

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLU ALTTEMEL TABAKASI VE TABAN ZEMİNİ ARASINDA FARKLI
GÖZ AÇIKLIKLARINDAKİ GEOGRİDLERİN PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Müh. Tuba SERT

**ARALIK 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLU ALTTEMEL TABAKASI VE TABAN ZEMİNİ ARASINDA FARKLI
GÖZ AÇIKLIKLARINDAKİ GEOGRİDLERİN PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

İnş. Müh. Tuba SERT

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08.11.2010
Tezin Savunma Tarihi : 13.12.2010**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. M. Vefa AKPINAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. H. Hulusi ACAR
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Tez düzeneği, TÜBİTAK 106 M 423 Kod No'lu Projenin maddi destekleriyle kurulmuş olup daha sonradan tez konusu olarak seçilmiştir. Hem bu projenin yürütücüsü ve hem de tez danışmanım olan Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR'a tezimde olan tüm yardımlarından ötürü teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora öğrenimim boyunca değerli görüşlerini benimle paylaşan ve her zaman bana destek olan hocam Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım esnasında görüş ve yorumlarından yararlandığım doktora tez izleme komitesi üyesi Sayın Prof. Dr. H. Hulusi ACAR hocama değerlendirme ve önerilerinden ötürü müteşekkirim.

Bu tez çalışmasında pullout deneylerinin yapılmasında lisans öğrencileri Alper DERELİ, Yavuz ÜÇÜNCÜ, Serkan EKMEK, Mehmet Akif AKSOY ve Ufuk UZUN'a; tezin görüntü işleme konularında yardımlarını gördüğüm Sayın Doç. Dr. Murat EKİNCİ ve Öğr. Gör. Eyüp GEDİKLİ'ye, MATLAB yazılımı konusunda yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf SEVİM'e, Makine Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirdiğim çekme testlerinde laboratuvar imkanlarını kullanmama olanak sağlayan Sayın Doç. Dr. Genççağ PÜRÇEK ve Arş. Gör. Onur SARAY'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yurt içi doktora burs programı kapsamındaki doktora başarı bursu ile beni destekleyen TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca manevi desteklerini gördüğüm kıymetli büyüğüm Sayın Yrd. Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ ve değerli ailesine teşekkürlerimi iletiyorum.

Bu zamana kadar her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili anneme, canım babama ve biricik kardeşime en içten saygı, teşekkür ve minnetlerimi sunarım. Tezimin en zorlu dönemlerinde hayatıma girerek bana moral kaynağı olan ve yoğun çalışmalarına rağmen zaman ayırarak her konuda yanımda olan nişanlıma en içten teşekkür ediyor, tezimin bilim dünyasına ve ülkemize faydalı olmasını diliyorum.

Tuba SERT
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	6
1.1.1. Tezin Literatüre Katkısı	8
1.2. Konu ile İlgili Literatür Çalışmaları	9
1.2.1. Geogridler ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	9
1.2.2. Arazi ve Laboratuarda Ölçüm Sensörleri ve Geogridin Yerleştirilme Konumlarıyla İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar.....	18
1.3. Geogrid-Hasır Donatı İlişkisi	26
1.4. Geogridlerin Arazide Serilmesi ve Uygulanması.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	29
2.1. Materyal.....	29
2.1.1. Agregaların Elek Analizleri.....	29
2.1.2. Pullout Deney Düzenegi.....	30
2.1.3. Pullout Deney Düzeneginde Kullanılan Ölçüm Sensörleri	33
2.1.4. Deneylerde Kullanılan Geogrid Türleri.....	35
2.2. Yöntem	36
2.3. Geogrid Çekme Testleri	37
2.4. Pullout Deneyleri.....	40
2.4.1. Pullout Deneyleri Öncesi Yapılan Çalışmalar.....	40
2.4.1.1. Arazi Koşullarında Alttemele Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Belirlenmesi.....	40
2.4.1.2. Pullout Deneylerinde Tatbik Edilen Düşey Yükün Belirlenmesi.....	41
2.4.1.3. Ölçüm Sensörleri ve Geogridin Yerleştirilmesi	43

2.4.1.4.	Pullout Test Kutusuna Yerleştirilen Ölçüm Cihazlarının Konumları	43
2.4.1.5.	Kalibrasyon Kontrolü	45
2.4.2.	Pullout Deneyi Esnasında Yapılan Çalışmalar	46
2.4.3.	Pullout Deneyi Sonrası Yapılan Çalışmalar	47
2.4.4.	Prexiglass Pencereler ve Dijital Görüntüleme Tekniği ile Deplasmanların Belirlenmesi	48
2.4.5.	Görüntü İşleme Tekniği	49
2.4.5.1.	Kameradan Görüntülerin Elde Edilmesi	50
2.4.5.2.	Geogridin Belirlenmesi	50
2.4.5.3.	Geogrid Uzaması ve Agregaların Yer Değişimi	51
2.5.	Arazi Çalışmaları	53
2.5.1.	Arazi Tekerlek Basınçlarının Kaydedilmesi	53
2.5.1.1.	Arazi Güzergahının Belirlemesi	53
2.5.1.2.	Arazide Ölçüm Sensörlerinin Yerleştirilmesi	53
2.5.1.3.	Asfalt Kaplama Tabakası Alt ve Üst Seviyesinden Alınan Veri Okumaları	55
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	57
3.1.	Arazide Alttemel Tabakasının Sıkıştırma Basıncının Belirlenmesine Ait Bulgular ve Tartışmalar	57
3.2.	Pullout Deneylerinde Tatbik Edilen Düşey Yükün Belirlenmesi ile İlgili Bulgular ve Tartışmalar	58
3.3.	Pullout Kuvveti-Yatay Deplasman Değişimine Ait Bulgular	62
3.4.	Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Değişimine Ait Bulgular	67
3.5.	Pullout Kutusu İçerisindeki Sıkıştırılan Zeminin Oturma Miktarlarına Ait Bulgular ve Tartışmalar	72
3.6.	Pullout Kutusunun Alt ve Üst Seviyelerindeki Normal Gerilme Dağılımlarına Ait Bulgular ve Tartışmalar	75
3.7.	Prexiglass Pencerelerden Alınan Görüntülere Ait Bulgular ve Tartışmalar	82
3.8.	Geogridlerin Çekme Testlerinden Elde Edilen Bulgular ve Sonuçların Yorumlanması	86
3.9.	Geogridlerin Farklı Şekilli Göz Açıklıklarının Geogrid Performansına Etkisinin İrdelenmesi	98
3.10.	Daha Önceden Yapılmış Benzer Çalışmalarla Tez Bulgularının Kıyaslanması ve İrdelenmesi	99
3.11.	Pullout Deney Sonuçlarının Nümerik Modellenmesine Ait Bulgular	107
3.11.1.	Nümerik Analizle İlgili Önceki Çalışmalar	107

3.11.2.	Pullout Testlerine Geliştirilen Hiperbolik Model ve Modelin Sayısal Çözümü	113
3.11.2.1.	Kayma Mukavemeti Deney Sonuçlarının Modellenmesi.....	113
3.11.2.2.	Hiperbol Model Kullanılarak Zemin-Geogrid Arayüzündeki Aderans Faktörünün Belirlenmesi	119
3.11.3.	Zemin-Geogrid Arasında Gözlenen Aderansın Beton-Çelik Arasındaki Aderansla İlişkisi	121
3.12.	Karayolu Taban Zemini Elastisite Modülü (E) Değerlerinin Belirlenmesine Ait Bulgular	125
3.12.1.	Pullout Kutusu İç ve Dışındaki Kayma Mukavemeti Değerleri.....	125
3.12.2.	Karayolu Tabakalarında Düşey ve Radyal Gerilme Değerlerinin Hesaplanması.....	127
3.12.3.	Taban Zemininin Farklı Elastisite Modülü Değerleri için Çekme Gerilmelerinin Hesabı	129
3.12.3.1.	Matematiksel Bağıntılar Kullanılarak Gerilme Hesabı	129
3.12.3.2.	ELSYM Sonlu Elemanlar Analizleri Yardımıyla Gerilme Hesabı	133
3.12.4.	Laboratuarda Kullanılan Geogridlerin Arazi Çekme Değerlerinin Hesabı ve Taban Zemininde Kullanılabilirliğinin Araştırılması	136
3.12.5.	Taban Zemini Elastisite Modülü Sabit Tutulup Alttemel Kalınlığının Değiştirilmesi Durumunda Radyal Gerilme Değişiminin İrdelenmesi	139
4.	SONUÇLAR.....	141
5.	KAYNAKLAR.....	143
6.	EKLER	148
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Bu tez çalışmasında, farklı şekil ve göz açıklıklarındaki geogridlerin karayolu alttemel ile taban zemini arasındaki kayma mukavemeti performansları araştırılmıştır. Beş farklı tür göz açıklığına sahip geogridler (5 cm x 5 cm, 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm kare göz açıklıklı ile petek ve çapraz göz açıklıklı geogridler) pullout testlerine tabi tutulmuş, kayma mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Dijital görüntüleme yöntemi ve birim şekil değiştirme ölçerler kullanılarak pullout test kutusu içerisinde geogridin yaptığı yatay ve düşey deplasmanlar ölçülmüştür. Pullout test kutusu içerisinde alttemel ve taban zemini arasındaki geogridin kayma mukavemetleri de MATLAB programı ile modellenmiştir. Son olarak, laboratuarda test edilen geogrid numunelerin farklı elastisite modülündeki karayolu taban zeminlerinde kullanımı araştırılmıştır. Farklı elastisite modüllerine sahip taban zeminlerinde oluşan radyal gerilmeler nümerik analizlerle ve ELSYM Sonlu Elemanlar Programı ile hesaplanmıştır.

4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm kare göz açıklıklı ve çapraz göz açıklıklı geogridlerin pullout test sonuçları çekme test sonuçlarından ortalama olarak % 5 daha az; 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogridlerin ise % 15 daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, çekme yönünden petek göz açıklıklı geogridlerin dayanımının yüksek olduğu görülmüştür. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogrid türü ise petek göz açıklıklı türe yakın dayanım göstermiştir ve kare göz açıklıklı geogridler içinde en iyi sonucu vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geogrid, Pullout Deney Düzeneği, Karayolu Alttemel-Taban Zemini Tabakaları, Kayma Mukavemeti, Dijital Görüntüleme Yöntemi.

SUMMARY

Investigation of Different Aperture Size Geogrids' Performance at Highway Subbase-Subgrade Interface

In this study, shear strength performances of different aperture size and shaped geogrids located between subbase and subgrade were investigated. Five different types of geogrids (5 cm x 5 cm, 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm square aperture size, hexagonal and crosswise aperture size geogrid), were tested and their shear strength values were analysed. Geogrid radial and horizontal displacements in pullout test box were measured by utilizing digital image process and strain gage sensors. Shear strengths of geogrids in the pullout test box between subbase and subgrade were also modelled by MATLAB programme. Finally, the usage of tested geogrid samples were researched for their highway performance under varying subgrade elasticity modulus values. Radial stresses occurring in highway subgrade layers that have different elastic modulus were numerically analysed and ELSYM Finite Element Analyses Programme.

The pullout test results of 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm and crosswise aperture size geogrids were % 5 lower than the tensile test results of them; pullout test results of 5 cm x 5 cm and hexagonal shaped aperture size geogrids were % 15 higher than tensile test results of them. As a result, hexagonal shaped aperture size geogrid showed good results in terms of both rupture at peak point and retained its strength after rupture. 5 cm x 5 cm aperture size geogrid showed close strength values with hexagonal shaped aperture size geogrid and gave the best results among the square shaped aperture size geogrids.

Key Words: Geogrids, Pullout Test Box, The Layers of Highway Subbase-Subgrade, Shear Strength, Digital Imaging Process.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Rijit Üstyapı Enkesiti	2
Şekil 2. Yüksek Standartlı Esnek Üstyapı Enkesiti	2
Şekil 3. D-100 karayolunun İstanbul-Ankara yönünde, Abant Kavşağı'na yaklaşık 1,5 kilometre uzaklıkta meydana gelen bir çökme (URL-3, 2008).	3
Şekil 4. Adapazarı-Karasu Yolu'nun Ferizli kısmında çökme nedeniyle oluşan kayma ve çatlaklar (URL-4, 2009).	4
Şekil 5. Amerika'da Tambillo kasabası yakınlarından geçen karayolu dolgusunda meydana gelmiş bir kayma (URL-2, 2007).	5
Şekil 6. Yol tabakalarında kaymalar	5
Şekil 7. Geogrid kullanımının amaçlarının şematik gösterimi	6
Şekil 8. Alttemel ile taban zemini arasındaki geogridin konumu	8
Şekil 9. Yük transferi (Nernheim, 2004)	9
Şekil 10. Pullout test aletinde normal basınç altındaki geogridde sırasıyla çekme bölgesine en yakındaki geogrid elemanından başlayarak deplasman ve birim şekil değiştirmede gözlenen değişimler (Alfaro vd.,1995)	11
Şekil 11. Birim şekil değiştirme-zaman grafiği (Kooch vd., 2004)	12
Şekil 12. Dar ve geniş örnekler için pullout etkileşim şeması (Moraci ve Recalcati, 2006)	13
Şekil 13. Pullout düzeneğinde zemin-geogrid ilişkisi (Palmeira, 2003).	14
Şekil 14. Çekme doğrultusundaki geogridde her bir elemanda oluşan birim şekil değiştirme (strain) (Teixeira vd., 2007)	15
Şekil 15. Farklı tabakalarda geogrid kullanılması durumu (Ryan vd., 2000).	19
Şekil 16. Yol plan ve kesit görünüşü (Basınç ölçerler tabakaların alt kısımlarında) (Wu, 2007)	20
Şekil 17. 21 ton yük altında Temel- Alttemel tabakalarına gelen gerilmeler (Wu, 2007).	21
Şekil 18. 26 ton yük altında Temel- Alttemel tabakalarına gelen gerilmeler (Wu, 2007).	21
Şekil 19. Çelik hasır donatı (URL-5, 2009).	26
Şekil 20. Geogrid serimi ve agregaların konumu	27
Şekil 21. Geogrid boylam ve enlem elemanlarda deformasyonlar	28

Şekil 22.	Pullout Deney Düzeneği.....	31
Şekil 23.	Pullout test düzeneğinin detay çizimleri.....	32
Şekil 24.	Pullout deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarından (sensörlerden) görüntüler.....	34
Şekil 25.	5 farklı göz açıklığına sahip geogridlerin rulo halde ve yakından görünüşü	35
Şekil 26.	Çekme test aletinin genel görünüşü.....	37
Şekil 27.	(a) Arazide 20 cm çaplı basınç ölçerin alttemel tabakasına yerleştirilmesi (b) Alttemelde gömülü basınç ölçer üzerinden silindir geçirilmesi	40
Şekil 28.	Arazide yüklü bir ağır taşıtın asfalt kaplaması üzerine temas eden ağırlığı (Priest vd., 2005).....	41
Şekil 29.	Asfalt kaplama tabakasına temas eden ağır taşıtın alt tabakalarda oluşturduğu gerilmeler, (2005).....	41
Şekil 30.	Yazılım programından bir ekran görüntüsü.....	42
Şekil 31.	(a) Pullout kutusunun ortası ve köşelerine sensörlerin yerleştirilmesi (Profilden görünüş) (b) Pullout kutusunun ortası ve köşelerine sensörlerin yerleştirilmesi (Üstten görünüş).....	43
Şekil 32.	(a) Pullout test kutusunda serilen alttemel ve taban zemini malzemenin kalınlıkları	44
Şekil 33.	Ölçüm sensörlerinin yerleştirilme konumları	45
Şekil 34.	Deney esnasında sıkıştırılmış malzeme arasındaki geogride çekme kuvveti uygulanması	47
Şekil 35.	Geogridin deney sonrası görüntüsü	48
Şekil 36.	Prexiglass pencereden alınan görüntü	49
Şekil 37.	Geogridin boyalı düğüm noktalarının görüntüsü.....	50
Şekil 38.	Program çıktısı 1	51
Şekil 39.	Program çıktısı 2.....	52
Şekil 40.	Ölçüm alınan karayolu güzergahı.....	53
Şekil 41.	(a) Sensörlerin yola yerleşim planı, (b) Sensörlerin araziye yerleştirilmiş hali	54
Şekil 42.	Basınç ölçerlerin arazide yerleştirilmesi.....	55
Şekil 43.	Ağır taşıtın kaplamaya uyguladığı basıncın belirlenmesi ve verilerin kaydedilmesi	56
Şekil 44.	Silindirin geçtiği andaki basınç-zaman değişimi.....	57
Şekil 45.	Alttemel basıncı- tekerlek yükü ilişkisi	58
Şekil 46.	Farklı genişliklerde lastikler (Priest vd., 2005)	60

Şekil 47.	(a) Arazi ölçümlerine göre temel tabakasında düşey basınç dağılışı (Priest vd.), (b) Arazi ölçümlerine göre subgrade tabakasında düşey basınç dağılışı (Priest vd., 2005)	61
Şekil 48.	Temel ve Taban zemini (subgrade) tabakalarında oluşan düşey basınç değerleri (Priest vd., 2005)	62
Şekil 49.	Pullout Kuvveti-Yatay Deplasman Grafiği	63
Şekil 50.	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği	64
Şekil 51.	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği	64
Şekil 52.	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği	65
Şekil 53.	Petek göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği	65
Şekil 54.	Çapraz göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği	66
Şekil 55.	Kayma Mukavemeti –Yatay Deplasman Grafiği	67
Şekil 56.	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği	68
Şekil 57.	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği	68
Şekil 58.	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği	69
Şekil 59.	Petek göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği	69
Şekil 60.	Çapraz göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği	70
Şekil 61.	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri	72
Şekil 62.	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri	73
Şekil 63.	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri	73
Şekil 64.	Petek göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri	74
Şekil 65.	Çapraz göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri	74
Şekil 66.	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılışı	77
Şekil 67.	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılışı	78

Şekil 68.	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları	79
Şekil 69.	Petek göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları	80
Şekil 70.	Çapraz göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları	81
Şekil 71.	Çapraz göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları	83
Şekil 72.	Çekme Bölgesinden uzaklaştıkça birim şekil değiştirme ve kayma mukavemeti değerlerinde görülen azalmalar	84
Şekil 73.	Yük transferi ($S_1 > S_2$).....	86
Şekil 74.	5 cm x 5 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi	87
Şekil 75.	4 cm x 4 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi	88
Şekil 76.	3 cm x 3 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi	89
Şekil 77.	Petek göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi	90
Şekil 78.	Çapraz göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi	91
Şekil 79.	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu	94
Şekil 80.	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu	94
Şekil 81.	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu	95
Şekil 82.	Çapraz göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu.....	95
Şekil 83.	Petek göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu.....	96
Şekil 84.	Elastisite teorisine göre, dik açılı ve yuvarlatılmış köşelere sahip malzemelerde mukavemet farklılıkları	98
Şekil 85.	Hexagonal ve kübik (petek ve kare) malzeme bağ yapıları.....	99
Şekil 86.	Geogridin gömülü derinliği boyunca deplasman değişimi.....	100
Şekil 87.	Çekme kuvveti- birim şekil değiştirme ilişkisi.....	102
Şekil 88.	Çekme bölgesinde uzaklaştıkça pullout kuvvetinin değişimi	103
Şekil 89.	Pullout kutusu iç ve dışındaki yük-deplasman ilişkileri.....	105
Şekil 90.	Pullout kutusu dışında serbest çekme bölgesinde gözlenen çekme kuvvetleri	106

Şekil 91.	Pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği.....	107
Şekil 92.	Çekme doğrultusundaki geogridde her bir elemanda oluşan birim şekil değiştirmeler (Alfaro vd, 1995)	108
Şekil 93.	Hazırlanan programın genel akış diyagramı.....	114
Şekil 94.	Prexiglass pencerelere göre çizilen birim şekil değiştirme değişimi	118
Şekil 95.	Arayüzdeki efektif içsel sürtünme açısını veren normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi.....	120
Şekil 96.	Çekip-çıkarma deneyinde aderans gerilmelerinin değişimi (Ersoy,1985).....	122
Şekil 97.	Çekme Bölgesinden uzaklaştıkça kayma mukavemetinin azalması	123
Şekil 98.	Çekme kuvveti neticesinde oluşan gerilmelerin yayılışı (Celep ve Kumbasar, 2001)	124
Şekil 99.	Karayolu üstyapı tabakaları elastisite modülü, poisson oranı ve kalınlık bilgileri	127
Şekil 100.	Taban zemininde elastisite modülü değişiminin çekme gerilmesine etkisi.....	131
Şekil 101.	Croney Teorisine göre tabakalı sistemde eksenel radyal gerilmelerin elastisite modülü oranına bağlı olarak değişimi (Tunç, 2004).	131
Şekil 102.	4 farklı elastisite modülündeki temel tabakalarında görülen gerilme dağılımları (Akbulut ve Aslantaş, 2005).....	132
Şekil 103.	ELSYM Sonlu Elemanlar Programı ekran çıktısı	134
Şekil 104.	ELSYM Programına göre 10 farklı elastisite modülündeki taban zemininde radyal gerilmeler	135
Şekil 105.	10 farklı elastisite modülündeki taban zemini tabakalarında radyal gerilmeler.....	139

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Genel olarak literatür araştırmalarından elde edilmiş pullout kutusu boyut özellikleri ve deneylerde uygulanmış olan yük ve çekme değerleri.....	17
Tablo 2. Önceki çalışmalara göre ölçüm sensörlerinin yerleştirildiği tabakalar	18
Tablo 3. Literatürden derlenen kaplama tabakası üzerine gelen yükler tablosu.....	22
Tablo 4. Literatürden ve laboratuarda yapmış olduğumuz deneylerden alınan birim Şekil değiştirme, basınç ölçer pozisyonları ile sayısal değerleri ve tabaka kalınlıkları	23
Tablo 5. Geogridlerin mekanik (fiziksel) özellikleri	39
Tablo 6. Laboratuvar deneylerinde kullanılan alttemel ve taban zemini malzemesinin granülometrisi.....	30
Tablo 7. Mulungye' nin (2007), çalışmasında kullanılan tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve poisson oranı değerleri	42
Tablo 8. Herbir kamyonun temas eden tüm dingilleri için tabaka basınçları.....	59
Tablo 9. Kayma Mukavemeti Değerleri	71
Tablo 10. Ortalama oturma miktarları	75
Tablo 11. Her bir geogrid türüne ait basınç değerleri.....	76
Tablo 12. Ortalama Düşey Basınçlar	82
Tablo 13. Deneyin başından ve sonundan alınan görüntüler yardımıyla deplasmanların bulunması	83
Tablo 14. Farklı geogrid göz açıklıklarında her bir noktanın deplasman değerleri.....	85
Tablo 15. Çekme ve pullout testlerinin maksimum yük ve maksimum kayma mukavemeti sonuçlarına göre kıyası.....	92
Tablo 16. Çekme testlerinde nihai kopmadaki yük ve ilk kopmanın meydana geldiği yük değerleri	97
Tablo 17. Hiperbol denklemine göre hesaplanan kayma mukavemeti katsayıları	115
Tablo 18. Pullout test sonuçlarına göre her bir deneye ait kayma mukavemeti değerleri	116

Tablo 19. Pullout kutusu içerisinde her bir deneye ait kayma mukavemeti değerleri.....	116
Tablo 20. Prexiglass pencerelerden belirlenmiş 4 nokta için birim şekil değiştirme tablosu.....	117
Tablo 21. Aderans Faktörü değerleri	121
Tablo 22. Kutu dışında oluşan çekme gerilmesi değerleri.....	125
Tablo 23. Kutu içinde oluşan kayma gerilmesi değerleri	126
Tablo 24. Her bir tabakada hesaplanan kayma gerilmesi değerleri.....	128
Tablo 25. Farklı elastisite modüllerine sahip taban zemini tabakalarında gerilme tabloları kullanılarak hesaplanan çekme gerilmesi değerleri.....	130
Tablo 26. ELSYM Sonlu Elemanlar Programı kullanılarak 10 farklı elastisite modülündeki taban zemini tabakaları için hesaplanan radyal ve normal gerilmeler.....	135
Tablo 27. Araziye karşılaşılan farklı durumlar için Fs (emniyet Faktörü) değerleri (Montanelli ve Recalcati, 2003).....	137
Tablo 28. Laboratuardaki geogridlerin çekme dayanımları ve Fs (Emniyet Faktörü) kullanılarak hesaplanan arazi eşdeğerleri	138
Tablo 29. Farklı elastisite modüllerine sahip taban zemininde gerilme tabloları ve ELSYM Programı kullanılarak hesaplanan ortalama çekme gerilmesi değerleri.....	138
Tablo 30. Alttemel kalınlığının düşürülmesiyle radyal gerilme değerindeki artış	140

SEMBOLLER DİZİNİ

AC	: Asfalt betonu
E	: Elastisite modülü
h	: Tabaka kalınlığı
F	: Aderans faktörü
F _{bi}	: i. Geogrid elemanın toplam kuvveti
F _{ij}	: Pullout kuvveti
F _T	: Çekme gerilmesi
F _s	: Geogrid emniyet faktörü
L _{rib}	: Geogridin iki birleşim yeri arasındaki mesafe
l _s	: Geogridin iki düğüm noktası arası mesafe
P	: Düşey basınç
R _{lij}	: Geogridin ilk boylam elemanının pullout direnci
R _{ti}	: Zemin pasif direnci
T _{ij}	: Ortalama çekme kuvveti
T _i	: İ. Geogrid elemanın çekme kuvveti
T _(i-1)	: (i-1). Geogrid elemanın çekme kuvveti
U	: Pullout kutusu derinliği boyunca deplasman değişimi
q	: Yayılı yük
z	: Derinlik
ε _i	: Birim şekil değiştirme
δ	: Deplasman (yerdeğiştirme)
Δ _i	: i. Elemanın deplasmanı
σ _r	: Radyal gerilme
σ _T	: Eksenel çekme gerilmesi
σ _v	: Normal gerilme
σ _z	: Düşey normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
Ø	: İçsel sürtünme açısı

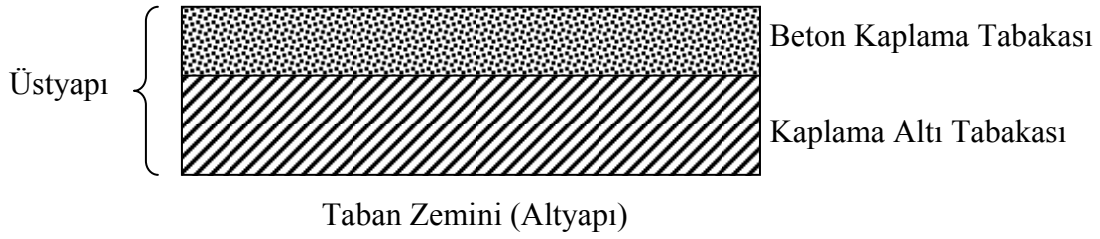
1. GENEL BİLGİLER

Bir ülkenin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve uygun standartta olması o ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesidir. Bu nedenle tüm ülke geneline yayılmış, yüksek geometrik standartlara sahip, fazla talebi karşılayan yüksek kapasiteli ve erişim kolaylığı olan karayolu inşa edebilmek çok önem arz etmektedir. Ancak böyle bir yol ağı kurulmasıyla ülke genelinde gelişme ve refahtan söz edilebilir. Gelişmiş ülkeler, ulaşım sistemlerini hızlı, ucuz, konforlu ve güvenli hale getirebilmek için; ulaşım politikalarının oluşturulması ve bu politikaların sürdürülebilirliğinin sağlanmasına yönelik çalışmalara önem ve öncelik vermektedirler. Bu ülkeler ulaşım sistemlerini, sosyal, ekonomik, çevresel, politik ve güvenlik sorunlarının önemli bir parçası olarak değerlendirmektedirler ve bu alanda kısa, orta ve uzun vadede yapılan yatırımların sağlayacağı toplumsal faydayı göz önünde bulundurmaktadırlar.

Gelişmiş ülkelere göre, Türkiye’de yol ağı yetersiz kalmakta, buna karşın ağır taşıt trafiği artmaktadır. Bu durum üstyapıda önemli problemlerin çıkmasına neden olmaktadır. Mali kaynakların da sınırlı olması konunun önemini daha da arttırmaktadır ve bu nedenle, bir karayolu yatırımının proje ve inşaat safhalarında optimum çözümlerin üretilmesi gereklidir. Ülkemizde karayolu trafiğinin yük ve yolcu taşıma payının çok büyük olması dikkat çekicidir. Avrupa Birliği ülkelerinde karayollarının yük taşıma payı ülkemizdeki yarısı kadar olmasına karşılık, ülkemizde yük ve yolcu taşıma payı çoğunlukla karayolu ile yapılmaktadır. Diğer ülkeler ile kıyaslandığında karayolunun, denizyolu, demiryolu ve havayolundan fazla oranda kullanılıyor olması karayollarına daha fazla önem verilmesi gerektiğini ve karşılaşılan problemleri çözmek için daha fazla çaba sarf edilmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir.

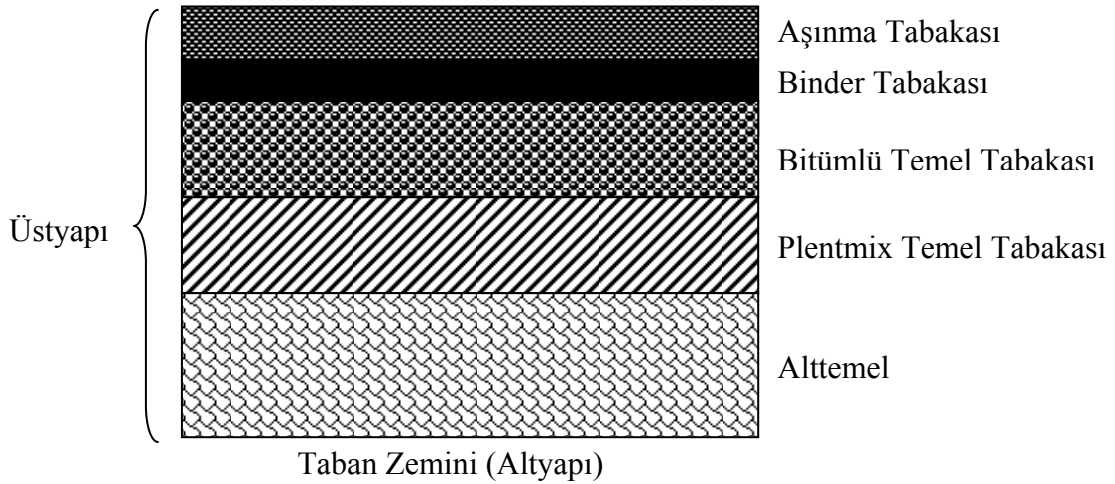
Karayolu üstyapısı rijit ve esnek üstyapı tasarımı olarak iki tipte incelenmektedir. Ancak ülkemizde rijit üstyapıdan ziyade esnek üstyapı tercih edilmektedir. Rijit ve esnek üstyapı tasarımlarından kısaca şu şekilde söz edilebilir:

Rijit üstyapı; yüksek eğilme mukavemetine sahip ve portland çimentosundan yapılmış tek tabakalı bir plak vasıtasıyla yükleri dağıtan bir üstyapı tipidir. Rijit üstyapıda yük, büyük oranda granüler alttemel üzerine oturan plak tarafından karşılanmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Rijit Üstyapı Enkesiti

Esnek üstyapı; kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan bir üstyapı tipidir. Kaplama tabakası, aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka şeklinde sıcak bitümlü karışım ya da sathi kaplama olarak inşa edilir. Diğer tabakalar ise granüler bir malzeme veya az miktar bağlayıcı ile işlem görmüş karışımlardan ibaret olan tabakalardır. Esnek üstyapıda yük iletimi alt tabakalarda daha geniş alana yayılarak taban zemininin taşıyacağı değere indirgeme esasına dayanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Yüksek Standartlı Esnek Üstyapı Enkesiti

Yol dolgularında gözlenen oturmalar, bozulma ve deformasyonlar karayollarında sıkça karşılaşılan problemlerdir. Özellikle son yıllarda karayolunu kullanan trafik miktarının artmasından dolayı, daha da artış gösteren problemlere karşı yol tabakalarında güçlendirme konusu gündeme gelmiştir. Geogrid gibi güçlendirici malzemelerin kullanımı ile taban zemini veya alttemelden kaynaklanan bozulma ve deformasyonların önüne geçmek mümkün olmaktadır. Yol alt tabakalarında özellikle de alttemelde geogrid

güçlendirme ile tabakanın taşıma gücü artırılmakta, deformasyonlara karşı dayanımı kuvvetlendirilmekte ve de tabaka kalınlığı azaltılarak ekonomiklik sağlanmaktadır.

Son yıllarda gelişmiş ülkelerde geosentetik malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Geotekstil, geomembran gibi diğer geosentetik malzemelere oranla geogrid, yol dolgularında agrega malzemelerinin yoğunlukta olduğu tabakaların çekme bölgelerinde üstünlük sağladığı için tercih edilmektedir. Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te arazide oluşmuş kayma ve oturmalara örnekler görülmektedir.

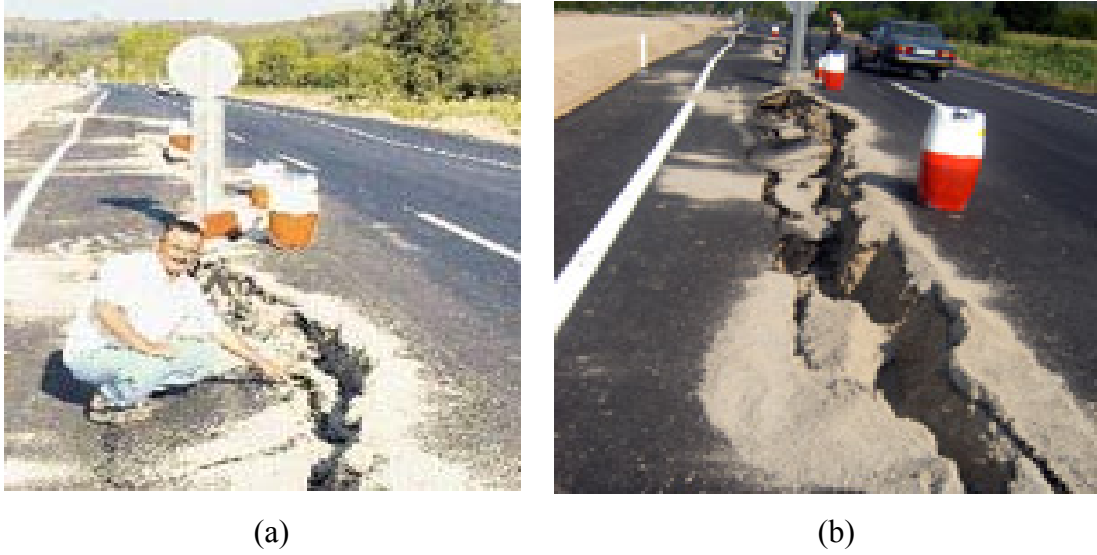


Şekil 3. D-100 karayolunun İstanbul-Ankara yönünde, Abant Kavşağı'na yaklaşık 1,5 kilometre uzaklıkta meydana gelen bir çökme (URL-3, 2008)

Şekil 3'te çökmenin yaklaşık 50 m uzunlukta ve 30 cm derinlikte olduğu bildirilmiştir. Burada önemli bir husus kayma olaylarının sadece dolguda olmayıp temel ve alttemelde de gerçekleşmiş olmasıdır. Zaten alt tabakalarda oluşan problemlerden dolayı, yol yüzeyinde deformasyon ve problemler gözlemleniyorsa, bunun çözümü için sadece yüzeysel iyileştirme yeterli olmayacaktır. Daha maliyetli ve emek gerektiren iyileştirmeler yapmak gerekecektir. Fakat bunun yerine inşa aşamasında geogrid kullanılması sonradan oluşabilecek problemlerin önüne geçmek için bir çözüm olarak sunulabilir.

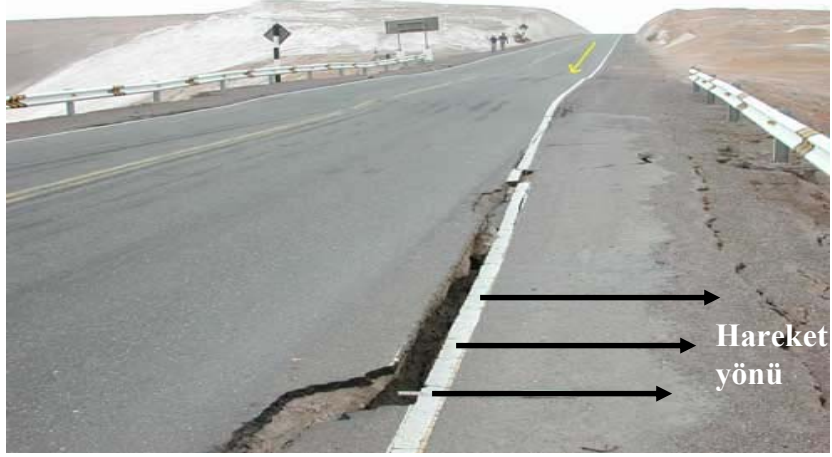
Karayolu alttemel tabakasının güçlendirilmesinde uygun olarak tasarlanmış geogridler yüksek gerilmeleri karşılar. Fakat son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda geogridlerle güçlendirilmiş taban zeminlerinde kaymaların olduğu rapor edilmiştir (Kooch vd., 2004; Guo vd.,2005). Ayrıca, geogridlerin sertlik, birim şekil değiştirme oranı,

geometri, uygulanan normal basınçlar ve zemin özellikleri gibi farklı parametrelerinin kayma mukavemeti üzerinde önemli etkilerinin olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Adapazarı-Karasu Yolu'nun Ferizli kısmında çökme nedeniyle oluşan kayma ve çatlaklar (URL-4, 2009)

Şekil 4'te ülkemizde meydana gelmiş bir karayolu deformasyonu görülmektedir. Bu görülen çatlak ve yarıklar, yol alt tabakalarında ortaya çıkmış olan bozulmaların asfalt yüzeyinde tahribat oluşturmasına güzel bir örnektir. Şekil 5 a'da yolda çökme nedeniyle oluşmuş yarıklar ve çatlaklar görülmektedir. Asfalt yol yüzeyinde bozulmuş yol kesiminin hareket yönü ok işaretiyle gösterilmiştir. Şekil 5 b'de ise dolguda oluşmuş bir kayma görülmektedir. Yol alt tabakalarında (temel-alttemel) güçlendirme yapılmış olsaydı, düşey yönde etkiyen trafik yüklerinden dolayı oluşmuş olan bu tür yanıl deformasyonlar muhtemelen önlenmiş olacaktı. Şekil 5 b'de gösterilmiş kayma durumunun, şematik gösterimi Şekil 6'da verilmiştir. Yayılı yük olarak gösterilen kısım yol yüzeyine temas eden taşıt yükleridir. Bu yükler etkisiyle yol dolgusunda yanlara doğru Şekil 6'da görülen hareketlenmeler oluşacaktır. Ancak alt tabakalarda kullanılan geogridler sayesinde tabakalarda düşey yük etkisiyle oluşan yanıl deformasyonlar önlenmektedir. Çünkü geogrid donatı görevi gördüğünden alt tabakalardaki agrega ile kenetlenmekte ve tabaka içinde yanıl kaymalar ve göçmeler ortadan kalkmaktadır.

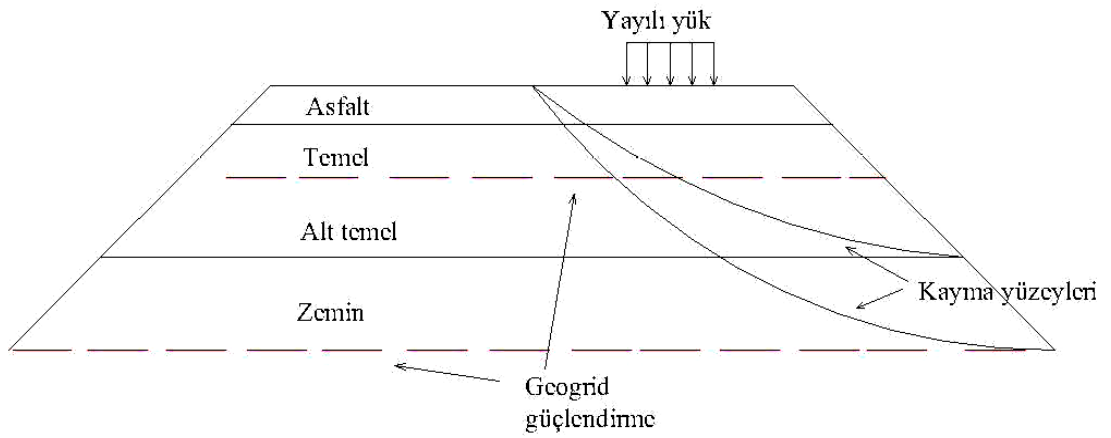


(a)



(b)

Şekil 5. Amerika'da Tambillo kasabası yakınlarından geçen karayolu dolgusunda meydana gelmiş bir kayma (URL-2, 2007)



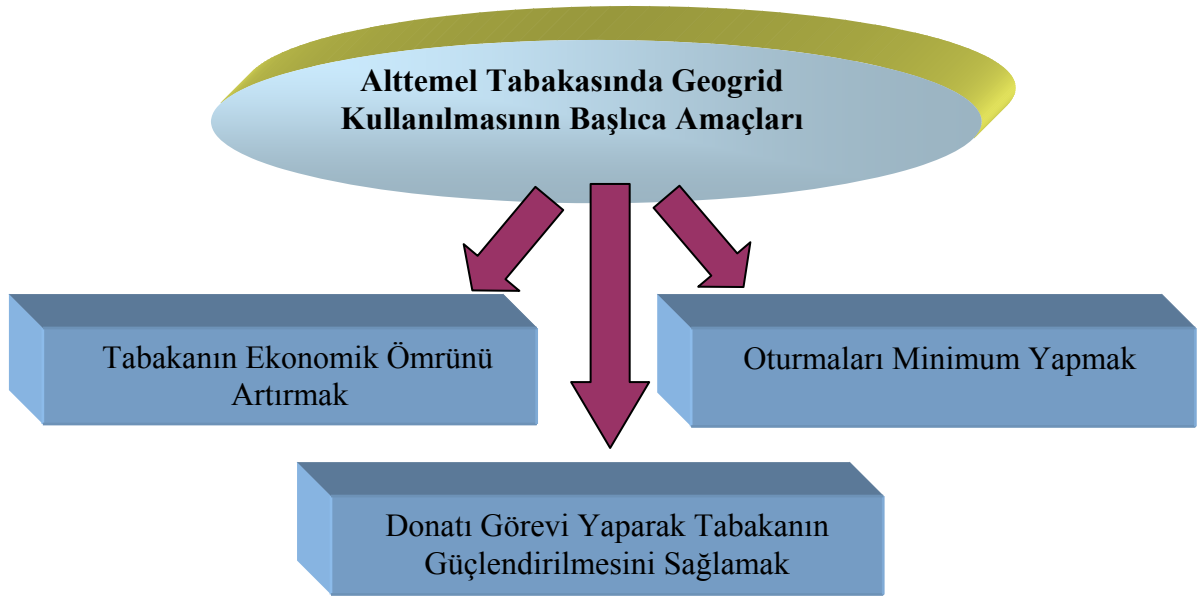
Şekil 6. Yol tabakalarında kaymalar

Şekil 6’da eğrisel olarak gösterilen kayma yüzeyleri zeminde kopmalar olabilecek bölgeleri göstermektedir. Kesikli çizgiler ise zeminin kaymasını önlemek için kullanılan geogrid güçlendirmeyi temsil etmektedir.

Pullout testleri, karayolları alttemel tabakası ile geogrid arasındaki kayma etkileşim davranışlarının incelenmesinde en çok kullanılan testlerin başında gelmektedir. Test sonuçlarının güçlendirilmiş zemin tasarımında direkt etkisi vardır. Zemin taneleri ve geogrid arasındaki yüzey sürtünmesi ile geogridin boylam ve enlem elemanlarında ortaya çıkan taşıma mukavemeti, pullout test sonuçlarını etkileyen mekanizmalardır. Bu nedenle agregaların özellikleri kadar boylam ve enlem elemanların boyutları da önem kazanmaktadır. Bu konuda yol alttemel tabakası inşaatlarında kullanılan geogridlerin göz açıklıkları ve agrega çapları üzerine karayolları teknik şartnamesinde bir standart veya getirilmiş bir prosedür mevcut değildir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, karayolu dolgularının güçlendirilmesinde kullanılan farklı göz açıklıklarına sahip geogrid donatılarının alttemel-taban zemini arayüzündeki mukavemet değerlerini belirlemektir.



Şekil 7. Geogrid kullanımının amaçlarının şematik gösterimi

Bununla beraber aşağıda belirtilen durumlar uygulamada kullanılacak geogrid türünün seçiminin önemini göstermektedir:

1. Yapılan bazı çalışmalar yol dolgularında kullanılan geogridlerin iki-üç yıllık trafik yükü sonunda gelişigüzel bölgelerinde yırtılmaların olduğunu göstermiştir (Kooh vd., 2004) ve Guo vd., 2005).

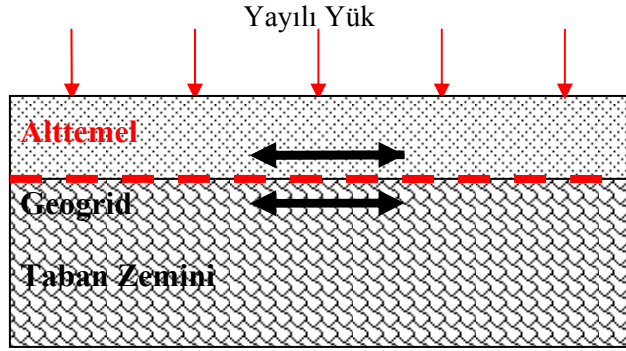
2. Geogrid boylam ve enlem açıklıklarının ve dolguda kullanılan agrega malzemelerin çaplarının çekme veya sürtünme dayanımları üzerindeki etkileri tam olarak bilinmemektedir. Bunun başlıca sebebi, geogrid malzemenin (donatının) dolgu malzemesi olan agregalar ile etkileşiminin (kenetlenme ve sürtünmesinin) tam olarak bilinmemesidir.

