortadaki travers ortasına yaklaştıkça travers kesiti de bu bölgede daha ince olduğundan travers daha çok zorlanmakta ve Resim 5.84’ te de görülen gözle görülür çatlaklar meydana gelmeye başlamıştır.

Geogrid ile yapılan 6. aşama deney:



Şekil 5.106. 6. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

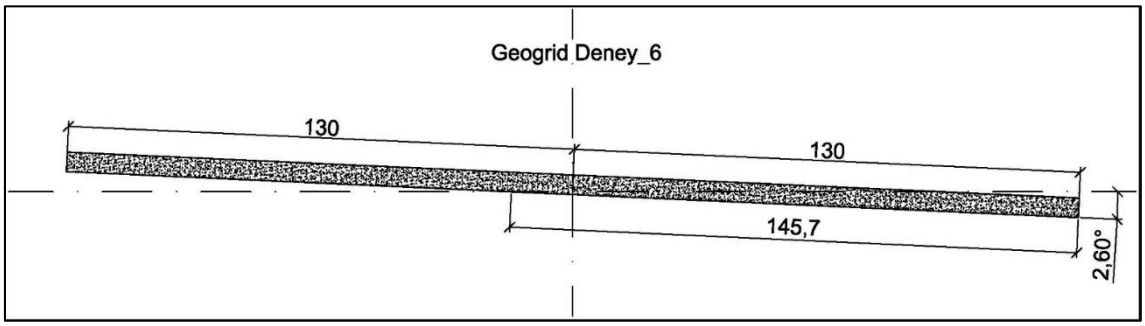
Geocell ile yapılan 6. aşama deney:



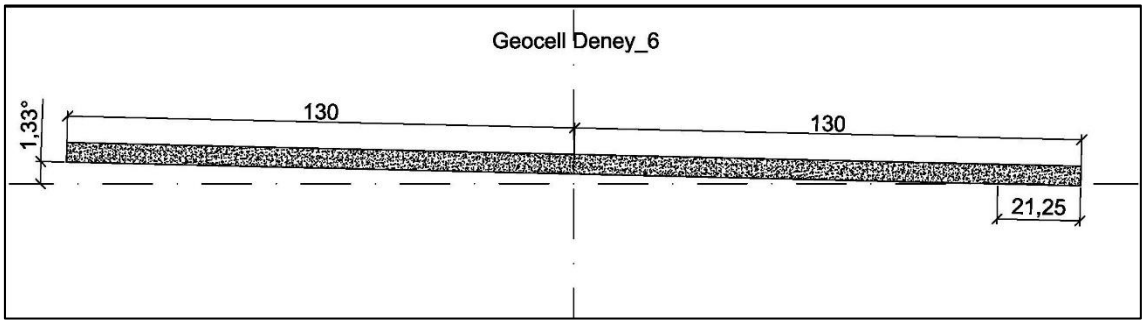
Şekil 5.107. 6. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Geocell ile yapılan deneyde 132 kN, geogrid ile yapılan deneyde ise 98 kN yükleme gerçekleştirilmiştir. P5 noktası yük altında geogrid deneyinde maksimum 33 mm, geocell deneyinde ise maksimum 34 mm seviyelerinde düşey deplasman yapmıştır. Yük boşaltıldıktan sonra P5 noktasında geogridli deneyde 21 mm geocelli deneyde ise14 mm kalıcı deplasman gerçekleşmiştir. P5 noktasında aynı miktar balast boşalmasına rağmen yük

kalktıktan sonra travers düşey deplasman miktarı daha azdır. Geogrid deney grafiğinde deplasman artışı sürekli artarken yük aynı oranda artmamaktadır. Geocell deneyinde ise yük ve deplasmanda ki artış aynı oranda artmaktadır. Geocell deneyi daha fazla yükle gerçekleştirilebilirdi ancak hem yük hücresinde sorun yaşamamak hem de daha fazla boşaltma yaparaktan deney yapabilmek için 132 kN yük yüklendikten sonra tekrar boşaltmaya geçilmiştir.