İnşaat Mühendisliği uygulamalarında çok geniş kullanım alanı olan geosentetiklerin bir çeşidi olan geogridler özellikle zemin donatısı görevinde güçlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Geogridler; polimer olarak ve çoğunlukla yüksek mukavemet gösterecek şekilde inşa edilen (tek ve çift yönlü çekme gösterebilen) bir yapı malzemesi olup, genellikle zemin taneleri ve agregalar arasında güçlendirici donatı olarak kullanılan yatay ve düşey elemanları birbiriyle kesişen ızgara biçimli polimerik malzemelerdir.

Geogridler zemin güçlendirmesi için yüksek mukavemet gösteren poliyster malzemelerdir. Poliyster ipliklerin örülmesi, boyut stabilitesi ve uygulama hasarlarına karşı polimer kaplama malzemesi ile kaplanarak imal edilir. Geogridin imalatında kullanılan poliyster iplikler mükemmel bir sünme (krip) etkisi yaratır. Molekül ağırlığı yüksek olan poliyster, zemindeki kimyasal maddelere ve hidroliz etkisi ile doğabilecek aşınmalara dayanıklıdır.

Geogrid sıkıştırılmış zemine yerleştirilir ve üzerine tekrar zemin tabakası serilerek sıkıştırılır. Zaman içinde çeşitli yüklemelere maruz kalan bu zeminde aradaki geogrid malzemedeki mekanik bir hareketlenme söz konusu olacaktır. Bu mekanik hareketlenme zamanla bir kesme kuvveti ortaya çıkaracaktır ve bu kesme kuvveti ise zemin-agrega arasında bir sürtünme kuvvetinin oluşmasına sebep olacaktır. Geogrid malzemenin sürtünme karşısındaki bu davranışını incelemek için, pullout testi olarak bilinen çekme testi uygulanmaktadır.

Geogridler çeşitli ihtiyaçları karşılamak için farklı mukavemet ve göz açıklığında üretilir, yani farklı şekil ve göz açıklıklarına sahip geogrid türleri vardır. Bu doktora çalışmasında geogrid göz açıklığı değişiminin kayma direncine etkisini araştırmak için belirlenen bir deney düzeneğinde alttemel-taban zemini arayüzünde kullanılan agregalara en uygun geogrid malzemelerin araştırılması yapılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Alttemel ile taban zemini arasındaki geogridin konumu

Taban zemini, diğer tabakalara kıyasla dayanımı en az olan tabakadır. Bu tabaka ile üstüne serilen alttemel tabakası arasında bağlantıyı ve kenetlenmeyi sağlamak maksadıyla, alttemel-taban zemini arayüzünde geogrid malzeme kullanılmıştır. Literatürden ve arazi ölçümünden alttemel tabakasına gelen düşey yük belirlenerek deneylerde uygulanmış ve bunun geogridlerin performansına etkisi araştırılmıştır.

1.1.1. Tezin Literatüre Katkısı

Zemin stabilizasyon işlerinde ve karayollarının dolgu güçlendirmelerinde yaygın olarak geosentetik türevi malzemeler kullanılmaktadır. Literatürde bununla ilgili çalışmalar yer almaktadır. Ancak bu tez çalışması geogrid performansı konusunda geogrid göz açıklığının etkilerinin araştırılması bakımından literatüre katkılar sağlamaktadır. Yol alt tabakalarından alttemel ile taban zemini arasında 5 farklı geogrid türü kullanılıyor olması ve hangi tür göz açıklığına sahip geogridin en iyi performans gösterdiğinin araştırılması üzerine başka bir çalışma yapılmamıştır. Üstelik bu çok önemli bir husustur. Yollarda geogrid kullanılmasına rağmen agregayla uyumlu göz açıklığına sahip geogrid türü seçilmediğinden birtakım kayma ve deformasyon sorunlarıyla karşılaşılabilir. Bu nedenle bu tez çalışmasında Türkiye karayollarında alttemel malzeme granülometrisine en uygun geogrid göz açıklığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Özellikle ülkemizde karayolu inşasında görevli mühendislere ve Karayolları Kurumu'na alttemel inşası sırasında tabaka altına serilen geogrid türünün hangisi olacağı ve hangi göz açıklığına sahip geogrid türü seçilirse gerilmeleri en iyi şekilde karşılayacağı konularında yol gösterilmiş olacaktır. Yukarıda belirtilen hususlardan ve deney

düzeninin büyük ölçekte olmasından ötürü bu tez çalışması ülkemizde bir ilk teşkil etmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Literatür Çalışmaları

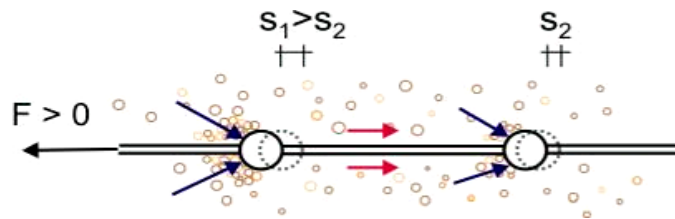
1.2.1. Geogridler ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Al., vd. (2001), pullout deneylerinde yaptıkları çalışmalarda, geogrid boylam eleman sayısının artmasıyla kayma mukavemetlerinin yükseldiğini belirlemişlerdir. Aynı çalışmada, geogrid enlem elemanlarının artmasının kayma mukavemet değerleri üzerinde ihmal edilecek kadar az etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Nernheim (2004), geosentetik güçlendirmeli yapılar için dizayn ve test metotlarını çalışmıştır. Çalışmasına göre, sürtünme kuvveti zemin ve güçlendirme elemanının özelliklerine bağlıdır. Üç türlü etkileşim mekanizmasından söz edilmektedir:

1. Zemin-geogrid arası sürtünme,
2. Kenetlenme durumundaki geogrid- agrega etkileşimi,
3. Yatay geogrid eleman önündeki zemin direncidir.

Yine bu çalışmada, geogrid elemanlar arasında yük transferinden bahsedilmektedir. Çekmeye yakın bölgedeki deplasman ve buna bağlı olarak gelişen birim şekil değiştirme değeri, çekmeye uzak olan bölgelere kıyasla daha büyük olmaktadır (Şekil 9).



Şekil 9. Yük transferi (Nernheim, 2004)

Alfaro vd. (1995), geogrid donatının pullout testinde zemin-geogrid eleman arasındaki etkileşimini çalışmışlardır. Moraci ve Recalcatti (2006), çalışmasında bahsedilen kutu genişliği kadar ve bu genişlikten dar seçilen geogridlerin pullout üzerindeki etkisi burada da doğrulanmaktadır (Alfaro vd.,1995). Yani kutu genişliğinden dar geogridlerde, geogridin bittiği yerden kutu yanlarına kadar olan zemin bölgesinde ilave bir sınır kayma

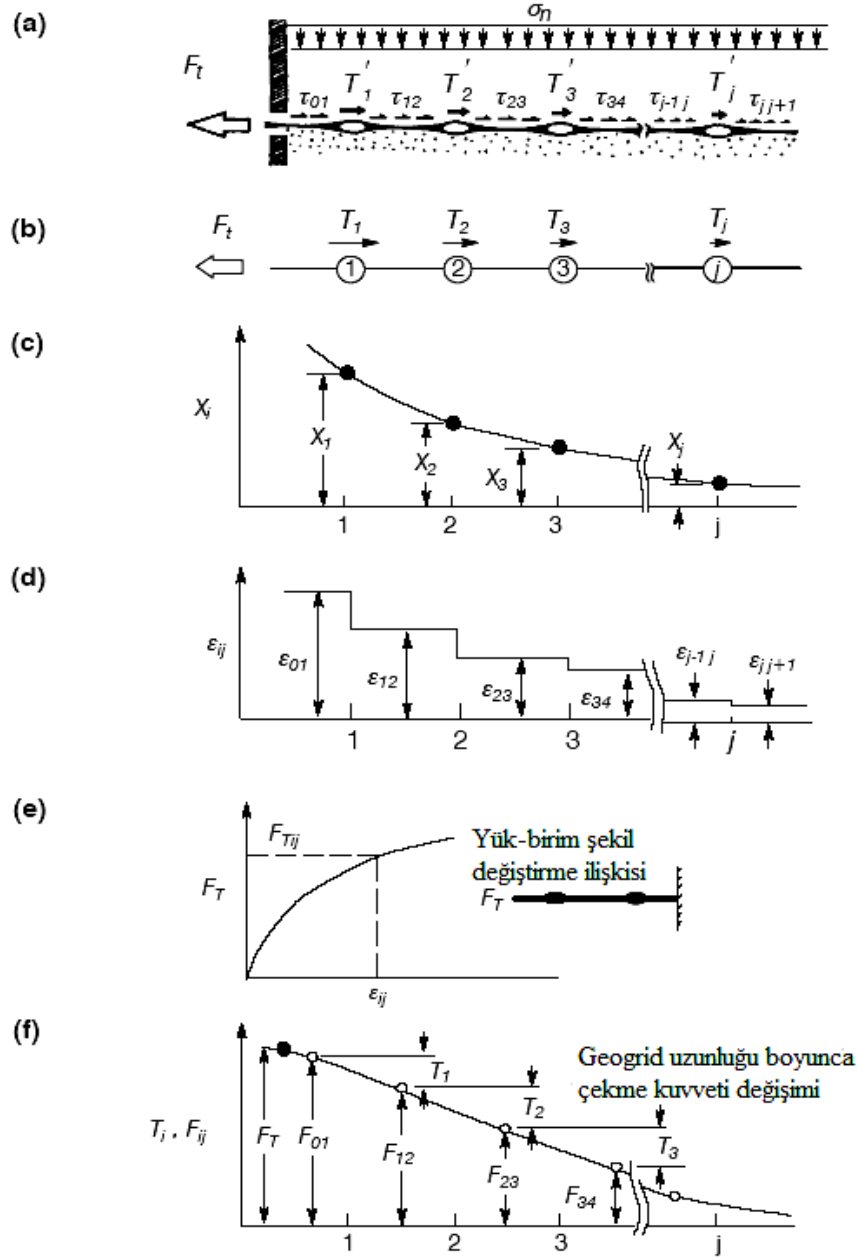
gerilmesi ortaya çıkar. Bu durum çalışmada 3 boyutlu etkileşim mekanizması olarak adlandırılmaktadır. Geogrid genişliği, kutu genişliği kadar ise bu durumda sadece zeminle geogrid arasında sürtünme ve kenetlenme (interlock) durumundan bahsedilir. Bu da 2 boyutlu etkileşimdir.

Alfaro vd.'nin (1995), çalışmasından alınan bir seri grafik Şekil 10'da görülmektedir. Şekil 10 a'da normal basınçta geogride uygulanan çekme, b'de çekmenin tersi yönde geogrid elemanlarda görülen tepki kuvveti, c'de çekme doğrultusundan itibaren her bir düğüm noktasının deplasmanı, d'de her bir düğüm noktasının birim şekil değiştirme, e'de yük-birim şekil değiştirme eğrisi ve f'de ise çekme kuvvetinin çekme doğrultusundan başlanarak geogrid boyunca diğer düğüm noktalarındaki değerleri görülmektedir. Çekmeye yakın bölgelerde birim şekil değiştirme, deplasman ve etkiyen kuvvet daha fazla olmakla beraber, doğrultu boyunca çekme bölgesinden uzaklaştıkça bu değerlerde azalmalar gözlenmektedir.

Austin vd. (1999), Sharma vd (1999), Mattox (2003), Ochiai vd (1999) ve Gunter vd (2003), geogrid güçlendirmeli yol temelinin performansını araştırmışlardır. Temel içine yerleştirilmiş geogridin yüksek rijitlik göstermesinin yine geogridin küçük göz açıklıklı olması ile ilgili olabileceği gösterilmiştir.

Baker vd. (1998), çalışmalarında kesme kutusu testlerinde agrega-agrega kayma mukavemetlerinin agrega-geonet kayma mukavemetlerinden daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Literatüre göre bu tezatlık aslında geogridlerin iyi bir güçlendirme donatısı olmadığı anlamına gelmez, agrega özelliklerine göre uygun geogrid kullanılması gerektiği anlamına gelmektedir.

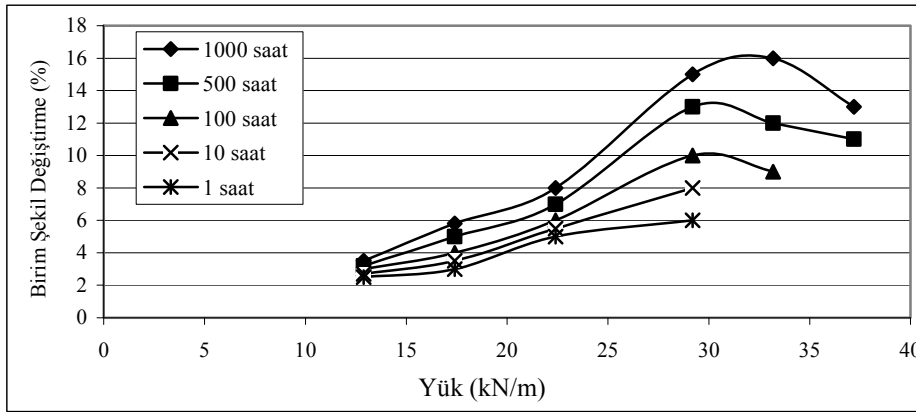
Farrag vd. (2003), geogrid donatının pullout çekme direncini araştırmışlardır. Basıncın, zemin yoğunluğunun, sınır şartlarının ve zemine gömülü geogridlerin mekanik özelliklerinin pullout karakteristikleri üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Uygulanan düşey basınç artırıldıkça pullout kutusu içindeki zemin ile geogrid daha iyi kenetlenebilmekte, iyi bir sıkışma elde edilmekte ve geogridin sıkışmış zemin arasından sıyrılıp çıkması ihtimali o kadar azalmaktadır. Sınır şartlarının genişletilmesi örneğin daha büyük ölçekli pullout kutusu kullanılması durumunda ise yanal basınçların sıfıra yaklaştığı daha iyi görülmektedir.



Şekil 10. Pullout test aletinde normal basınç altındaki geogridde sırasıyla çekme bölgesine en yakındaki geogrid elemanından başlayarak deplasman ve birim şekil değiştirmede gözlenen değişimler (Alfaro vd.,1995)

Kooh vd. (2004) ve Guo vd. (2005), geogridlerin uzun ve kısa süreli sünme davranışını çalışmışlardır (Şekil 11). Geogridlerin bozulmasını aşırı sünme deformasyonu olarak tanımlamışlar ve geogrid örneklerin birim şekil değiştirme-zaman eğrilerini elde etmişlerdir. Bu eğriler sünme davranışını göstermektedir. Daha az süre deneye tabi tutulan geogridlerde daha yatık bir birim şekil değiştirme-zaman grafiği; daha uzun süre devam

edilenlerde ise daha dik grafik eğrileri elde edilmiştir. Kısa süre deneye tabi tutulan geogridler yorulmaya maruz kalmamaktadır, böylece kopmadan uzun süreli sünme davranışı gösterebilmektedirler. Bundan dolayı da yatık bir eğri ortaya çıkmaktadır. Uzun süreli deneye tabi tutulanlarda ise bir noktadan sonra geogrid dayanımını kaybetmekte ve eğri azalma eğilimi göstermektedir. Bu yüzden dik grafik eğrileri görülebilmektedir. Bu durum ise polyster malzemeden üretilmiş olan geogridlerin sürekli sünme deformasyonuna maruz bırakılmasının ömrünü azaltabileceği ve dayanımını yitirebileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.

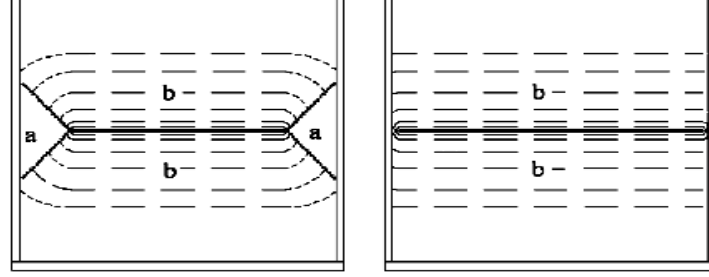


Şekil 11. Birim şekil değiştirme-zaman grafiği (Kooh vd., 2004)

Moraci ve Recalcati (2006), sıkıştırılmış granüler zeminde gömülü geogrid donatısının davranışına etkiyen faktörleri çalışmışlardır. Bu çalışmayı yapmak için büyük ölçekte pullout test aparatı tasarlamışlardır. Sabit birim şekil değiştirme yüklemesi altında 3 adet geogrid örneğine 40 adet pullout testi uygulamışlardır. Kullanılan granüler malzemeler; sınıflandırma, proktor ve çekme testleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Vurgulanan önemli bir husus da, kullanılan geogrid genişliği pullout kutusu genişliğinden az ise 3 boyutta zemin genişleme eğiliminin ortaya çıkmasıdır. Şekil 12'de 3 boyutta zemin genişleme eğilimi açıklanmaktadır.

Şekil 12'de bölgesel bir gerilme dağılımının ortaya çıkması kısa geogridi çevreleyen zemindeki genişmeyen bölge olan a'daki genişleme etkisinin genişleyen bölge olan b'deki genişleme etkisinden uzak olmasından dolayıdır. Bu durum iki bölge arasında sınırda kayma gerilmesi ortaya çıkarır ve zemin-geogrid arayüzünde efektif normal gerilmelerin artmasına yol açar. Buna bağlı olarak pullout etkisi artar. Örnek genişliğinin artırılmasıyla

da aksi durum görülür, yani basınç etkisi yayıldığı için genişleme azalmış olur. Böylece kayma gerilmeleri görülmez ve yanal etki kutu yan yüzeylerine dağıtılmış olur.



Şekil 12. Dar ve geniş örnekler için pullout etkileşim şeması (Moraci ve Recalcati, 2006)

Moraci ve Recalcati (2006), tarafından yapılmış olan çalışmadan çıkarılacak sonuçlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

- ❖ Aynı normal basınçta geogrid kalınlığı artırıldıkça pullout direnci artmaktadır.
- ❖ Çekme bölgesi yakınlarında çekme etkisi en fazladır, bu bölgeden uzaklaştıkça etki azalmaktadır. Çekmeye devam edildikçe öyle bir nokta vardır ki yırtılma (rupture) meydana gelir ve geogridin koptuğu kısımdan itibaren kesme yüzeyi oluştuğu varsayılmaktadır.
- ❖ Genişlik bakımından pullout kutusu genişliğinden dar, uzunluk bakımından da pullout kutusu uzunluğundan küçük örnekler kullanıldığında gelen kuvvet pullout kutusunun tüm yüzeyine dağıtılamadığı için artan çekme ve düşey basınç etkisinden dolayı geogridi etkileyen yük değeri de artmış olacaktır. Dolayısıyla geogrid daha geniş bir örneğe kıyasla daha erken kopacaktır.
- ❖ Birim şekil değiştirme ve deplasman en ve boy bakımından kutu boyutlarına yakın örnekler kullanıldığında daha fazla görülmektedir.

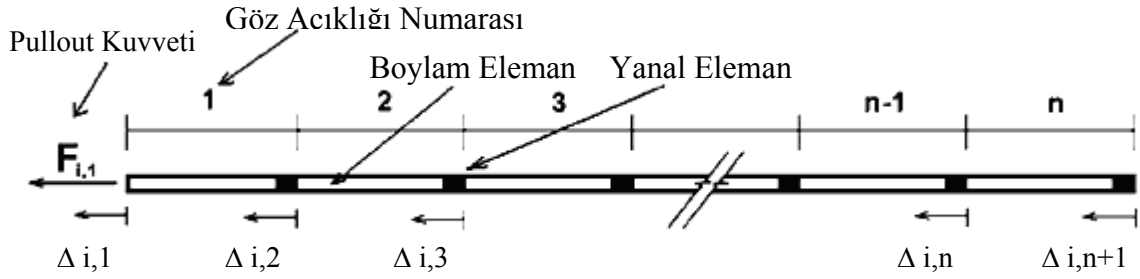
Literatürdeki Moraci ve Recalcati (2006), çalışmasından çıkarılan olgu ve bu doktora çalışmasını destekleyen en önemli husus, büyük ölçekte bir pullout düzeneğinin gerçeği yansıtmaya payının yüksek olacağıdır. Düşey yükü her tarafına eşit dağıtması için, pullout kutusu boyutlarında geogrid numune kullanılması tavsiye edilmiştir.

Moraci ve Gioffre (2005), granüler zemine gömülü geogridin pullout direncini belirlemek için basit bir metot geliştirmişlerdir. Çalışmada kesitten görünüşü normal olan bir geogrid ile aynı geogridin enlem ve boylam elemanları olmayan yani her yerinde aynı

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{l_s} \quad (2)$$

Yukarıdaki bağıntıda ise çekme bölgesine yakın elemanın deplasmanı ile bir önceki elemanın deplasmanının farkları alınıp elde edilen değer iki eleman arasındaki mesafeye bölünmesiyle bulunan değer çekme bölgesine yakın elemanın birim şekil değiştirme değerini vermektedir. Çekme bölgesinden başlayarak bu bölgeye en yakın elemandan en uzak elemana doğru sırasıyla birim şekil değiştirme en fazla çekme bölgesindeki elemanda gözlenmektedir.

Teixeira vd. (2007), yatay ve düşey geogrid elemanların pullout direnci etkilerini çalışmışlardır. Gerçek boyutlardaki pullout mekanizmasıyla küçük boyutlardaki pullout mekanizması karşılaştırılmış ve küçük ölçekteki kutudan alınan örneklerin diğerleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Fakat Moraci vd.'nin (2006) çalışmasında büyük ölçekteki pullout test düzeneğinin gerçeği temsil etme bakımından daha tutarlı olduğu belirtilmiştir. Şekil 14'te deplasmanların geogrid içine doğru aktarımı görülmektedir



Şekil 14. Çekme doğrultusundaki geogridde her bir elemanda oluşan birim şekil değiştirme (strain) (Teixeira vd., 2007)

$$\Delta_{i,2} = \Delta_{i,1} - \Delta_{i,1} \times L_{rib} \quad (3)$$

Eşitlikte;

$\Delta_{i,2}$ = 2. yatay elemanın (çekme bölgesine uzak eleman) pullout etkisi sonucu gösterdiği birim şekil değiştirme

$\Delta_{i,1}$ = 1. yatay elemanın (çekme bölgesine yakın eleman) pullout etkisi sonucu gösterdiği birim şekil değiştirme

L_{rib} = Geogrid elemanın çekme doğrultusundaki boylam elemanının uzunluğu olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik 3'te çekme bölgesine yakın bölgede oluşan birim şekil değiştirme, kendinden bir sonraki elemanda oluşan birim şekil değiştirme değerinden, bu birim şekil değiştirme değeri ile iki birim şekil değiştirme bölgesi arasında kalan geogrid uzunluğunun çarpımından elde edilen değer farkına eşittir. Tablo 1, referanslar bölümünde verilmiş olan çalışmalardan çıkarılan pullout deneyi ile ilgili verileri içermektedir. Pullout kutusunun boyutları, kullanılan geogridin boyutları, yük hücreleri ile ölçülmüş yatay ve düşey yük değerleri, deplasman ve birim şekil değiştirmeler tabloda görülmektedir.

Sugimoto ve Al (2003), yaptıkları çalışmada sayısal analizlerin ve testlerin geogridin pullout davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Birisi çift yönlü göz açıklıkları 28 mm x 38 mm, diğeri ise tek yönlü göz açıklıkları 158 mm x 23 mm olan iki farklı tür geogrid kullanılmıştır. Tek yönlü geogridin yatay ve düşey geogrid elemanlarında birim şekil değiştirme daha çok gözlenmiştir. Çalışma, diğer çalışmaları destekler nitelikte olup çekme ön yüzeyinde deplasman, birim şekil değiştirme, çekme kuvveti ve normal basınç etkisi daha çokken, çekme bölgesinden uzaklaştıkça etkilerin azaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 1. Genel olarak literatür araştırmalarından elde edilmiş pullout kutusu boyut özellikleri ve deneylerde uygulanmış olan yük ve çekme değerleri

	Pullout Kutusu Boyutları (mm)	Geogrid Boyutları Uzunluk- Genişlik (m)	Düşey Basınç (kPa)	Birim Şekil Değiştirme Oranı (mm/min)
	(Uzunluk x genişlik x yükseklik)			
[Nernheim ve Meyer (2004)]	1.5x0.60x0.60	–	300	–
[Alfaro vd, 1995]	1.60x0.7x0.5	–	–	–
[Marques, 2005]	1.53x1.0x0.80	–	–	–
[Palmeira, 2004]	1.0x1.0x1.0	–	25-75	0.5
[Sugimoto ve Alagiyawanna, 2003]	0.68x0.3x0.625	–	–	–
[Farrag ve Morvant, 2004]	1.21x0.60x0.45	–	–	–
[Teixeira vd, 2007]	1.5x0.70x0.50	–	52-50	4.6
[Moraci ve Recalcati, 2006]	1.7x0.60x0.68	0.40-1.15	–	1
[Racana vd, 2003]	1.0x1.0x0.75	–	2.8-27.8	6

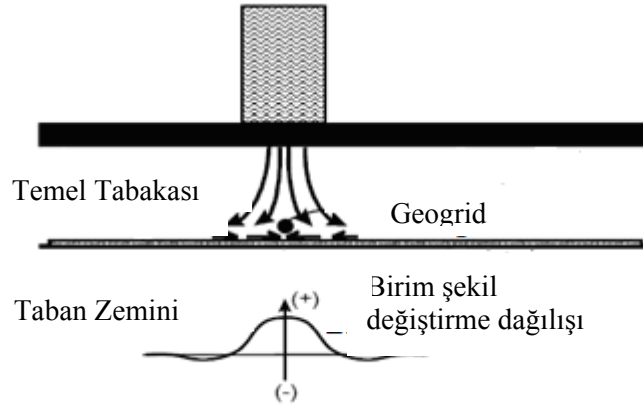
1.2.2. Arazi ve Laboratuarda Ölçüm Sensörleri ve Geogridin Yerleştirilme Konumlarıyla İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, önceki çalışmalarda kullanılan ölçüm sensörlerinin yerleştirilme konumları ve kaç adet ölçüm sensörü kullanıldığına dair bilgiler yer almaktadır. Literatüre göre ölçüm sensörü kullanılmış çalışmalar ve hangi sayıda sensör kullanıldığına dair bilgiler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

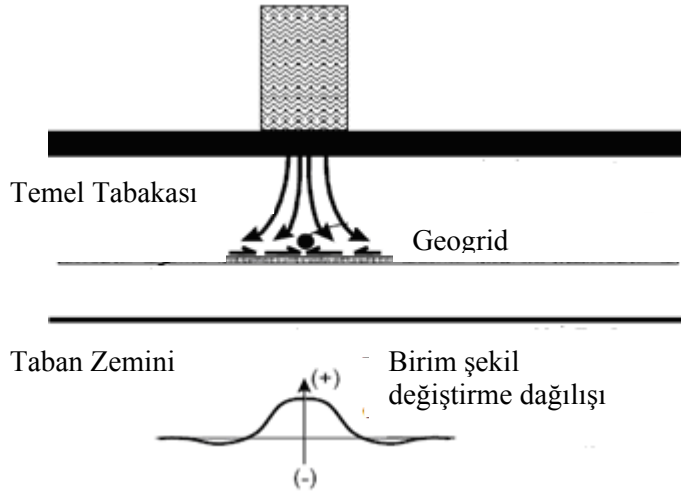
Tablo 2. Önceki çalışmalara göre ölçüm sensörlerinin yerleştirildiği tabakalar

	Yerleştirilen Ölçüm Sensörleri ve Yerleştirildiği Tabaka	
	Basınç Ölçer	Birim Şekil Değiştirme Ölçer
Hamad vd., (2006)	8 tane-taban zemini altına	24 tane-asfalt kaplama tabakası altına
Knoth vd., (2006)	4 tane-taban zemini altına	12 tane-asfalt kaplama tabakası altına
Morvant ve Farrag, (2004)	Sıkıştırılmış kil zeminde tabaka ortasına	
Mohiuddin, (2003)	Sıkıştırılmış kil zeminde tabaka ortasına	
Retzlaff vd.	Taban zemini tabakasının yüzeyden itibaren 5 cm altına	

Ryan vd. (2000), tarafından hazırlanan raporda temel ve alttemel tabakalarının performansının geogrid kullanımı ile arttığı ifade edilmiştir. Kaplamaya gelen yük 0.42-130 kN arasındadır. 2 cm-18 cm arası kaplama kalınlığı, 4-64 cm arası da temel+alttemel kalınlığı olacak şekilde yol tasarlanmıştır. Şekil 15'te iki farklı durumda ortaya çıkan birim şekil değiştirme dağılımları görülmektedir.



(a) Temel tabakası-taban zemini arayüzünde geogrid kullanılmış durum



(b) Temel tabakası içinde geogrid kullanılmış durum

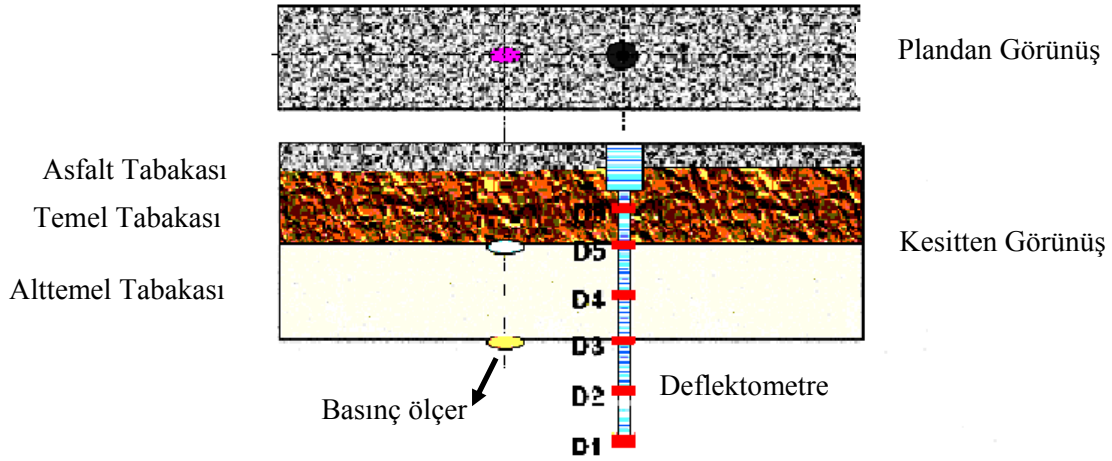
Şekil 15. Farklı tabakalarda geogrid kullanılması durumu
(Ryan vd., 2000)

Ryan vd. (2000), çalışmasına göre Şekil 15'teki ilk durumda arayüzde geogrid kullanılmasıyla rijitlik arttığından yükün etkisi daha az hissedilir ve gelen düşey yükler geogrid üzerinden yatay yönde azaltılarak aktarılır. İkinci durumda temel tabakası içinde kullanılan geogridin tabakanın kayma mukavemetini artırmasıyla birlikte malzemenin dağılmasını önleyip bir arada tuttuğu için temel tabakasının ömrünü artıran özelliği vardır. Bu çalışmaya göre temel tabakasının geogridle güçlendirilmesinin 4 amacı vardır:

- Temel ve alttemel malzemesinin yanal olarak hareketini önlemek.

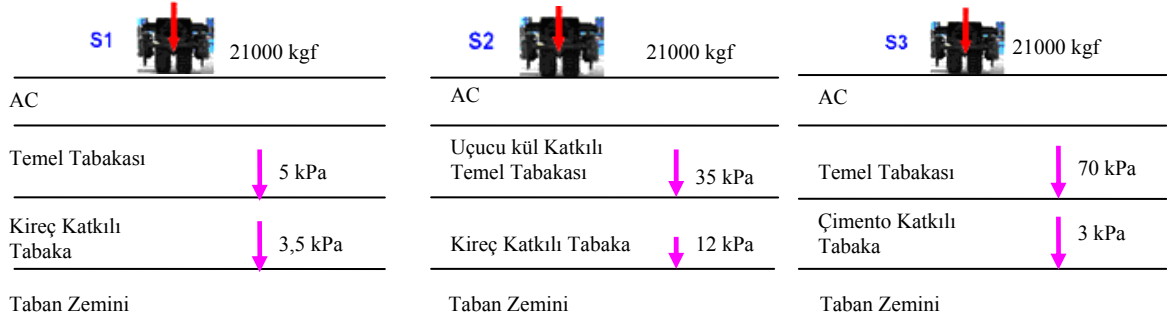
- Kenetlenmeyi artırmak ve bunun sonucunda güçlendirme yapılan kısımda temel ya da alttemelin mukavemetini artırmak.
- Sıkıştırılmış zemin üzerindeki düşey gerilmeleri artırmak.
- Sıkıştırılmış zeminde kayma gerilmelerini azaltmaktır.

Wu (2007), tarafından Louisiana yol araştırmaları merkezinde yapılmış olan çalışmada temel ve alttemel malzemelerinin yapısal performansı değerlendirilmiştir. Kurulan düzende tekerlek yükünün 21000 kgf- 41000 kgf arası değişebildiği ve lastik basıncının 723 kPa olduğu ortaya konulmuştur. Gerilmeleri belirlenecek yol kesitinde kaplama 5,08 cm, temel tabakası 21,6 cm ve alttemel tabakası da 30,5 cm olacak şekilde inşa edilmiştir. Şekil 16'da sensör yerleşimi görülmektedir. Kullanılan temel ve alttemel tabakalarının malzeme türlerine bağlı olarak aynı tekerlek yükünde ve aynı kalınlıklarda farklı gerilmeler oluştuğu görülmektedir. Temel tabakasındaki gerilmelerin 5,52-70,27 kPa arası; Alttemel tabakasındaki gerilmelerin ise 3,44-11,71 kPa arası değiştiği belirlenmiştir. Tekerlek yükü 21000 kgf'dan 26000 kgf'a çıkarıldığı zaman ise tabakalarda gözlenen basınçlar temel tabakasında 6,2-85,43 kPa arası; alttemel tabakasında ise 4,134-17,22 kPa arası değişmektedir.

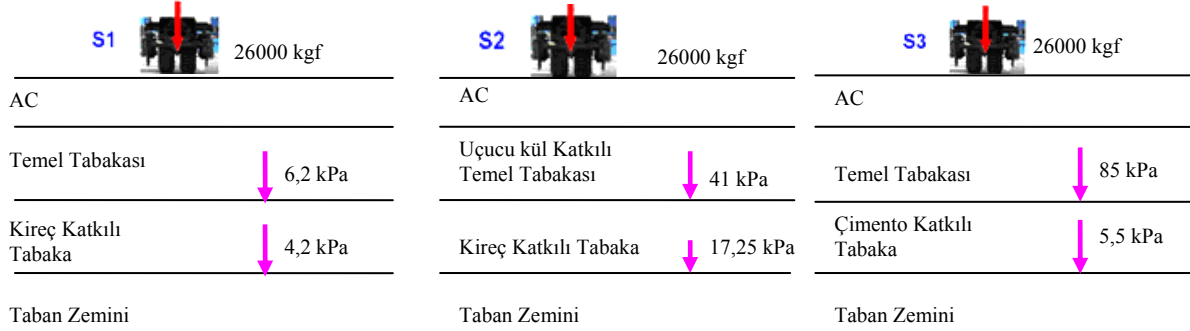


Şekil 16. Yol plan ve kesit görünüşü (Basınç ölçerler tabakaların alt kısımlarında) (Wu, 2007)

Şekil 17 ve 18'de iki farklı düşey yüke maruz karayolunda alt tabakalarda oluşan düşey gerilmeler görülmektedir.



Şekil 17. 21000 kgf yük altında Temel- Alttemel tabakalarına gelen gerilmeler (Wu, 2007)



Şekil 18. 26000 kgf yük altında Temel- Alttemel tabakalarına gelen gerilmeler (Wu, 2007)

WSDOT ve ASSHTO' ya göre alttemel tabakası için R değeri adı verilen ve CBR deneyinin gelişmiş hali olan deney metodu ile malzeme türüne bağlı olarak taşıyabileceği gerilmeler bulunabilmektedir. Bu değer uygulanan düşey gerilmeye ve malzemenin plastik akmasına bağlı olan bir değerdir. Bu konuda WSDOT 611 test metodu AASHTO T 190 ile benzer sonuçlar vermekteydi; ancak WSDOT maksimum 2067 kPa gerilmeyi (exudation pressure- bozulma gerilmesi) öngörürken AASHTO T 190 ise 2756 kPa öngörmektedir. Bu değerler kaplamaya gelebilecek maksimum değerler olup artık bu değer aşıldığı zaman taban zemininde bozulmalar ve taşıma gücünde kayıplar meydana gelmektedir.

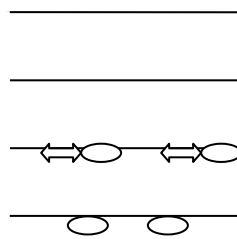
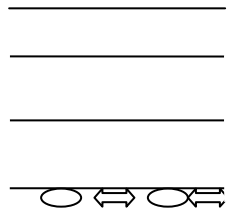
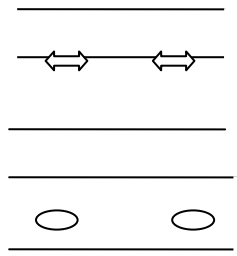
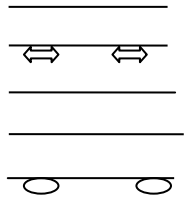
Tablo 3. Literatürden derlenen kaplama tabakası üzerine gelen yükler tablosu

Kaplama (Asfalt Kaplama Tabakası) Üzerine Gelen Tekerlek Yükleri				
Makale ismi	Tekerlek Yükleri	Temas Yüzey Alanı	Lastik Basınçları	Açıklama
Predicting Truck Tire Pressure ...	20, 24, 31 kN	20 kN için 200mm*188mm 24 kN için 200mm*173mm 31 kN için 200mm*172mm	483, 690, 896 kPa	-
Determining Layer Contributions ...	80 kN (Dingil-aks-yükü)		517-552 kPa	AASHTO 1993' e göre
Developing Geotechnical Engineering ...	-	-	70-700 kPa	Asfalta ölçüm sensörleri yerleştirilmiş bu sensörlerin ölçüm aralığı bu arada değişiyor.
Flexible Pavement Design, ESAL Lec. 28 Ch. 20 p. 955-973	Tek aksta(yaklaşık 4 tekerlek) 81 kN	110 mm çapında	488 kPa	-
Weight Limits Used for ...	Tek aks için 110 kPa Çift aks için 200 kPa 3 aks için 267 kPa 4 aks için 310 kPa 4 akslı grup için 360 kPa 5 akslı grup için 556 kPa	-	-	-
Approximately 192' C. A. ...	Ön akslar için 81 kN Arka akslar için 153 kN	-	-	-
Truck Characteristics, Movement and Speed	Tek lastikli tek aks 60.6 kN Çift lastikli çift aks 206.2 kN Çift lastikli 3 aks 210.5 kN	250*290 mm 280*210 mm 270*200 mm	750 kpa	-
Computed Design Coverage for Example ...	Otomobil 6,67 kN Pick-up 13,5 kN 2 akslı kamyon 40-44 kN 3 Akslı kamyon 40-142 kN	-	-	-
Karayolu Uluslararası Yönetmeliği	Taşıtı yüklü haldeyken tek dingil 13 tonu; iki dingilli bir aks grubu 19 tonu geçmemelidir.	-	-	-

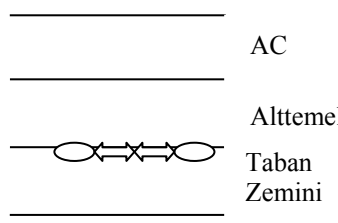
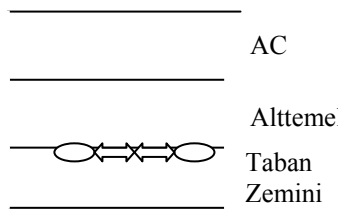
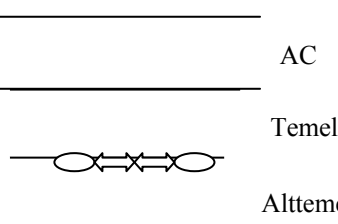
Tablo 4. Literatürden alınan birim şekil değiştirme, basınç ölçer pozisyonları ile sayısal değerleri ve tabaka kalınlıkları



Literatür Araştırması ve Lab. Deneyleri	Pressure Cell Yerleştirilme Pozisyonu (tekerlek altına gelecek şekilde)	Okunan Gerilme (Stress) Değerleri (kPa)	Kaplama Kalınlıkları ve Yol Tabakalarının Kesit Görünüşü	Birim Şekil Değiştirme Ölçer Yerleştirilme Pozisyonu (tekerlek altına gelecek şekilde)	Okunan Birim Şekil Değiştirme (Strain) Değerleri (micro strain)
1. Wijayanath vd.	Alttemel tabakası altına	40-41 kPa	<p>15 cm AC 23 cm Temel 145 cm Alttemel</p>	Kaplama tabakası altına	183-228 mstrain arası
2. Romanoschi vd.	Alttemel tabakası altına	10-84 kPa arası	<p>10.16 cm Temel 15.24 cm Alttemel</p>	Kaplama tabakası altına	
3. Chandra vd.	Temel-Alttemel tabakası arasına	50 kPa civarı	<p>15 cm AC 15 cm Temel 50 cm Alttemel</p>	-	-

Tablo 4'ün devamı

4. Knight vd.	Temel-Alttemel arasına ve Alttemel-Zemin arasına	30-50 kPa 3-10 kPa	15 cm 23 cm 145 cm		AC Temel Alttemel	Temel Tabakası altına	-
5. Retzlaff vd.	Alttemel-Zemin arasına	10 28 kPa arası	- -		AC Temel Alttemel	Alttemel-Zemin arasına	-
6. Knoth vd.	Taban zemini-Sıkıştırılmış zemin arasına	Yaklaşık 5 kPa (Sıkıştırma yapılmış zemin tabakasında ki gerilme)	11 cm 30 cm 15 cm		AC Temel Alttemel Taban Zemini	Kaplama tabakası altına	120-600 mstrain arası
7. Hamad vd.	Taban zemini-Sıkıştırılmış zemin arasına	-	- -		AC Temel Alttemel Taban Zemini	Kaplama tabakası altına	-

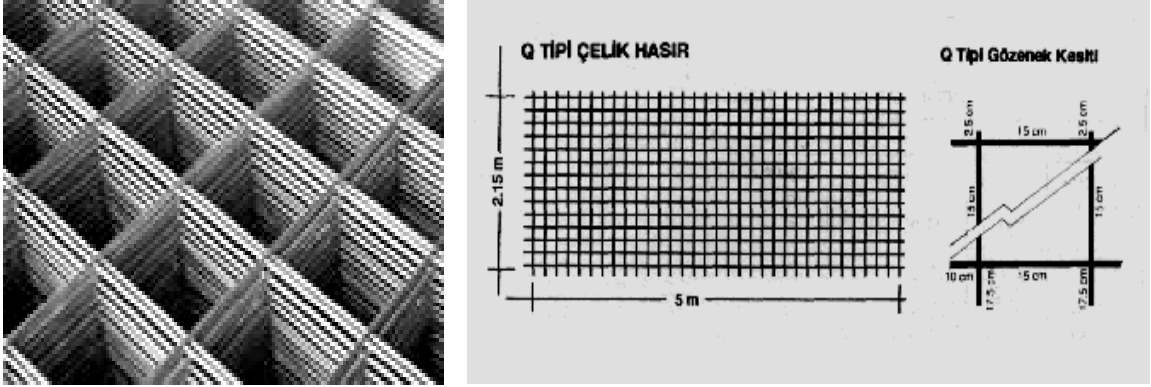
Tablo 4'ün devamı

8. Teze Ait Deney No 1	Alttemel tabakası altına	3-8 kPa arası	— 20 cm 30 cm	 <p>AC Alttemel Taban Zemini</p>	Alttemel-Taban zemini arası	120-230 mstrain
9. Teze Ait Deney No 2	Alttemel tabakası altına	—	— 20 cm 30 cm	 <p>AC Alttemel Taban Zemini</p>	Alttemel-Taban zemini arası	17 mstrain (çekmeye dik)- 230 mstrain (çekmeye paralel)
10. Teze Ait Deney No 3	Temel tabakası altına Temel- Alttemel arası	30-50 kPa (Temel tabakası altına) 33-39-40- 48 kPa (Temel- Alttemel arası)	— 20 cm 30 cm	 <p>AC Temel Alttemel</p>	Temel-alttemel arası	17-31 mstrain arası (çekmeye dik)- 57-100 mstrain arası (çekmeye paralel)

NOT:  Birim Şekil Değişirme Ölçer (Strain Transducer) sembolü
 Basınç Ölçer (Pressure Cell) sembolü.

1.3. Geogrid-Hasır Donatı İlişkisi

Toprak yapılarındaki zemin-geogrid ilişkisi, betonarme yapılarındaki çelik ilişkisine benzetilebilir (Şekil 19). Betonarmede çekme gerilmelerini çelik karşılarken, zeminde ise bu görevi geogrid yerine getirir. Geogridler, asfalt yollar ve dolguların altına serilerek düşey yük vektörlerini kendi düzleminde üniform olarak dağıtır ve zemine takviye oluşturur. HDPE (high density polyethilen) malzemeden üretilen ve zemine takviye için kullanılan geogridler; betonarme yapıların tabliyelerinde, tünel kalıp sistemlerde, beton pist ve otoyol kaplamalarında, metro ve tünel inşaatlarında sıkça kullanılan hasır çelik donatı ile yapısal olmasa da işlev ve görüntü olarak benzerlikler göstermektedir.



Şekil 19. Çelik hasır donatı (URL-5, 2009).

Zemin agrega boyutlarının etkisi, geogrid yapısı ve geogrid plastik malzemesinin taşıma gücü son derece önemlidir. Agrega boyutları, geogrid göz açıklığı, plastik geogrid elemanın kalınlığı gibi faktörler zemin-geogrid arasındaki yüzeyin kayma direncini belirlemek için önemlidir (Farrag vd., 2003). Burada kayma direncini artıran en önemli parametre geogrid kalınlığından çok zemin agrega boyutlarının oranıdır ama bundan daha da önemli olan geogrid göz açıklığıdır.

1.4. Geogridlerin Arazide Serilmesi ve Uygulanması

Arazide gelen trafik yükleri her yerde aynı olmadığı için geogridin kayma gerilmeleri altında bir bütün olarak çalışmadığı bölgesel çalıştığı yani kayma gerilmelerinin geogridin

her yerinde aynı olmadığı varsayılmaktadır. Buna en iyi örnek dolgulardan belli bir süre sonra çıkarılan geogridlerde kısım kısım yırtılmaların olması gösterilebilir. Bunun başlıca nedeni, agregaların geogridin açıklıkları içinde penetre olan kısımlarının bütün geogrid üzerinde eşit olmadığı, bu kısımların daha fazla gerilme taşıdığı düşünülmesidir. Dolayısıyla geogrid elemanlarındaki yırtılmaların bu bölgelerde daha çok olacağı gerçektir.

Şekil 20 a'da karayollarında geogridlerin alttemel tabakasında serimi, b ve c'de 24 mm boyutundaki agregaların geogrid içinde penetre edilmiş şekillerinin üstten ve yandan görünüşleri ve d'deki şekilde ise aynı agregaların daha küçük çaplı geogride penetre edememiş şekli görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

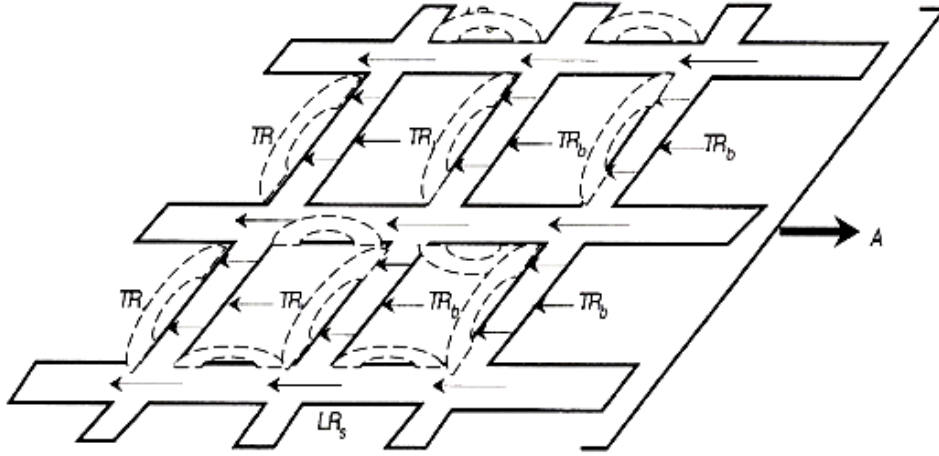


(d)

Şekil 20. Geogrid serimi ve agregaların konumu

Karayolları fenni şartnamesinde 75 mm'lik elekten geçen malzemelerin % 100 olması istenir (Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006). Bu durumda 7 cm'lik agregaların kullanılması kaçınılmazdır. Üretilen geogridlerin çoğunluğu çift yönlü çalışan (biaxial)

kare göz açıklıklı olup onların da en yaygın kullanılanı küçük göz açıklıklı türlerdir (1,5-3 cm). Ya da tek yönlü çalışanlar (uniaxial) vardır ki onlarında göz açıklıkları 20-25 cm uzunluğunda ve 1-2 cm genişliğindedir. Sözü edilen agregaları bu göz açıklığındaki geogridler penetre edemeyecektir. En azından 7,62 cm boyutundaki agregalar geogridin göz açıklığı içerisine alınarak kenetlenme etkisi göstermeyecek sadece yüzeysel sürtünmeye bağlı kayma davranışı elde edilmiş olacaktır. Daha büyük göz açıklıklı geogridleri alttemel malzemesi altında kullanmak daha ideal sonuçlar verecektir. Şekil 21'de geogridin agregaları penetre etmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 21. Geogrid boylam ve enlem elemanlarda deformasyonlar

A= Toplam pullout mukavemeti

LRs= Geogrid boylam elemanının kesme mukavemeti

TRs= Geogrid yanıl elemanının kesme mukavemeti

TRb= Geogrid yanıl elemanının taşıma mukavemeti

Geogrid göz açıklığı, agregaları penetre edemeyecek kadar küçük ise bu durumda kenetlenme ortaya çıkmayacak sadece yanıl ve boylam elemanlar üzerinde ortaya çıkan sürtünme kuvveti oluşacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında farklı göz açıklıklarına sahip geogridler pullout deneyine tabi tutulmuş, deneyler sonucunda hangi göz açıklığındaki geogridin en iyi performansı verdiği araştırılmıştır. Bu amaçla testlerde kullanılacak geogrid numuneler 1,20 m x 1 m ebatlarında kesilerek hazırlanmış, her bir farklı göz açıklığındaki geogrid için 3'er adet pullout deneyi yapılmış, deneyler sonucunda pullout kuvveti-deplasman ile kayma mukavemeti-deplasman grafikleri çizilmiştir. Pullout test kutusu içine yerleştirilen ölçüm sensörleri sayesinde düşey gerilmeler ve oturmalar hesaplanmıştır.

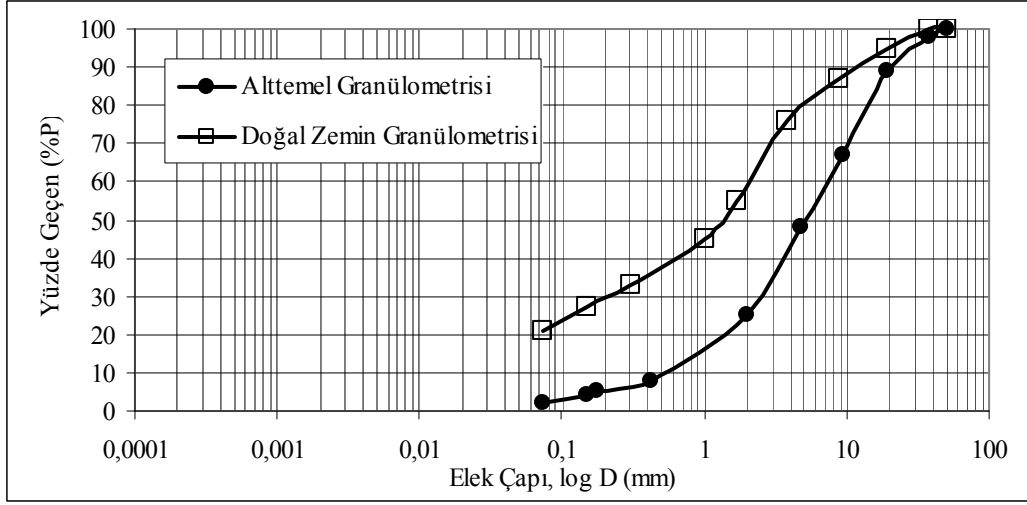
2.1. Materyal

Bu kısımda; araştırmada kullanılan alttemel tabakası ve taban zemininin malzeme özellikleri araştırılmış, pullout deney düzeneği ve düzenekte kullanılan ölçüm sensörleri ile farklı göz açıklıklarına sahip olan geogridlerin özellikleri açıklanmıştır.

2.1.1. Agregaların Elek Analizleri

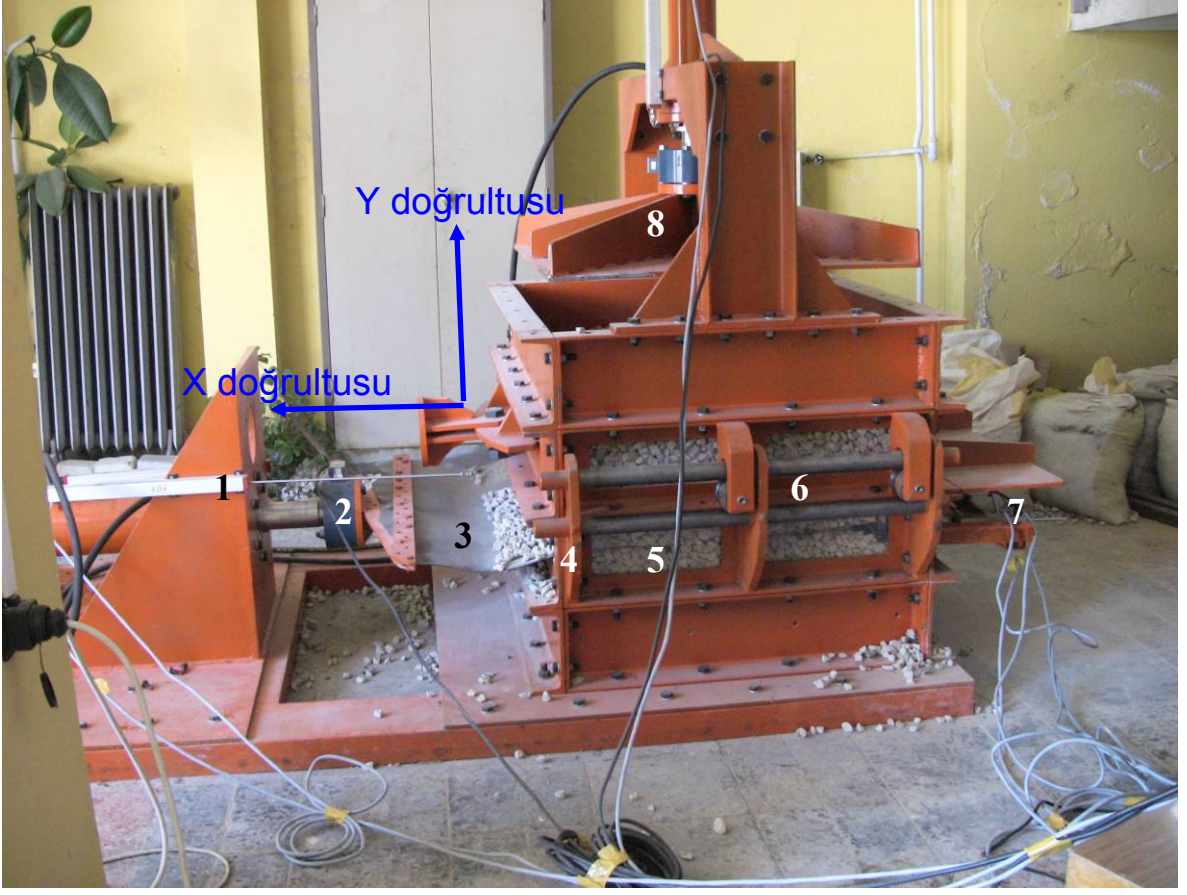
Bu çalışmada kullanılan agregalar Türkiye şartlarında kullanılan agrega malzemelerini içermekle beraber, ağırlıklı olarak Karadeniz Bölgesi'nde yaygın olarak kullanılan malzemelerden oluşmaktadır. Alttemel malzemesi Karayolları ile görüşülerek temin edilmiştir. Bunun sebebi rastgele malzeme kullanmayıp Türkiye'de yol yapımında birebir kullanılan alttemel malzemesini kullanmaktır. Malzeme temin edildikten sonra etüvde kurutma işlemine tabi tutulmuş sonrasında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'ndaki ASTM elekleri ile alttemel malzemenin elek analizleri gerçekleştirilmiştir. Alttemel tabakası malzemesi % 20 filler agrega, % 60 ince agrega ve % 20 iri agrega; taban zemini ise % 3 filler agrega, % 45 ince agrega ve % 52 iri agrega içermektedir. Granülometri eğrisi Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Laboratuvar deneylerinde kullanılan alttemel ve taban zemini malzemesinin granülometrisi



2.1.2. Pullout Deney Düzeneği

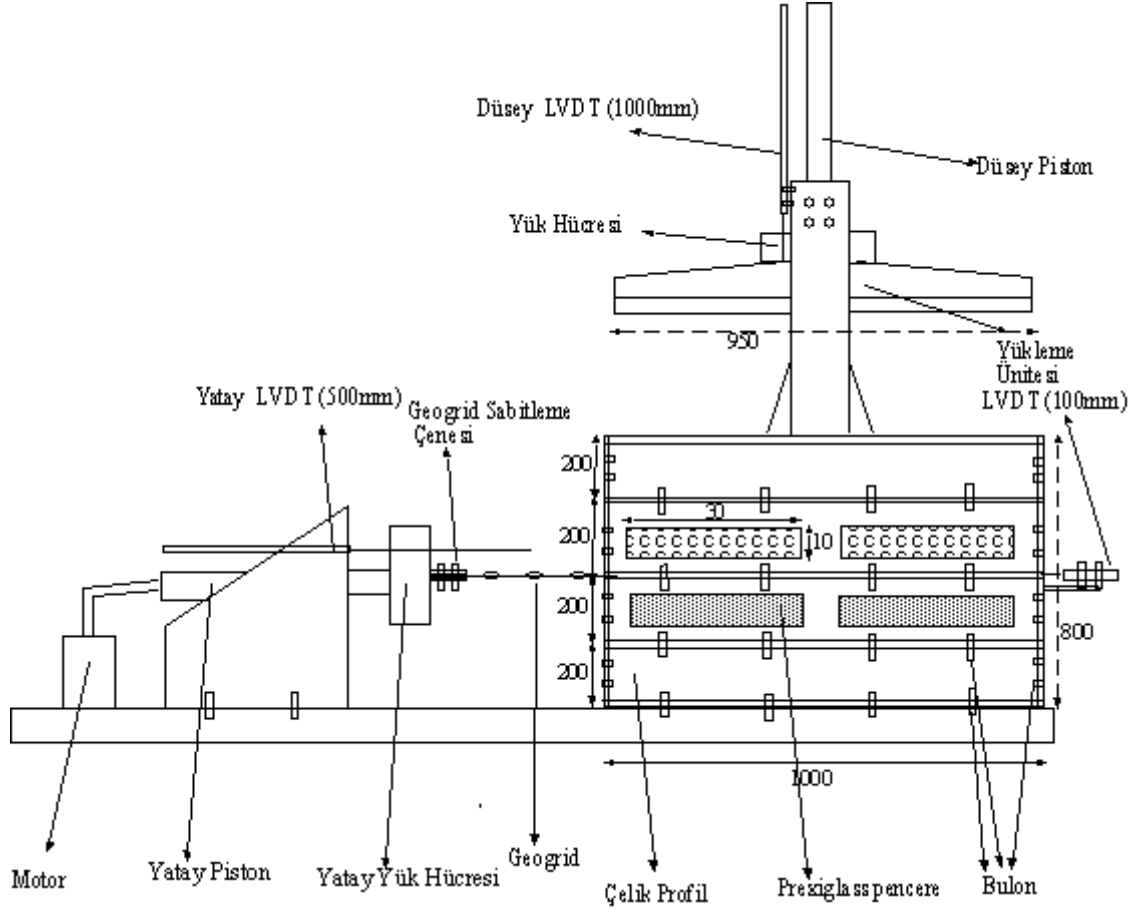
Geogrid, geomembran gibi zemin donatısı olarak kullanılan malzemelerin sıkıştırılmış zemin içinde ve belli bir düşey basınç altında çekildiği ve bu çekme etkisiyle geogrid, geomembran gibi donatıların çekme ve kayma davranışının belirlendiği testler pullout testleri olarak adlandırılmaktadır. Test düzeneği TÜBİTAK tarafından desteklenmiş olup bu çalışma için tez konusu olarak kararlaştırılmıştır. Deney düzeneği Trabzon Sanayi Sitesi'nde yaptırılmıştır. Şekil 22'de pullout düzeneği açık şekilde görülmektedir.



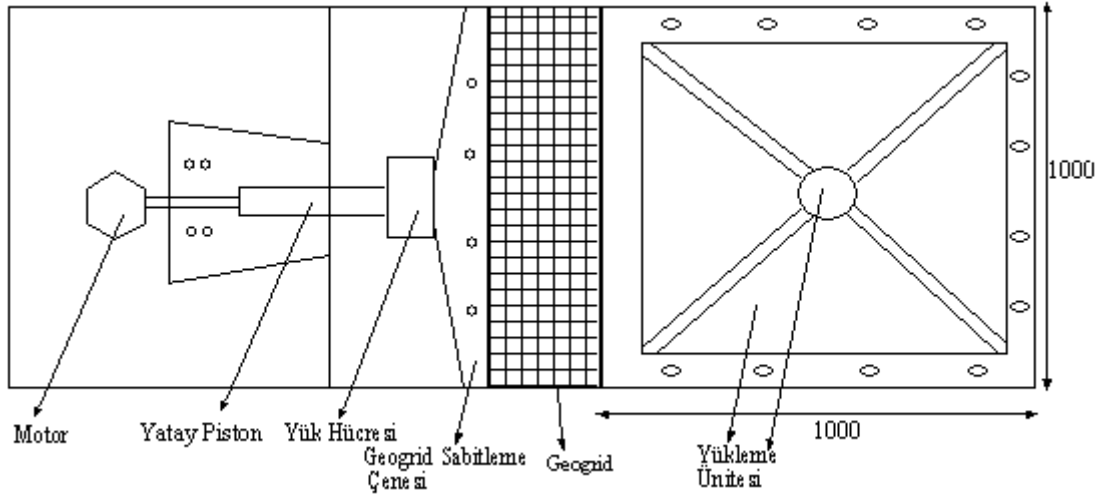
Şekil 22. Pullout Deney Düzeneği

Şekil 22 üzerinde numaralandırılan kısımlar aşağıda görülmektedir. Fotoğrafi verilen düzeneğin Şekil 23'te de detay çizimleri görülmektedir.

1. LVDT
2. Çekme pistonu ve yük hücresi
3. Geogrid-Geomembran
4. Çekme yüzeyi (ön yüz)
5. Prexiglass pencereler
6. Ray sistemi
7. LVDT
8. Basınç pistonu, plakası ve yük hücresi



(a) Yan görünüş



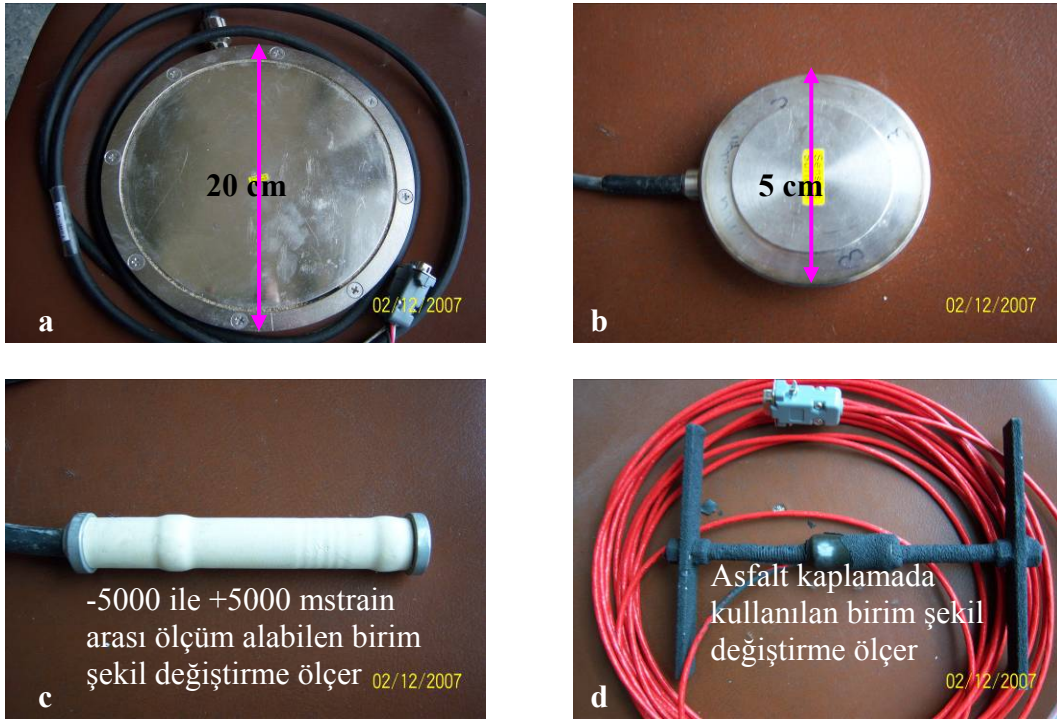
(b) Üst Görünüş

Şekil 23. Pullout test düzeneğinin detay çizimleri

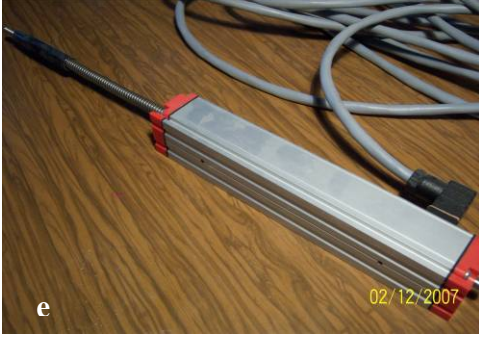
2.1.3. Pullout Deney Düzeninde Kullanılan Ölçüm Sensörleri

Laboratuarda pullout deneyleri yapılırken aşağıda özellikleriyle verilen ölçüm aletleri kullanılmıştır:

- ❖ 8 adet 5 cm çaplı 1 MPa kapasiteli zemin basınç ölçer (Şekil 24a)
- ❖ 1 adet 20 cm çaplı 1 MPa kapasiteli zemin basınç ölçer (Şekil 24b)
- ❖ 8 adet -5000 ile +5000 microstrain arası ölçüm alabilen birim şekil değiştirme ölçer (Şekil 24c)
- ❖ 2 adet -1500 ile +1500 microstrain arası ölçüm alabilen asfalt kaplama içinde kullanıma uygun birim şekil değiştirme ölçer (Şekil 24d)
- ❖ 8 adet Potansiyometrik Cetvel
 - 5 adet 10 cm ölçüm kapasiteli (Şekil 24e)
 - 2 adet 50 cm ölçüm kapasiteli (Şekil 24f)
 - 1 adet 100 cm ölçüm kapasiteli (Şekil 24g)
- ❖ 3 adet Sıcaklık Ölçer (Thermocouple) (Şekil 24h)
- ❖ 2 adet 20 ton kapasiteli basınç-çekme yapabilen yük hücresi (Şekil 24 k- Şekil 24 l)
- ❖ 3 adet Veri Toplama Ünitesi (Data Acquisition System) (Şekil 24m)



Şekil 24.1. Pullout deney düzeninde kullanılan ölçüm sensörleri



10 cm LVDT



50 cm LVDT



100 cm LVDT



Sıcaklık ölçme sensörü ve veri kaydedici



2 Adet 20 tonluk yük hücresi

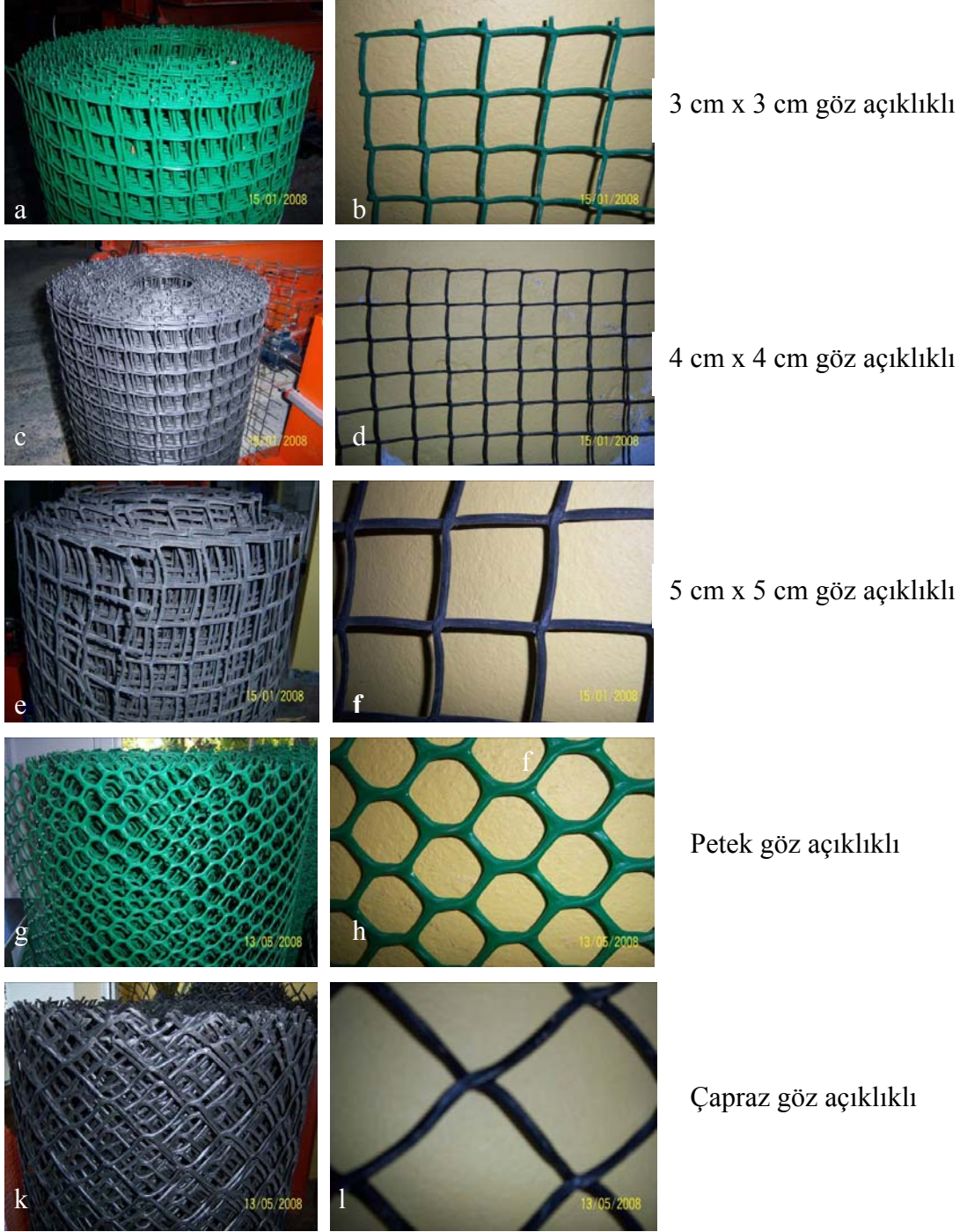


Veri Toplama Ünitesi

Şekil 24.2. Pullout deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarından (sensörlerden) görüntüler

2.1.4. Deneyleerde Kullanılan Geogrid Türleri

Taban Zemini (Subgrade)-Alttemel arayüzünde 5 farklı geogrid türlü kullanılarak pullout deneyleri yapılmış ve sonuçlar tablo ve grafikler şeklinde verilmiştir (Şekil 25).



Şekil 25. 5 farklı göz açıklığına sahip geogridlerin rulo halde ve yakından görünüşü

Öncelikle 3 farklı kare göz açıklığına sahip geogridler ve onları takiben petek göz açıklıklı ve çapraz göz açıklıklı geogridler üzerinde pullout deneyi yapılmıştır.

2.2. Yöntem

Pullout deney düzeneği kurulduktan sonra, deneyler aşağıda anlatıldığı şekilde yapılmıştır:

- Kullanılan agrega boyutunu sabit tutup taban zemini ile alttemel arasına her deney için farklı göz açıklıklarında geogridler sermek suretiyle gerçekleştirilmiştir.
- Her bir göz açıklığındaki geogridle yapılan deneylere bir defasında çekme uygulanarak bir defasında da çekme yaptırmaksızın sadece düşey basınç uygulayıp düşey gerilmeler kaydedilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Deneyler yapılırken aşağıdaki yöntem takip edilmiştir:

1. Pullout testi öncesi geogrid malzemenin hareketini belirleyebilmek için dijital görüntü düzeneği hazırlanmış, deneyin başlatılmasıyla görüntü alınmasına başlanmış, deney boyunca dijital kamera kayıta kalmış ve deney sonunda kamera kaydı durdurularak alınan görüntüler kaydedilmiştir. Bu konuda Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden destek alınmıştır.

2. Pullout testi boyunca agregaların hareketleri, özellikle geogrid içine penetre edilmiş olanlar kodlanarak deformasyonları analiz edilmiştir. Geogridlerin pullout testi öncesi ve sonrası x ve y doğrultusundaki deformasyonları ve birim şekil değiştirmeleri hassas bir şekilde ölçülmüştür. Bu konuda ilgili şekil ve açıklamalar ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır.

3. Laboratuarda kurulu olan pullout düzeneğinde yüklemeler yapılmış ve uygulanan düşey yükte geogrid belli bir hızda çekilmiş ve deney sonunda yükleme boşaltılarak geogriddeki deformasyonlar gözlemlenmiştir.

4. Her bir geogrid türünden üçer örnek laboratuardaki pullout testleri için kullanılmıştır. Yani deneylerin gerçeği yansıtması bakımından her bir test üç kere tekrarlanmıştır.

5. Pullout test kutusu içerisine yerleştirilmiş basınç ölçerler ile kutu içindeki basınç dağılışı tespit edilmiştir. Bunun yapılmasındaki amaç, uygulanan düşey yük etkisiyle pullout test kutusu içerisinde farklı derinliklerde düşey basınç dağılışının nasıl

gerçekleştiğini deneysel olarak gözlemlemektir. Elde edilmiş olan düşey basınç dağılışı grafikleri ilerleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

6. Boylam ve enlem birim şekil değiştirmeleri hesaplamak için kutu içine birim şekil değiştirme ölçerler yerleştirilerek x ve y doğrultusundaki birim şekil değiştirme değişimleri incelenmiştir. Yine düşey yük etkisiyle farklı derinliklerde çekme yönüne paralel ve dik doğrultulardaki birim şekil değiştirmelerin hangi değerleri aldığı tespit edilmiştir.

2.3. Geogrid Çekme Testleri

Pullout testlerinde sıkıştırılmış zemin içerisindeki geogridlere çekme uygulanarak zemin donatısı performansları araştırılmıştır. Bu durumda elde edilen pullout kuvveti ve kayma mukavemeti sonuçları geogridin sadece kendi performansını göstermemektedir. Pullout testlerinde geogrid agregalarla penetre durumunda olduğu için bu testler geogridlerin mekanik özellikleri konusunda bir bilgi vermemektedir. Geogridlerin mekaniksel özellikleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda yapılan çekme testleri ile belirlenmiştir (Şekil 26). Geogridlerin mekanik (fiziksel) özelliklerini belirlemek için 30 cm x 30 cm boyutundaki numuneler hazırlanmıştır. Testlerin gerçekliğini sağlamak için her bir göz açıklığına sahip geogrid 3 defa teste tabi tutulmuştur.

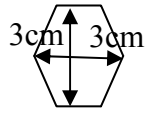
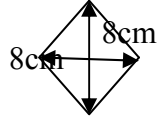


Şekil 26. Çekme test aletinin genel görünüşü

Geogrid numuneleri kavrayacak şekildeki metal çeneler sanayide yaptırılmış, geogrid bunlar aracılığıyla düşey ekseninden test cihazına yerleştirilmiştir. Çekme testlerinde test cihazına uygun olarak hazırlanmış numuneler cihaza yerleştirildikten sonra çekme hızı 5 mm/dk olacak şekilde cihaz programlanmıştır. Bu hızın seçilmesinin sebebi, pullout testleri yapılırken yaklaşık bu hızda deneylerin yapılmış olmasıdır. Literatür araştırması yapılarak Tablo 5'te görüldüğü üzere birim şekil değiştirme oranı yani geogride dakikada ne kadar çekme uygulandığı araştırılmış, tez düzeneğinde de bu konudan destek alınmıştır.

Cihazın geogrid numuneyi çekmeye başlamasıyla teste başlanmıştır. Test devam ederken cihaza bağlı bilgisayardan teste ait yük-uzama değişimleri izlenmiştir. Teste devam edildiğinde çekme arttıkça uzamanın da arttığı görülmüştür. Geogridde kopmalar meydana geldiği andan itibaren geogrid mukavemetini kaybetmekte ve grafik belli bir pik (maksimum) değer yaptıktan sonra düşmeye başlamaktadır. Bir değerden sonra geogridin tamamen koptuğu ve mukavemetini kaybettiği anda deneylere son verilmiştir. Çekme testlerine ait sonuç grafikleri bulgular ve irdeleme kısmında detaylı olarak yer almaktadır.

Tablo 6. Geogridlerin mekanik (fiziksel) özellikleri

	5cmx5cm Göz Açıklıklı Geogrid			4cmx4cm Göz Açıklıklı Geogrid			3cmx3cm Göz Açıklıklı Geogrid		Petek Göz Açıklıklı Geogrid		Çapraz Göz Açıklıklı Geogrid		
	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 1	Test No. 2	Test No. 3
Yük kN/m (pik değer)	5,64	5,76	5,76	2,76	2,72	2,64	3,52	3,32	5,92	5,72	3,6	5,60	4,72
Strain % (nihai değer)	25	25,5	23	25	11	15	75	26	80	80	27	37	34
Strain % (pik değer)	11	9	10	5	5	6	23	10	60	30	23	26	28
Deplasman mm (pik değer)	40	26	30	14	16	17,5	70	26	160	60	57	57	82
Deplasman mm (nihai değer)	220	75	68	76	32	45	80	76	240	230	65	65	113
Göz Açıklığı Boyutları	5cmx5cm			4cmx4cm			3cmx3cm						

2.4. Pullout Deneyleri

2.4.1. Pullout Deneyleri Öncesi Yapılan Çalışmalar

2.4.1.1. Arazi Koşullarında Alttemele Uygulanan Sıkıştırma Basıncının Belirlenmesi

Trabzon-Araklı Dağbaşı Mevkiinde Karayolu ekiplerinin sermekte olduğu alttemel malzemenin sıkıştırıldığı yerden ölçüm alınmıştır. Amaç, arazide alttemel tabaka serilirken sıkıştırma yapan silindirin uyguladığı maksimum yükün ne kadar olduğunu belirlemektir. Bu sıkıştırma yükünün belirlenmesiyle laboratuvar deneylerinde kullanılan taban zemini ve alttemel tabakasının hangi basınçta sıkıştırılması gerektiği tespit edilmiştir. Pullout testlerinin gerçeği yansıtması bakımından birebir arazideki sıkıştırma yükünün kullanılması tercih edilmiştir.

Araziye basınç ölçeri yerleştirirken sıkıştırma yapılacak alttemel malzemesi kazılmış ve basınç ölçerin altına ve üstüne kum serilmiştir. Ayrıca kablonun cihaza giriş bölgesine cihazın herhangi bir darbe almasını önlemek amacıyla yine kum serilmiştir. Üzeri yaklaşık 5 cm alttemel malzemeyle kapatılmış, basınç ölçerin bulunduğu nokta işaretlenmiş ve silindirin bu noktadan tam ortalararak geçmesi sağlanmıştır. Gelen yükün temas alanına bölünmesiyle elde edilen sıkıştırma basıncının, toprağa gömülü büyük basınç ölçerin ölçtüğü ile tutarlı olduğu görülmüştür. Silindir basıncı toplam yükün etki alanına oranlanmasıyla bulunmuştur. Şekil 27’de basınç ölçerin zemine yerleştirilmesi ve sıkıştırılması görülmektedir.



(a)

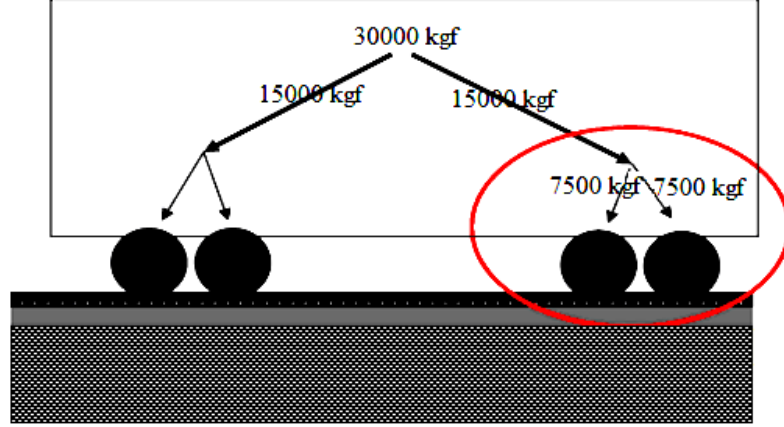


(b)

Şekil 27. (a) Arazide 20 cm çaplı basınç ölçerin alttemel tabakasına yerleştirilmesi (b) Alttemelde gömülü basınç ölçer üzerinden silindir geçirilmesi

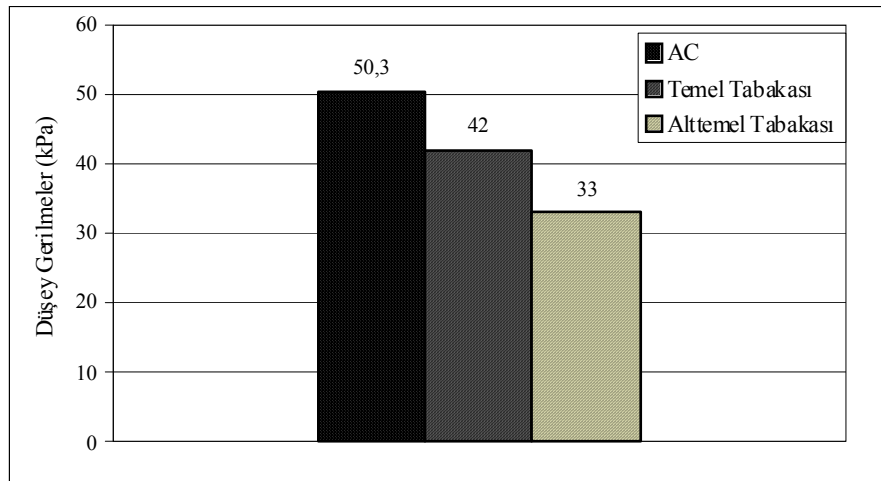
2.4.1.2. Pullout Deneylerinde Tatbik Edilen Düşey Yükün Belirlenmesi

Deneylere başlanırken uygulanması gereken düşey yük rastgele seçilmeyip literatüre bağlı kalınarak araziden alınmış ölçümlerdeki ağır taşıtın dingil yükü (dingilin her iki tarafında eşit dağılmış tekerlek yükleri) esas alınmıştır. Şekil 28’de ağır taşıtta tekerleklere gelen yükler görülmektedir.



Şekil 28. Arazide yüklü bir ağır taşıtın asfalt kaplaması üzerine temas eden ağırlığı (Priest vd., 2005)

Şekil 28’e göre ağır taşıtlarda en çok ağırlık alan aksa gelen yükün 80 kN olduğu belirlenmiştir. Bu da yaklaşık 8000 kgf değerine karşılık gelmektedir. Bir aksın 4 tekerlekten oluştuğuna bilindiğine göre $8/4=2000$ kgf tekerlek başına gelen maksimum düşey yük (kamyon tekerlek yükü) olarak hesaplanır (Priest vd., 2005).



Şekil 29. Asfalt kaplama tabakasına temas eden ağır taşıtın alt tabakalarda oluşturduğu gerilmeler (Priest vd., 2005)

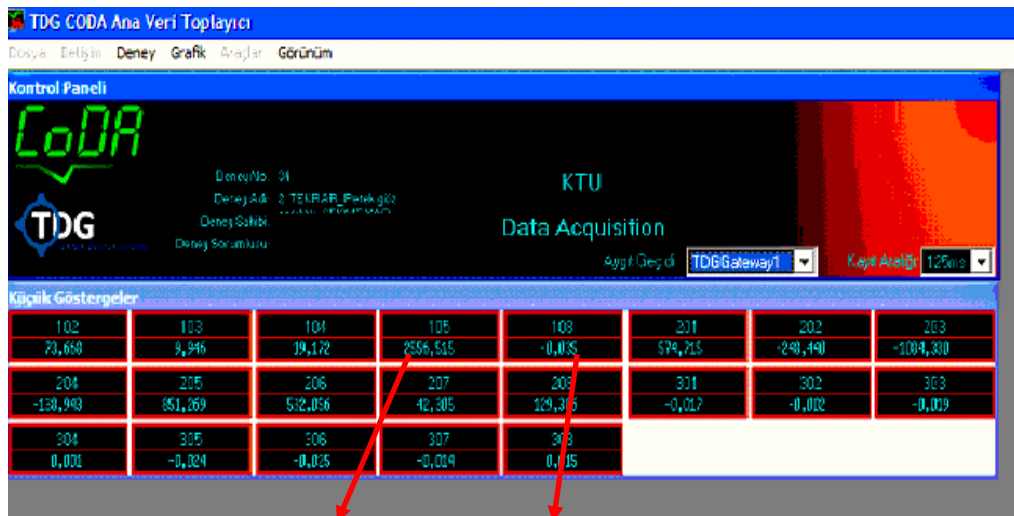
Şekil 29'da; temel tabakası üzerine gelen düşey basınç 42 kPa, alttemel tabakası üzerine gelen düşey basınç ise 33 kPa olarak belirtilmektedir.

Mulungye vd. (2007), tarafından yapılan arazi çalışmalarında ağır taşıtta tek tekerleğe gelen yükün 3100 kgf, orta dingile bağlı tek taraftaki çift tekerleğe gelen yükün 4500 kgf, tek tekerleğe gelen yükün ise $4500/2= 2250$ kgf olduğu belirlenmiştir. Tablo 7'de ise Mulungye vd. (2007)'nin çalışmasına göre tekerlek yüklerinin belirlendiği karayolu tabakalarına ait veriler yer almaktadır. Priest vd. (2005), alttemel tabakası üzerine gelen düşey yükü yaklaşık 35 kPa olarak belirlemiştir. Haddock vd. (2007), asfalt tabakasına gelen tekerlek yükünü belirlerken bir aksa (dingile) gelen toplam yükün 80 kN, aksın bir tarafında tekerlek başına gelen yükün ise yaklaşık 40 kN olduğunu belirlemişlerdir.

Tablo 7. Tabaka kalınlığı, elastisite modülü ve poisson oranı değerleri (Mulungye vd., 2007)

	Tabaka Kalınlıkları (cm)	Elastisite Modülleri (MPa)	Poisson Oranları
Asfalt Kaplama	5	2300	0.3
Temel Tabakası	20	55	0.35
Alttemel Tabakası	40	25	0.40

Bu tez çalışmasında düşey plaka 35 kPa basınç yapacak şekilde ayarlanmış ve tüm deneyler bu basınç altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 30'da ise 35 kPa düşey basınç uygulandığı kalibrasyon ekranı görülmektedir.



25 kN düşey yük Düşey yük etkisiyle oluşan 35 kPa basınç

Şekil 30. Yazılım programından bir ekran görüntüsü

2.4.1.3. Ölçüm Sensörleri ve Geogridin Yerleştirilmesi

Laboratuarda kurulu düzenekte deneye başlamadan önce ölçüm cihazları kutu içine yerleştirilerek her birinin düzenekteki konumu belirlenmiş ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonları kontrol edilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. (a) Pullout kutusunun ortası ve köşelerine sensörlerin yerleştirilmesi (Profilden görünüş) (b) Pullout kutusunun ortası ve köşelerine sensörlerin yerleştirilmesi (Üstten görünüş)

2.4.1.4. Pullout Test Kutusuna Yerleştirilen Ölçüm Cihazlarının Konumları

Pullout kutusu içine önce 30 cm taban zemini ve üzerine 20 cm alttemel malzemesi serilmiştir (Şekil 32). Sonra taban zemini ile alttemel arayüzüne kayma mukavemeti ve çekmeye karşı davranışları belirlenmeye çalışılan farklı göz açıklığına sahip geogridler yerleştirilmek suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Geogrid seviyesinin 7 cm altına 4 adet 5 cm çaplı basınç ölçer ve 4 adet birim şekil değiştirme ölçer; geogrid seviyesinin 7 cm üstüne de 4 adet 5 cm çaplı basınç ölçer ve orta kısımda 1 adet 20 cm çaplı basınç ölçer ile 4 adet birim şekil değiştirme ölçer olmak üzere toplam 9 adet basınç ölçer ve 8 adet birim şekil değiştirme ölçer yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Cihazların kutu içerisine yerleştirilmiş halleri Şekil 33'te görülmektedir.

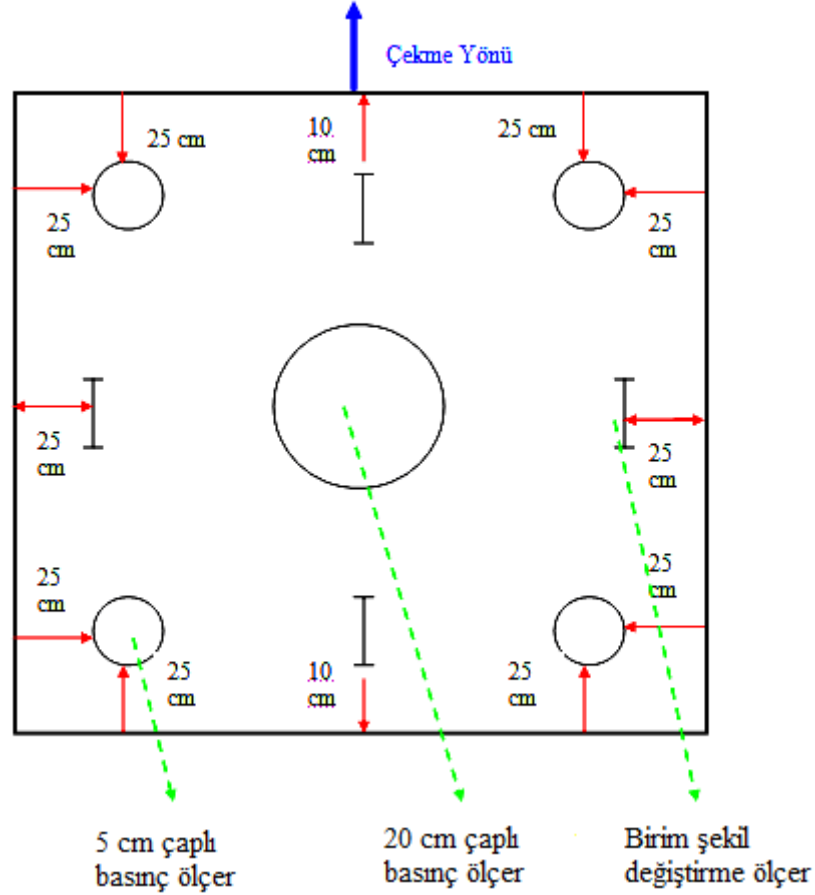
Geogrid seviyesinin 7 cm altına yani taban zemini içine yerleştirilen, basınç ölçerlerin sensör numaraları: 301, 302, 303 ve 304; birim şekil değiştirme ölçerlerin sensör numaraları ise 201, 202, 203 ve 204'tür.