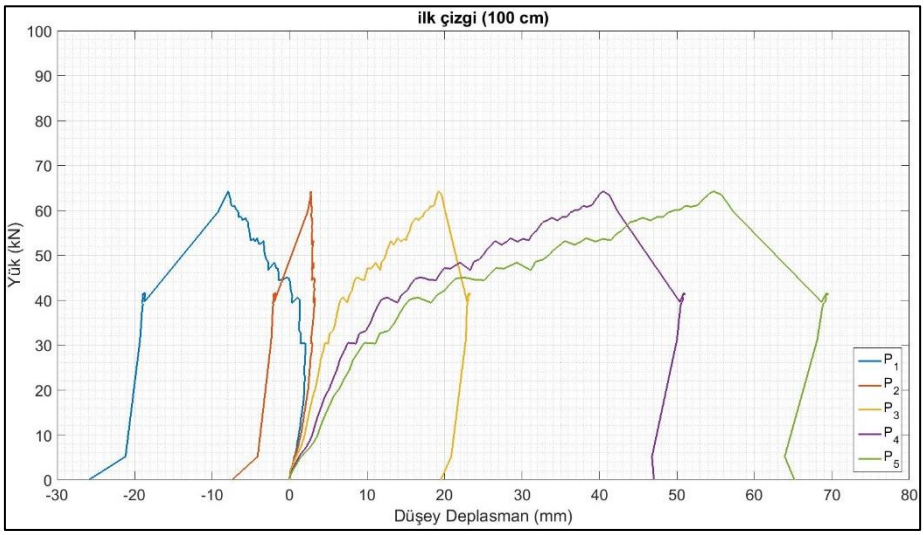
Şekil 5.108. Geogrid deney_6 traverste dönme açısı ve travers son durumu



Şekil 5.109. Geocell deney_6 traverste dönme açısı ve travers son durumu

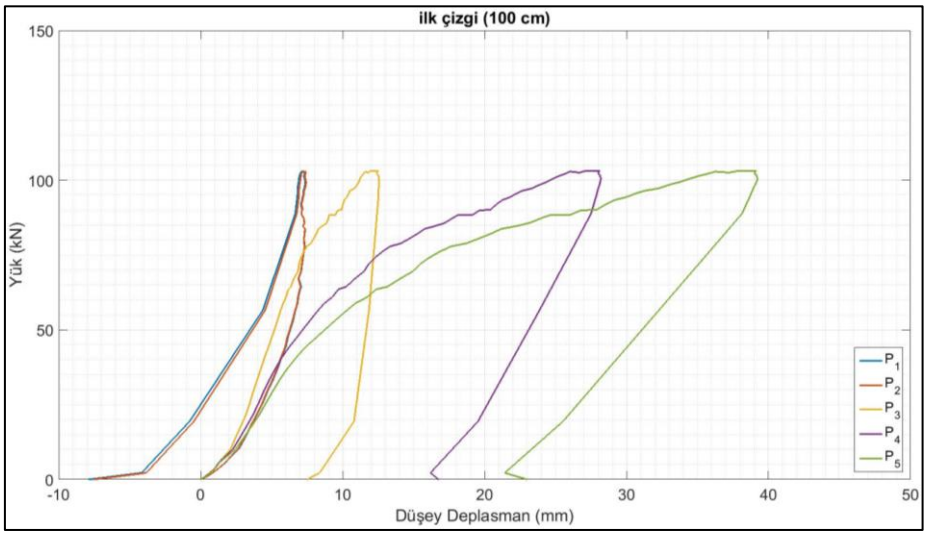
Altıncı deney aşaması, balastın travers ucundan itibaren 87,50 cm travers ortasına doğru boşaltıldığı deneydir. Traverste balast eksilmesinden dolayı yük boşaltıldıktan sonra kalıcı olarak geogrid deneyinde 2,60º, geocell deneyinde 1,25º dönmüştür. Traversin dengelendiği noktanın yaklaşık olarak travers ortası olduğu varsayıldığında ve travers kesitinin bu bölgede kenarlara göre daha küçük kesitte olduğu düşünüldüğünde döngüsel yük altında traverste çatlaklar her bir adımda daha da artacak, ön germede kayıplar yaşanacak ve traverse kendisine biçilen servis ömrünü tamamlayamadan servis dışı kalacaktır. Resim 5.84' te de gösterildiği gibi bu aşamada artık çatlaklar gözle görülür seviyede geniştir.

Geogrid ile yapılan 7. aşama deney:



Şekil 5.110. 7. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

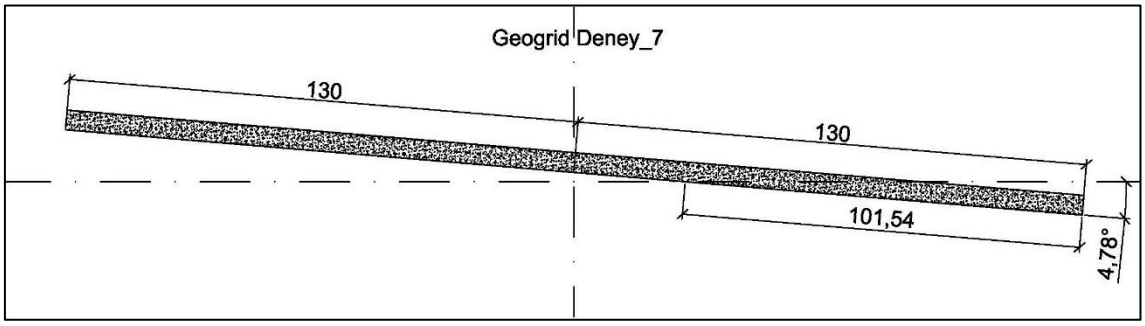
Geocell ile yapılan 7. aşama deney:



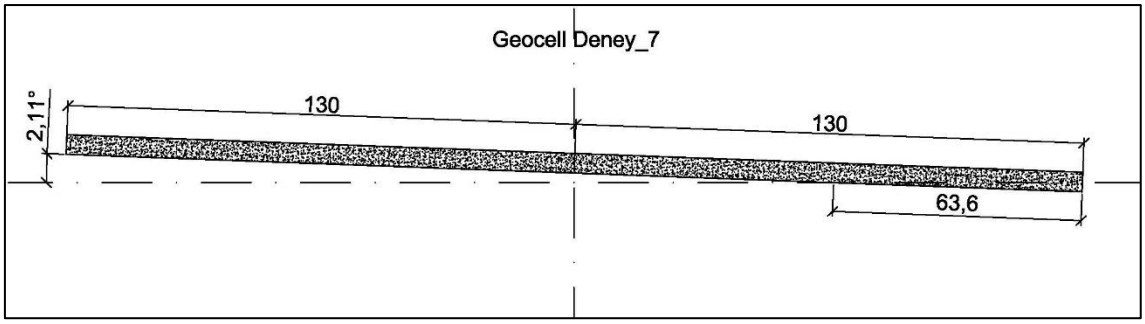
Şekil 5.111. 7. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

Bu deney aşaması, geogrid için son deney aşaması olup travers üzerindeki P1 noktası yukarı yönde 27 mm kalıcı deplasman gerçekleştirirken P5 noktası 65 mm aşağı yönlü kalıcı deplasman gerçekleştirmiştir. Geogrid deneyinde travers stabilitesi tamamen bozulmuş ve bir sonra ki aşamaya geçilememiştir. Geocell deneyinde ise P1 ve P2 noktaları yukarı yönde 8 mm kalıcı deplasman gerçekleştirirken P5 noktası 22 mm aşağı yönlü kalıcı deplasman

gerçekleştirmiştir. Geocell deneyinde P5 noktasında ki yük – deplasman eğrisi deplasman yönünde daha hızlı hareket edip grafik artık yatay dönünce yükleme sonlandırılmıştır.



Şekil 5.112. Geogrid deney_7 traverste dönme açısı ve travers son durumu



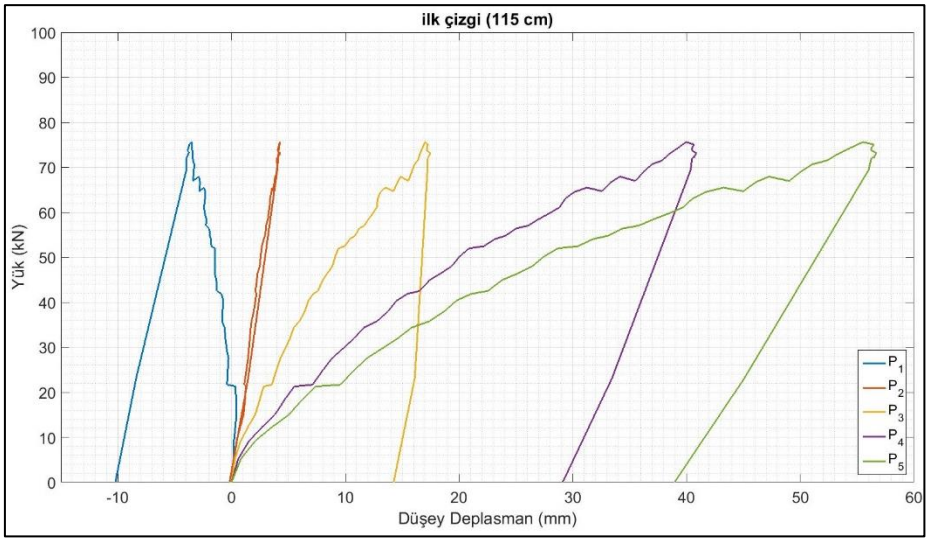
Şekil 5.113. Geocell deney_7 traverste dönme açısı ve travers son durumu