Şekil 32. (a) Pullout test kutusunda serilen alttemel ve taban zemini malzemenin kalınlıkları

Geogrid seviyesinin 7 cm üstüne yani alttemel içine yerleştirilen, basınç ölçerlerin sensör numaraları: 305, 306, 307 ve 308; birim şekil değiştirme ölçerlerin sensör numaraları: 205, 206, 207 ve 208 olmak üzere üst üste 2 seviyeye sensörler yerleştirilmiştir. Ayrıca sadece geogrid seviyesinin üstündeki seviyeye mahsus olmak üzere kutunun en ortasına 20 cm çaplı büyük basınç ölçer yerleştirilmiştir.

Pullout kutusu içerisine serilen malzemeler her defasında sıkıştırma uygulanarak serilmiştir. Yani 30 cm taban zemini malzemesi ile 20 cm alttemel malzemesinden oluşan pullout kutusu içerisinde hazırlanan yol dolgu malzemesi 50 cm kalınlığına ulaşıncaya kadar düşey yükleme ünitesi ve piston yardımıyla düşey basınç uygulanarak her 10 cm'de sıkıştırılmıştır ve deneylere zeminin sıkıştırılmış halinde başlanmıştır. Unutulmaması gereken bir husus geogridin serilme seviyesinin her deney için sabit tutulduğudur. Farklı göz açıklıklarına sahip geogridler her deneyde 30 cm taban zemini ile 20 cm alttemel malzeme altına gelecek şekilde taban zemini-alttemel tabakaları arayüzüne yerleştirilmiştir.



Şekil 33. Ölçüm sensörlerinin yerleştirilme konumları

Geogrid serildikten ve üzerine gelen alttemel malzeme de serilip sıkıştırıldıktan sonra pullout deneyine başlarken henüz geogridin sıkışmış iki tabaka arasından çekilmesi gerçekleştirilmeden önce yükleme plakası ile düşey basınç uygulanmıştır. Bu basıncın miktarı 35 kPa (pullout kutusu boyutları için yaklaşık 25 kN) kadardır. Önceki bölümlerde deneylerde ne kadar düşey basınç altında çekme yapılması gerektiği anlatılırken arazide bir tekerlek başına gelen ortalama yükün de 25 kN olduğundan bahsedilmişti. Deney başlangıcında uygulanan yaklaşık 25 kN düşey yük altında oturmalar kaydedilmiştir. Oturmalar hesaplanırken yükleme ünitesini hareket ettiren düşey piston yanına monte edilmiş 100 cm ölçüm kapasiteli düşey LVDT kullanılmıştır.

2.4.1.5. Kalibrasyon Kontrolü

Deneylere başlamadan önce kullanılacak sensörlerin kalibrasyonu kontrol edilmiştir. Veri almaya başlamadan önce sensörler veri toplama kutusuna oradan da bilgisayara

bağlanmış en az 25 dk boyunca sensörler ortam ısısına (23°) uyum sağlayana kadar beklenmiştir. Yazılım sistemi voltaj olarak değer okumaktadır. Okunan bu voltaj değerleri, adım sayısı olarak kalibrasyon düzeltme ekranında yer alır. Okunan adım sayısı her bir sensörün ölçüm birimine (Basınç ölçer için kPa, birim şekil değiştirme ölçer için microstrain, yük hücresi için kgf, LVDT için cm gibi) dönüştürülmüştür. Her bir cihazın serbest okuduğu değer (üzerinde hiç yük yokken) ve maksimum okuyabileceği değer (en fazla yükleme altında) hesaplanarak ham ve kalibreli veri çiftleri atanmış ve sensörler deneye hazır hale getirilerek deneylere başlanmıştır.

2.4.2. Pullout Deneyi Esnasında Yapılan Çalışmalar

Yazılım programında kalibrasyonu yapılmış cihazlar deney için atanmış ve tüm cihazların deneye hazır olduğu kontrol edilerek deneye başlanmıştır. Deneyler 3 ana gruptan oluşmaktadır:

- Birinci grup deneyler, gerçek arazi koşullarında şev stabilite problemi olduğu durumu temsil edecek şekilde belli bir basınç altında geogride çekme yaptırmak suretiyle yapılmıştır (Şekil 34). 25 kN düşey kuvvet uygulanarak oluşan yaklaşık 35 kPa sabit basınç altında geogride bağlı pistonu çekme yaptırılmıştır. Çekme kuvveti belli bir değere kadar artırıldıktan sonra geogrid kopmaya başladığı anda azaldığı belirlenmiştir. Maksimum çekme kuvveti elde edildikten sonra deneye son verilmiştir. Yük hücresi (loadcell), potansiyometrik cetvel (LVDT), birim şekil değiştirme ölçer (strain gage) ve basınç ölçer (pressure cell)'lerden alınan okuma değerleri veri aktarma yoluyla kaydedilmiştir.

- İkinci grup deneylerde, gerçek arazi koşullarında şev stabilite problemi olmadığı durumu temsil edecek şekilde uygulanmıştır. Burada geogride çekme yaptırmaksızın sadece belli bir düşey yük altında yük hücresi, potansiyometrik cetvel, birim şekil değiştirme ölçer ve basınç ölçerlerden alınan okuma değerleri kaydedilmiştir.

- Kontrol deneylerinde ise geogrid kullanmadan sadece sensörler kutu içine yerleştirilerek 1. ve 2. grup deneylerden (geogride çekme yaptırılan ve yaptırılmayan) elde edilen veriler bu gruptakilerle kıyaslanmıştır. Amaç, geogrid donatılı zeminin şev stabilite

problemi olan ve olmayan zeminlerdeki performansını araştırmak ve her defasında farklı bir göz açıklığı kullanarak hangisinin her durumda iyi sonuç vereceğini belirlemektir.

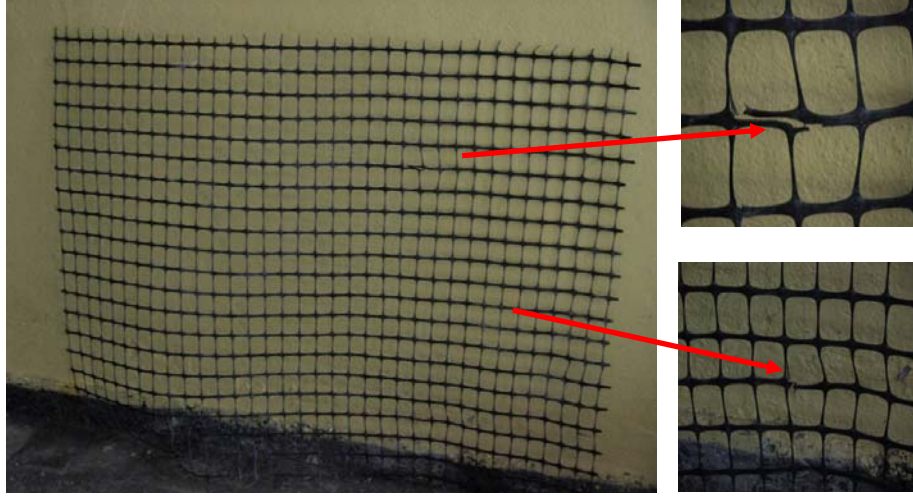


Şekil 34. Deney esnasında sıkıştırılmış malzeme arasındaki geogride çekme kuvveti uygulanması

2.4.3. Pullout Deneyi Sonrası Yapılan Çalışmalar

Geogrid pullout kutusu dışında yırtılmaya başlamasıyla mukavemetini giderek kaybetmiştir ve bilgisayarda okunan çekme kuvveti değerinde düşme gözlenmiştir. Çekme kuvvetinin maksimum bir değerden sonra düşmeye başlamasıyla malzemenin koparak mukavemetini kaybettiği görülmüş ve bu andan itibaren deneye son verilmiştir. Şekil 35'te deney sonrası sıkıştırılmış zemin içinde kalan kısımda gözlemlenen yırtılmaların olduğu geogrid numune görülmektedir. Geogridin agrega ile kenetlendiği kısımlarda yırtılmalar meydana gelmiştir.

Deneyin tamamlanmasıyla veri toplama sisteminden bilgisayara aktarılan veriler kaydedilmiştir. Pullout kutusunun arka tarafında kalan çelik profillerden birkaçı açılarak deney sonrası agrega malzeme boşaltılmış ve çekme etkisiyle deformasyona uğramış geogrid numune çıkarılmıştır.



Şekil 35. Geogridin deney sonrası görüntüsü

2.4.4. Prexiglass Pencereleler ve Dijital Görüntüleme Tekniği ile Deplasmanların Belirlenmesi

Mevcut pullout testleri kapalı kutu gibi çalışmaktadır yani geogrid ile geogridi çevreleyen agrega arasındaki etkileşimin nasıl olduğu hakkında detaylı bilgi vermektan yoksundurlar. Sadece normal basınç altında, geogridlerin ortalama kayma mukavemetleri hakkında bilgi verirler. Pullout test sonuçlarını en çok etkileyen parametrelerden biri, agrega çapları ile geogridin göz açıklıklarının uyumudur. Bu amaçla çalışmada özel olarak tasarlanan pullout test aleti kullanılmıştır. Laboratuardaki düzeneğin diğer pullout testlerinden farkı, test cihazının kenarlarındaki profillerde saydam prexiglass'dan yapılmış pencereler bulunması ve bu pencereler yardımıyla agrega ile geogrid arasındaki etkileşimlerin üç boyutlu olarak dijital görüntü tekniği ile bilgisayar ortamında incelenebiliyor olmasıdır. Bu sayede kutu içerisindeki sensör okumalarına ek olarak pencereden de geogridin hareketi izlenmiş olmaktadır. Literatürde bu konuda herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Şekil 36'da prexiglass pencerelerden birine ait ekran görüntüsü yer almaktadır. Görüntü tekniğinin bu tez çalışmasında kullanılmasının en büyük avantajlarından biri geogridin tamamında olmayıp belli bir kısmında meydana gelen deformasyonların belirlenebilmesidir.



Şekil 36. Prexiglass pencereden alınan görüntü

Literatürde geogridlerin dolgularda kullanılması ile ilgili sonlu eleman çalışmaları mevcuttur. Fakat bu çalışmalarda, geogridin bir bütün donatı olarak çalıştığı varsayımı, arazideki çalışmalarla çelişmektedir. Kayma gerilmelerine dayalı geogrid kopmaları geogridin hepsinde olmayıp belli başlı kısımlarında oluşmaktadır.

Çalışmada deplasmanlar iki şekilde ölçülmüştür. Birinci yöntemde, prexiglass pencerelerden görüntü alarak ve bu görüntülerde geogridin belirli noktaları deney başında ve deney sonunda işaretlenerek iki resim arası kıyaslama yapılmak suretiyle deplasmanlar ölçülmüştür. İkinci yöntemde ise pullout kutusu içine yerleştirilen birim şekil değiştirme ölçerin deneyde çekme boyunca okuduğu veriler kaydedilerek deplasmanlar belirlenmiştir.

2.4.5. Görüntü İşleme Tekniği

Bu çalışmada görüntü işleme tekniğinin kullanılmasında:

- ❖ Geogridin uzama ve kopma durumlarını belirlemek,
- ❖ Agregaların boyutlarını ve zamanla yer değişimlerini otomatik olarak belirlemek amaçlanmıştır.

Bu çalışmalar konusunda Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden pullout deney düzeneğindeki cam pencerelerden agregaların ve geogrid malzemenin gerçek zamanda izlenmesi konularında yardım alınmıştır. Geogrid malzemenin küçük yer değişimlerini ve agregaların hareketinin net bilgisini elde edebilmek için pencereye yakın bir yere video sabitlenmiştir. Pullout deneyinin başlatılmasıyla eş zamanlı olarak videodan görüntü kaydına başlanmıştır. Deney boyu video kayıta tutulmuş deneyin bitirilmesiyle video kaydına son verilmiştir.

2.4.5.1. Kameradan Görüntülerin Elde Edilmesi

Kameradan alınan görüntüler USB port, bellek kartı veya tv kartı ile bilgisayara aktarılabilir. Bunun için yazılmış olan Windows API'lerini kullanan bir program ile saniyede alınan imge çerçevesi sayısı esnek hale getirilmiştir. Bunun sebebi pullout deney düzeneği ile yapılan testlerin milisaniye düzeyinde hızlı değişim göstermemesidir. Dolayısıyla bir veya birkaç saniyede bir imge çerçevesi almak yeterli olmaktadır. Geogrid ve agregaların belirlenip izlenmesi uygulamaları ilk aşamada ayrı ayrı yapıp doğruluğu test edildikten sonra otomatik uygulama için birleştirilmiştir.

2.4.5.2. Geogridin Belirlenmesi

Geogridlerin ince ve siyah olmaları nedeniyle agregaların arasında kaybolma riskleri yüksektir. Deney esnasında geogrid önüne agregalar gelebilmektedir. Amaç geogridin uzama ve kopmasını incelemek olduğu için geogridin düğüm noktalarını net olarak belirlemek gerekmektedir. Geogrid düğüm noktalarını kolay algoritmalarla ve doğru olarak belirleyebilmek, deney esnasında geogridin görünmeyen noktalarını sezgisel yaklaşımlarla tahmin edebilmek önemlidir. Bu düşünceler ışığında geogrid düğüm noktaları boyanmıştır (Şekil 37). Geogridin boylam elemanları ile düğüm noktaları farklı renklerde boyanmaya çalışılmıştır.



Şekil 37. Geogridin boyalı düğüm noktalarının görüntüsü

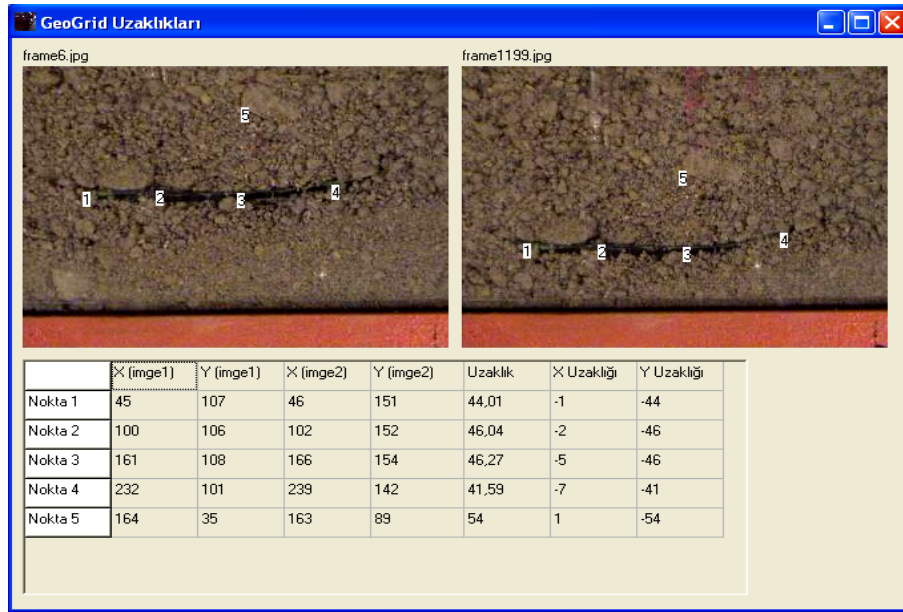
Geogridlerin boyanmasında kullanılan boya geogridin çekme etkisiyle hareketliliğini gösteren bir bilgi vermektedir. Bunun yanında konum ve şekil bilgisi de yardımcı birer bilgidir. Eğer boyanan renk, istenen bölgede ise ve birleşimleri doğrusal bir yapı veriyorsa geogride dahil noktalardır. Bu doğru üstündeki ilgili renkler düğüm noktalarını diğer renkler de düğüm aralarını vermektedir.

2.4.5.3. Geogrid Uzaması ve Agregaların Yer Değişimi

Görüntü tekniği için agregaların alanlarının belirlenmesi işlemi önemli bir adımdır. Ancak çalışmada kullanılan agregalar farklı boyutlardadır. Dolayısıyla alttemel ve taban zemininde iri agrega granülometrisinde malzemeler yanında filler agrega gibi ince partiküllü malzemeler de bulunmaktadır. Bu malzemeler ile test yaparken, geogridin önüne iri boyutlu agregalar gelmekte ve geogridin görünüş açısını kesmektedir. Yani görüntü tekniği ile geogridin ve agregaların otomatik olarak algılanıp, nokta seçimi yapılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle manuel nokta seçimi yapılabilecek bir çalışma geliştirilmiştir.

Pullout deney düzeneği önüne yerleştirilen kamera ile alınan video kaydı deney sonunda resimlere dönüştürülmüştür. Daha sonra resimler üzerinde noktalar seçilmiş, geogridin uzaması, yer değiştirmesi ve hareketleri hesaplanmıştır.

Şekil 38’de, görüntü tekniği ile geogrid hareketliliğinin izlendiği program çıktısı görülmektedir.



Şekil 38. Program çıktısı 1

Soldaki resim pullout deneyinin başından (ilk saniyelerde) sağdaki resim ise deneyin sonundan alınmıştır. Buradaki amaç deney boyunca pullout kutusu içindeki geogrid ve

agregaların hareketliliğini izleyebilmektir. Böylece sensörlerden alınan ölçüm değerlerinin yanı sıra görüntü yöntemiyle de deplasman ve oturmalar gözlemlenmiştir.

Şekil 38’de görülen deney başı ve sonuna ait iki görüntü arasında kıyaslama yapılmıştır. Soldaki görüntü üzerinde referans noktaları seçilmiş, sağdaki resim yüklenmiş ve referans noktalarına karşılık gelen noktalar tekrar seçilmiştir. Sonra iki imge arasındaki ilgili uzaklıklar piksel tabanlı olarak hesaplanmıştır.

Tabloda verilen değerler:

X(imgex) : x imgesinde X yönündeki koordinat noktası

Y(imgex) : x imgesinde Y yönündeki koordinat noktası

Uzaklık : Referans imgesindeki nokta ile yüklenen 2. imgedeki aynı noktanın

değişme miktarıdır, uzaklık, $uzaklik = \sqrt{(n_{1x} - n_{2x})^2 + (n_{1y} - n_{2y})^2}$ şeklinde hesaplanır.

X uzaklığı : referans imgesindeki nokta ile, yüklenen imgedeki ilgili nokta arasındaki x yönündeki uzaklıktır. X Uzaklığı $|n_{1x} - n_{2x}|$ şeklindedir.

Y uzaklığı : referans imgesindeki nokta ile, yüklenen imgedeki ilgili nokta arasındaki y yönündeki uzaklıktır. Y Uzaklığı $|n_{1y} - n_{2y}|$ şeklindedir.



Şekil 39. Program çıktısı 2

Şekil 39’da, Şekil 38’de verilen uzaklık bilgilerinin cm cinsinden hesaplanmış hali verilmektedir. Şekil 39, imge 1’deki *co* ve *c1* noktaları arasındaki mesafe dışarıdan girilen

cm cinsinden değer olmalıdır. Eğer hesaplanan değerler cm cinsinden isteniyorsa yüklenecek imgeler de cm olmalıdır.

2.5. Arazi alışmaları

Arazi çalışmalarında tabakalar arasına geogrid serilmesi mümkün olmadığından geogridsiz bir şekilde sadece sensörlerden veri okumaları yapılmıştır. Böylece pullout testlerinin bir aşaması olarak gerçekleştirilen geogrid kullanmadan tabakalar arasında farklı derinliklerde düşey basınçların nasıl değiştiği arazide gözlemlenmiştir.

2.5.1. Arazi Tekerlek Basınçlarının Kaydedilmesi

2.5.1.1. Arazi Güzergahının Belirlemesi

Arazi alışmaları için Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü tarafından gösterilen güzergah kullanılmıştır. Trabzon-Rize Devlet Sahil Yolu üzerinde 67+970 km'de Arsin İlçe girişinde deniz tarafında yapımı devam eden park etme ve duraklama için ayrılmış olan cep güzergah olarak seçilmiştir (şekil 40).

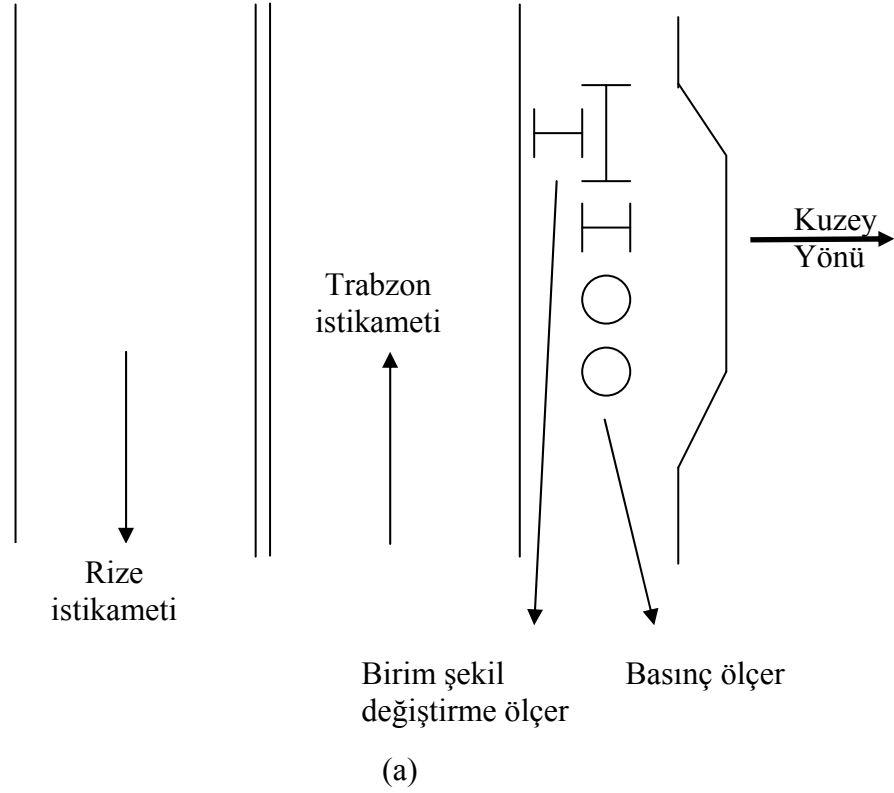


şekil 40. lm alınan karayolu güzergahı

2.5.1.2. Arazide lm Sensörlerinin Yerleştirilmesi

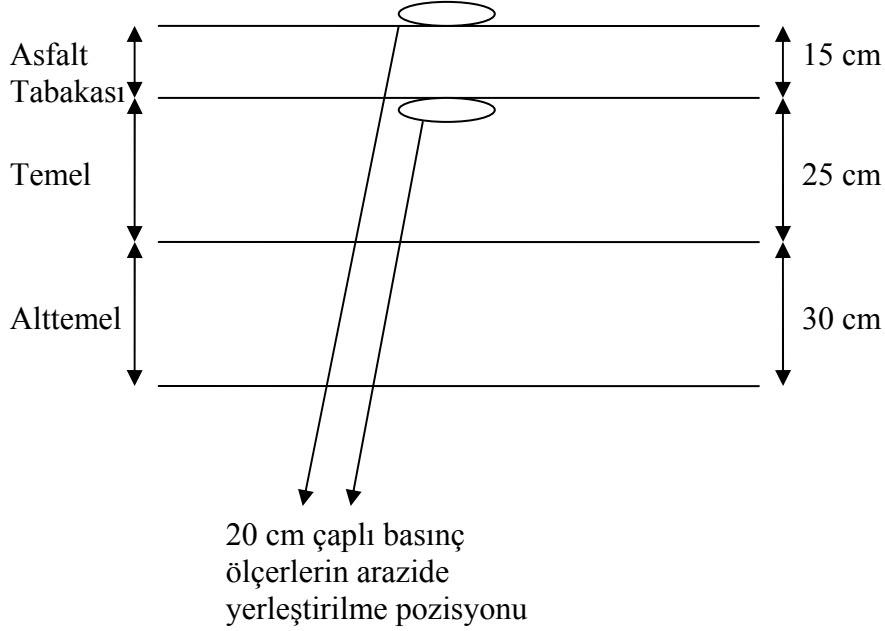
Belirlenen güzergahta 2 adet basınç ölçer ve 2 adette birim şekil değiştirme ölçer olmak üzere toplam 4 adet ölçüm sensörü asfalt tabakasının altına gelecek şekilde

sıkıştırılmış temel tabakasının hemen üzerine yerleştirilmiştir. Basınç ölçerlerin birisi 20 cm, diğeri 5 cm çaplı olarak seçilmiştir (Şekil 41). Birim şekil değıştirme ölçerlerin ise birisi yol güzergahına paralel yani tekerlek altında boylam birim şekil değıştirmeyi ölçecek şekilde, diğeri ise yol güzergahına dik yani yatay yöndeki birim şekil değıştirmeleri ölçecek şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 41. (a) Sensörlerin yola yerleşim planı, (b) Sensörlerin araziye yerleştirilmiş hali

Şekil 41 b’de sıkıştırılmış temel tabakası üzerine serilmiş sensörler görülmektedir. Üzerlerine asfalt dökülüp sıkıştırılarak Şekil 40’daki halini almıştır. 20 cm çaplı büyük basınç ölçerden bir tanesi simetrik olarak asfalt tabakası altında gömülü olanın tam üzerine gelecek şekilde asfalt tabakası üzerine yüzeye yerleştirilmiştir (Şekil 42). Şekil 42’de asfalt tabakası altında ve üstündeki basınç sensörlerinin konumu kesitten görülmektedir.



Şekil 42. Basınç ölçerlerin arazide yerleştirilmesi

2.5.1.3. Asfalt Kaplama Tabakası Alt ve Üst Seviyesinden Alınan Veri Okumaları

Sensörlerin yerleştirilmesi tamamlandıktan sonra üzerleri asfalt tabakasıyla kapatılmış ve yol trafiğe açılmıştır. Sensörlerin bilgisayara bağlantıyı sağlayan kablo başlıkları yolun kenarında kalacak şekilde dışarıda bırakılmıştır. Veri toplama ünitesi ve verileri kaydeden bilgisayar yol kenarına kurulmuş ve trafik akışı sensörlerin bulunduğu güzergaha yönlendirilmiştir (Şekil 43). Özellikle yüklü kamyon, tır gibi ağır taşıtlar seçilmiştir.

Ölçüm sensörlerinden birim şekil değiştirme ölçerler sağlıklı veri kaydedememiştir. Birim şekil değiştirme cihazlarında meydana gelen bozukluktan ötürü arazi ölçümlerinde sadece basınç ölçerlerden alınan değerler kaydedilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 43. Ağır taşıtın kaplamaya uyguladığı basıncın belirlenmesi ve verilerin kaydedilmesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

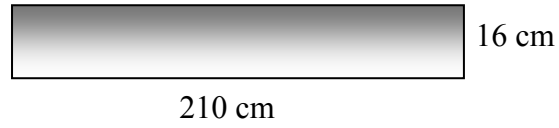
Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen bu çalışmada farklı göz açıklıklarındaki geogridler pullout testlerine tabi tutulmuş, deneyler ve gözlemler yapıldıktan sonra sonuçlar bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlardan ve bu sonuçların birbirleriyle ilişkilerinden kıyaslamalı olarak söz edilmektedir.

3.1. Arazide Alttemel Tabakasının Sıkıştırma Basıncının Belirlenmesine Ait Bulgular ve Tartışmalar

Arazide alttemel tabakasına yerleştirilen sensörler yardımıyla tabakanın sıkıştırılmasını sağlayan silindirin ne kadar basınçla zemini sıkıştırdığı hesaplanmıştır (Şekil 44). Buna göre, hesaplanarak bulunan silindir basıncı:

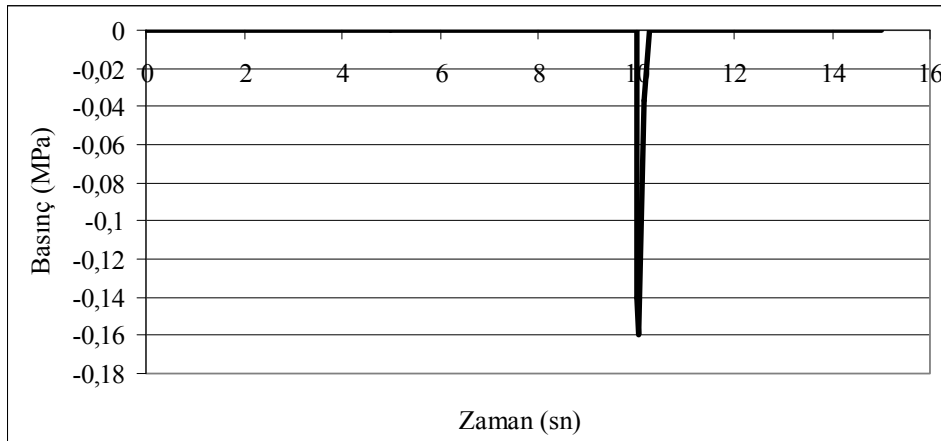
Silindir tambur yükü= Yaklaşık 50 kN'dur.

Silindirin zemine temas alanı=



$P = 50 / (0.16 \times 2.1) = 148 \text{ kPa}$ 'dır.

Arazi Ölçümü ile Bulunan Maksimum Silindir Basıncı= $0.154 \text{ MPa} = 154 \text{ kPa}$ 'dır.



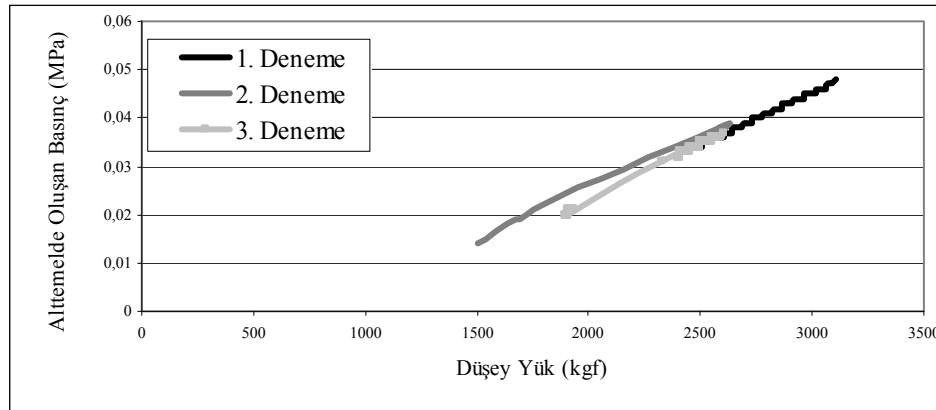
Şekil 44. Silindirin geçtiği andaki basınç-zaman değişimi

Şekil 44'te zemine gömülü basınç ölçer üzerinden geçen silindirin tam geçme anında zeminde oluşturduğu basınç değeri yaklaşık 154 kPa olarak ölçülmüştür. 20 sn'lik zaman süresinde silindirin tam olarak basınç ölçer üzerinden geçme anı 10. saniyededir ve basınç değeri de tam bu anda kaydedilmiştir.

Arazide alttemel tabakası serilirken sıkıştırma silindirinin ne kadar düşey basınç uyguladığının bilinmesi laboratuvar deneyleri için önemlidir. Çünkü, arazide uygulanan bu düşey basınç miktarı laboratuvar deneylerinde de gerçeği yansıtması bakımından aynen uygulanmıştır. Yani arazi uygulamalarında yol alttemeli 154 kPa basınçla sıkıştırılmış olduğundan laboratuvar deneylerinde de taban zemini malzemesi pullout kutusuna serilip 150 kPa civarı basınç uygulanarak sıkıştırma yapılmıştır. Geogrid serilip üzerine alttemel malzemesi yerleştirilip yaklaşık olarak bu basınç değerinin uygulanması ile sıkıştırma yapılmış ve literatüre göre belirlenen ağır taşıt tekerlek yükü uygulanarak pullout deneylerine başlanmıştır.

3.2. Pullout Deneylerinde Tatbik Edilen Düşey Yükün Belirlenmesi ile İlgili Bulgular ve Tartışmalar

Bu tez çalışmasında da pullout kutusuna 30 cm taban zemini malzeme, üzerine de 20 cm alttemel malzeme serilmiştir. Alttemelin yüzeyinden 7 cm aşağıya yerleştirilen basınç sensörü ile literatürle ve hesaplanarak bulunan 35 kPa basıncın hangi yükte elde edildiği belirlenmiştir. Sonuçta 25 kN düşey yükün 35 kPa basınç oluşturduğu tespit edilmiştir (Şekil 45) ve deneylerde alttemele gelen düşey yük her zaman 25 kN olarak uygulanmıştır. Tablo 8'de araziden kaydedilmiş olan veriler ve ağır taşıtın oluşturduğu basınç değerleri görülmektedir.

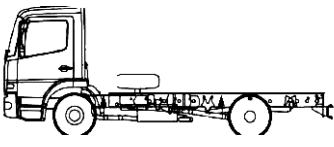


Şekil 45. Alttemel basıncı- tekerlek yükü ilişkisi

Bu basınç değerleri asfalt tabakası altı ve üstünden kaydedilen basınçlar olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. 1 No'lu aks ön, 2 No'lu aks orta ve 3 No'lu aks ise arka aksı göstermektedir. Tablo 8 incelendiğinde görülmektedir ki; ön aks aracın yola en fazla basınç uyguladığı akstır. Bir aracın tüm akslarının yol yüzeyine uyguladığı basınçlar yaklaşık yakın değerlerdedir. Farklı tekerlek genişliklerinin uygulanan basınçtaki etkisini araştırmak için bu konuda literatür araştırması yapılmıştır.


Tablo 8. Herbir kamyonun temas eden tüm dingilleri için tabaka basınçları

	Aks (Dingil) Numarası		
	1	2	3
Asfalt kaplama tabakası altı basıncı (kPa)	142	121	96
Asfalt kaplama tabakası üstü basıncı (kPa)	678	603	663
Tekerlek temas alanı boyutları (axb)	26.5x22	26.5x 23	25x 21



b (tekerlek temas uzunluğu)

a (lastik genişliği)



Asfalt tabakası altından ve üstünden alınmış olan veriler kıyaslandığında aşağıda verilen durumlarla karşılaşmıştır:

- Asfalt tabakası üstündeki yani yüzeydeki basınç değerinin asfalt tabakası altındaki basınç değerinden çok fazla olduğu görülmektedir. Asfalt tabakası altında basınç değeri ortalama olarak 100 kPa iken asfalt tabakası üstünde bu değer 500-700 kPa arası değişmektedir. Bu da yaklaşık 5-7 katı kadardır. Yani asfalt tabakasına temas eden tekerlek basıncı alt tabakalara azaltılarak aktarılır.

- Temel tabakasına gelen basınç değeri yaklaşık olarak 100 kPa ölçülmüştür. Temel tabakası altına sensör yerleştirme imkanı olmadığından arazi ölçümlerinden alttemel

tabakası üzerine gelen basınç değerleri belirlenememiştir. Ancak arazi ölçümleri ile hesaplanan temel tabakasındaki düşey basınç değeri literatürle örtüşmektedir. Temel tabakası üzerindeki gerilmenin yayılarak aktarılmasına bağlı olarak temel tabakası altında yani alttemel tabakası üzerindeki gerilme değeri de biraz düşük olacaktır. Zaten literatürde de alttemel üzerine gelen basınç değeri yaklaşık 35-40 kPa olarak verilmektedir. Buradaki arazi çalışmasında da temel tabakası üzerine 100 kPa olarak gelen basınç değerinin alttemele ortalama olarak 30-40 kPa olarak aktarılması beklenir. Bu durumda literatür verileri arazi çalışmalarını desteklemektedir.

Tekerlek temas alanlarının etkisi konusunda Priest vd. (2005), yapmış oldukları çalışmada farklı genişliklerde iki lastik türünün yapmış olduğu gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeleri hesaplamışlardır. Kullanılan lastik genişlikleri şöyledir:

- ❖ Geniş tabanlı lastik tipi, 44,5 cm genişlik- Ticari ismi 445/50R 22,5 Şekil 46-a.
- ❖ Standart tip, 22.2 cm genişlik- Ticari ismi 275/80R 22,5 Şekil 46-b.



(a) (b)
Şekil 46. Farklı genişliklerde lastikler (Priest vd., 2005)

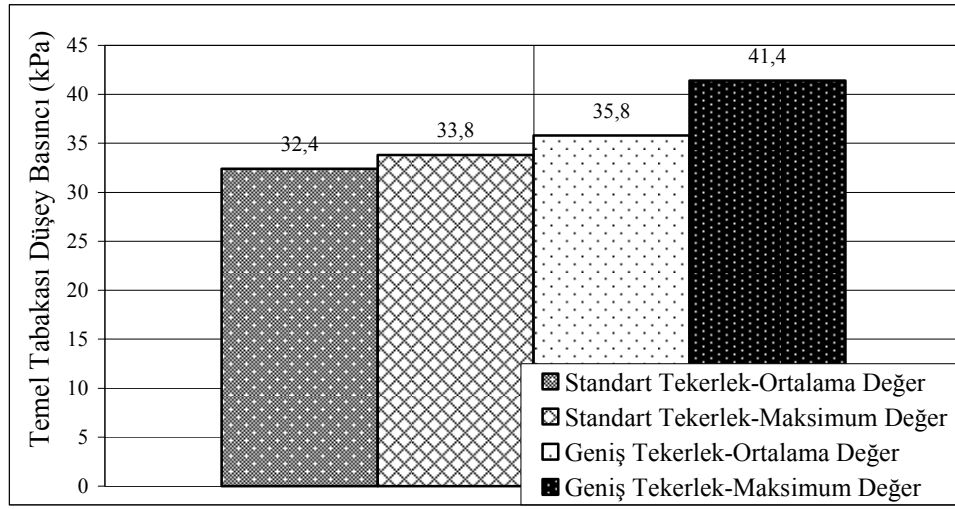
Yine aynı çalışmada (Priest vd., 2005) tarafından test yolu inşa edilmiş ve her iki lastik türüne sahip araçların test yolundan geçişi sağlanmak suretiyle veriler kaydedilmiştir. Yol altına basınç ölçer ve birim şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmek suretiyle ölçümler alınmıştır.

Birim şekil değiştirme ölçerler asfalt tabakasının altına yerleştirilmiştir. Basınç ölçerler ise asfalt tabakasının altı yani temel tabakası üstü ile temel tabakasının altı yani taban zemininin üzerine yerleştirilmiştir. Priest vd.'nin (2005), çalışması teorik ve deneysel olarak 2 kısma ayrılabilir. Teorik olarak hesaplanan grafik Şekil 48'de yer almaktadır.

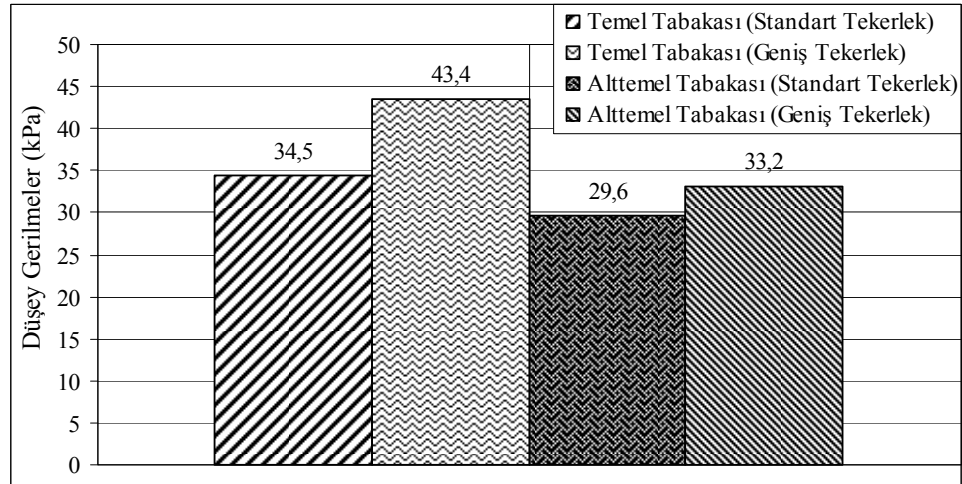
Hesaplanan değerler incelendiğinde görülmektedir ki; hem asfalt tabakası altında oluşan birim şekil değiştirme ve hem de temel ile taban zemini tabakalarının üstünde oluşan gerilme değerlerine bakıldığında geniş tekerlek tipinin yaptığı basınçlar standart

(dar) tekerlek tipinin yaptığı basınçlardan daha yüksektir. Priest vd. (2005), çalışmasında arazi kısmı olarak sensörlerden elde edilen grafikler ise aşağıda görülmektedir.

Priest vd., (2005) çalışmalarında arazi ölçümleri grafikleri kıyaslandığı zaman (Şekil 47-a ve 47-b, Şekil 48) her iki tekerlek tipinde benzer gerilme sonuçlarının çıktığı görülmektedir. Çok fazla bir farklılık olmamakla beraber temel ve taban zemini üzerine gelen gerilmelerde geniş lastik kullanıldığı zaman % 2.8'lik artış meydana gelmektedir. Tekerlek genişliğinin yanı sıra lastik basıncı ve şişme basıncı gibi hususlarda tabakalardaki gerilme basınçları konusunda önemlidir.

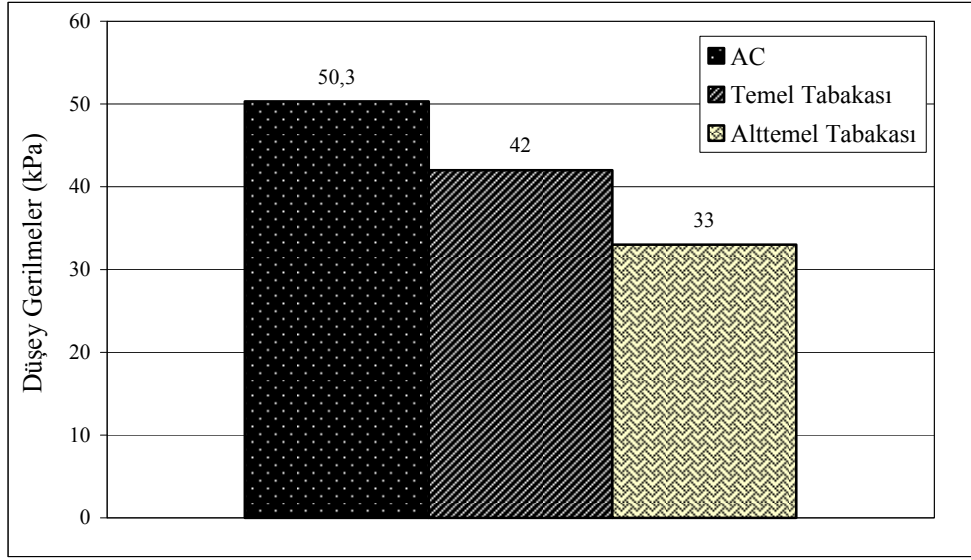


(a)



(b)

Şekil 47. (a) Arazi ölçümlerine göre temel tabakasında düşey basınç dağılışı (Priest vd., 2005), (b) Arazi ölçümlerine göre taban zemininde düşey basınç dağılışı (Priest vd., 2005)

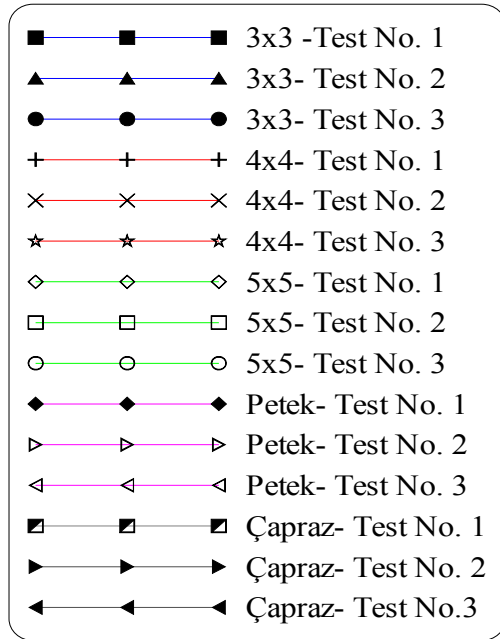
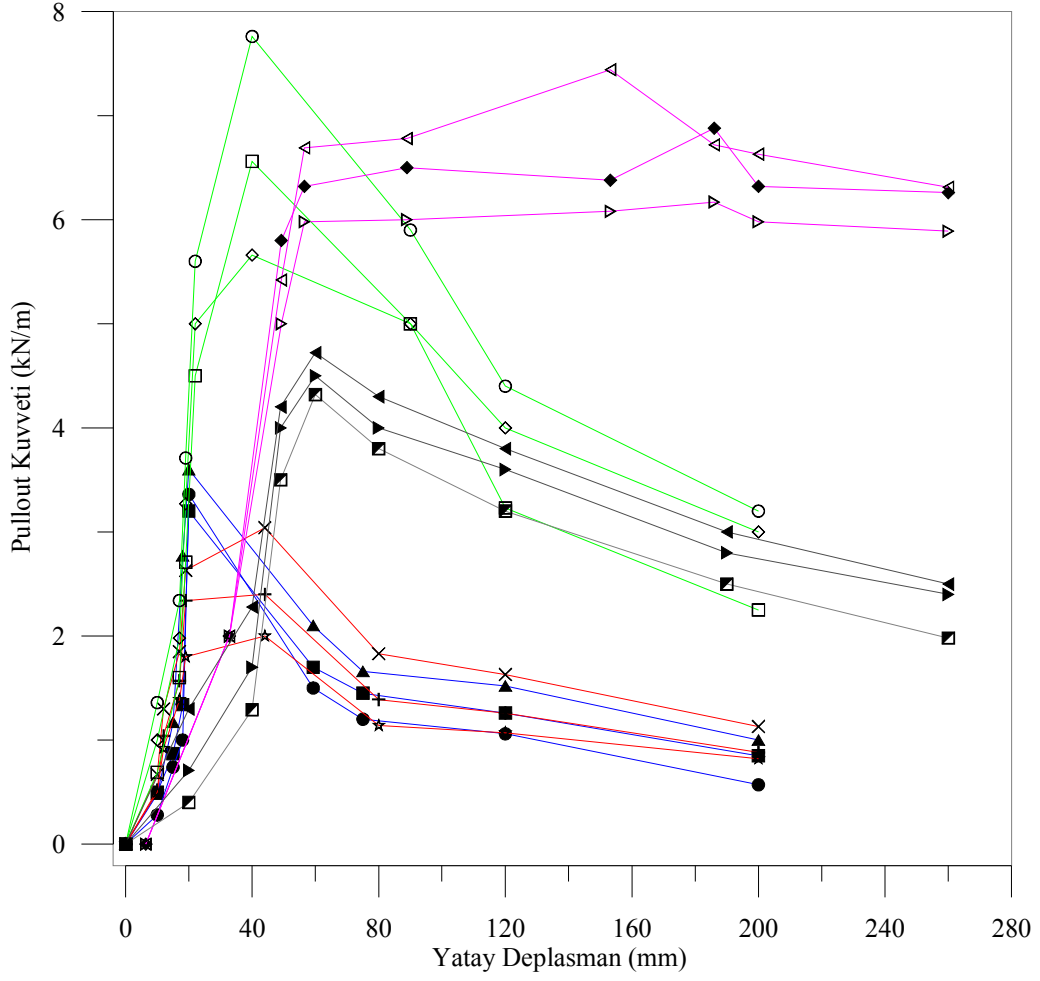


Şekil 48. Temel ve taban zemini (subgrade) tabakalarında oluşan düşey basınç değerleri (Priest vd., 2005)

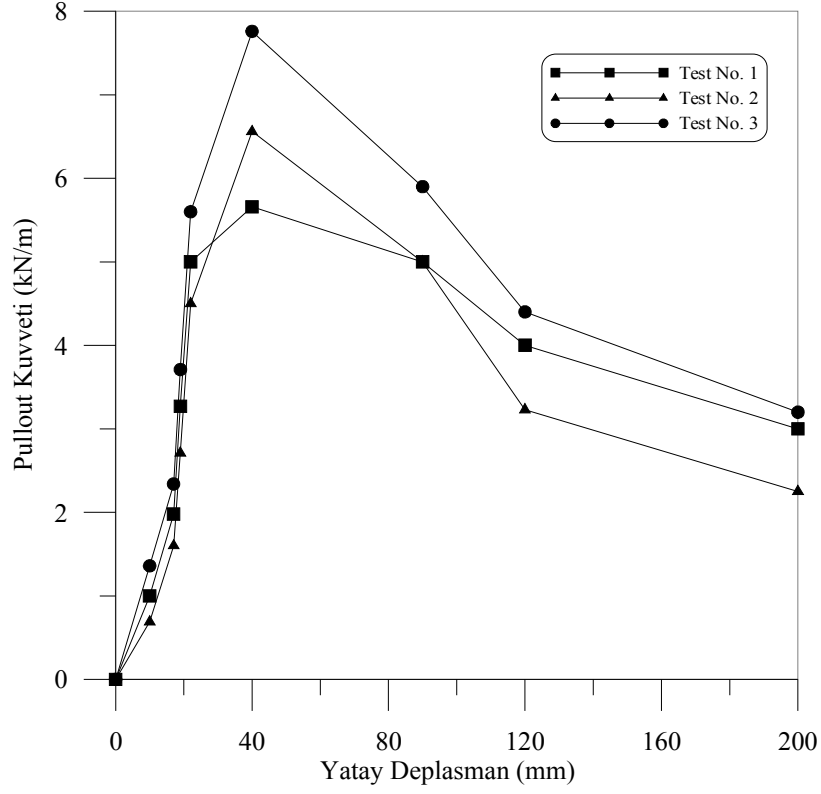
3.3. Pullout Kuvveti-Yatay Deplasman Değişimine Ait Bulgular

Bu çalışmada yapılan tüm deneylere ait pullout kuvveti-yatay deplasman değişimleri Şekil 49'da bir arada görülmektedir. Şekil 50-54'te ise her bir farklı göz açıklığına sahip geogrid türü için ayrı ayrı yapılmış 3'er adet deney kendi içerisinde kıyaslanarak grafikler çizilmiştir.