Yedinci deney aşaması, balastın travers ucundan itibaren 100 cm travers ortasına doğru boşaltıldığı deneydir. Traverste balast eksilmesinden dolayı yük boşaltıldıktan sonra kalıcı olarak geogrid deneyinde 4,78º, geocell deneyinde 2,11º dönmüştür. Bu kalıcı dönmeler geogrid deneylerinde her bir döngüsel yük altında geocell deneylerine göre daha fazla artacağı öngörülmektedir.

Geogrid ile yapılan 8. aşama deney:

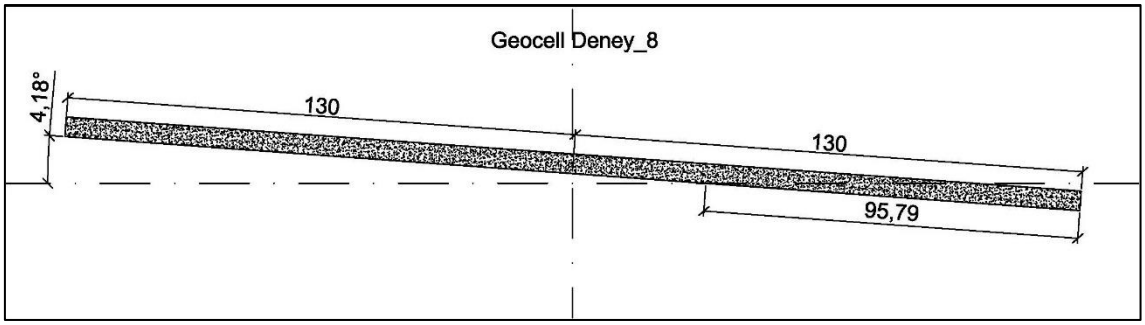
Geogrid ile 8.deney aşamasına geçilememiştir.

Geocell ile yapılan 8. aşama deney:



Şekil 5.114. 8. aşama deney, yük – düşey deplasman grafikleri

8. aşamada sadece geocell deneyi yapılabilmiş ancak travers stabilitesinin artık kritik olmasından dolayı yük hücresinin herhangi bir hasar görmemesi için deney sonlandırılmıştır. P1 noktası yukarı yönde 10 mm kalıcı deplasman gerçekleştirirken P5 noktası 40 mm aşağı yönlü kalıcı deplasman gerçekleştirmiştir. Geocell deneyleri boyunca geocell malzemesi herhangi bir deformasyona uğramamış yırtılma, kopma gerçekleşmemiştir.



Şekil 5.115. Geocell deney_8 traverste dönme açısı ve travers son durumu

Sekizinci deney aşaması geogrid ile gerçekleştirememiş geocell ile yapılmıştır. Boşaltma miktarı travers ucundan itibaren 115 cm olarak gerçekleşmiş ve traversin tam orta noktasına 15 cm kalmıştır. Bu aşamada traverste, yükün boşaltılması ile birlikte 4,18º kalıcı dönme meydana gelmiştir. Geocell ile yapılan bu deneyde bile geogrid son deney aşamasında ki dönme açısı 4,78º geçilememiştir. Bu durumda balast stabilitesi açısından bir kere daha geocell katkısı pekiştirilmiştir. Demiryollarında maksimum dever 130 mm olarak ele alındığında geogridde maksimum dönme ile birlikte düşeyde kalıcı dönme uzunluğu (1300 mm x sin(4,78º) =) 108,3 mm' dir. Bu değer maksimum dever 130 mm' yi aşmadığı için geogrid kullanımıyla travers altında, travers ucundan 100 cm boşalmalar bile trenin raydan geçişini tehlikeye atmayacaktır. Geocell kullanımında ise bu değer 115 cm olsa bile tren geçişine imkân vermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

1) Geogrid ve geocell ile ayrı ayrı yapılan deneylerde geogrid kullanımı ile subbalast kalınlığının 5 ile 10 cm arasında kullanımının yeterli olacağı görülmüş ve balasttan iletilen gerilmelerin daha geniş bir alana yayılarak düşey deplasmanların azaltılabileceği gözlenmiştir. Geogrid kullanımı ile birlikte rayın traverse bağlandığı noktaya kadar olan balast boşalmalarında bile balastın kitlesel bir erozyona uğramadan dingil yükü olan 225 kN' a karşı direnç göstererek yolun araç geçişine imkân verdiği gözlemlenmiştir. Rayın traverse bağlandığı noktadan sonraki her bir boşalmada geogride temas eden balastlarda yine herhangi bir kayma ve yer değiştirme gözlemlenmemiş fakat balastın traverse temas ettiği noktada traversin yük altında dengelenmeye çalışmasından dolayı yeni bir yatak arayışı ile birlikte balastın üst bölgelerde az da olsa aktığı gözlemlenmiştir. Geogrid, balastın fiziksel özelliği gereği açısal parçacıklı yapıda olması sayesinde balastla çok iyi bir direnç uyumu sağlamıştır.

2) Geocell ile yapılan deneyde ise geocellin balastı çok iyi bir şekilde muhafaza etmesinden dolayı sekizinci aşamadaki traversin orta noktasına ulaşan balast boşalmasına kadar olan yüklemede traverste, 102 kN yük altında yolda araç geçişini engelleyecek bir düşey deplasman oluşmamıştır. Geogrid ile yapılan deneylerden bir tane fazla deney yapmaya da imkân veren geocelli deney aynı zamanda deneylerdeki eşit boşaltma miktarlarında daha fazla yük yüklemeye imkân vermiştir.

3) Geogrid sayesinde balasttaki gerilmeleri tabanda daha geniş bir alana iletip balastın sabit kalarak balast-zemin direncini artırmış olduk. Geocell de ise çok büyük problem teşkil eden balast boşalması hadisesine hem ekonomik hem kalıcı bir çözüm sunmuş olduk. Özellikle sel ve taşkın olan arazi şartlarında, köprülerde, menfez üstleri gibi kritik yerlerde geocell ve geogrid kullanımında fayda vardır. Her iki malzemenin bir arada kullanılmasında herhangi bir sakınca görülmemektedir.

4) Demir yolu alt yapısına en çok zarar veren doğa olaylarının başında gelen sel, büyüklüğüne göre demir yolunda ciddi zararlara neden olmaktadır. Özellikle taşkın korumanın zayıf veya hiç olmadığı kırsal alanlarda bu tip olaylar oldukça yaygındır. Geocell kullanmak selin balastı süpürüp götürmesine engel olacaktır.

5) Travers altında balast boşalmalarında kalıcı dönme açılarından düşey dönme miktarı hesapları trenin demir yollarında maksimum dever 130 mm' yi aşmadığını, geogrid ve geocell kullanımının balast eksilmelerinde balast stabilitesini iyi muhafaza ettiğini göstermektedir. Tüm hat boyunca stabilitenin korunduğu demir yolunda hat hizalama, dinamik yük altında dağılan balastı tekrar toplayıp balast kalınlığını muhafaza etme gibi sürekli dikkat gerektiren işlerde hem iş yükünün azalacağı hem de buraj yaparak oluşan maliyetin azalacağı ön görülmektedir. Menfez, köprü ve şevli arazilerde geocell ve geogrid kullanımı aynı zamanda ani boşalma, kısmi boşalma gibi balastta eksilmeleri önleyerek kazaların önüne geçecektir.

6) Dijital görüntü korelasyonu tekniği ile matlab programında deneyde alınan görüntülerin analizi neticesinde travers altında balast boşalması veya balastın çökmesi durumlarının rayın bağlantı noktasından itibaren travers ortasına doğru ilerledikçe beton üzerinde gerçekleşen birim deformasyonlar limit değerleri aşmaktadır. B70 travers üzerinde yapılan bu deneyde ön germe ile birlikte traverste kullanılan C60 betonu lifli beton olarak kullanılması beton performansını artıracak, traversin daha elastik davranacağı ve birim deformasyonların azalacağı öngörülmektedir.