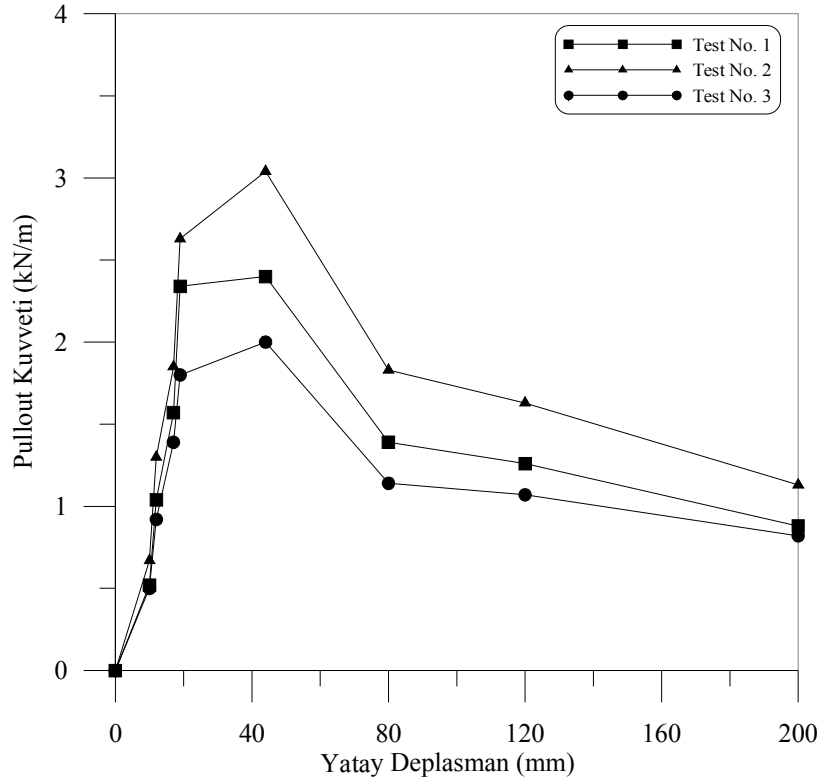
Deneysel yapılarırken geogridlerin kopmaya başladıkları anda deneylere son verilmiştir. Burada grafiklerdeki maksimum noktalar geogridlerin tamamen koparak mukavemetlerini kaybetmeye başladıkları andaki yük değerleridir. Şekil 49'da 5 farklı göz açıklığı ile yapılan deneyler 5 farklı renkle gösterilmiştir. Petek göz açıklıklı geogrid ile 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogridler ortalama olarak maksimum 7 kN/m kuvvette koparken, çapraz göz açıklıklı geogrid ortalama 4,5 kN/m, 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid ile 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridler ise 2,5-3,5 kN/m civarında bir yük değerinde kopmaktadır.



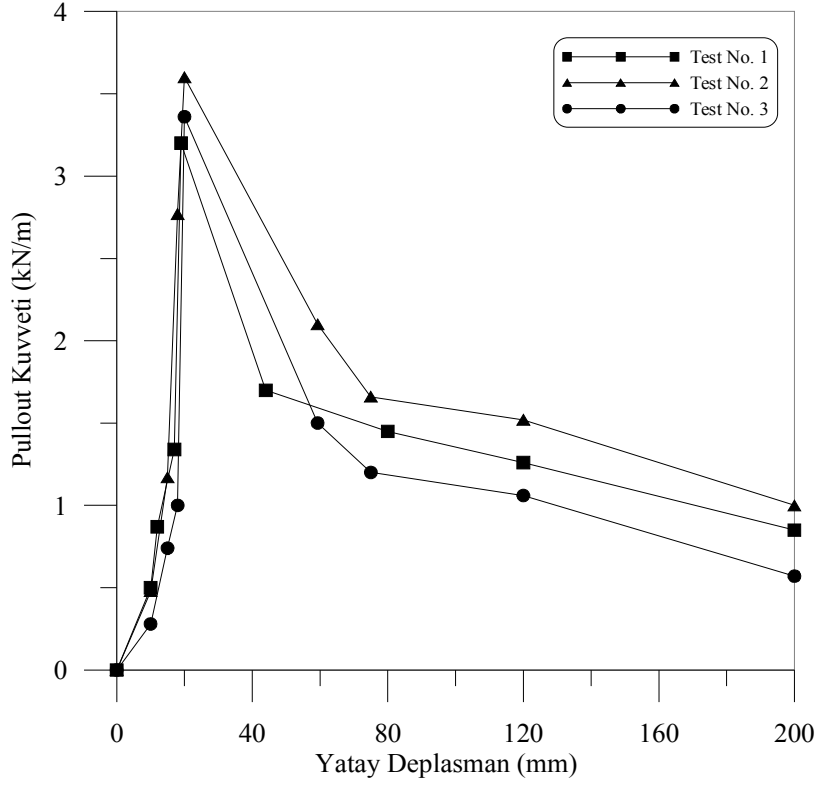
Şekil 49. Pullout Kuvveti-Yatay Deplasman Grafiği



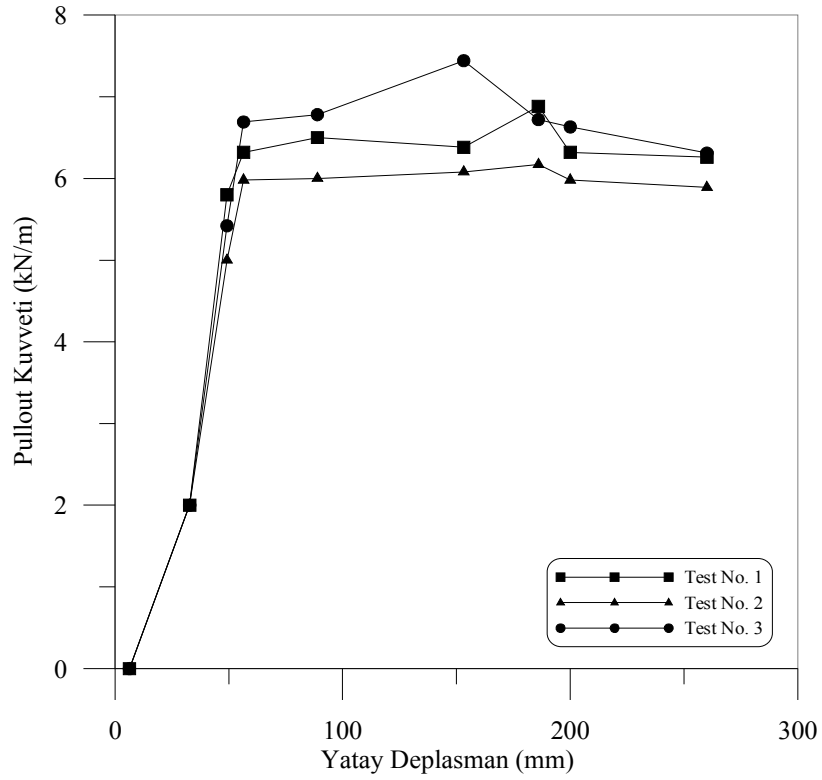
Şekil 50. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği



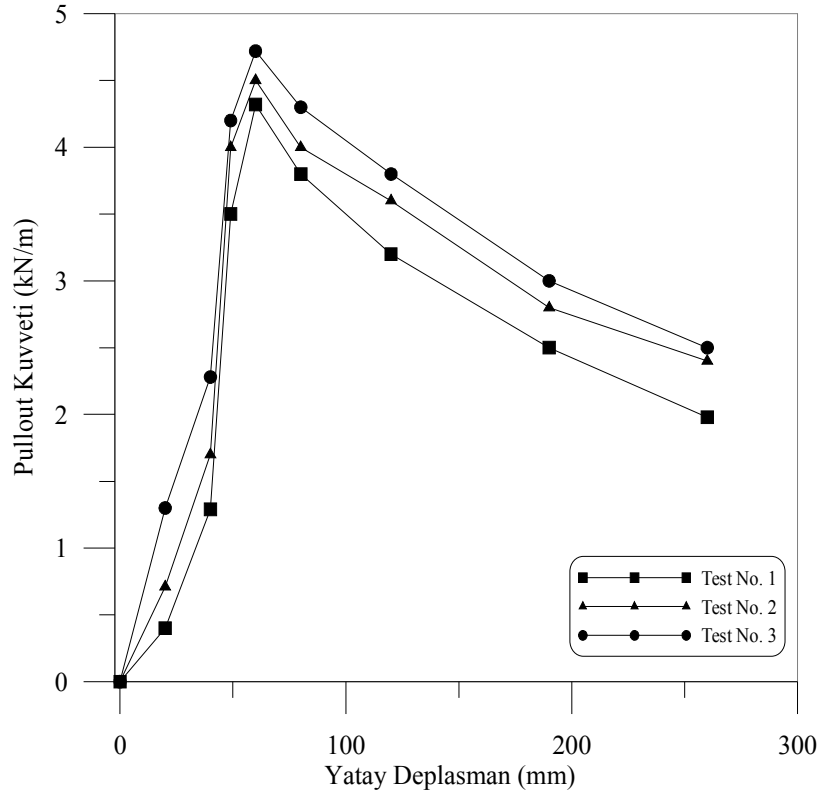
Şekil 51. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği



Şekil 52. 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği



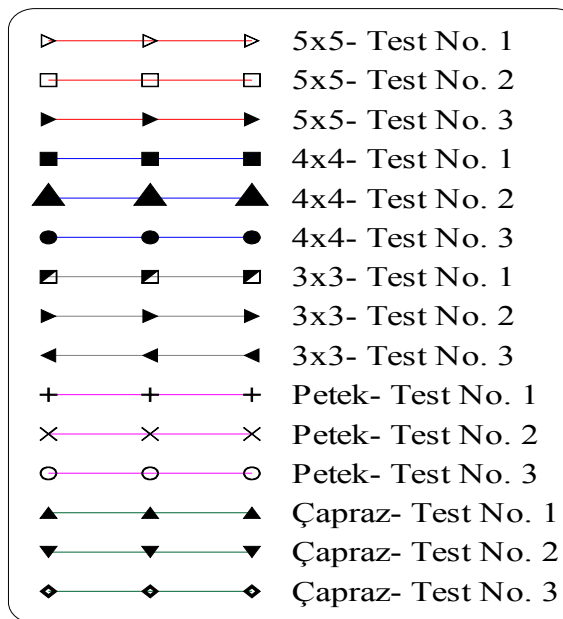
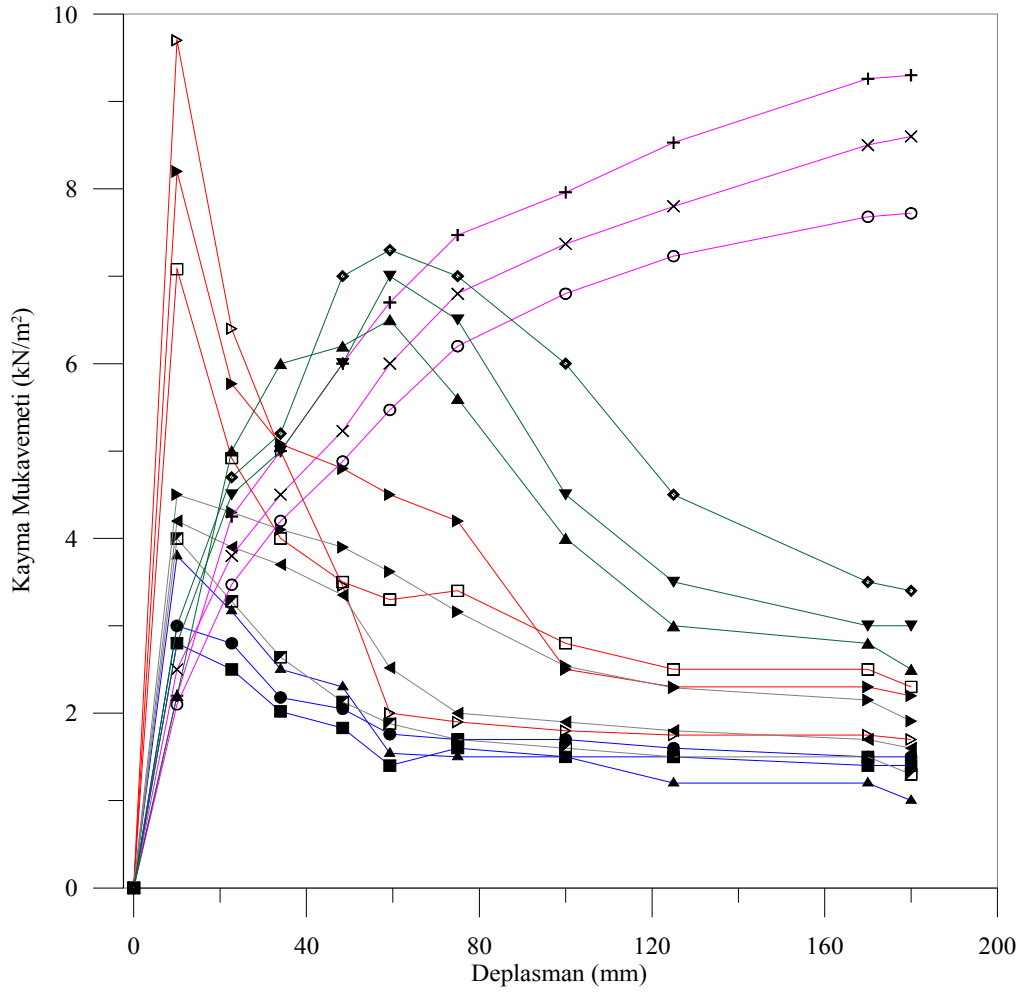
Şekil 53. Petek göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği



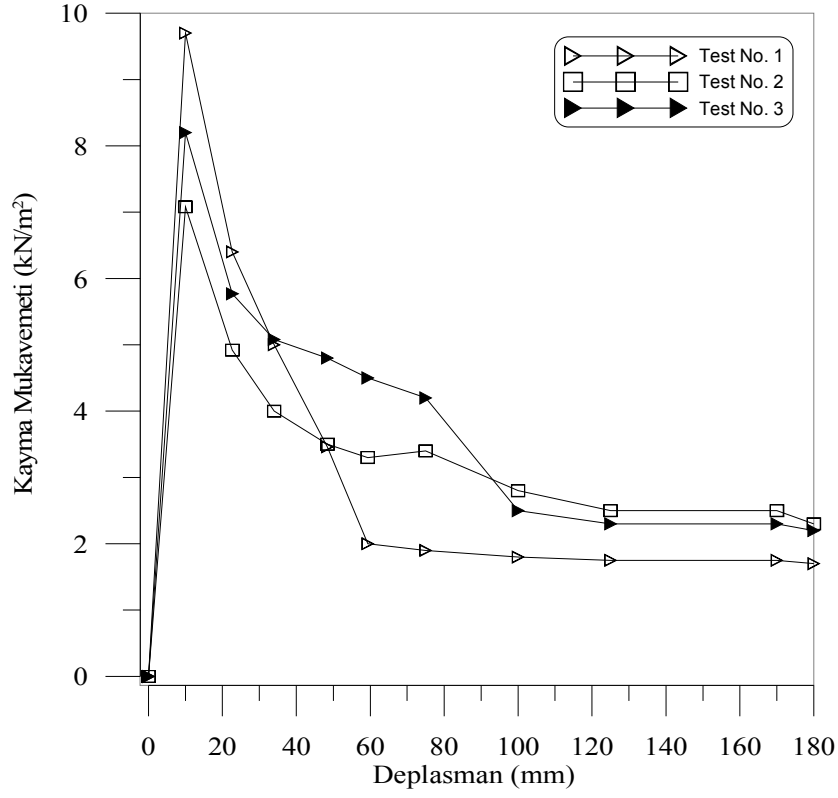
Şekil 54. Çapraz göz açıklıklı geogride ait pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği

5 cm x 5 cm, 4 cm x 4 cm ve 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridler maksimum 200 mm deplasman yapmasına rağmen petek göz açıklıklı geogrid ile çapraz göz açıklıklı geogridler 280 mm yatay deplasman yapmaktadır. Bu deplasmanlar pullout kutusu dışında meydana gelen deplasmanlardır. Kutu içerisine aktarılan kuvvet ve deplasman değerleri çok azdır. Matematik modelleme kısmında bu durumdan bahsedilmiştir.

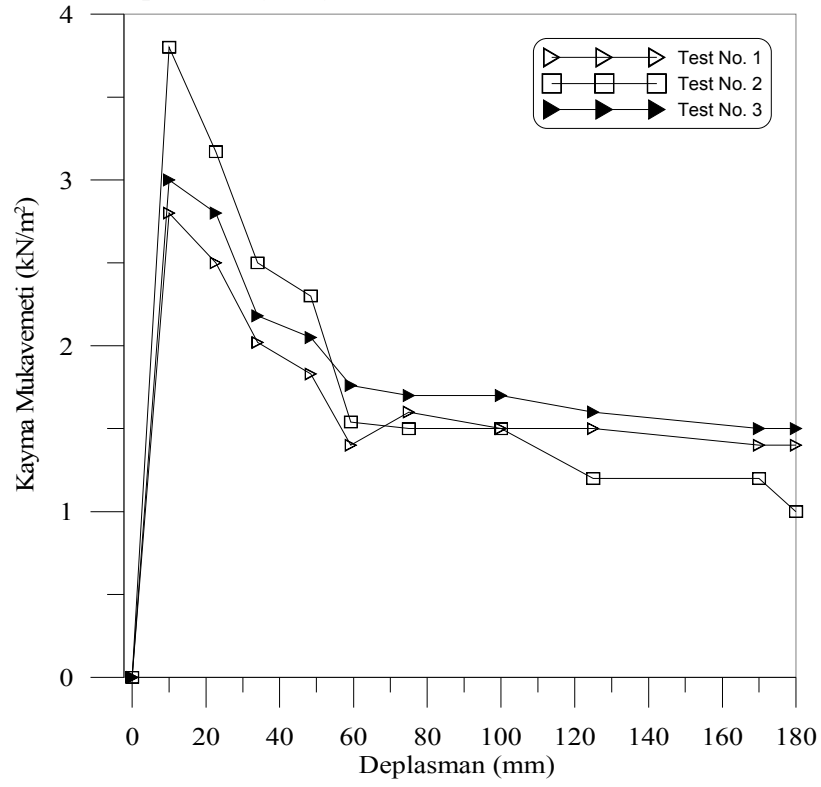
3.4. Kayma Gerilmesi-Yatay Deplasman Değişimine Ait Bulgular



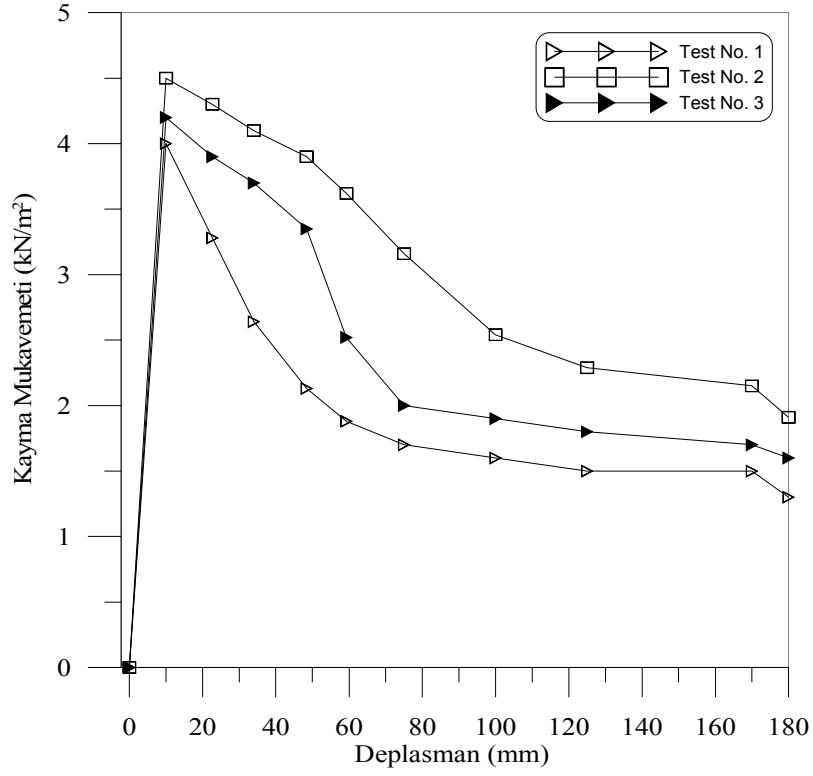
Şekil 55. Kayma Mukavemeti –Yatay Deplasman Grafiği



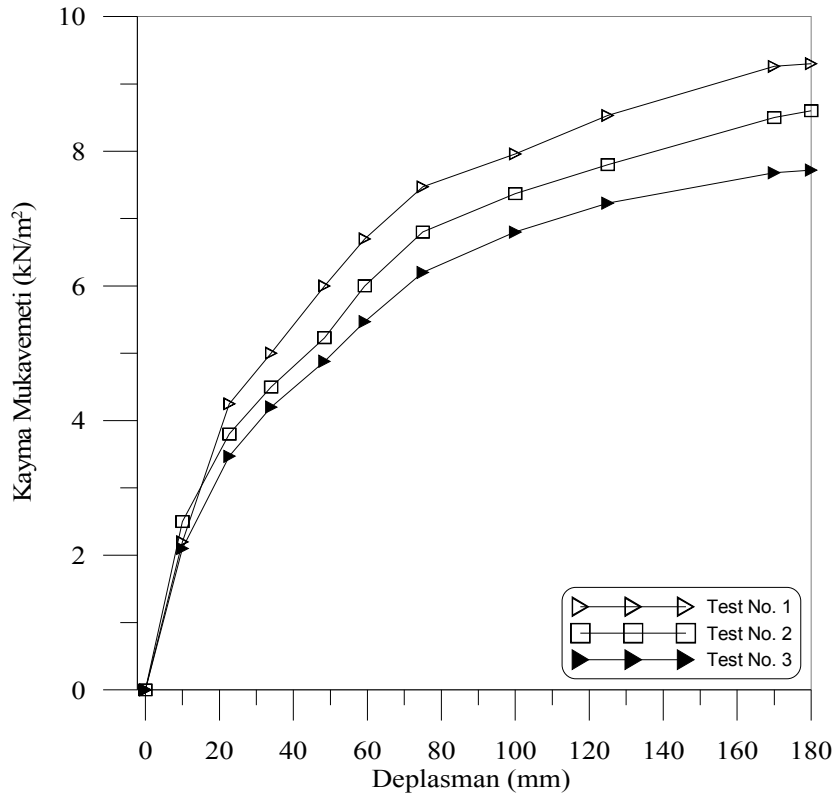
Şekil 56. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği



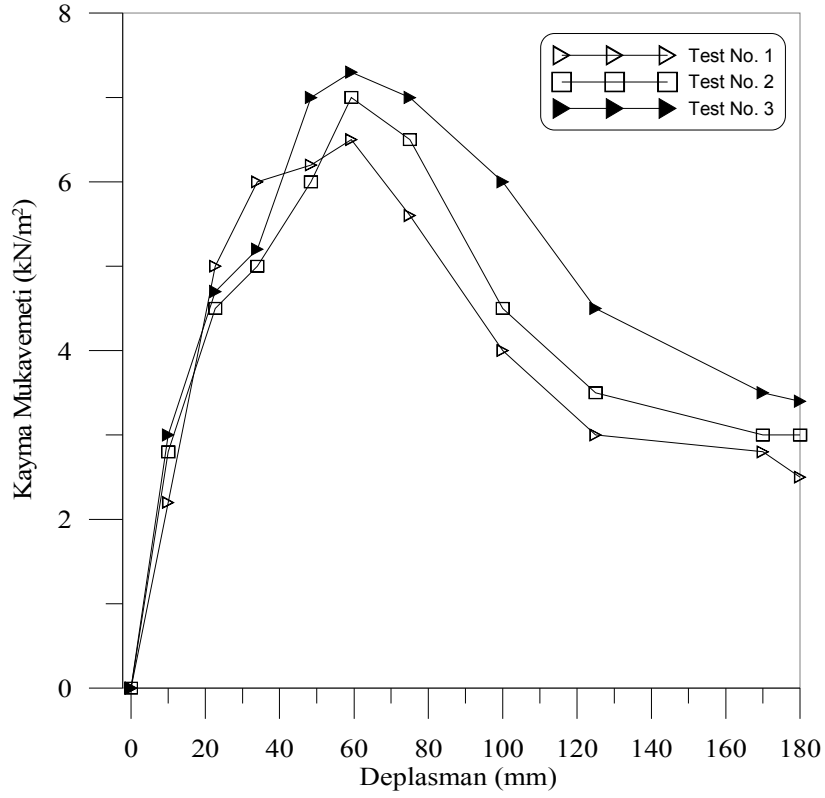
Şekil 57. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği



Şekil 58. 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği



Şekil 59. Petek göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği



Şekil 60. Çapraz göz açıklıklı geogride ait kayma mukavemeti-deplasman grafiği

Deneylelerden elde edilen çekme mukavemeti sonuçlarına dayanarak kayma mukavemetleri hesaplanmıştır. Kayma mukavemeti grafikleri geogride uygulanan ve geogridin koptuğu maksimum değer olan çekme kuvveti değerinin geogridin pullout kutusunda sıkıştırılmış zemin içindeki toplam alanına bölünmesi suretiyle elde edilmiştir. Çekme kuvvetinin pullout kutusu alanına bölünmesiyle belirlenen kayma mukavemeti değerleri kutu içindeki gerilmelerin hesaplanması için geliştirilen matematik modelde de kullanılmıştır. Bunun dışında geogridin pullout performansını belirlemede çekme kuvvetinin pullout kutusu genişliğine oranlandığı pullout kuvveti grafikleri kullanılmaktadır. Pullout kutusunun içerisine aktarılan kayma mukavemeti değerinin ne kadar olduğu matematiksel modellemenin yapıldığı kısımda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Tablo 9’da her göz açıklığı için kayma mukavemeti değerleri sayısal olarak verilmiştir.

Tablo 9. Kayma Mukavemeti Değerleri

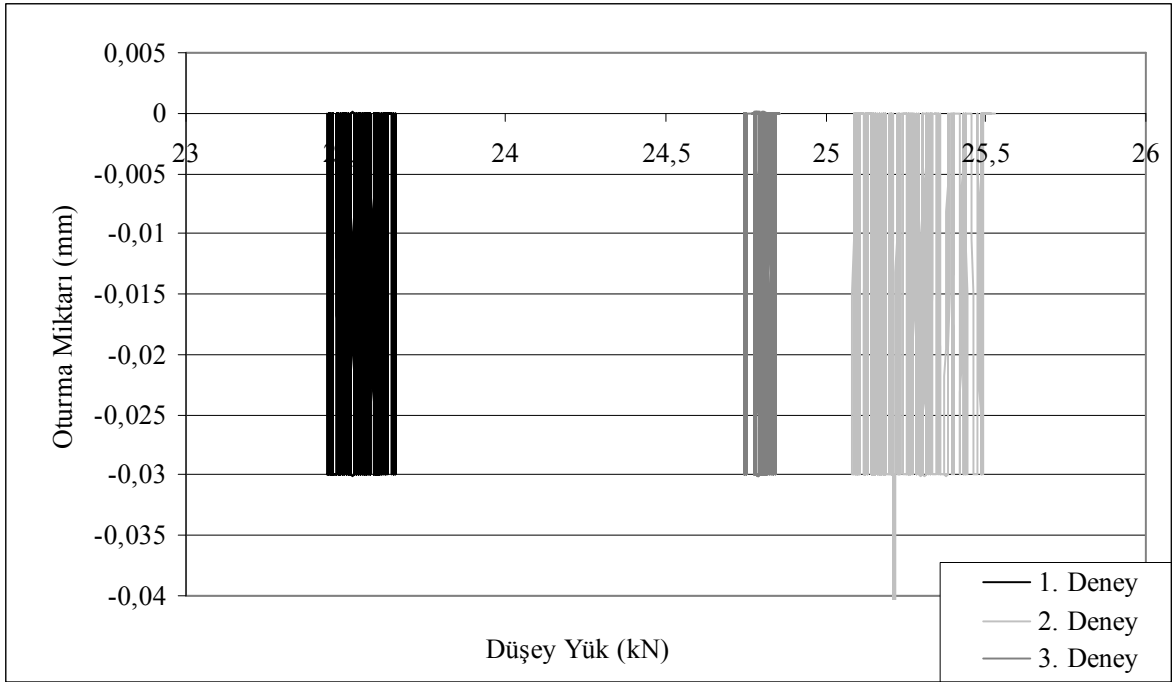
	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	7,37	5,38	6,23	6,32
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	9,7	7,08	8,2	8,32
	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	1,90	2,31	2,28	2,16
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	2,5	3,8	3	3,1
	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	3,04	3,42	3,19	3,22
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	4	4,5	4,2	4,23
	Petek göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	7,08	6,53	5,86	6,49
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	9,3	8,6	7,72	8,54
	Çapraz göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	4,94	5,32	5,54	5,27
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	6,5	7	7,3	6,94

Tablo 9 incelendiğinde 5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid türü ile petek göz açıklıklı geogrid türünün kayma mukavemetlerinin yaklaşık yakın değerler olduğu ve en yüksek değeri aldığı, 3 cm x 3 cm kare göz açıklıklı geogridin ise en düşük değerde koptuğu görülmektedir. 4 cm x 4 cm kare göz açıklıklı geogrid ile çapraz göz açıklıklı geogridlerin ise 5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid türü ile petek göz açıklıklı geogridlere kıyasla daha düşük değerde koptukları gözlenmiştir. Bu durumda kare göz açıklıklılar içerisinde en büyük göz açıklığı boyutlarına sahip olan 5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid türü, kare olmayan farklı şekilli geogrid türleri içerisinde de petek göz açıklıklı geogrid türü en iyi çekme dayanımı göstermiştir. 5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid türü kullanılan geogridle iyi kenetlenerek agrega tanelerinin dağılmasını önlediği

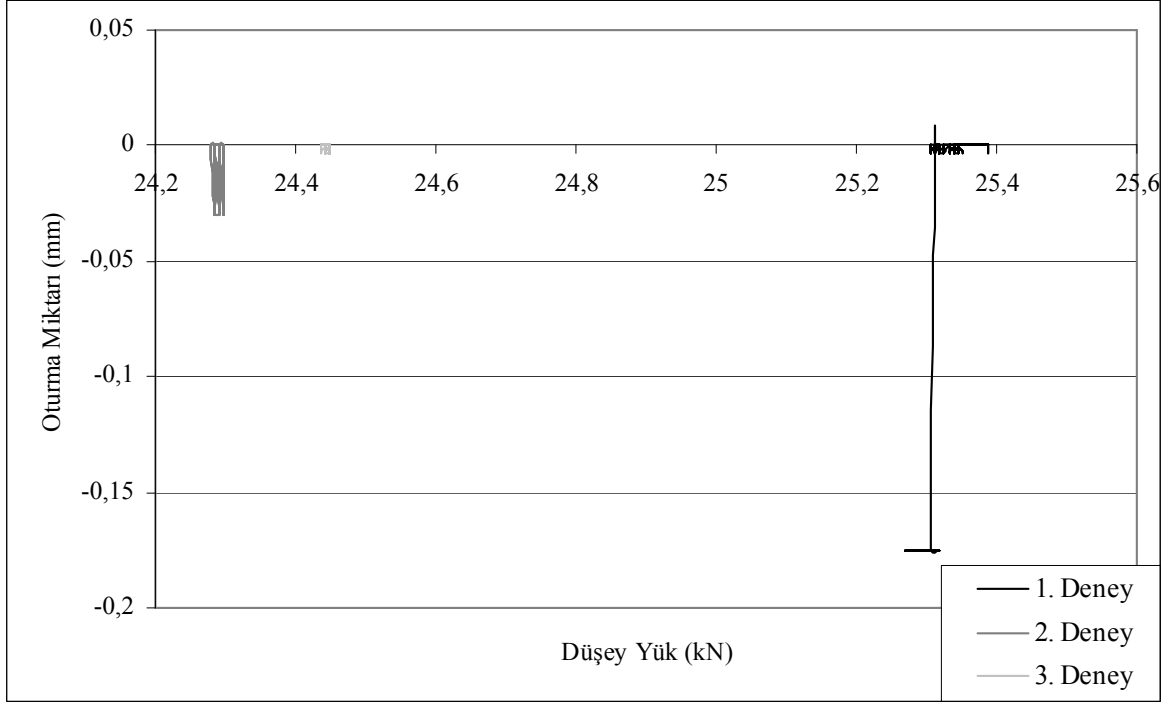
için iyi sonuç vermiştir. Petek göz açıklıklı geogrid türü ise dik açılı köşelere sahip olmadığından ve agregaları içerisinde penetre ettiğinden çekme kuvveti etkisiyle bu agregalar geogridi kenarlarından zayıflatamamıştır ve petek göz açıklıklı geogrid dayanımını hemen kaybetmeden ideal bir davranış göstermiştir.

3.5. Pullout Kutusu İçerisindeki Sıkıştırılan Zeminin Oturma Miktarlarına Ait Bulgular ve Tartışmalar

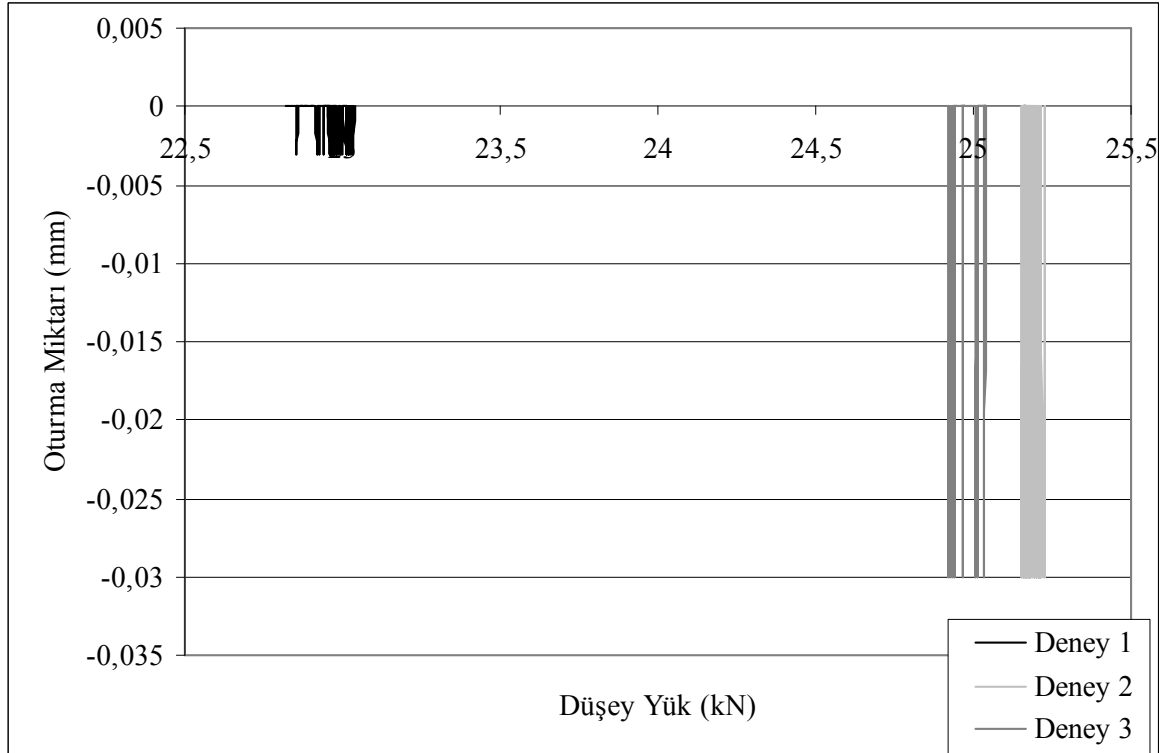
Her bir farklı göz açıklığına sahip geogridlerle yapılan deneyler için sıkıştırılmış zeminde gözlemlenen oturma miktarları Şekil 61-65’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde görülmektedir ki; iyi bir sıkıştırımla başlanan deneylerde her farklı göz açıklığındaki geogridde yaklaşık aynı miktarda oturma gerçekleşmiştir. Deney süresince gözlenen oturma miktarları ortalama olarak 0,03 mm kadardır.



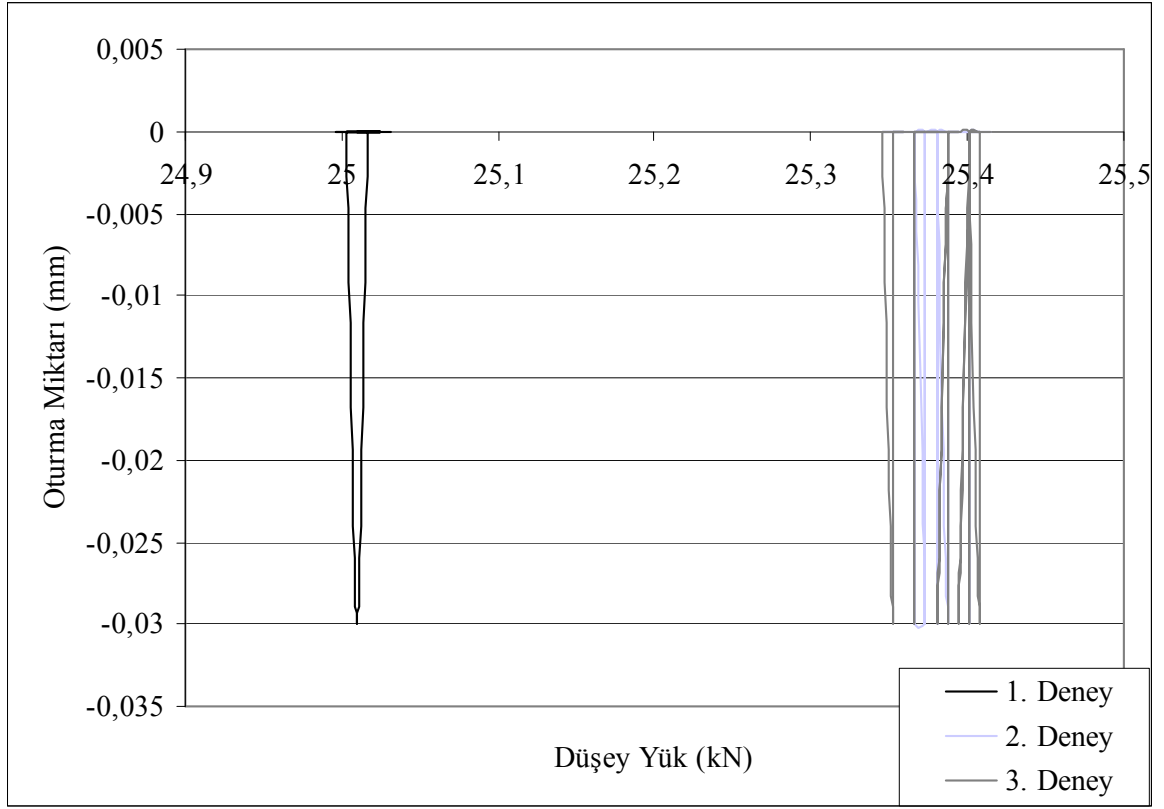
Şekil 61. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri



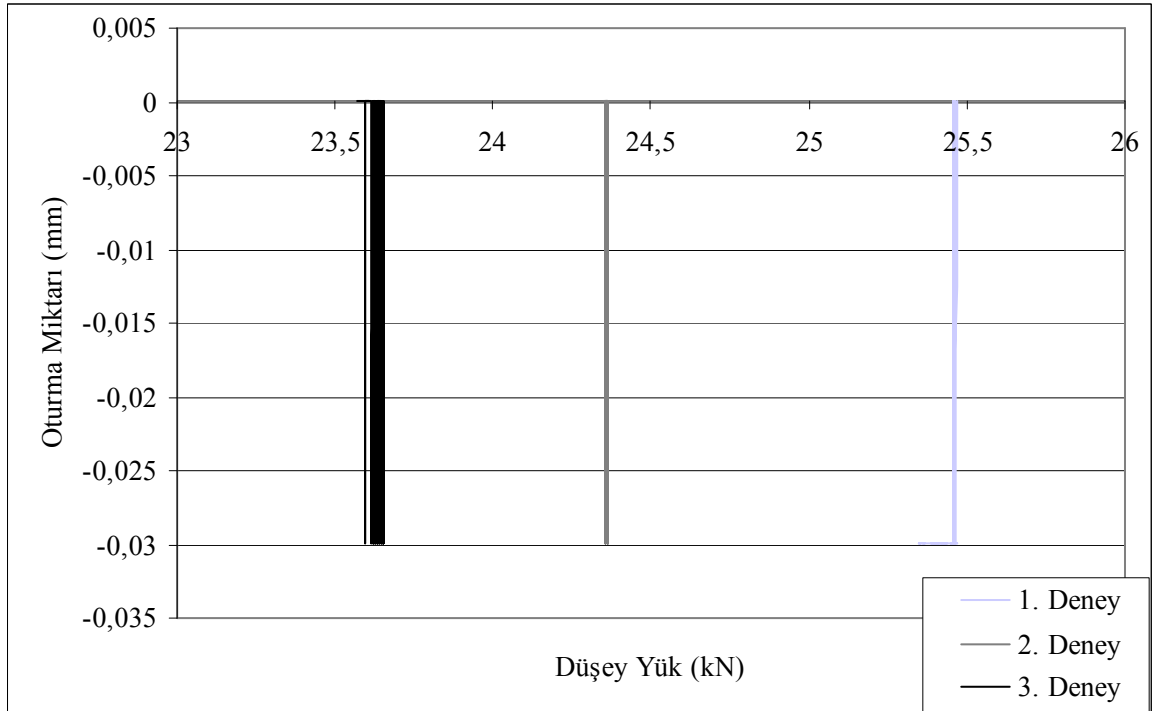
Şekil 62. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri



Şekil 63. 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri



Şekil 64. Petek göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri



Şekil 65. Çapraz göz açıklıklı geogride ait oturma-düşey yük değişimleri

Şekil 61-65'te verilen grafikler Tablo 10'da ortalama oturma miktarları olarak özetlenmiştir.

Tablo 10. Ortalama oturma miktarları

Farklı Göz Açıklıklı Geogridler	Ortalama Oturma Miktarları (mm)
5 cm x 5 cm Göz Açıklıklı	0,03
4 cm x 4 cm Göz Açıklıklı	0,06
3 cm x 3 cm Göz Açıklıklı	0,025
Petek Göz Açıklıklı	0,03
Çapraz Göz Açıklıklı	0,03

5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid ile petek ve çapraz göz açıklıklı geogridlerle yapılan deneylerde sıkıştırılmış zemin ortalama olarak 0,03 mm oturma yapmıştır. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid ile 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridlerle yapılan deneylerdeki oturmalar diğerlerinden farklı sonuçlar vermektedir (3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogrid için 0,025 mm ve 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid için ise 0,06 mm). Ama genel olarak oturma miktarları yorumlanacak olursa mm cinsinden virgülden sonra iki basamak var olduğundan oturma miktarlarının arasındaki farkın çok az olduğundan söz edilebilir. Bu kadar çok küçük oturmaların gözlenmiş olması pullout deneylerine çok iyi bir sıkıştırma yapılarak başlanmış olmasından dolayıdır. Araziye karayolu inşaatında sıkıştırma çok önem arz etmektedir. Temel-alttemel tabakaları iyi sıkıştırılarak yol inşa edilirse sonrasında oluşacak bozulma ve deformasyonlar o kadar azaltılmış olur.

3.6. Pullout Kutusunun Alt ve Üst Seviyelerindeki Normal Gerilme Dağılımlarına Ait Bulgular ve Tartışmalar

Pullout deneylerinin esas amacı sıkıştırılmış zemindeki geogride çekme uygulayarak zemin donatısı olan geogridin göstermiş olduğu kayma ve kenetlenme etkisini belirlemektir. Ama bu doktora tezinde çekmenin yanı sıra farklı seviyelere yerleştirilmiş basınç ölçerler ile zeminde basınç dağılımları da belirlenmeye çalışılmıştır. Geogrid seviyesinin 7 cm alt ve 7 cm üstüne 4'er adet basınç ölçer yerleştirilmiş ve ölçümler

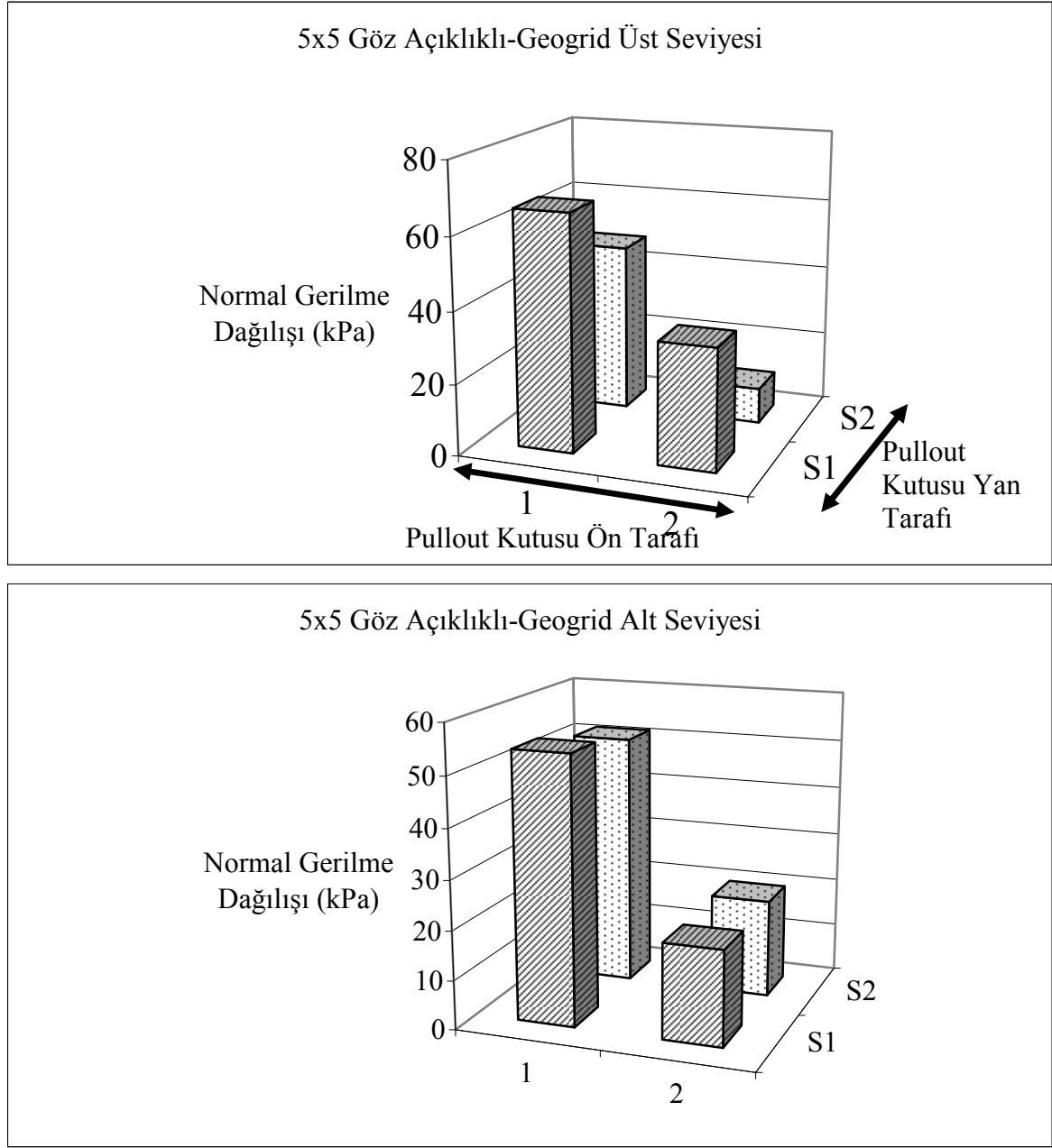
alınmıştır. Şekil 66-70’de ayrıntılı bir şekilde her geogrid türü için pullout kutusu içinde geogrid alt ve üst seviyeleri için basınç dağılımları sütun grafik şeklinde görülmektedir.

Pullout kutusu içerisinde 4 bölgeye basınç sensörü yerleştirilmiştir. Şekilde çapraz çizgili gösterilen sütun grafikler pullout kutusunun çekme bölgesine göre ön tarafına ait, noktali şekilde gösterilenler ise arka tarafına ait basınç dağılımlarını göstermektedir. Basınç dağılımlarının pullout kutusunun içerisinde düzenli dağılmadığı, belli bir kısımda yoğunlaşmadığı rastgele bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

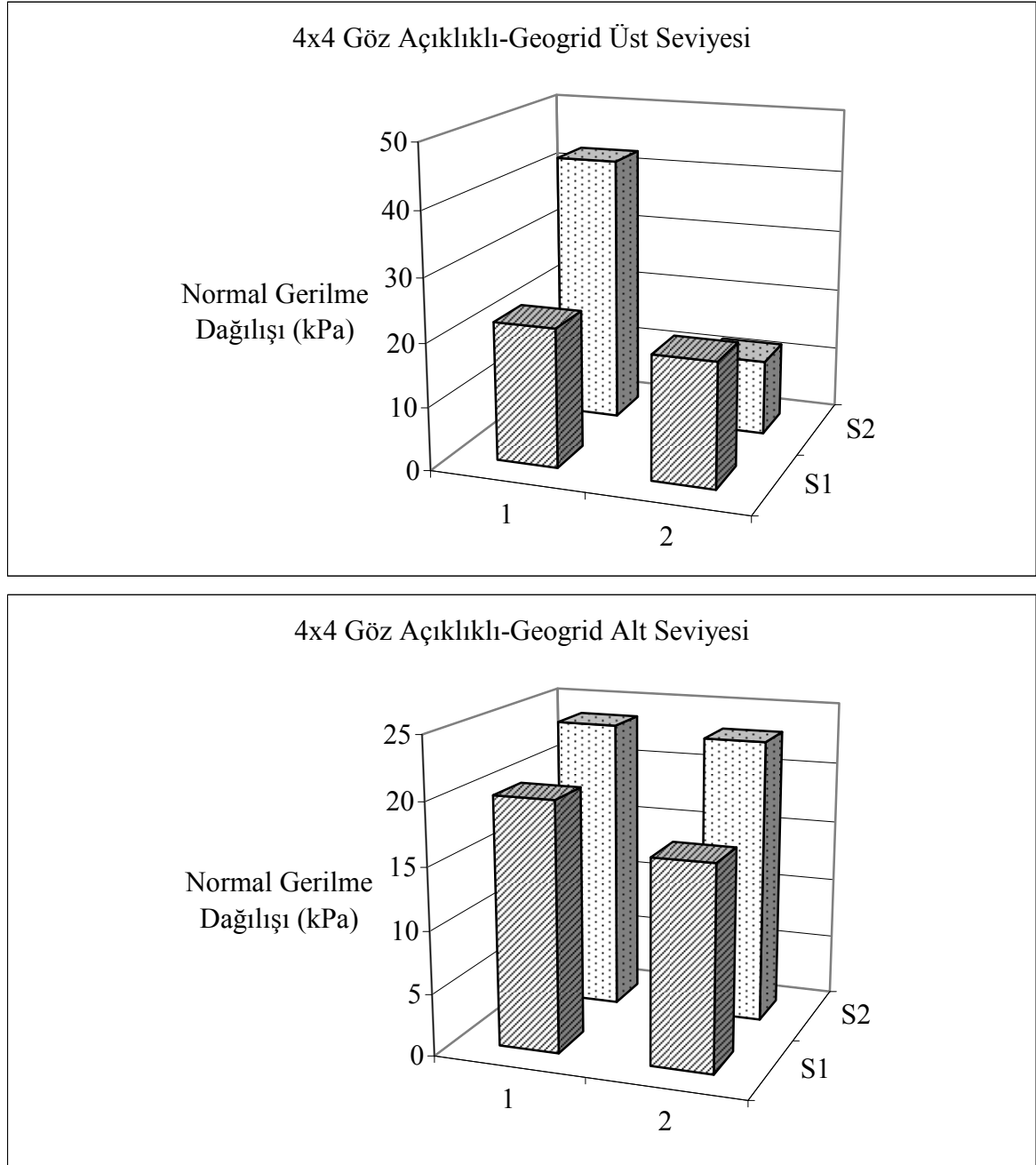
Farklı göz açıklığı türleri ile yapılan deneylere göre elde edilen düşey basınç dağılımları Tablo 11’de görülmektedir.

Tablo 11. Her bir geogrid türüne ait basınç değerleri

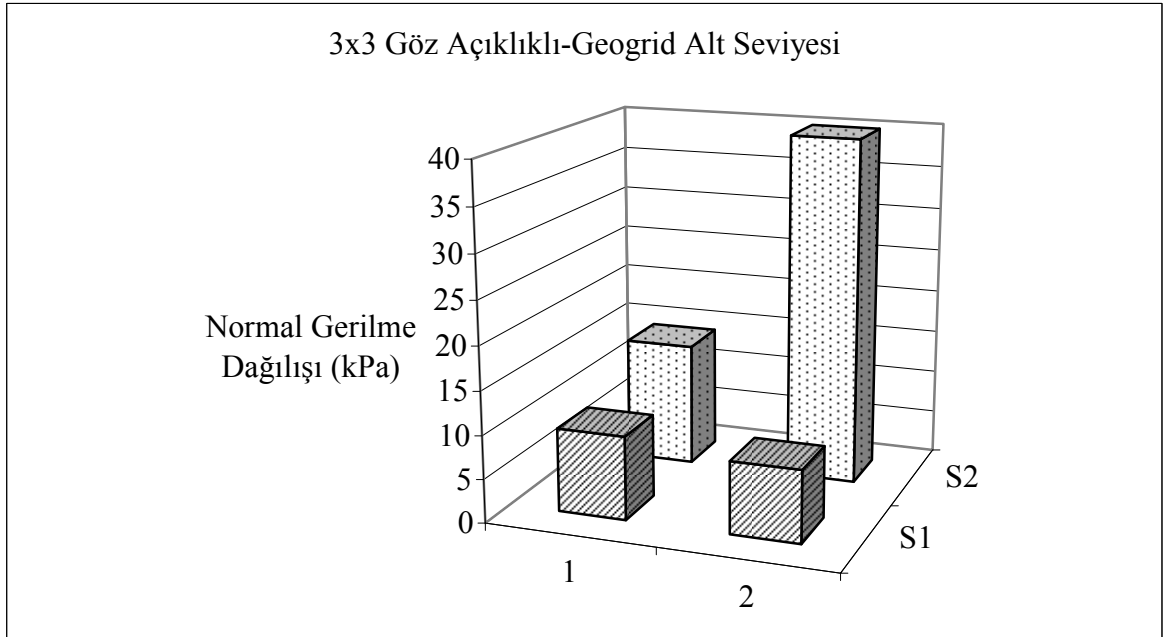
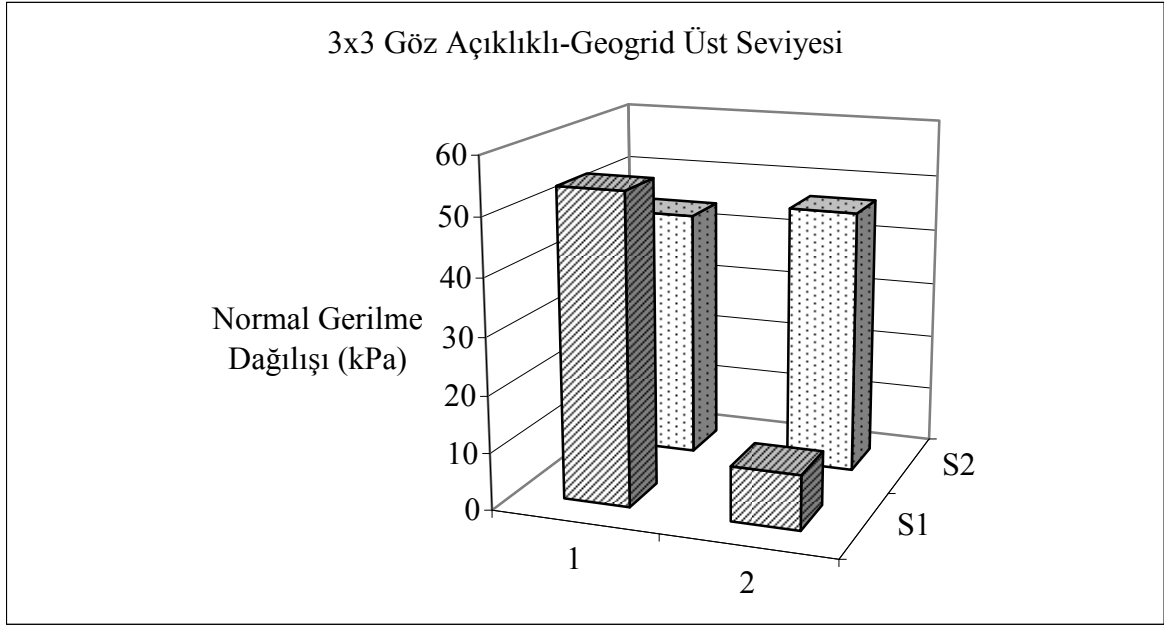
Göz Açıklığına Göre Geogrid Türleri	Deney No	Geogridin Alt Seviyesindeki Normal Gerilme Değerleri (kPa)				Geogridin Üst Seviyesindeki Normal Gerilme Değerleri (kPa)			
		Sensör No				Sensör No			
		1	2	3	4	5	6	7	8
5cmx5cm	1	91	14	27	64	113	18	13	39
	2	54	39	17	56	63	73	4	29
	3	14	5	17	34	22	31	14	75
4cmx4cm	1	5	17	21	40	1	2	3	53
	2	31	13	16	18	25	16	17	9
	3	26	19	32	13	40	41	16	66
3cmx3cm	1	5	6	19	—	5	7	11	—
	2	17	3	65	26	2	11	109	101
	3	7	16	36	17	155	11	20	31
Petek	1	29	24	34	19	51	23	21	6
	2	15	58	50	28	27	66	43	72
	3	18	2	19	1	24	25	14	15
Çapraz	1	31	38	45	34	19	51	37	—
	2	44	37	163	82	56	34	95	186
	3	29	44	65	70	25	40	46	102



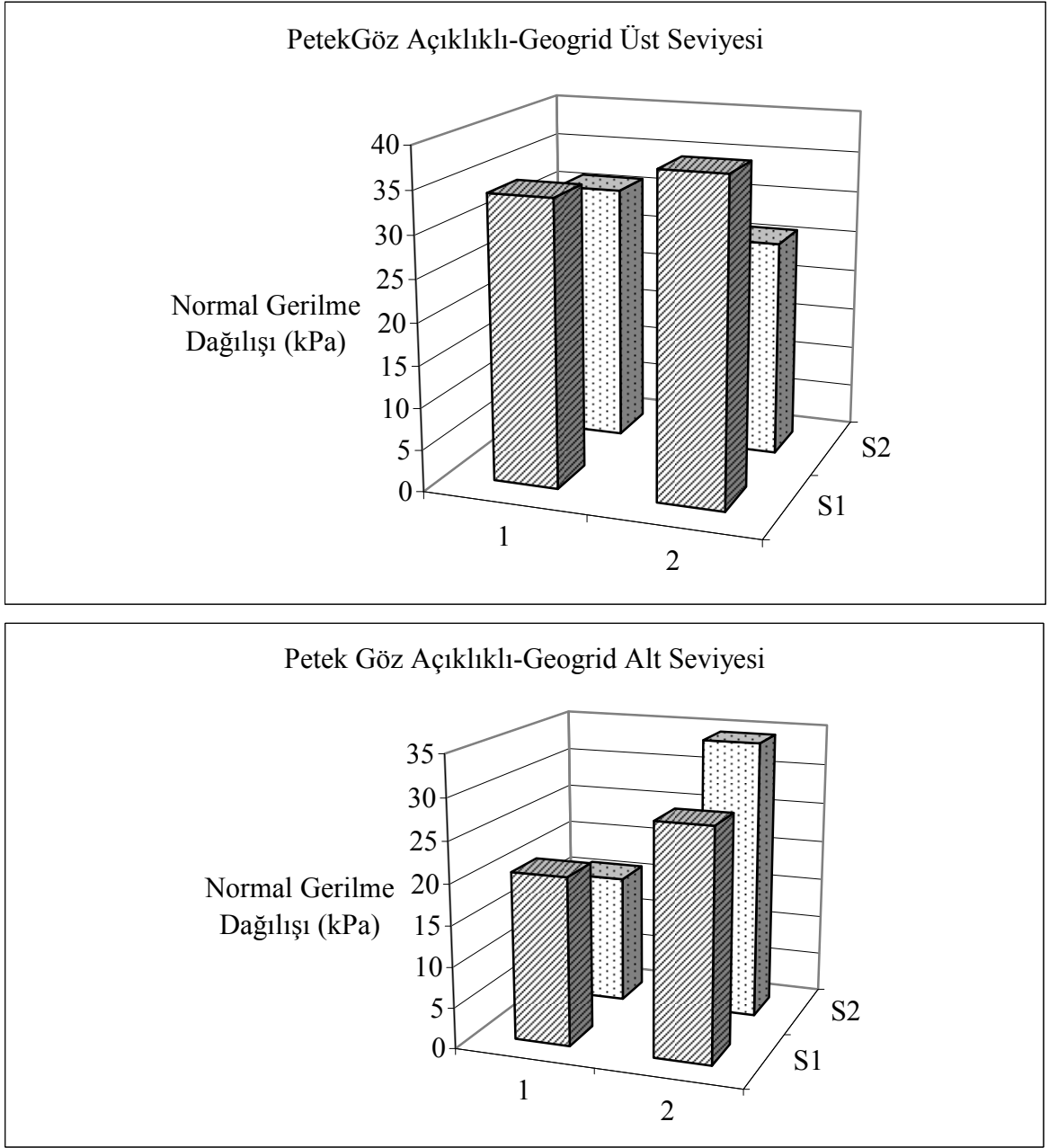
Şekil 66. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları



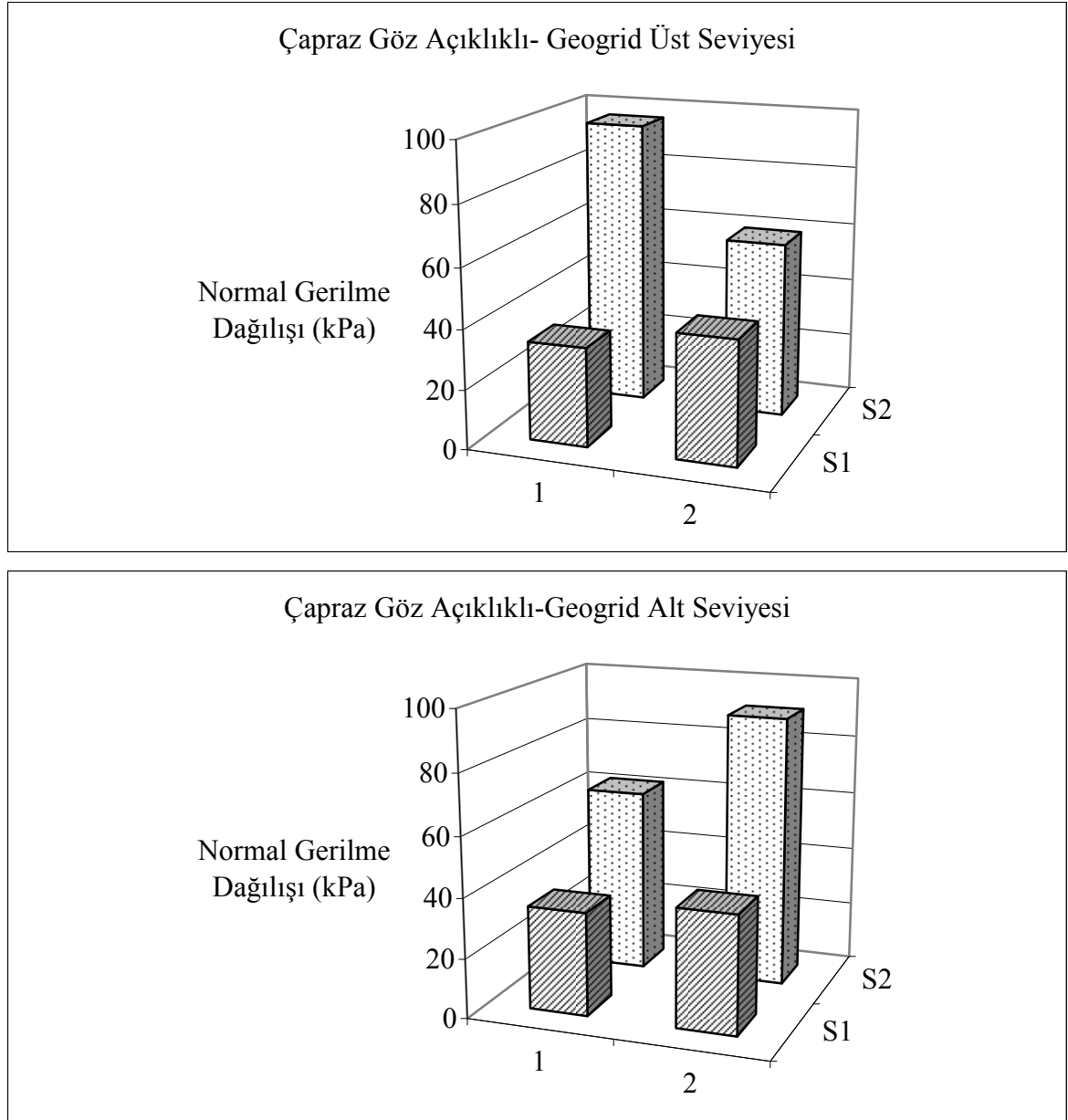
Şekil 67. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları



Şekil 68. 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılımları



Şekil 69. Petek göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılışları



Şekil 70. Çapraz göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılışları

Tabakalarda ölçülen düşey basınç değerleri Tablo 12’de ortalamaları alınarak alt ve üst seviyelerdeki basınç değerleri şeklinde gösterilmiştir. Kare göz açıklıklı geogridlerde geogrid alt seviyesinde ölçülmüş olan basınçlar üst seviyede ölçülmüş olan değerlerin yaklaşık yarısı kadardır (5 cm x 5 cm göz açıklıklı, 4 cm x 4 cm göz açıklıklı, 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridler için). Petek göz açıklıklı geogrid için de aynı durum söz konusudur. Ancak çapraz göz açıklıklı geogrid kullanılması durumu için ve geogridsiz kontrol deneyleri için geogrid alt ve üst seviyesinde hemen hemen aynı basınç değerleri elde edilmiştir.

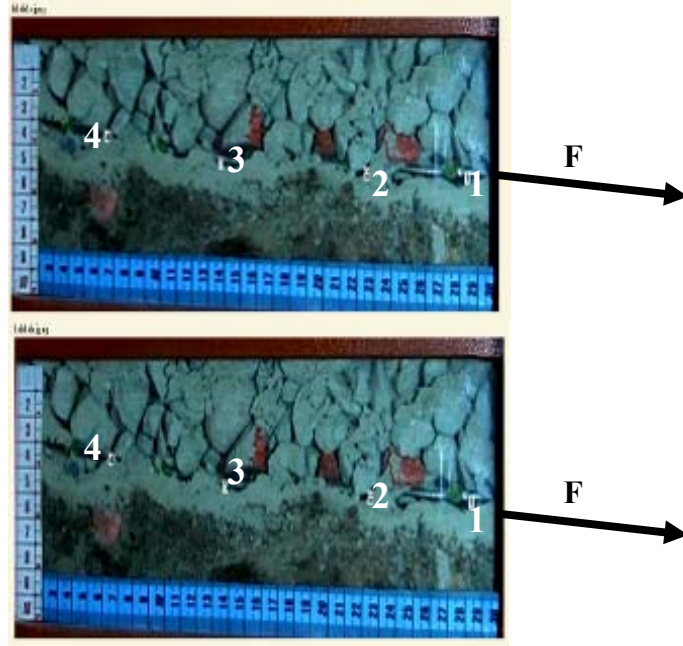
Tablo 12. Ortalama Düşey Basınçlar

	Ölçülen Düşey Basınç Miktarı (kPa)													
	<i>Geogridli deneylerde</i>													
	5cmx5cm Göz Açıklıklı			4cmx4cm Göz Açıklıklı			3cmx3cm Göz Açıklıklı			Petek Göz Açıklıklı			Çapraz göz açıklıklı	
Alt Seviye	48	41	17,5	21,7	19	22,5	10	27,7	34	10	37,75	10	37	57
Üst Seviye	45	42	35,6	14,7	16,8	42	8	60	55	19	52	20	36	62
	Ölçülen Düşey Basınç Miktarı (kPa)													
	<i>Geogrid kullanılmadığı kontrol deneylerinde</i>													
		Kontrol 1				Kontrol 2				Kontrol 3				
Alt Seviye	25				23				53					
Üst Seviye	21,50				20				59					

Tablo 12’de geogridli ve geogridsiz durumlardaki basınç dağılımları incelenecek olursa geogrid kullanıldığı durumda geogrid üst seviyesinde daha fazla basınç değeri geogrid alt seviyesinde ise daha az basınç değeri olduğu görülür. Yani alttemel-taban zemini arasında kullanılan geogrid üzerine gelen düşey basıncı yanal olarak dağıttığından dolayı böyle bir durum ortaya çıkmıştır. Geogridsiz durumda ise gelen düşey basınç iki tabakayı ayıran arayüzde herhangi bir geogrid benzeri donatı kullanılmadığından aynen alt tabakalara aktarılmıştır. Buradan çıkan sonuç, tabakalar arasında geogrid kullanılıyorsa gelen düşey basınçlar yanal olarak dağıtılacak ve alt tabakalara aktarılan basınç azaltılmış olacaktır. Bu sayede de tabakanın dayanımı korunmuş olacaktır. Geogrid üstündeki tabakada alttaki tabakaya kıyasla yaklaşık iki katı fazla basınç değeri elde edilmiş olması geogrid donatısının kullanım amacını yansıtması bakımından önemlidir.

3.7. Prexiglass Pencereleden Alınan Görüntülere Ait Bulgular ve Tartışmalar

Farklı göz açıklığına sahip geogridler pullout çekme testine tabi tutulduğunda her bir göz açıklığına sahip geogridin deplasmanları da ölçülmüştür. Şekil 71’de geogridin çekme yönünden başlanarak 1., 2., 3., ve 4. noktalar olarak geogridin birleşim yerleri işaretlenmiştir. Şekilde gösterilen iki resimden üstteki deneyin başlangıcından, diğeri ise deneyin sonundan alınmış görüntüdür. Çekme deneyinde noktaların deplasmanları iki resim arasında ve geliştirilen yazılım programı kullanılarak kıyaslanmış ve her bir noktanın ilk ve son konumları farkı alınarak deplasmanlar belirlenip Tablo 13’te gösterilmiştir.



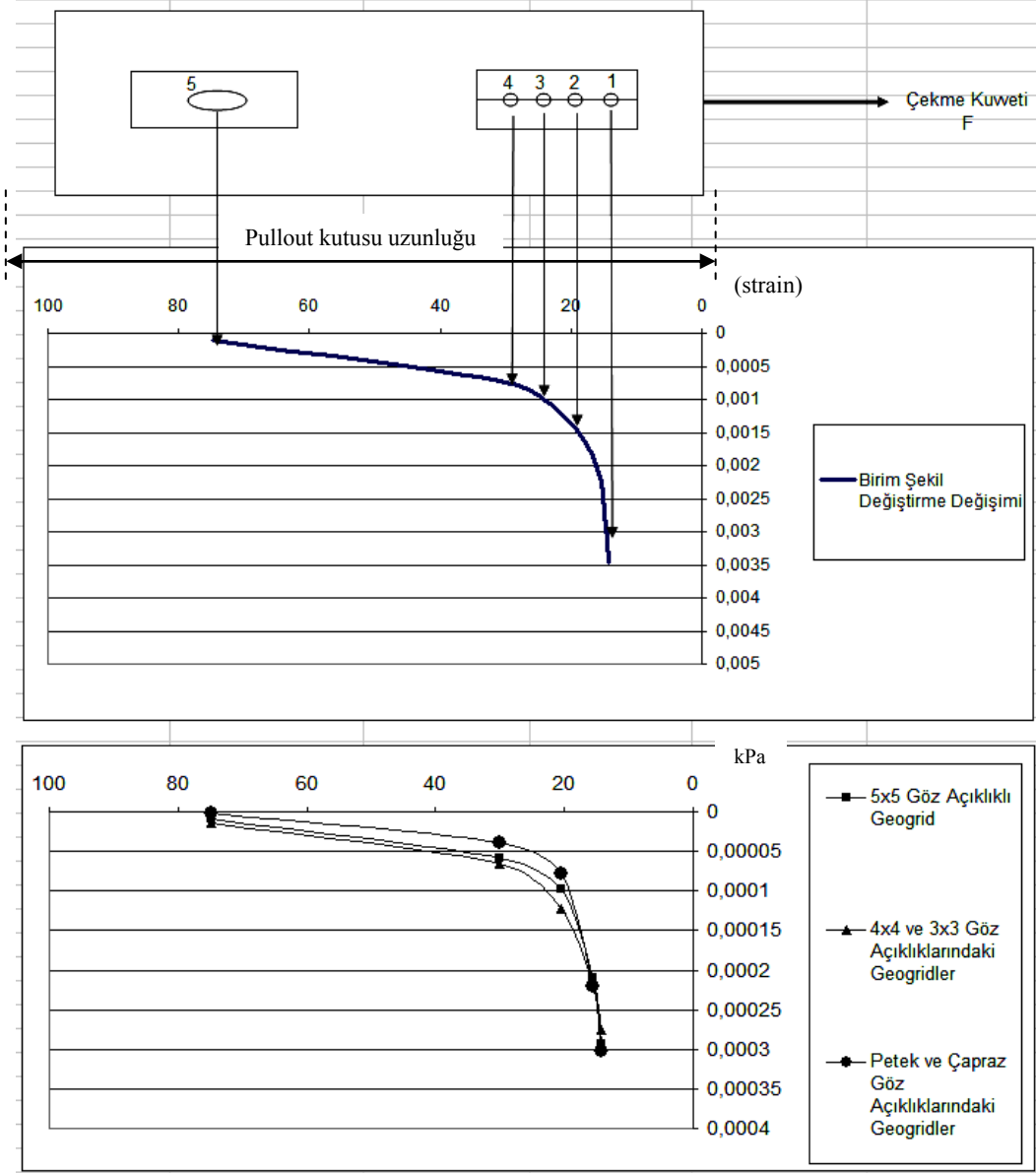
Şekil 71. Çapraz göz açıklıklı geogrid türü için farklı seviyelerdeki basınç dağılışları

Tablo 13. Deneyin başından ve sonundan alınan görüntüler yardımıyla deplasmanların bulunması

Nokta No	Deney Başlangıcında Noktaların Konumu (x_1) (cm)	Deney Sonunda Noktaların konumu (x_2) (cm)	$x_2 - x_1$ (cm)
1	28.1	28.2	0.1
2	23.9	24	0.1
3	14.1	14.1	0
4	7.9	7.9	0

Şekil 72’de, pullout kutusu içerisindeki noktaların görüntü tekniği ile hesaplanmış birim şekil değiştirme değerleri ve buna bağlı hesaplanmış kayma mukavemeti değerleri görülmektedir.

Çekme yüzeyine en yakın noktada hem birim şekil değiştirme hem de kayma mukavemeti maksimum olmuştur. Çekme bölgesinden uzaklaştıkça bu değerler giderek azalmış ve pullout kutusu içinde yaklaşık 70 cm’e denk gelen mesafede ise hem birim şekil değiştirme hem de mukavemet değeri sıfır olmuştur. Bunun sebebi de agregalarla geogridin kenetlenmesinden dolayı çekme yüzeyinden uzaklaştıkça geogridin hareket etmemesinden yani iç kısımlara yük aktarılamamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 72. Çekme Bölgesinden uzaklaşıldıkça birim şekil değiştirme ve kayma mukavemeti değerlerinde görülen azalmalar

Tablo 14'te çekme bölgesine yakın bölgede (1 noktası) az da olsa deplasman olduğu ancak bu bölgeden uzaklaşıldıkça (4 noktası) deplasmanın azaldığı hatta sıfır olduğu görülmektedir. Tablo 14 incelendiğinde görüntü ölçümleri ve sensör ölçümleri arasında fazla fark olmadığı görülmektedir. Görüntü ölçümlerine ve sensör ölçümlerine göre elde edilen değerler yaklaşık yakın değerler olup hemen hemen sıfıra yakındır.

Tablo 14. Farklı geogrid göz açıklıklarında her bir noktanın deplasman değerleri

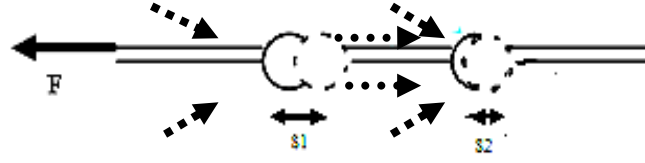
Geogrid Göz Açıklıkları	Deplasman Değerleri (m)							
	Nokta 1		Nokta 2		Nokta 3		Nokta 4	
	Görüntü Ölçüm	Sensör Ölçüm	Görüntü Ölçüm	Sensör Ölçüm	Görüntü Ölçüm	Sensör Ölçüm	Görüntü Ölçüm	Sensör Ölçüm
3cmx3cm	0,001	0,00042	0,001	0,0004	0	0,00037	0	0,00037
4cmx4cm	0,002	0,00044	0,001	0,00041	0	0,00037	0,001	0,00039
5cmx5cm	0,001	0,0004	0,002	0,0004	0,001	0,00039	0	0,00038
Petek	0,002	0,00043	0,001	0,00041	0,001	0,00038	0	0,0004
Çapraz	0,002	0,00041	0,002	0,0003	0	0,00037	0	0,00039

Tablo 14’te pullout kutusu içinde hem görüntüleme yöntemine ve hem de sensörlerden okunan değerlere göre fazla deplasman olmadığı görülmektedir. Bunun sebepleri şöyle irdelenebilir:

- Çok iyi bir sıkıştırma yapılarak ve sabit düşey yük tatbik edilerek deneye başlandığı için kutu içinde sıfıra yakın bir hareketlilik gözlenmesi,
- Deney anında çekme kuvveti etkisinin pullout kutusu içine fazla iletilmemesi ve kutu dışında kopma oluşması,
- Geogridin göz açıklığının farklı olmasının (3 cm x 3 cm, 4 cm x 4 cm, 5 cm x 5 cm) deplasmanlar üzerinde önemli bir etkisi olmamasıdır. Her bir açıklığa sahip geogridin mukavemet değerlerinin yaklaşık aynı olması da buna sebep olabilir. Taban zemininde CBR değeri yüksek malzeme kullanıldığından alttemel ile taban zemini arasında rijit bir kenetlenme olmuş ve bu etki yatay deplasmana izin vermemiştir. Pullout kutusu içinde her göz açıklığındaki geogrid sıfıra yakın bir deplasman göstermiştir (Sert ve Akpınar, 2010).

Tablo 14’te çekme yüzüne yakın bölgede (1 noktası) az miktarda deplasman olması ancak uzaklaşıldıkça (4 noktası) deplasmanın azalarak sıfır olması hususu literatürde de açıklanmaktadır:

Nernheim (2004), çalışmasında geogridin çekme bölgesine yakın elemanlarında uzak elemanlara kıyasla daha çok hareketlilik olduğunu göstermiştir. Pullout testlerinde çekme yüzeyinden uzaklaşıldıkça deplasman ve birim şekil değiştirme sıfıra yaklaşmaktadır. Şekil 73’te çekme uygulanan geogridin davranışı görülmektedir. Kesikli çizgilerle gösterilen oklar agregaların çekmenin aksi doğrultusundaki hareket yönünü göstermektedir. Yuvarlak gösterilen kısımlar ise geogridin enlem ve boylam elemanlarının birleşim yerleridir.



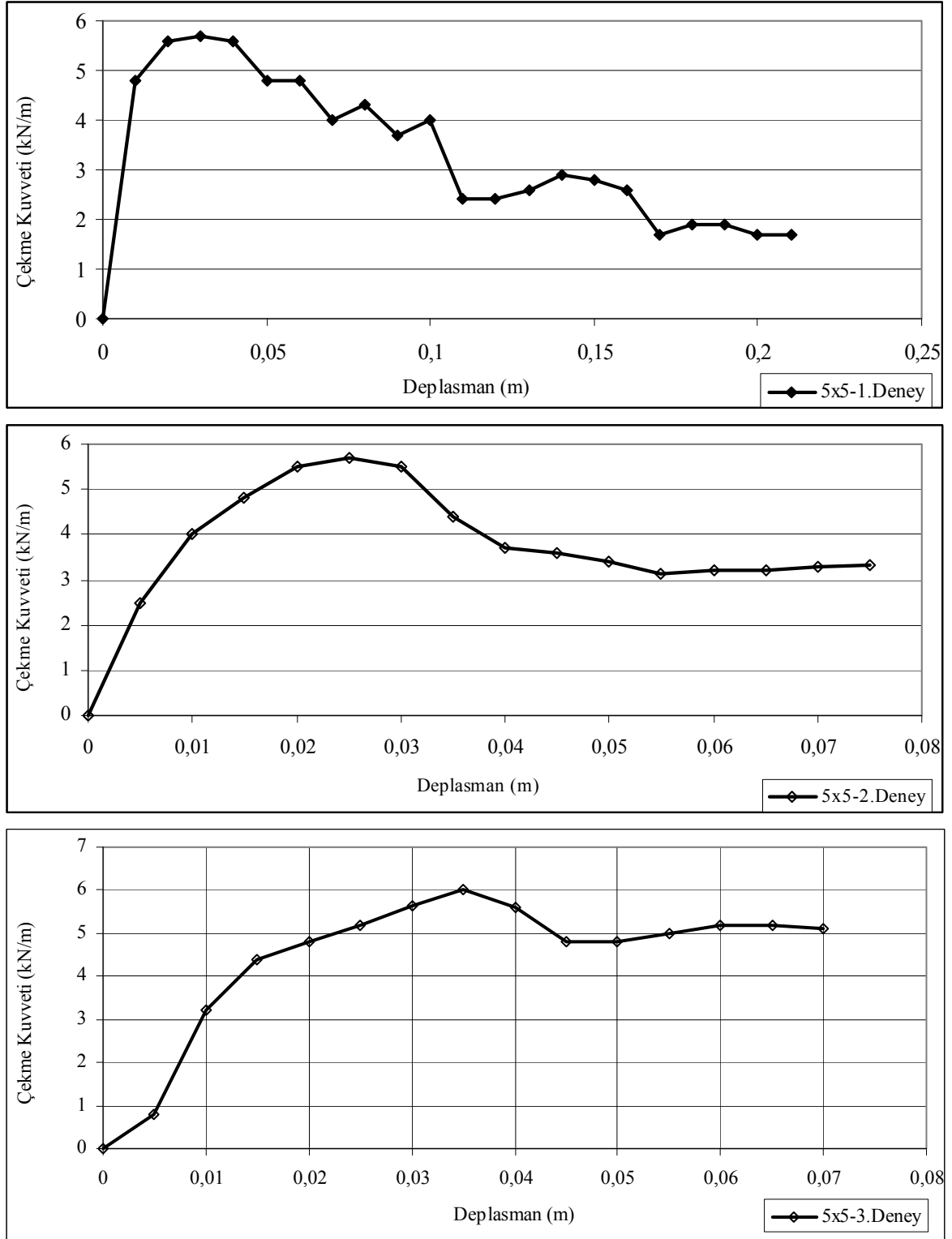
Şekil 73. Yük transferi ($S_1 > S_2$)

Kesikli çizgi ile gösterilen yuvarlak kısımlar çekmeye başlandığı anda geogrid düğüm noktalarının konumlarını göstermektedir. F kuvvetiyle çekilen geogride çekme yüzeyine yakın geogrid eleman S_1 kadar deplasman yaparken çekme yüzeyine daha uzak olan eleman S_2 kadar deplasman yapmaktadır. Teorik olarak $S_1 > S_2$ şeklinde ifade edilmektedir (Nernheim, 2004). Bu da sıkıştırılmış tabakalar arasındaki geogride çekme kuvveti uygulandığında, geogridin her noktasında aynı deplasmanların oluşmadığını göstermektedir. Çekme yüzeyine yakın kısımlarda gerilme ve deplasmanlar fazla oluşmakta, bu bölgeden uzaklaştıkça gerilme ve deplasmanlar azalmaktadır. Tablo 14’te gösterildiği gibi yatay yöndeki en fazla deplasman değeri çekme yüzeyine en yakın olan 1 numaralı noktada, en az deplasman değeri ise çekme yüzeyine en uzak olan 4 numaralı noktada elde edilmiştir.

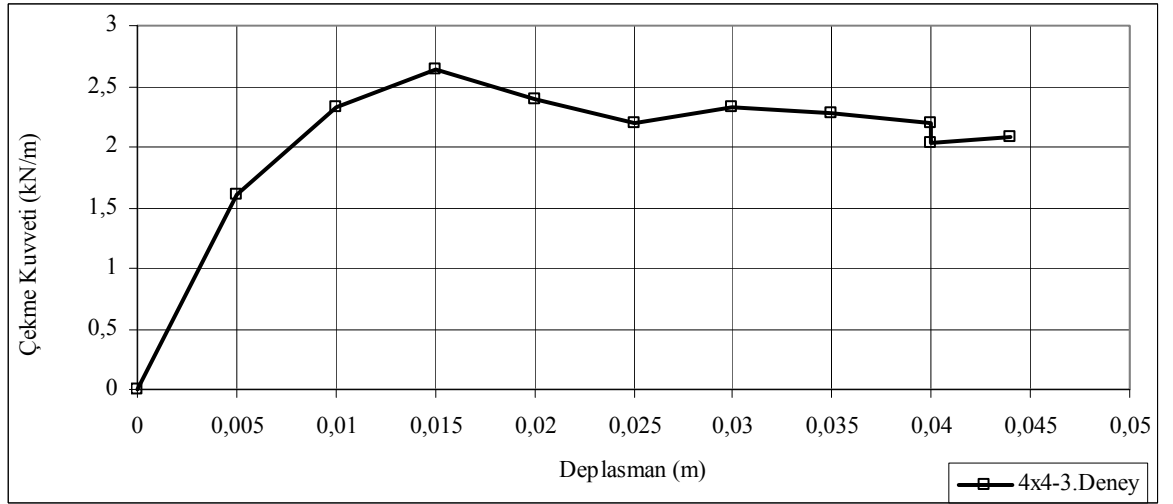
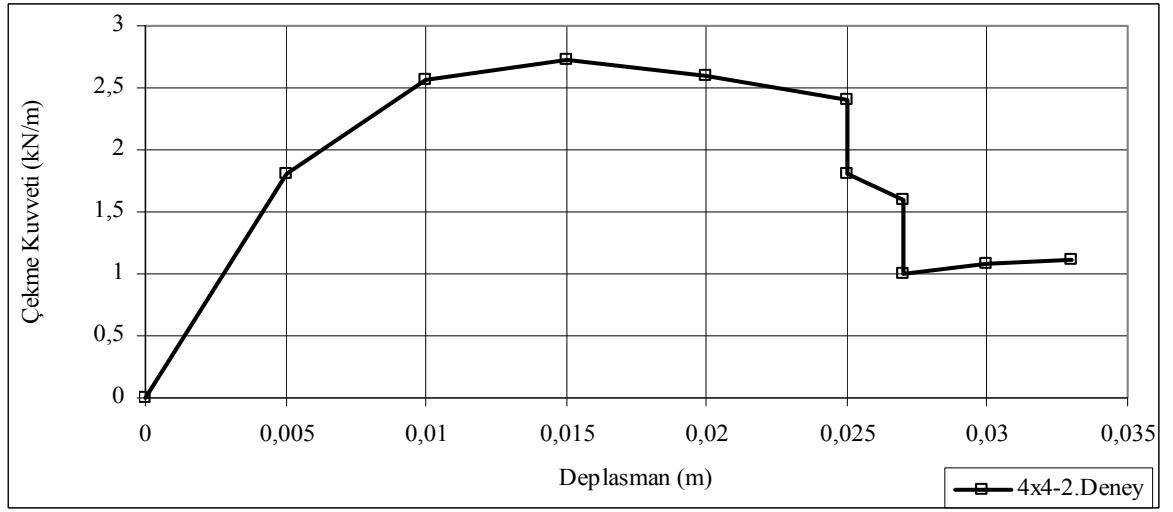
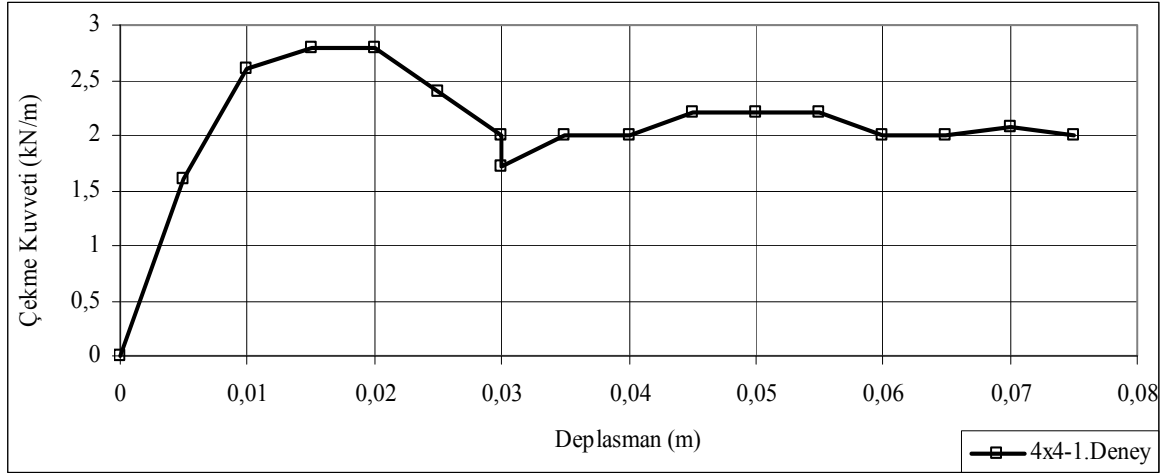
3.8. Geogridlerin Çekme Testlerinden Elde Edilen Bulgular ve Sonuçların Yorumlanması

Geogridlerin üzerinde herhangi bir yük yokken geogrid numunelerin çekme test aletinin çeneleri arasına monte edilip düşey doğrultuda çekildiği çekme test sonuçları ile pullout test sonuçları Tablo 15’te kıyaslanmıştır. Buradaki yük ve kayma mukavemeti değerleri hem çekme hem de pullout testleri için geogridlerin mukavemetini maksimum gösterdiği değer baz alınarak hesaplanmıştır. Yani geogridlere çekme uygulandığında maksimum bir noktaya kadar geogrid dayanım göstermekte bu noktadan sonra mukavemeti giderek düşmektedir. Tablo 15’te bu maksimum nokta göz önüne alınmıştır.