7) Demir yolundaki dinamik yükleri emme konusunda önem arz eden balast, çeşitli araçlarla sıkıştırılıp tekrar tekrar hizalansa da bunu sürekli kontrol altında tutmak hem maliyetli hem de büyük dikkat gerektiren önemli bir iştir. Balastı demir yolu hattı boyunca aynı fiziki şartlarda tutmak imkânsız bir iştir. Elastikliği fazla olan balast yatağı için raydan gelen yükleri balast tabakasına eşit bir şekilde aktaracak rijit bir traverse ihtiyaç vardır. Tam tersi durum için ise rijit, elastiklikten uzak bir balast yatağının dinamik yükleri sönümleyip demir yolu araçlarına sarsıntıyı hissettirmemesi için elastik bir traverse ihtiyaç vardır. Bu anlatılan her iki durumda bir demir yolu hattı boyunca kısım kısım var olan gerçek durumlardır. Bu açıdan balastın travers altında göçmesi, lokal olarak çökmesi, balast danelerinin zamanla yük altında kırılıp balast yatağının elastik bir yatak olmaktan çıkması, balast kirlenmesi hadisesiyle daneler arası yük aktarımının azalması neticesinde traversin elastik yatağı kaybolmakta ve giderek daha da zorlanmaktadır. Deney sonuçlarına da bakarak balast yatağının stabilitesi kaybolduğunda travers üzerindeki gerilmeler artmaktadır ve traverste gözle görülen çatlaklar oluşmaktadır. Bu durum için mevcut travers

tasarımlarının gözden geçirilmesi, sadece üstten gelen yüklere göre değil balast yatağındaki durumlarda göz önüne alınarak tasarım yapılmalıdır.

8) Deney sırasında çekilen görüntülerin dijital görüntü korelasyonu tekniği ile matlab programında analizinde, bilgisayar ile her bir piksel üzerinde işlem yapıldığından analiz süresi çok uzun ve bilgisayar performansının çok üst seviyelerde kullanılmasından dolayı analizler traversin tamamında yapılamamıştır. Birim deformasyonlar için yapılan analizler rayın traverse bastığı ray altında, travers ortasında ve varsa balast boşaltma çizgisinin olduğu yerlerde lokal seviyede analiz yapılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Baessler, M. and Ruecker, W. (2003). *In System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade* (Vol_6). Springer, Berlin, Heidelberg, 337–356.
2. Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management* (Vol_2). Thomas Telford Publishing, 1-446.
3. Dash, S. K. & Shivadas, A. S. (2012). Performance Improvement of Railway Ballast Using Geocells. *Indian Geotechnical Journal*, 42, 186–193.
4. İnternet: Yalçın, N. S. ve Erel, A. Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi Ve Tasarım İlkeleri. URL: *http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3114.pdf* Son Erişim Tarihi: 24.09.2019
5. Bathurst, R. J. and Raymond, G. P. (1987). *Geogrid reinforcement of ballasted track* (Vol_1). Transportation Research Board Yayınevi, 8-14.
6. Raymond, G. P. and Bathurst, R. J. (1987). *Performance of large-scale model single tie-ballast systems* (Birinci Baskı). Transportation Research Board Yayınevi, 7-14.
7. Nancey, A., Imbert, B. and Robinet, A. (2002). Thick and abrasion-resistant geotex tiles for use under the ballast in railway structures. ***Rail International,*** 33, 40 – 45.
8. Indraratna, B., Shahin, M. A., Rujikiatkamjiorn, C. and Christie, D. (2006). Stabilization of Ballasted Rail Tracks and Underlying Soft Formation Soils with Geosynthetic Grids and Drains. ***In Ground Modification and Seismic Mitigation American Society of Civil Engineers***. 143–152.
9. Indraratna, B., Hussaini, S. K. K. and Vinod, J. S. (2012). On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces. ***Geotechnical Testing Journal***. 305-312.
10. Matharu, M. (1994). Geogrids cut ballast settlement rate on soft substructures. ***Railway Gazette International***.
11. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Christie, D., Rujikiatkamjorn, C. and Vinod, J. (2010). Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics. ***Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*** 136, 907–917.
12. Fernandes, G., Palmeira, E. M. and Gomes, R. C. (2008). Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track. ***Geosynthetics International*** 15, 311–321.
13. Medina, A., Córdova, J. A., Luna, E. and Treviño, C. (1998). Velocity field measurements in granular gravity flow in a near 2D silo. ***Physics Letters A***, 250, 111-116.
14. Rechenmacher, A. L. and Finno, R. J. (2004). Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands. ***Geotechnical Testing Journal***, 27-1, 13-22.
15. Skarżyński, Ł., Kozicki, J. & Tejchman, J. (2013). Application of DIC Technique to Concrete-Study on Objectivity of Measured Surface Displacements. ***Experimental Mechanics***, 53, 1545–1559.
16. Sause, M. G. R. Digital Image Correlation (2016). ***In Springer Series in Materials Science,*** 242, 57–129.

17. Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. and Christie, D. (2006). Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. ***Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement***, 10, 91–101.

18. Ay, İ. (2014). Geosentetik Malzemelerin Demir Yollarında Kullanımı ve Balast - Alt Balast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması. ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 151.

19. Shin, E. C., Kim, D. H. and Das, B. M. (2002). Geogrid-reinforced railroad bed settlement due to cyclic load. ***Geotechnical and Geological Engineering***, 20, 261-271.

20. Liu, S., Huang, H. and Qiu, T. (2017). Behavior of Geogrid-Reinforced Railroad Ballast Particles Under Different Loading Configurations During Initial Compaction Phase. *In 017 Joint Rail Conference, JRC 2017* , American Society of Mechanical Engineers.

21. Biabani, M. M., Ngo, N. T. and Indraratna, B. (2016). Performance evaluation of railway subballast stabilised with geocell based on pull-out testing. ***Geotextiles and Geomembranes***, 44, 579–591.

22. Leshchinsky, B. A. (2011). Enhancing Ballast Performance Using Geocell Confinement. ***In Geotechnical Special Publication***, 4693–4702.

23. Profillidis, V. (2016). Railway Management and Engineering. *Railway Management and Engineering,* Routledge (4. baskı), Routledge, 34-58.

24. İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı (2013). Balast ve Travers.

    URL:http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Balast%20Ve%20Travers.pdf 37. Son Erişim Tarihi: 24.09.2019

25. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları (2016). Yol Mühendisleri Kursu Yol Üst Yapısı Ders Notu. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları Eğitim ve Öğretim Dairesi Başkanlığı Yayınları, 1-140.

26. Ionescu, D. (2004). Evaluation of the Engineering Behaviour of Railway Ballast. ***Civil Mining and Environmental Engineering Ph. D.***, 485.

27. Hussaini, S. K. K., Indraratna, B. and Vinod, J. S. (2015). Performance assessment of geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading. ***Transportation Geotechnics,*** 2, 99–107.

28. İnternet: Demiryolları Malzeme, Yapım, Kontrol ve Bakım Onarım Teknik Esasları. URL:*http://www.ubak.gov.tr/BLSM_WIYS/DLH/tr/DOKUMANLAR/20100416_100451_10288_1_10315.pdf* Son Erişim Tarihi: 24.09.2019

29. İnternet: Design of Monoblock Concrete Sleepers
    URL: *https://kupdf.net/download/e713_59799015dc0d60df32043373_pdf*
    Son Erişim Tarihi: 24.09.2019

30. İnternet: Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 6: Design
    URL: https://www.din.de/en/wdc-proj:din21:150128973
    Son Erişim Tarihi: 24.09.2019

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: ÜNAL, Ercan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 25.09.1987, Malatya
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (530) 291 68 36
e-mail	: ercanunal4406@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Malatya Hacı Ahmet Akıncı Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	TCDD Genel Müdürlüğü	Devam Ediyor
2018-2018	Şanlıurfa Vakıflar Bölge Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
2011-2018	Özel Sektör	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Arslan, A., Ünal, E. (2019). Investigation of the Effects of Discharges of Ballast Beds Using Geogrid and Geocell on Reinforced Concrete Traverse *4. Uluslararası Çevre, İnşaat, Jeoloji ve Maden Mühendisliği Konferansı*, Trabzon.

Hobiler

Yüzme, Sinema



GAZİ GELECEKTİR...