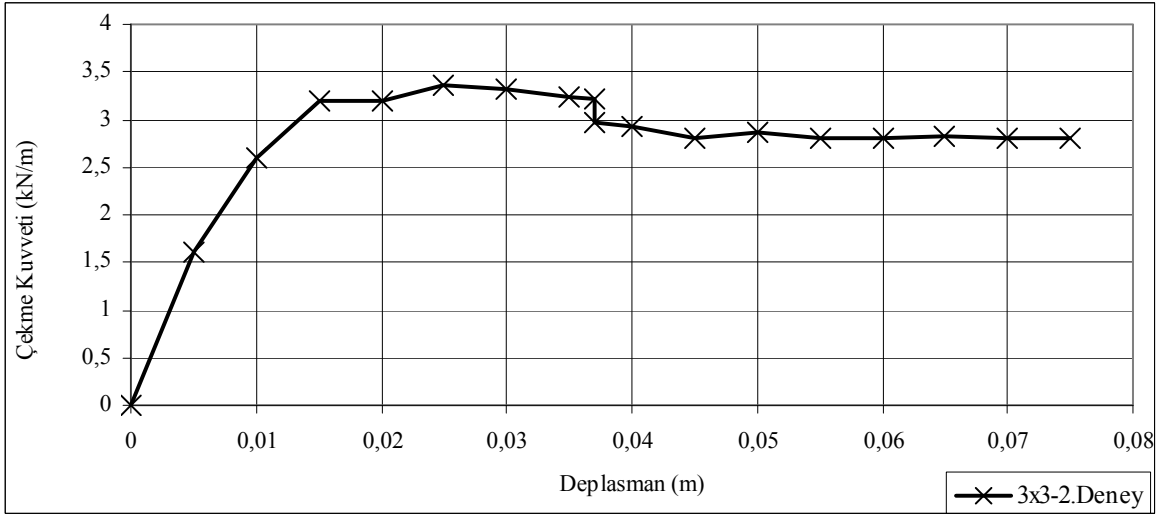
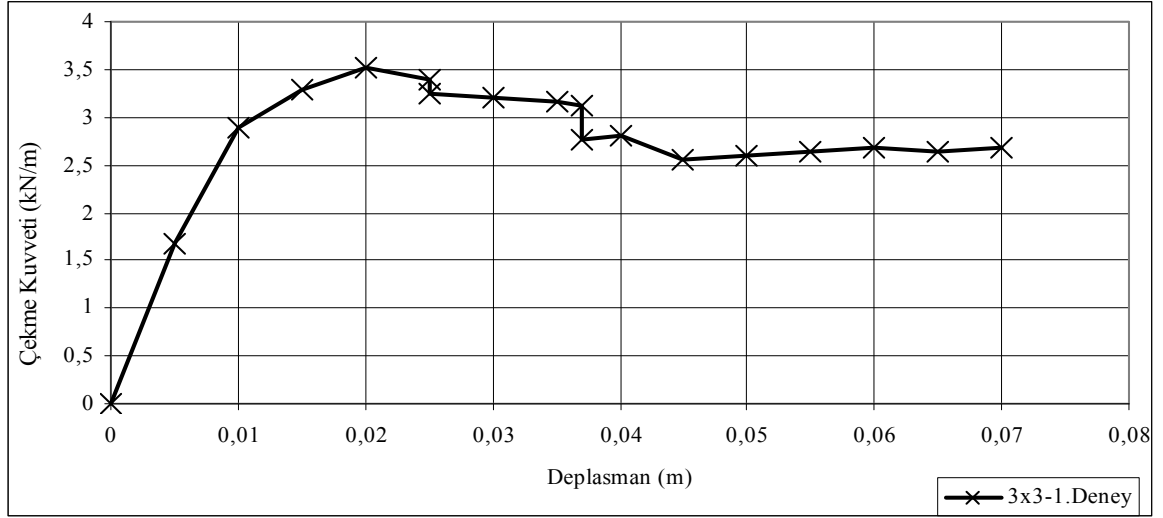
Şekil 74-78’de her bir geogrid türünün çekme testlerine ait çizilmiş olan grafikler görülmektedir.



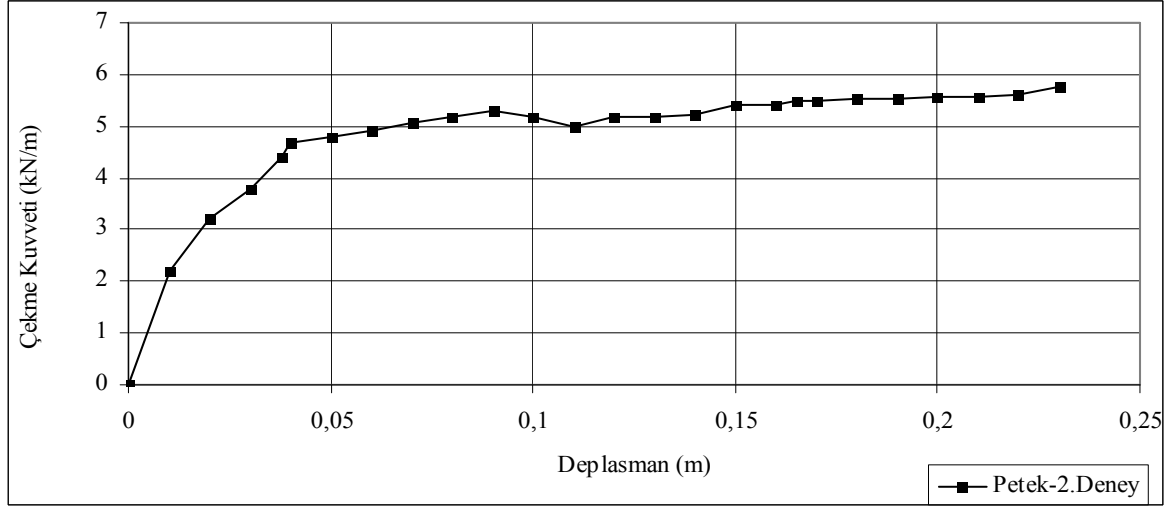
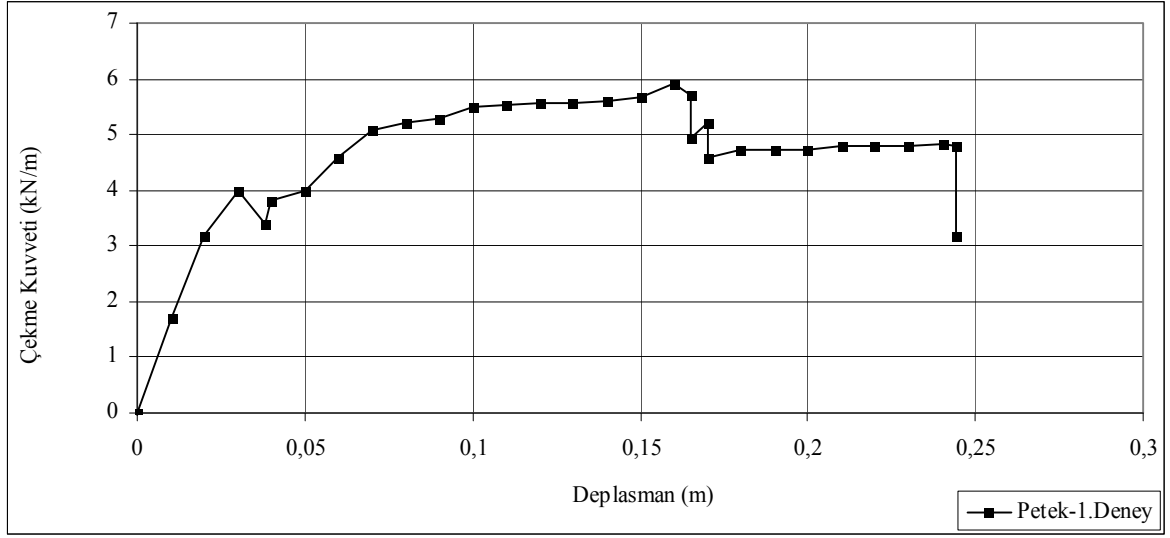
Şekil 74. 5 cm x 5 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi



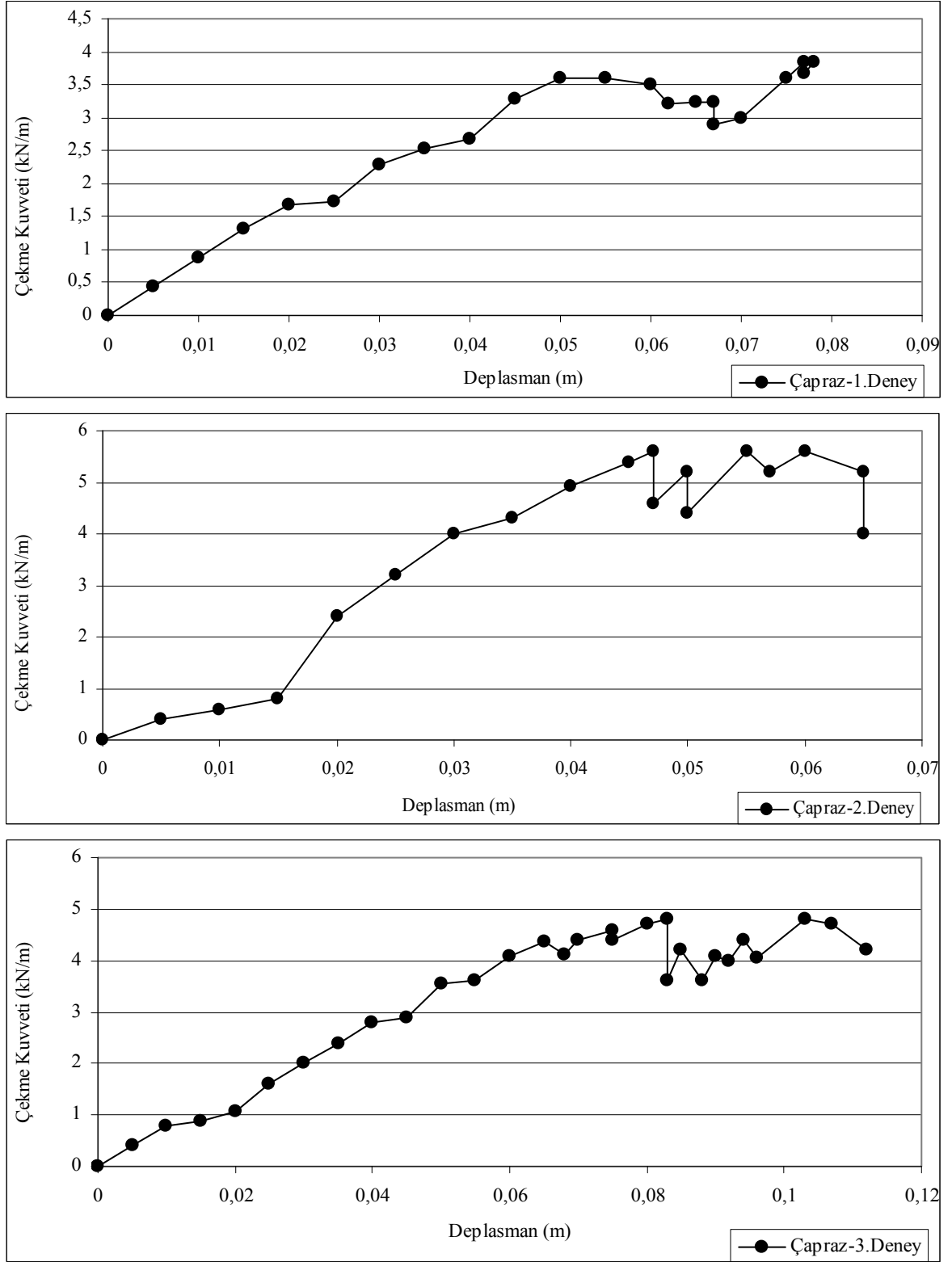
Şekil 75. 4 cm x 4 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 76. 3 cm x 3 cm göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 77. Petek göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 78. Çapraz göz açıklığındaki geogride ait çekme testlerine göre kuvvet-deplasman ilişkisi

Tablo 15. Çekme ve pullout testlerinin maksimum yük ve maksimum çekme mukavemeti sonuçlarına göre kıyası

	Geogrid Göz Açıklığına Göre Maksimum Çekme Mukavemetleri (kN/m)				
	5cmx5cm	4cmx4cm	3cmx3cm	Petek (Altıgen)	Çapraz
Pullout Test Sonuçları	6,66	2,48	3,38	6,83	4,52
Çekme Test Sonuçları	5,72	2,70	3,42	5,82	4,64

Geogridlerin taşıyabileceği maksimum yük değerlerine bakılacak olursa; boş haldeyken çekme uygulandığında ve pullout testleri yapıldığında her durumda geogridlerin kopmadan dayanabileceği maksimum taşınan yük miktarı Tablo 15’te görüldüğü gibidir. 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ve çapraz göz açıklıklı geogridlerde boş halde geogride çekme uygulandığında okunan değer, pullout testlerinden elde edilen değerden daha yüksek çıkmıştır. Ancak 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogridlerde ise aksi durum gözlenmiştir. Yani çekme testlerinden elde edilen mukavemet değeri pullout testlerinden elde edilenden düşük çıkmıştır. Bu sonuç aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Malzeme kalitesine göre: Kare göz açıklıklı geogrid türleri içerisinde 5 cm x 5 cm göz açıklıklı olan tür, kare açıklıklar dışında da petek göz açıklıklı geogrid türü en iyi dayanım veren geogrid türleridir. Bu iki tür geogrid, pullout testine tabi tutulduğunda kutu içerisinde kopmuş ancak kutu dışında kopma meydana gelince mukavemetini kaybetmiştir. Pullout kutusunda sıkıştırılmış zemin içerisinde ankastre bağlı gibi çalışmış yani bir tarafından ankastre olup diğer tarafından çekilmiştir. Çekme testinde ise geogride test aletinin her iki çenesi tarafından çekme uygulanmıştır. Bu durumda 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogridlerde çekme testinde iki taraftan da çekme uygulandığından çekme test sonuçları pullout test sonuçlarından küçük çıkmıştır. Yani çift taraflı çekme etkisiyle daha küçük değerlerde mukavemetini kaybetmiştir. Sıkıştırılmış pullout test kutusu içerisinde ise 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogridlerin kopma ya da herhangi bir deformasyona uğramadıklarından boş halde çekmeye kıyasla daha iyi bir performans gösterdikleri söylenebilir. Ancak 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ve çapraz göz açıklıklı geogrid türlerinde ise sıkıştırılmış zemin içerisinde azda olsa kopma veya deformasyonlar meydana geldiğinden dolayı pullout testinde, boş halde çekildiği duruma kıyasla daha düşük bir çekme değerinde kopma gözlenmiştir.

- Agrega ile uyumlu çalışmasına göre: 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogrid türleri agrega tanelerini göz açıklığı içerisinde iyi bir şekilde penetre edebildiğinden dolayı granüler malzeme içerisine doğru çekme etkisi iyice aktarılabilmekte ve agrega-geogrid kenetlenmiş bir şekilde uyum içerisinde çalışabilmektedir. Bu durumda da pullout testlerinde geogridin boş halde çekildiği durumdan daha iyi bir çekme mukavemeti elde edilmiş olmaktadır.

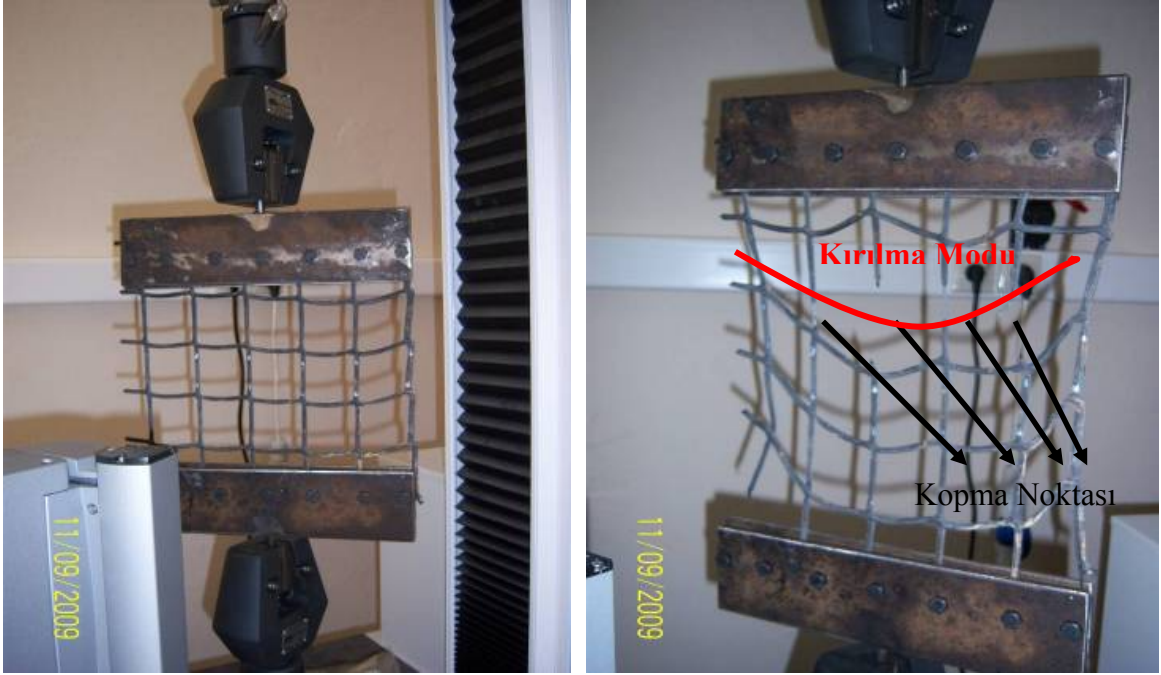
Literatürde de şu durumlarla karşılaşılmıştır:

Shinoda'nın (2004), çalışmasında kare göz açıklıklı geogridlerde aksenal çekme kuvveti değeri 12,9-17,3 kN/m bulunmuş iken; kare değil de dikdörtgen göz açıklıklı geogridlerde bu değer 60 kN/m olarak bulunmuştur.

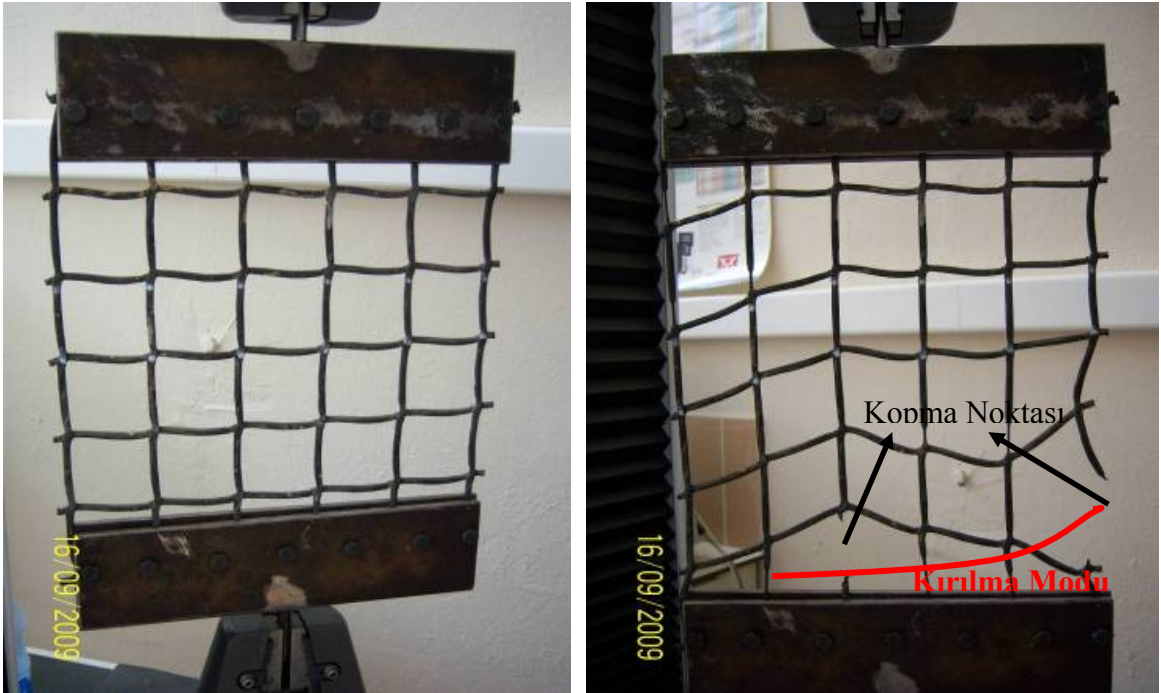
- ❖ HDPE türü geogrid için 60,9 kN/m,
- ❖ PET türü geogrid için 17,2 kN/m ve
- ❖ PP türü geogrid türü için ise 12,8 kN/m olarak hesaplanmıştır.

Burada da görülmüştür ki; geogridin üretildiği malzeme türü ve geogrid göz açıklığı şekli çekme test sonuçlarını önemli oranda değiştirmektedir.

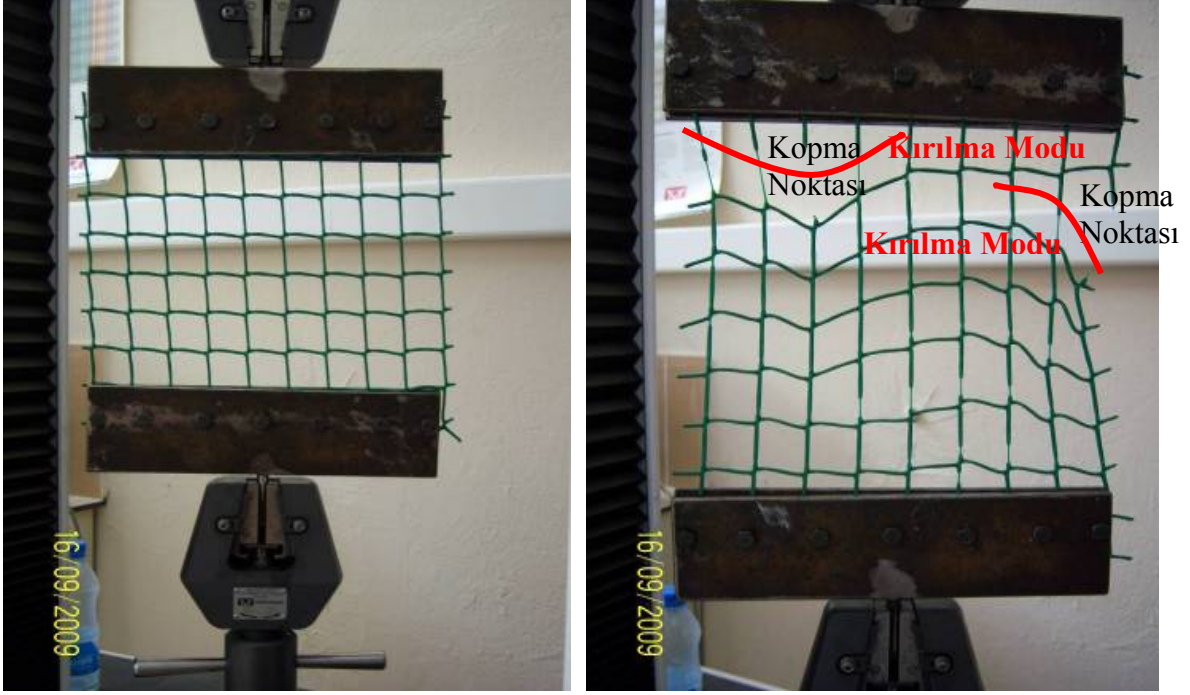
Jeon'un (2002), çalışmasında da geogridlere uygulanan çekme testlerinde birim genişlik için 9,7 kN/m'lik bir çekme değeri elde edilmesine rağmen 4 adet birleşim yeri kullanılan geogrid türü için ise bu değer 8,9 kN/m olarak hesaplanmıştır. Burada da görülmüştür ki hem pullout hem de çekme testlerinde geogridin çekmeye tabi tutulan genişliğinde geogridin enlem ve boylam elemanlarının birleşim yeri sayısının önemi büyüktür. Ne kadar fazla göz açıklığı ve birleşim yerine çekme uygulanıyorsa elde edilen mukavemet değeri o kadar fazla olacaktır.



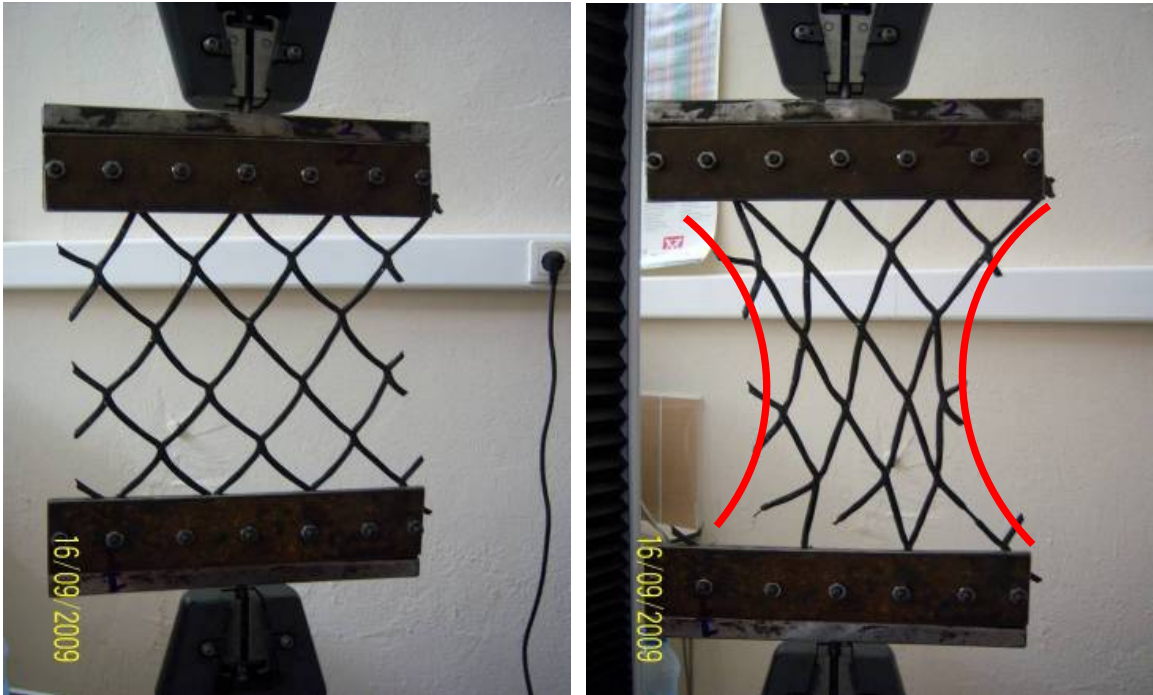
Şekil 79. 5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu



Şekil 80. 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu



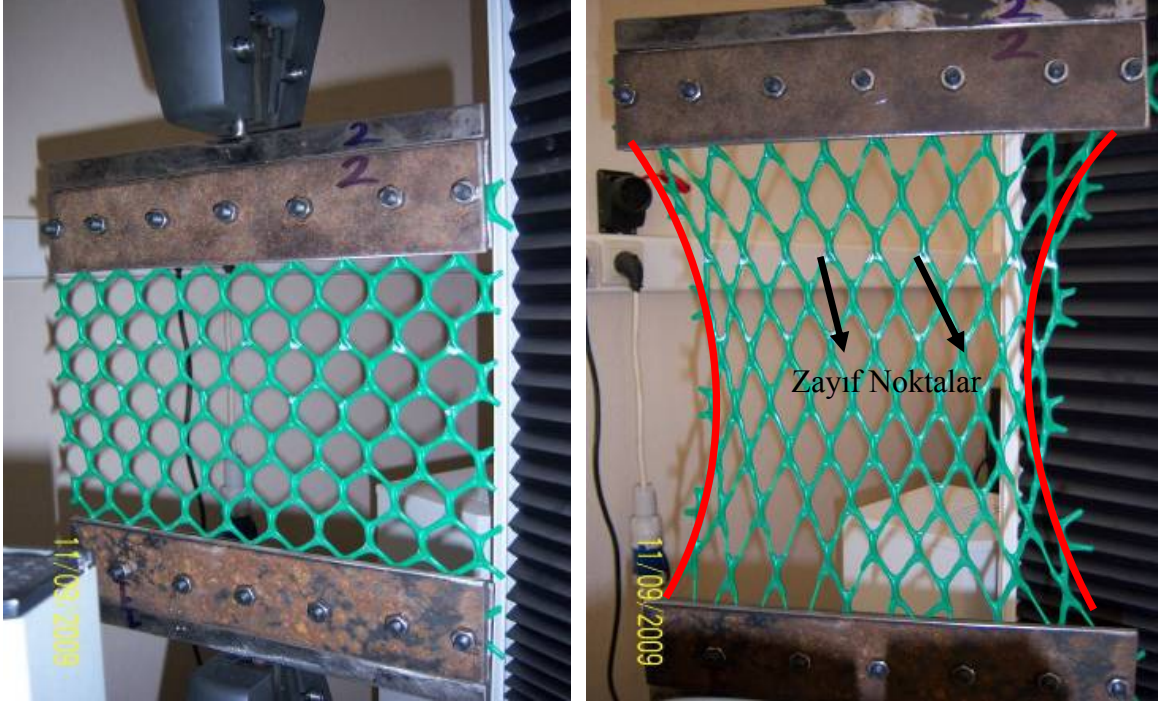
Şekil 81. 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu



Şekil 82. Çapraz göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu

Not: Çapraz göz açıklıklı geogrid türünde kopmalar orta kısımlarda değil geogridle çelik plakanın birleşim yerinde gözlenmiştir. Bunun sebebi çapraz göz açıklıklı geogrid türünün enlem ve boylam elemanlara sahip olmamasından kaynaklanabilir. Yani geogrid

elemanları çekme doğrultusu ile 45° açı yaptığından geogrid çekmeye karşı orta kısımdan incelerek uzayan bir hal almaktadır.



Şekil 83. Petek göz açıklıklı geogridin deney öncesi ve deney sonrası durumu

Şekil 79-83'e göre kopma şekilleri irdelenecek olursa; kare göz açıklıklı geogrid türlerinde (5 cm x 5 cm, 4 cm x 4 cm ve 3 cm x 3 cm) çekme doğrultusunda geogrid elemanların kopmasıyla numunenin fazla bir şekil değişikliğine uğramadığı görülmüştür. Ancak çapraz ve petek göz açıklıklı geogridlerde ise geogrid elemanların kopması sonucu dairesel bir yapı oluşmuştur. Yani alt ve üstten çekme aparatına tutturulmuş olan geogrid ortasına doğru incelen bir şekil göstermiştir (Şekil 82-83).

Bu durum, çapraz ve petek göz açıklıklı geogridlerin sahip oldukları şekil itibariyle kareden farklı olmaları yani çekme doğrultusunda kenarlarının boş olmasıyla açıklanabilir. Kare göz açıklıklıda kenarlarda boylu boyunca geogrid boylam elemanı bulunduğundan çekmeye karşı şekil korunmuştur. Ancak özellikle çapraz göz açıklıklı geogridde çekme etkisiyle ortaya doğru daralan bir yapı görülmüştür.

Tablo 16. Çekme testlerinde nihai kopmadaki yük ve ilk kopmanın meydana geldiği yük değerleri

Göz Açıklığına Göre Geogrid Türleri	Deney No	Geogridin Mukavemetini Tamamen Kaybettiği Toplam Yük Miktarı (kN/m)	Ortalama (kN/m)	Geogridin Çekme Sırasında İlk Kopmaya Başladığı Noktadaki Yük Miktarı (kN/m)	Ortalama (kN/m)
5 cm x 5 cm	1	5,64	5,72	0,72	3,09
	2	5,76		3,48	
	3	5,76		5,08	
4 cm x 4 cm	1	2,8	2,7	2,16	1,78
	2	2,72		1,12	
	3	2,64		2,08	
3 cm x 3 cm	1	3,52	3,42	2,64	2,41
	2	3,32		2,84	
Petek	1	5,91	5,82	3,4	4,26
	2	5,76		5,6	
Çapraz	1	3,6	4,64	3,76	3,9
	2	5,6		3,88	
	3	4,72		4,08	

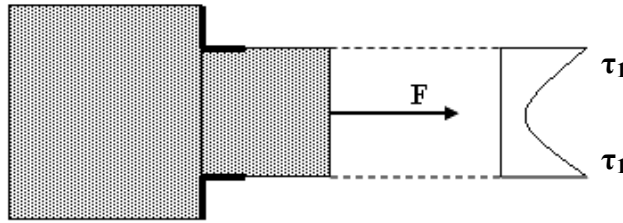
Tablo 16 incelendiğinde ilk kopmadaki yük değerlerinin nihai kopmadaki yük değerlerinden daha küçük olduğu görülür. Şekil 79-83 incelendiğinde geogrid numunelerin çekme aparatı (clamp) ile cihaza bağlandığı görülmektedir. Testlere başlanıp geogride çekme uygulandığında toplam çekme mukavemeti, geogrid tamamen mukavemetini kaybettiği andaki değeridir ve bu andaki yük miktarı maksimum çekme yüküdür. Ancak geogride çekme uygulandığında geogrid boylam ve enlem elemanlardan herhangi biri ya da birkaçının mukavemetini kaybederek kopmaya başladığı anda ki yük miktarı Tablo 16'da son sütunda ortalama olarak verilen yük değeridir. İlk kopma anındaki ve nihai kopmadaki yük miktarları kıyaslandığında; mukavemetini kaybetmeden en uzun süre dayanım gösteren geogrid türünün petek göz açıklıklı geogrid olduğu görülür (4,26 kN/m). Petek göz açıklıklı geogride ilk kopma meydana geldiği anda taşıyabildiği yük değeri bile 3 cm x 3 cm, 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogridlerin toplam (nihai) yük değerlerinden fazladır (4,26 kN/m > 2,70 ve 3,42 kN/m). O halde çekme testlerine göre ilk kopma anına bakıldığında da yine en iyi dayanımı veren geogrid türü petek göz açıklıklı geogriddir. 5 cm x 5 cm ve çapraz göz açıklıklı geogridler düşük değerlerde kopmasa bile yine de kopma değerleri petek göz açıklıklı geogridten düşüktür. Petek göz açıklıklı geogridin

çekme deneylerindeki performansının diğer türlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

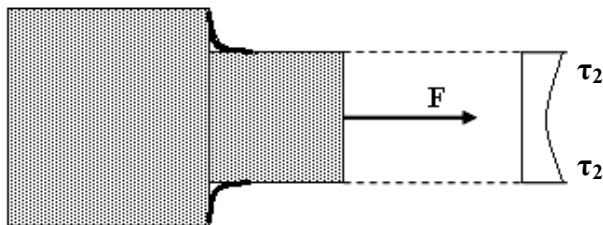
3.9. Geogridlerin Farklı Şekilli Göz Açıklıklarının Geogrid Performansına Etkisinin İrdelenmesi

Çalışmada petek (altıgen) göz açıklıklı geogrid hem pullout hem de çekme testlerinde ideal sonuçlar vermiştir. Bu da petek göz açıklığına sahip geogridlerin altıgen şekilli bir malzeme yapısına sahip olmasından dolayıdır. Altıgen yani daireye benzeyen malzeme yapısı dik açılı köşelere sahip olmadığından bu köşelerde gerilme yığılmaları oluşmamakta ve üzerine gelen yükü her doğrultuya kolayca aktarabilmektedir. Bal peteği şeklindeki hexagonal malzeme yapısında, kenarları birbirine bağlayan iç açı 120° dir.

Kare ve dikdörtgen benzeri malzeme yapılarında ise köşeler dik açılı olduğundan bu köşelerde gerilme yığılmaları oluşmakta ve malzeme bu kısımlardan yırtılarak mukavemetini kaybetmektedir. Şekil 84’te dik açılı ve yuvarlatılmış köşeli yapılarda mukavemet ilişkisi görülmektedir.



(a)

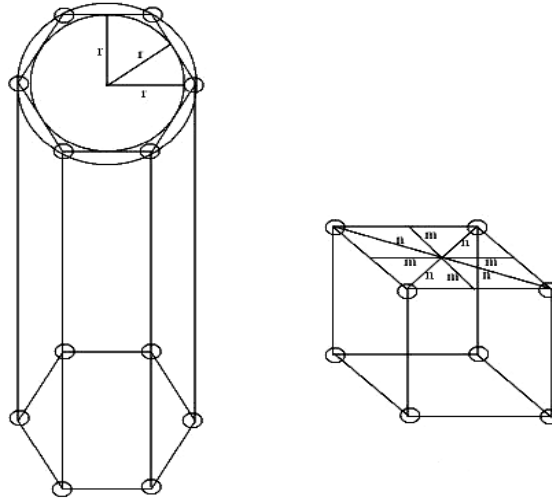


(b)

$$\tau_1 > \tau_2$$

Şekil 84. Elastisite teorisine göre, dik açılı ve yuvarlatılmış köşelere sahip malzemelerde mukavemet farklılıkları

Elastisite teorisine göre en ideal yapı daireye benzeyen ya da dik açılı köşeler içermeyen malzeme yapısıdır. Kare göz açıklıklı geogridler ile petek (hexagonal) göz açıklıklı geogridlerin kayma mukavemeti ve çekme davranışı bakımından farklılığı Malzeme Bilimi'ne göre de araştırılmıştır. Malzeme yapısı olarak kübik yapı 8 bağdan oluşmakta olup koordinasyon sayısı 8'dir. Ancak hexagonal malzeme yapısını bir arada tutan bağ sayısı ise 12'dir. Yani koordinasyon sayısı 12'dir. Bu yönüyle bakıldığında kare yapının merkezinden kenarlarına olan uzaklığı ile köşelerine olan uzaklığı farklılık göstermektedir. Ancak hexagonal yapıda merkez kenar ve köşelere eşit uzaklıktadır (Şekil 85). Bu tespitlerden yola çıkarak petek göz açıklıklı yani hexagonal yapıya sahip geogridlerin kare yapıya sahip geogridlere kıyasla kopmadan daha fazla dayanım göstermesi ve daha fazla deplasman yapmasının malzeme şekil özellikleriyle ilgili olabileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 85. Hexagonal ve kübik (petek ve kare) malzeme bağ yapıları

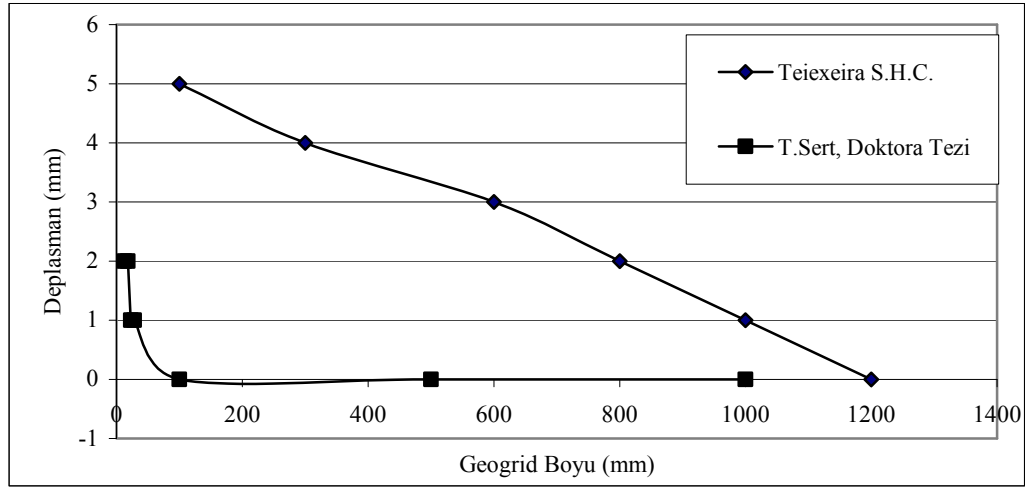
3.10. Daha Önceden Yapılmış Benzer Çalışmalarla Tez Bulgularının Kıyaslanması ve İrdelenmesi

Pullout kutusu dışında meydana gelen çekme mukavemeti kuvvetin geogridin sıkışmış zemin içinde kalan alanına bölünmesi suretiyle elde edilmiştir. Nernheim'in (2004), çalışmasında bu formül pullout kutusu dışındaki geogrid davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Bulunan gerilme değeri kopma anı gerilmesi (rupture strength) dir. Nernheim'in (2004), çalışmasından çıkarılabilecek önemli bir sonuç, geogridle yapılan

deneylerde kullanılan zemin taneleri küçükse pasif direncin, büyükse kenetlenme (interlock) etkisinin fazla olduğudur. Bu konu açıklanacak olursa, küçük taneli sıkıştırılmış zeminde örneğin kil gibi geogrid zemin arasından çekilip çıkarılmaya çalışıldığında iri taneler söz konusu olmadığından ince taneler birbirine sürtünme suretiyle pasif direnç açığa çıkaracaklardır. İri taneli zeminde ise bu taneler geogridin göz açıklıkları arasında penetre edilecek böylece kenetlenme (interlock) etkisi açığa çıkacaktır.

Geomembran süreklilik gösteren bir donatı türü olduğundan çekme kuvvetinin alana oranlandığı bir kayma bağıntısı kutu içinde kayma etkisinin belirlenmesi için kullanılabilir. Ancak geogrid kullanıldığında geogrid malzeme göz açıklıkları sebebiyle süreksizlik arz eden bir yapıda olduğundan dolayı kutu içindeki gerilme davranışını belirlemek için bu bağıntı kullanılmaz, farklı modeller geliştirilmelidir (Nernheim, 2004). Bu sebepten dolayı bu çalışmada kutu içindeki gerilmeyi tanımlamak için matematik model geliştirilmiştir.

Teixeira vd.'nin (2007), çalışmasında önemli sonuçlar büyük ölçekli pullout test aleti ile elde edilmiştir. Ancak yanal ve boylam geogrid elemanların performansları küçük ölçekli pullout test aletinde daha iyi değerlendirilmiştir.



Şekil 86. Geogridin gömülü derinliği boyunca deplasman değişimi

Yukarıdaki grafikte Teixeira vd.'nin (2007), çalışmasında çekme yüzeyinden kutu içine doğru lineer azalan bir deplasman değişimi görülmektedir. Pullout kutusunun ön tarafından 10 cm yatay uzaklıkta 5 mm deplasman gözlemlenmiş, kutu ön yüzünden uzaklaştıkça 35 cm'de 4 mm, 60 cm uzaklıkta 3 mm, 120 cm olan pullout kutusunun en arka kısmında ise 0 (sıfır) deplasman değeri ölçülmüştür. Yani yaklaşık lineer değişen bir azalma söz konusudur. Bu tez çalışmasında ise pullout kutusu içinde çekme yüzeyine en

yakın bölgede sırasıyla 0,2 mm ve 0,1 mm deplasman gözlemlenmiştir. 10 cm uzaklaştıktan sonra ise tüm pullout kutusu boyunca deplasmanlar sıfır olmaktadır.

Bu iki çalışmada görülen deplasmanlar arasındaki fark aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

- Teixeira'nın (2007), çalışmasında kullanmış olduğu geogrid türü çekme mukavemeti yüksek (ortalama 30-40 kN/m) bir malzemedir. Bundan dolayı pullout testinde kutu dışında hemen kopmamakta kutu içine doğru kuvvet aktarmaktadır. Aktarılan bu kuvvet sayesinde de pullout kutusunun uzunluğu boyunca lineer azalan bir deplasman dağılımı görülmüştür.

- Bu tez çalışmasında ise kullanılan geogrid malzemeler daha az çekme mukavemetine sahip (Ortalama 5 kN/m) geogridlerdir. Pullout deneyinde çekmeye başlandığında geogrid malzeme kutu dışında yüksek deplasman yaparak kopmakta, kutu içine pullout kuvvetinin çok az bir kısmı aktarılmaktadır. Bu yüzden kutu içinde çekme yüzeyine yakın bölgede çok az bir deplasman (0,2-0,1 mm) oluşmaktadır. Bu deplasman miktarı 1 m yatay uzunluğa sahip pullout kutusunun ilk 10 cm'lik kısmında oluşmakta, çekme yüzeyinden uzaklaştıkça deplasmanlar sıfır olmaktadır. Geogrid malzeme dayanımının büyük miktarını kutu dışında kaybettiğinden kutu içinde fazla bir kuvvet ve deplasman aktarılamamaktadır.

Teixeira'nın (2007), çalışmasından çıkarılan tespitler:

- Yük hücreleri (Loadcell)'lerden okunmuş olan değerlerin pullout kutusu içinde düzgün dağılım göstermemesi yanal (transverse) elemanların varlığı ile açıklanmaktadır.

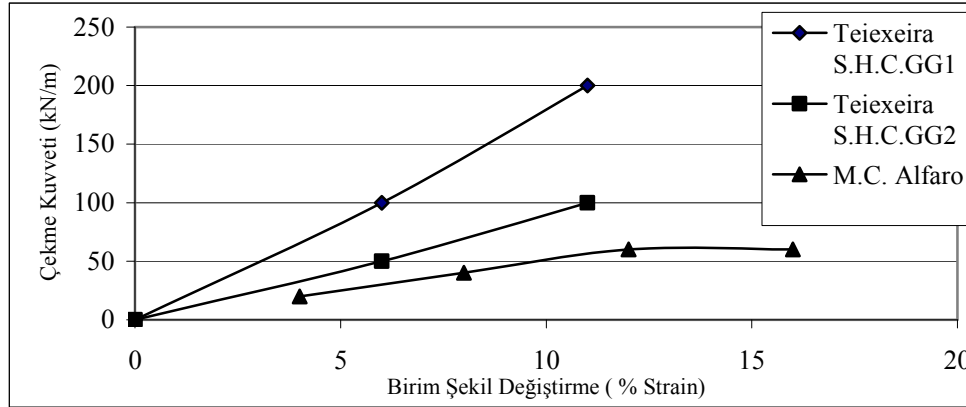
- Yanal elemanlar yokken geogridin boylam elemanları boyunca kutu içinde normal gerilme dağılımında fazla farklılıklar görülmemektedir. Yani düşey basınç dağılımındaki düzensizlikler yanal elemanlardan kaynaklanmaktadır.

- Optimum geogrid göz açıklığı pullout kuvvetini maksimum yapmaktadır. Yanal eleman yoğunluğu optimum göz açıklığının altında olduğunda yani seyrek göz açıklığı durumunda pullout performansı bozulmaktadır. Aynı şekilde fazla olduğu durumda ise zemin pasif direnç oluşturduğundan yine pullout performansı olumsuz etkilenmektedir.

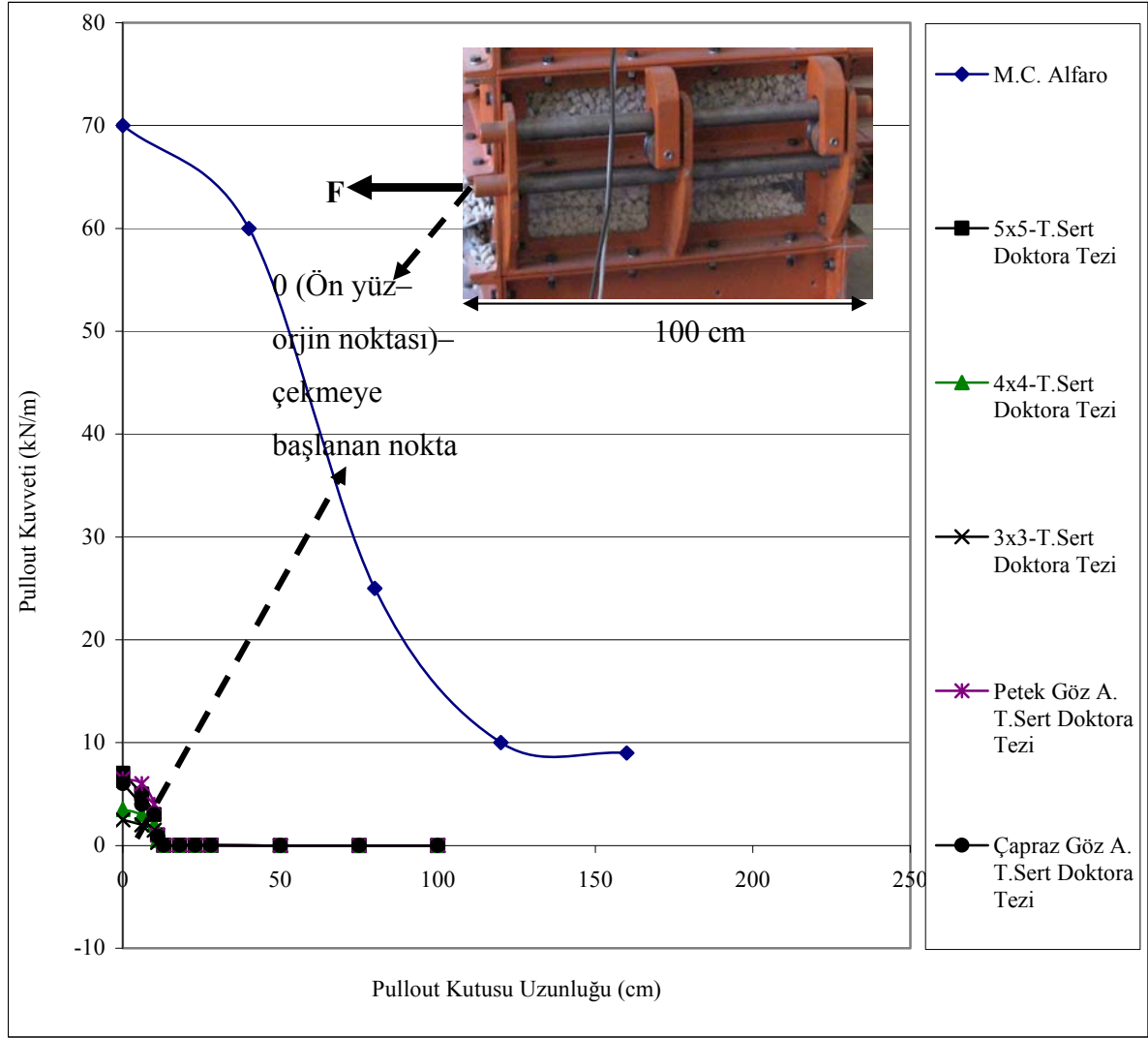
Polimerik geogridlerin pullout direncinde geogridin yanal elemanlarının sık ya da seyrek olması pullout performansını etkilemektedir. Fabrika çıkış mukavemetleri eşit olan iki geogridden göz açıklıkları arası daha sık olan geogrid daha iyi yüzey sürtünmesi sağlarken, göz açıklıkları arası seyrek olan geogrid agrega tanelerini içinde daha iyi penetre edebildiğinden iyi bir kenetlenme göstermektedir.

Teixeira vd.'nin (2007), çalışmasında zeminde oluşan normal gerilme dağılısının geogrid kullanıldığı durumlarda düzensizlik gösterdiğinden söz edilmektedir. Bu tez çalışmasında da bu hususu destekler yönde sonuçlar elde edilmiştir. Yani geogrid seviyesinin 7 cm alt ve 7 cm üst seviyesine yerleştirilen yük ölçerler pullout kutusunun içinde düzgün bir gerilme dağılısı oluşmadığını göstermiştir. Alfaro vd.'nin (1995), çalışmasında bu tez çalışmasına benzemekle beraber, farklı olarak pullout testleri için kullanılan geogrid numunelerin enleri değiştirilmiştir (B=10, 15, 20, 30, 45, 58); 4 farklı normal basınç altında ($\sigma=20, 30, 40, 50 \text{ kN/m}^2$) deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece 24 farklı deney yapılmıştır.

Şekil 88'de pullout kutusu içinde pullout kuvveti değişimi görülmektedir. Orjin noktası, çekme yüzeyini ifade etmektedir. Grafiğin yatay ekseni ise pullout kutusunun uzunluğunu göstermektedir. Alfaro'nun (1995), çalışmasında pullout kutusu uzunluğu 170 cm iken bu tez çalışmasında 100 cm'dir (Grafikteki şekilden de görülmektedir). Tez çalışmasına ait farklı geogridlerle yapılmış deneylerden ve Alfaro'nun (1995), çalışmasından görülebileceği üzere, çekme yüzeyine yakın (yaklaşık 10–15 cm mesafeye kadar) kısımda pullout kuvveti aktarılabilmekte, kutu içerisinde çekme yüzeyinden uzaklaştıkça ise kuvvet iç kısımlara kadar aktarılamamakta ve sıfır olmaktadır.



Şekil 87. Çekme kuvveti- birim şekil değişirme ilişkisi



Şekil 88. Çekme bölgesinde uzaklaştıkça pullout kuvvetinin değişimi

Alfaro'nun (1995) çalışması ile bu tez çalışması kıyaslandığında aşağıdaki irdelemeler yapılabilir:

Her iki çalışmada da çekme yüzeyinden uzaklaştıkça pullout kuvvetinin değişimi incelenmiştir. Grafikte, orjin (0) noktası (Şekil üzerinde kesikli oklar ile gösterilen noktalar) pullout kutusunun ön kısmını göstermektedir. Alfaro'nun (1995) çalışmasında pullout kutusunun yatay uzunluğu 170 cm, buradaki tez çalışmasında ise 100 cm'dir. Alfaro'nun (1995) çalışmasında çekme yüzeyinin başlangıcında yani kutu dışında çekme 70 kN/m iken bu tez çalışmasındaki 5 farklı göz açıklığında kullanılan geogridlerin çekme kuvveti ortalaması 5 kN/m'dir. Yine Alfaro'nun çalışmasında, çekme yüzeyinden

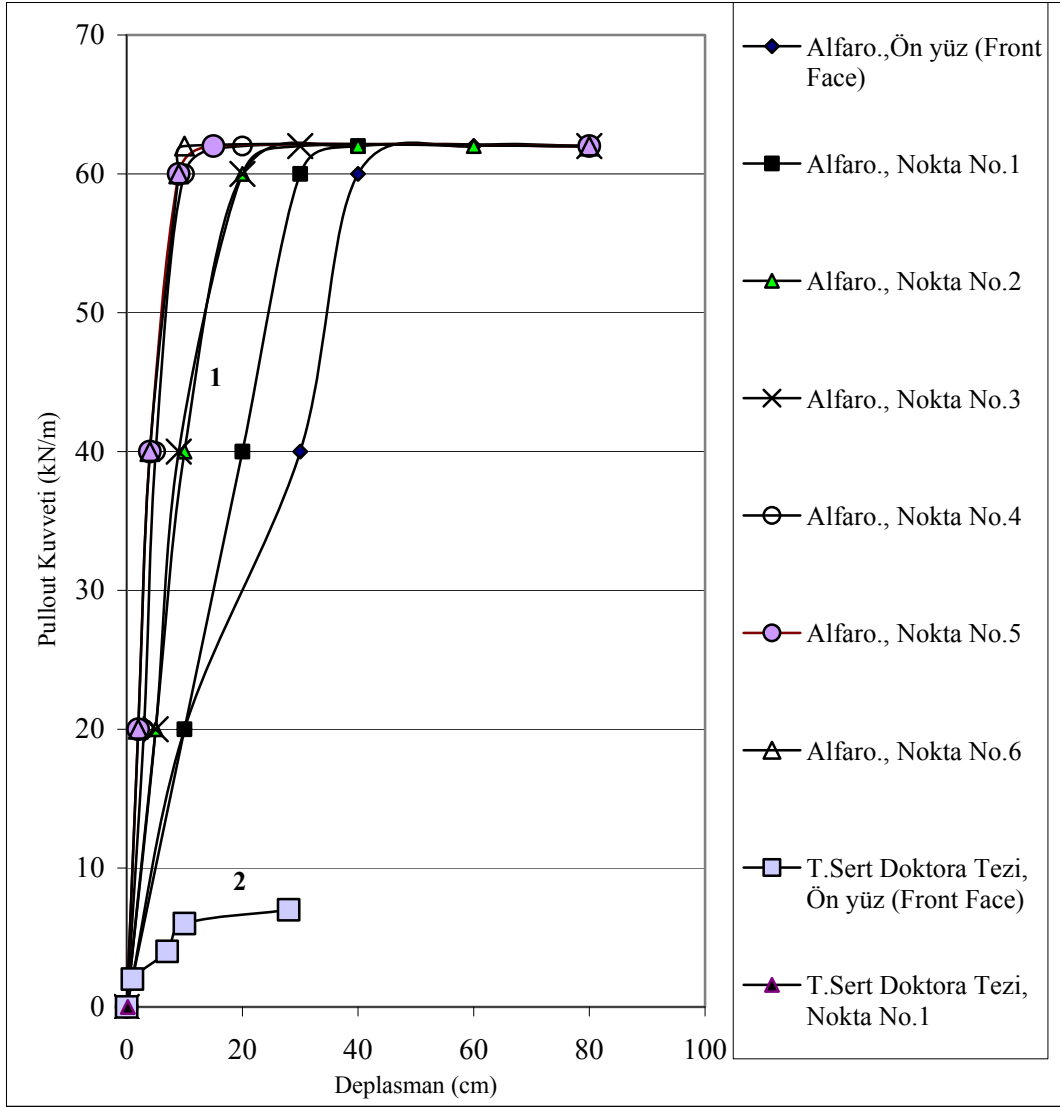
uzaklaştıkça pullout kuvvetinin etkisi azalmaktadır. Ancak kutunun çekme yüzeyine en uzak bölgesinde bile bu etki sıfır olmamaktadır, 9-10 kN/m pullout etkisi gözlenmektedir. Bu tez çalışmasında ise pullout kutusunun ön tarafında yaklaşık 5 kN/m kadar pullout kuvveti görülmekle beraber çekme yüzeyinden uzaklaştıkça bu etki sıfır olmaktadır. Yani kutu içine çok az kuvvet aktarılmaktadır.

İki çalışma arasında gözlemlenen bu farkın en büyük sebebi kullanılan geogrid malzemelerin üretim farklılığıdır. Alfaro'nun (1995) çalışmasında daha mukavemetli, dayanımı yüksek bir geogrid malzeme kullanılmıştır. Bu nedenle geogridin hem kutu dışındaki çekme kuvveti yüksektir ve hem de bu kuvvetin kutu içinde geogridin uzunluğu boyunca iletilmesi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan geogrid malzeme çalışmada karşılaşılan maddi kısıtlamalardan ötürü çok dayanımlı temin edilememiştir. Ancak yine de iki çalışma kıyaslandığında yukarıdaki grafikten anlaşıldığı üzere geogrid dayanımları farklı olsa da çizilmiş olan eğrilerin yönelimleri benzerdir. Her iki eğri, çekme yüzeyinin başlangıcında yani pullout kutusu dışında maksimum değer almaktadır; ancak kutu içinde sıkıştırılmış zemin arasında bu kuvvet minimum olmakta hatta sıfıra yaklaşan bir dağılım göstermektedir.

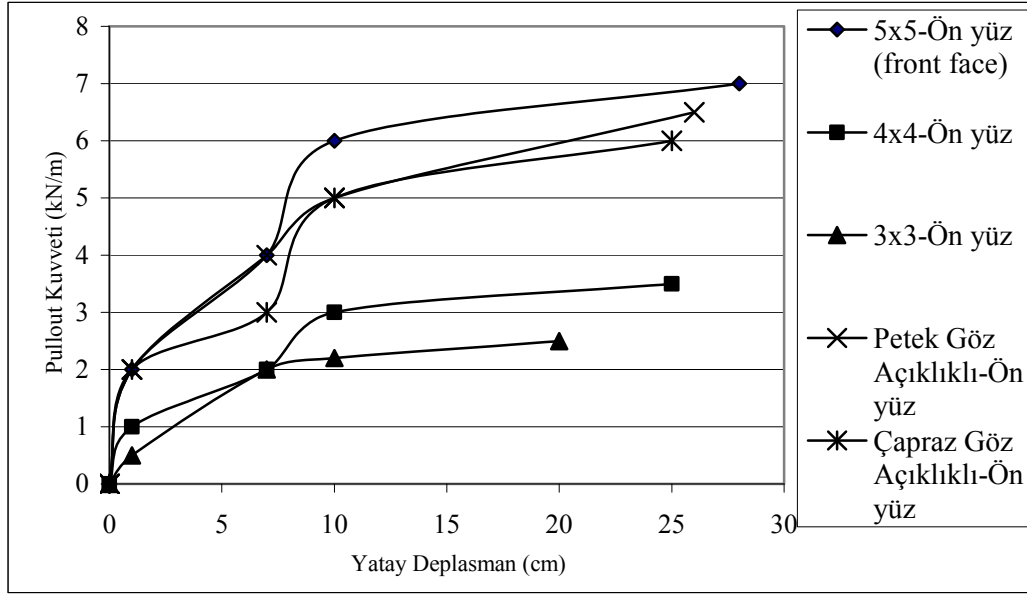
Şekil 89'a göre teze ait ön yüz (çekmeye başlanılan bölge) ve kutu içerisinde belirlenmiş olan noktalara ait grafiklerden 1 ile numaralandırılan eğriler Alfaro'nun (1995) çalışmasına, 2 ile numaralandırılan eğri ise buradaki tez çalışmasına aittir. Alfaro'nun (1995) çalışmasında pullout kuvveti-deplasman eğrilerine göre pullout kutusu dışında oluşan çekme değerleri irdelenecek olursa: Alfaro'nun (1995) çalışmasındaki geogridin (1 No'lu eğri), bu tez çalışmasındaki geogridden (2 No'lu eğri) daha fazla çekme kuvveti gösterdiği ve kopma anına kadar 4 kat fazla deplasman yaptığı görülmektedir. Bu farklılık Alfaro'nun (1995) çalışmasındaki geogridin daha dayanımlı olmasıyla açıklanabilir.

Alfaro'nun (1995) çalışmasındaki 1 No'lu eğri davranışını gösteren geogrid çekmeye daha dayanıklı kaliteli bir malzeme olduğundan 2 No'lu grafikteki geogridden çok fazla pullout kuvveti göstermiştir. Ancak bu tez çalışmasındaki geogrid malzeme literatürle benzer dağılım göstermektedir. Şekil 89'da tez çalışmasında pullout kutusunun ön kısmında yani geogridin kutu dışındaki kısmında pullout kuvveti-yatay deplasman değişimleri görülmektedir.



Şekil 89. Pullout kutusu iç ve dışındaki yük-deplasman ilişkileri

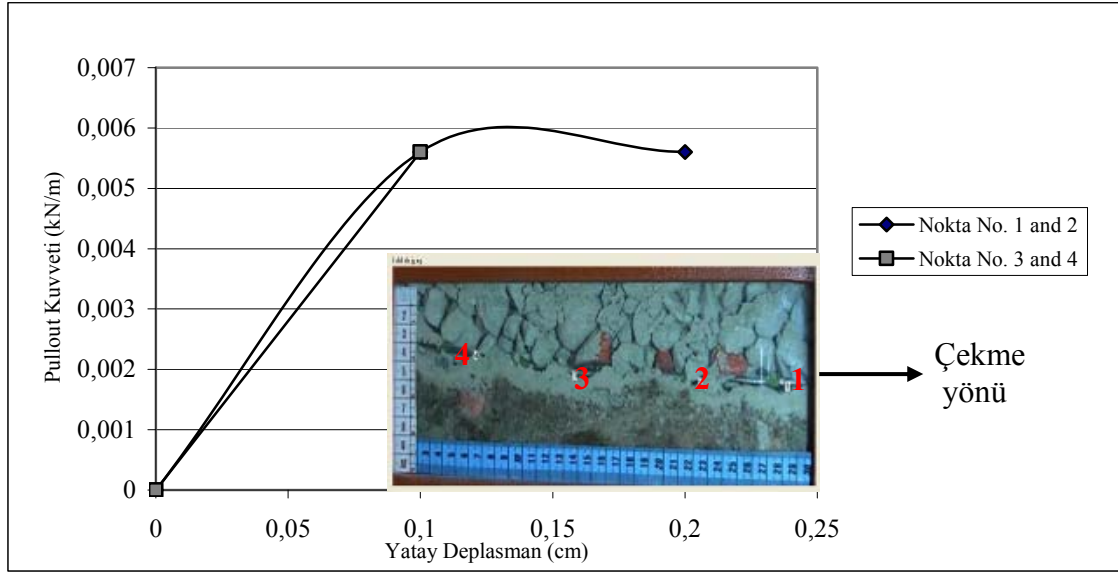
Şekil 90'da gösterilen grafikler ise tez çalışmasında her bir göz açıklığındaki geogridlerin kutu dışında yaptıkları deplasmanları göstermektedir. Bu grafiklerin Şekil 89'da verilmeyip ayrıca başka bir grafikte çizilmesinin sebebi ise Şekil 89'un yorumunda açıklandığı gibi Alfaro'nun (1995) çalışmasında kullanılan geogridlerin buradaki tez çalışmasında kullanılanlardan daha mukavemetli olmasıdır. Bu iki tür çalışmaya ait grafikler aynı grafikte verildiğinde, tez çalışmasına ait farklı 5 göz açıklıklı geogridlerin eğrileri detaylı anlaşılmayıp karışıklık olmaktadır. Şekil 89'da iki çalışmanın ön yüz karşılaştırması genel olarak yapılmış, ayrıntıları Şekil 90'da verilmiştir.



Şekil 90. Pullout kutusu dışında serbest çekme bölgesinde gözlenen çekme kuvvetleri

Şekil 91’de bu tez çalışmasında pullout kutusu içindeki sıkıştırılmış zeminde pullout kuvveti yatay deplasman ilişkisi görülmektedir. Şekil 89’da Alfaro’nun (1995) çalışmasında kutu içinde her bir noktaya ait olan pullout-deplasman değişimleri görülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında kutu içine aktarılan pullout kuvveti ve bu kuvvete bağlı olarak geogridlerin 1., 2., 3. ve 4. noktalarında yapmış oldukları deplasmanlar sıfıra yakın çok küçük değerler olduklarından daha ayrıntılı görülebilmesi için ayrıca Şekil 91’deki grafik çizilmiştir. Şekil 89’daki Alfaro’nun (1995) çalışmasında kutu içine pullout kuvvetinin büyük bir miktarı aktarılmıştır. Bu da geogridin kutu dışında hemen kopmayıp yüksek gerilmeleri karşılamasındandır. Çekme yüzeyine en yakın olan noktanın deplasmanı en fazla, çekme yüzeyinden uzaklaştıkça deplasmanlar da azalmaktadır. Ancak Şekil 91’e göre bu tez çalışmasında ise kullanılan geogrid malzemeler kutu dışında yırtılmakta ve mukavemetinin büyük miktarını kaybetmektedir. Bu durumdan ötürü kutu içine aktarılan kuvvet çok düşük olmaktadır. Şekil 91’de 0,006 kN/m değerindeki kuvvetin kutu içine aktarılması bu sebepten dolayıdır. Şekil 91’de 1., 2., 3. ve 4. noktalar prexiglass pencereden görülen geogrid noktalarını ifade etmektedir. Nokta 1 ve 2 çekme yüzeyine yakın olan, nokta 3 ve 4 ise çekme yüzeyinden uzak olan noktalardır. Şekil 91’deki grafik oluşturulurken; y ekseninde görülen kutu içerisine aktarılan çekme kuvveti değeri matematik modelle hesaplanmıştır. x ekseninde yer alan deplasman değerleri de prexiglass pencerelerden okunmuş olan değerlerdir. Nokta 1 ve 2 çekme

yüzeyine daha yakın olduğundan dolayı geogridin yapmış olduğu deplasman 3 ve 4 No'lu noktalara göre daha fazladır. Ama tüm noktaların deplasmanları ve kutu içine aktarılan pullout kuvveti değerleri yaklaşık eşit olup çok küçük (sıfıra yakın) değerlerdir. Ancak çekme yüzeyinden uzaklaştıkça deplasmanlar da giderek azalmaktadır. Çekme yüzeyinden uzaklaştıkça noktaların yapmış olduğu deplasmanların giderek azalması durumu Alfaro'nun (1995) çalışmasıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 91. Pullout kuvveti-yatay deplasman grafiği

3.11. Pullout Deney Sonuçlarının Nümerik Modellenmesine Ait Bulgular

3.11.1. Nümerik Analizle İlgili Önceki Çalışmalar

Literatürden alınan çeşitli çalışmalardan geogrid-agrega arasındaki kayma davranışını gösteren bağıntılar ve matematik modeller aşağıdaki şekilde irdelenmiştir:

Teixeira vd. (2007), Şekil 92'de görülen geogridin kesitten görüşünde çekme yüzeyinden iç kısımlara doğru olan yük aktarımında aşağıdaki formülü kullanmışlardır.

$$T_{ij} = F_{ij} \cdot \beta \times \left(\frac{R_{lij}}{2} \right) \quad (4)$$

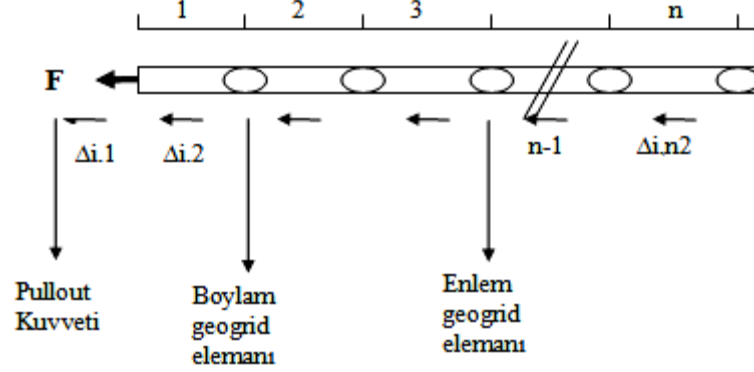
Burada;

T_{ij} : Ortalama Çekme Kuvveti

F_{ij} : Pullout Kuvveti

$R_{li,j}$: Geogridin ilk boylam elemanının pullout direnci

β : 0 ile 1 arasında değişen ampirik bir katsayıyı (Yoğun göz açıklıklı geogridde 1, az yoğun göz açıklıklı geogridde 0) ifade etmektedir.



Şekil 92. Çekme doğrultusundaki geogridde her bir elemanda oluşan birim şekil değiştirmeler (Alfaro vd, 1995)

$$\Delta_{i,2} = \Delta_{i,1} - \Delta_{i,1} \times L_{rib} \quad (5)$$

Bu bağıntıda geogridin çekme bölgesinden uzaklaştıkça geogridin deplasmanının da azaldığı görülmektedir. Önemli bir husus, formülde L_{rib} olan geogridin iki birleşim yeri arasındaki uzunluğun 1 cm'den küçük olmasıdır. Büyük olduğu takdirde bağıntı negatif sonuç vermektedir. Deplasman, negatif değer alamayacağı için de sonuçlar yanlış olacaktır. Bu tez çalışmasında en küçük göz açıklığı 3 cm olduğu için bu formül kullanılmamıştır. Tezde deplasman değerleri görüntü yöntemiyle ve birim şekil değiştirme sensörlerinin ölçümleriyle belirlenmiştir.

$$F_{i,2} = F_{i,1} - \beta \times R_{li,1} - R_{ti,1} \quad (6)$$

Bağıntıda R_{ti} değeri zemin pasif direncidir. Tezde bu değer belirlenemediğinden bu bağıntı kullanılmamıştır.

Sugimoto ve Alagiyawanna (2003), Geogridin pullout davranışını (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) eşitlikleriyle nümerik olarak modellemiştir. Pullout kutusu boyunca deplasman değişimi:

$$U = b(x_0 - x)^a + c(x_0 - x) + d \quad (7)$$

x: Geogridin ön yüzeyinden olan mesafe
a, b, c, d: Katsayılar

Birim Şekil Değişirme (strain) değişimi:

$$\varepsilon = -\left(\frac{\delta u}{\delta x}\right) = a \times b \times (x_0 - x)^{(a-1)} + c \quad (8)$$

Eksenel Çekme Gerilmesi (kN/m²):

$$\sigma_T = \frac{b_f}{(\varepsilon + a_f)} - \left(\frac{b_f}{a_f}\right) \quad (9)$$

Çekme Kuvveti:

$$F_T = A_l \times m \times \sigma_T \quad (10)$$

Geogrid yüzeyi boyunca gerilme değişimi (kN/m²)

$$\tau = -\left(\frac{1}{2} W\right) \times \left(\frac{\delta F_T}{\delta x}\right) \quad (11)$$

δF_T = Çekme kuvvetinin geogrid uzunluğuna oranının türevi

W = Geogrid genişliği (m)

(11) bağıntısında çekme kuvvetinin x'e göre türevi alınarak bu ifadenin geogrid alanına bölünmesiyle gerilme bağıntısı elde edilmiştir. Genel olarak geogrid pullout testlerinde çekme gerilmesinin belirlenmesi çekme kuvvetinin pullout test kutusu alanına bölünmesiyle elde edilmektedir.

O halde ortalama kayma gerilmesi:

$$\tau_{ort} = \frac{F_{p_{max}}}{2A} \quad (12)$$

Tezde de genel olarak kayma gerilmesini belirlemek için literatürdeki çoğu çalışmada benzer olarak yer alan (12) eşitliği kullanılmıştır. Ancak buna ilave olarak tezde pullout kutusu içinde kayma gerilmesi davranışını hesap etmeye yarayan hiperbol model kullanılmıştır.

Sınır gerilmesi:

$$\sigma = \left[\frac{\tau}{(\sigma_v \times \tan \phi)} \right] \quad (13)$$

σ_v : Normal gerilme

ϕ : İçsel sürtünme açısı

Moraci ve Gioffre (2006), sıkıştırılmış zemine gömülü geogridin davranışını modelleyen bağıntılar kullanmışlardır. Bu bağıntılar (14) (15) (16) nolu eşitliklerde görülmektedir.

$$PR = PRS + PRB \quad (14)$$

PR: Geogridin pullout direnci

PRS: Geogridin pullout davranışını belirleyen kayma sürtünmesi bileşeni

PRB: Geogridin pullout davranışını belirleyen kenetlenme bileşeni

$$PRS = 2 \times a_s \times L_r \times \tau \quad (15)$$

a_s : Geogridin katı yüzey alanı

L_r : Geogrid uzunluğu

τ : Arayüz kayma gerilmesi

$$PRB = \left(\frac{L_r}{S} \right) \times a_b \times \sigma_b \times B \quad (16)$$

(L_r/S) : Geogrid içindeki boşluk alanı

σ_b : Geogrid elemanın efektif taşıma gerilmesi

B : Geogrid et kalınlığı

a_b : Yanal elemanların boyutunun tüm alana oranı

Bu çalışma, sonuçlarına bakılarak irdelenecek olursa; geogrid malzemenin davranışının yanıl elemanlarda kenetlenme direnci ve boylam elemanlarda görülen yüzey sürtünmesi olarak ikiye ayrıldığı görülmektedir. Bu iki davranışın toplamı pullout kuvvetini vermektedir. Sonuç göstermiştir ki: yüzeysel sürtünme toplam geogrid pullout direncinin % 20'si kadardır (Moraci ve Gioffre, 2006). Yani kenetlenme direnci geogrid

pullout testlerinde daha fazladır. Yüzey sürtünmesi kenetlenme yanında ihmal edilecek kadar azdır.

Sieira vd., (2008), pullout şartları altında geogridlerin yük ve deplasman transferini araştırmışlardır. Sıkıştırılmış zemin kitlesi içinde oluşan gerilmeler sıkışmış zeminde bozulmaya ve boylam elemanlarda kopma-deformasyonlara sebep olur. Sonuçta deplasman ve birim şekil değiştirmeler geogridin uzunluğu boyunca non-lineer bir azalma gösterir. Aynı şekilde kayma gerilmeleri de benzer bir azalma gösterir. Çoğu araştırmacılar (Beech, 1987; Bergado ve Chai, 1994; Costalonga ve Kuwajima, 1995; Teixeira ve Bueno, 2002) geogrid boyunca zeminle geogrid arasında yük aktarımı olduğunu ancak uzunluk boyunca kayma gerilmesinin azaldığını göstermişlerdir.

Bu çalışmada da hiperbol bir kayma modeli (12) geliştirilmiştir (Sieira vd., 2008). Model kurulurken 2 temel mekanizma üzerinde çalışılmıştır.

1. si: Geogridin alt ve üst yüzeylerindeki kayma gerilmeleri
2. si: Enlem elemanlar arasındaki kenetlenme direncidir.

Geliştirilen hesaplama yönteminde; yanal geogrid elemanlarına karşı oluşan pasif direnç ile boylam elemanların deformasyonlarını veren katsayılar kullanılmıştır. Geogrid boyunca kayma mukavemeti değişimi sadece gerilme hallerine bağlı olmayıp aynı zamanda geogridin esnekliğine ve boylam-enlem elemanların yük aktarma kapasitesine bağlıdır. Çalışmanın önemli sonuçlarından birisi, geogridin yanal elemanlarında görülen kenetlenme direnci üzerinde göz açıklığı şekillerinin etkisinin önemli olduğudur. Sieira vd. (2008), çalışmasının sonucunda görülmüştür ki; geogrid göz açıklığının kare ya da dikdörtgen olması yuvarlak olmasına kıyasla gerilmeleri % 20 artırmaktadır.

$$\tau = \beta \times \left[\frac{dh}{(A+B \times dh)} \right] \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\tau_{sg}}{\tau_s} \quad (18)$$

Eşitlik (17)'de β , geogrid varken zemin-geogrid arası gözlenen kayma gerilmelerinin geogrid yokken sadece zeminde gözlenen kayma gerilmesine oranlanmasıyla bulunan değerdir. Literatürde genellikle bu değer 1,5 olarak kabul edildiği için tezde de aynı değer kullanılmıştır.

dh: Yatay birim şekil değiştirme
A ve B: Hiperbolik parametreler

Kayma gerilmesi bağıntısı (12) pullout makalelerini kapsayan literatürde yer almaktadır. Ama bu denklem pullout kutusu içinde oluşan kayma gerilmelerini karşılamada yetersiz kalmaktadır. Yani çekme aparatına bağlı geogrid çekildiği zaman kutu dışında yırtılmaların olduğu, pullout kutusu içine gerilmenin çok az bir kısmının aktarıldığı deneysel çalışmalarda gözlenmiştir. (17) No'lu eşitlikte ise; kayma gerilmesi bağıntısına göre deney sonuçlarından elde edilmiş kayma-deplasman noktaları belirlenir. Bu noktalardan geçirilecek en uygun hiperbol eğrileri çizilir. Bu çizilen eğri eğer bir hiperbol tanımlıyorsa kayma-deplasman davranışını gösteren a ve b katsayıları belirlenir ve buna göre (17). eşitlikte yerine konularak uygun model çıkarılır.

Ju vd., benzer hiperbolik fonksiyon kullanarak donatılı zeminlerin pullout davranışını modellemişlerdir.

$$P_d = \frac{\delta}{(m+n\delta)} \quad (19)$$

P_d : Pullout kuvveti

δ : Yatay deplasman

m, n: Hiperbolik parametreler

Sieira vd. (2008), çalışmasındaki (19) nolu eşitliği kayma gerilmelerini belirlemek için kullanmaktayken Ju vd. ise çalışmasında bu eşitliği pullout kuvveti-yatay deplasman verilerine göre çekme kuvvetinin pullout kutusu içindeki değerini belirlemede kullanmıştır. Hiperbolik model kullanmak birkaç çalışmaya mahsus olmayıp, literatürde genel olarak pullout eğrisinin davranışını tahmin etmek için kullanılan bir nümerik analiz yöntemidir.

Mohiuddin (2003), çalışmasında pullout kayma mukavemetini belirlerken pullout kayma bağıntısını (12) kullanmıştır. Bu çalışmada da yine diğer çalışmaları destekleyici yönde toplam pullout kuvvetinin yüzeysel sürtünme ve kenetlenme kuvvetinden oluştuğu ifade edilmektedir. Sonuçta çalışmada pullout kutusu içine doğru geogrid uzunluğu boyunca kayma gerilmesi ve deplasmanların azaldığı gösterilmiştir.

3.11.2. Pullout Testlerine Geliştirilen Hiperbolik Model ve Modelin Sayısal Çözümü

3.11.2.1. Kayma Mukavemeti Deney Sonuçlarının Modellenmesi

Kayma gerilmesi-deplasman grafikleri çizildikten sonra bu grafiklerin geçtiği noktalar MATLAB 7.7.0 programında yerine konulup hiperbol denklemin çözümü yapılmış ve a, b katsayıları bulunmuştur. Bu katsayılar (17) ve (19) bağıntılarında kullanılarak çözüm yapılmış ve pullout test kutusu içinde her bir deney için kayma mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Her bir deneye ait kayma gerilmesi-deplasman değerleri 3. Bölümdeki Bulgular ve İrdeleme kısmında detaylı olarak verilen kayma mukavemeti-deplasman grafiklerindeki değerler kullanılarak ve bu değerler denkleme çözülerek sonuca ulaşılmıştır. Merkezil hiperbol denkleminde lineerleştirme yapılmış ve nonlineer sayısal çözümlene yöntemiyle işleme aşağıdaki şekilde devam edilmiştir:

Amaç Fonksiyonunun 2. dereceden türevleri:

$$\frac{\delta}{\delta b} \times \left[\frac{\delta \text{Amaç}}{\delta b} \right] = \frac{\delta}{\delta b} \times \left[-2 \left(\frac{y^2}{b^2} \right) \left[\left(\frac{y^2}{b} \right) - \left(\frac{x^2}{a} \right) - 1 \right] \right] \quad (20)$$

Amaç fonksiyonunun b' ye göre 2. türevi:

$$\left(\frac{\delta^2 \text{Amaç}}{\delta b^2} \right) = \frac{(4b \times y^2)}{b^4} \times \left[\left(\frac{y^2}{b} \right) - \left(\frac{x^2}{a} \right) - 1 \right] - 2 \times \left(\frac{y^2}{b^2} \right) \times \left[- \left(\frac{y^2}{b^2} \right) \right] \quad (21)$$

$$\left(\frac{\delta}{\delta a} \right) \left[\frac{\delta \text{Amaç}}{\delta b} \right] = \left(\frac{\delta}{\delta a} \right) \left[-2 \times \left(\frac{y^2}{b^2} \right) \left[\left(\frac{y^2}{b} \right) - \left(\frac{x^2}{a} \right) - 1 \right] \right] \quad (22)$$

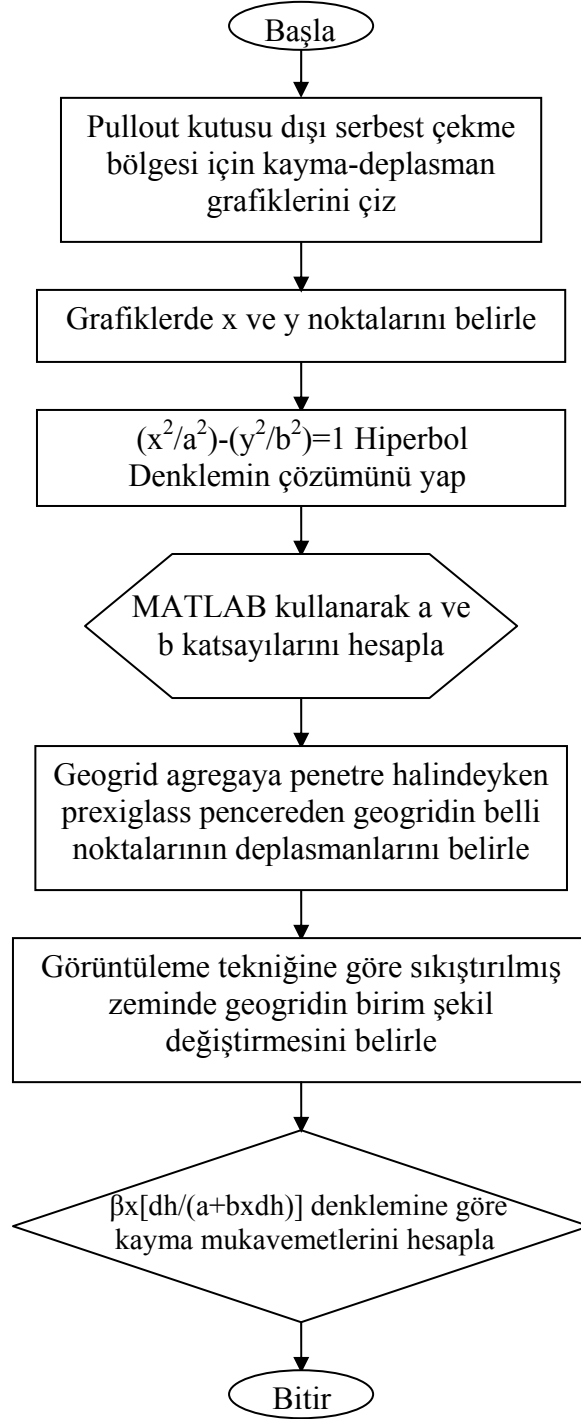
$$\left(\frac{\delta^2 \text{Amaç}}{\delta a \times \delta b} \right) = -2 \left[\left(\frac{y^2}{b^2} \right) \left(\frac{x^2}{a^2} \right) \right] \quad (23)$$

$$\left(\frac{\delta}{\delta a} \right) \left[\frac{\delta \text{Amaç}}{\delta a} \right] = \left(\frac{\delta}{\delta a} \right) \left[-2 \times \left(\frac{x^2}{a^2} \right) \left[\left(\frac{y^2}{b} \right) - \left(\frac{x^2}{a} \right) - 1 \right] \right] \quad (24)$$

Amaç fonksiyonunun a' ye göre 2. türevi:

$$\left(\frac{\delta^2 \text{Amaç}}{\delta a^2} \right) = \frac{(4a \times x^2)}{\left[a^4 \times \left[\left(\frac{y^2}{b} \right) - \left(\frac{x^2}{a} \right) - 1 \right] - 2 \times \left(\frac{x^2}{a^2} \right) \times \left[- \left(\frac{x^2}{a^2} \right) \right] \right]} \quad (25)$$

Şekil 93'te kutu içindeki kayma davranışının modellendiği programın akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 93. Hazırlanan programın genel akış diyagramı

Sayısal çözümlemelerde hiperbol fonksiyonunun a ve b katsayılarına göre 2. dereceden türevleri alınarak türev fonksiyonları elde edilmiştir. Matematiksel ifadenin MATLAB

programında yazılmış şekli yani sayısal analizlerin MATLAB çözümü 7. bölümdeki Ekler kısmında yer almaktadır. Elde edilen türev denklemleri MATLAB programında yazılarak sistem çalıştırılmış a ve b katsayılarına her bir farklı göz açıklığındaki geogridle yapılan farklı deneyler için ulaşılmıştır. MATLAB programında yazılan kısım çalıştırıldığında nonlinear sayısal çözümleme algoritması a ve b'nin karesi değerlerine 20 adımda ulaşılmıştır. MATLAB yazılımından elde edilen katsayılar her bir göz açıklığına sahip geogrid için yapılan 3'er deney için hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu bulunan kayma mukavemeti değerleri Tablo 19'da görülmektedir. Tablo 18'de görülen doğrudan çekme kuvvetinin alana bölünmesiyle elde edilen kayma mukavemeti değerleri, Tablo 17'de görülen ise nümerik modelleme sonucu bulunan zemin-geogrid arayüzündeki kayma mukavemeti bağıntısı ve bu bağıntıdan her deney için bulunan a ve b katsayılarıdır.

Tablo 17. Hiperbol denklemine göre hesaplanan kayma mukavemeti katsayıları

Hiperbolik Eğri Denklemleri a ve b Katsayıları ve Kayma Mukavemeti Bağıntısı				
Geogrid Göz Açıklığı Türleri	Deney No	a Katsayısı	b Katsayısı	Zemin-Geogrid Arayüzündeki Kayma Mukavemeti Bağıntısı
5cmx5cm	1	17.79	15,31	$\beta x [dh / (a + b x dh)]$
	2		15,9	
	3		15,18	
4cmx4cm	1		19,93	
	2		19,05	
	3		19,92	
3cmx3cm	1		17,97	
	2		17,91	
	3		18,01	
Çapraz	1		15,92	
	2		15,92	
	3		17,91	
Petek (Altıgen)	1		12,82	
	2		12,81	
	3		12,81	

Kayma mukavemetleri pullout kutusu içi için ayrıca belirlenmiştir. Belirlenirken Eşitlik (17)'de gerekli olan birim şekil değiştirme (strain) değerleri için pullout kutusu içinde oluşan birim şekil değiştirmeler göz önüne alınmıştır. Pullout kutusunda kenarlarda açılmış olan prexiglass pencerelerden kaydedilmiş görüntüler kullanılmak suretiyle geogrid 4 noktada işaretlenmiştir. Her bir noktanın birim şekil değiştirme değeri Tablo 20'de

görüldüğü üzere hesaplanmıştır. 5. nokta olarak ise kutu içindeki ikinci pencereden ve çekme yüzeyinden 75 cm uzaklıktaki birim şekil değiştirme ölçerden alınmış olan birim şekil değiştirme değeri kullanılmıştır. Birim şekil değiştirme hesaplanırken her bir noktadaki deplasman miktarı pencereden alınan görüntüler yardımıyla hesaplanmıştır. Birim şekil değiştirme bağıntısına göre geogriddeki boyca uzama miktarının geogridin tüm uzunluğuna oranlanmasıyla her bir noktadaki birim şekil değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Buna göre 1. nokta için geogridin gömülü uzunluğu 80 cm, 2. nokta için 75 cm şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 18. Pullout test sonuçlarına göre her bir deneye ait kayma mukavemeti değerleri

	5 cm x 5 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	7,37	5,38	6,23	6,32
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	9,7	7,08	8,2	8,32
	4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	1,90	2,31	2,28	2,16
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	2,5	3,8	3	3,1
	3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	3,04	3,42	3,19	3,22
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	4	4,5	4,2	4,23
	Petek göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	7,08	6,53	5,86	6,49
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	9,3	8,6	7,72	8,54
	Çapraz göz açıklıklı geogrid			
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
Çekme Kuvveti (kN)	4,94	5,32	5,54	5,27
Kayma Mukavemeti (kN/m ²)	6,5	7	7,3	6,94

Tablo 19'daki kayma değerleri yorumlanırsa; yaklaşık olarak tüm geogrid türlerinde eşit mukavemetler ortaya çıktığı görülmektedir. Bu da çekme etkisiyle geogridin kutu dışındaki kısmında kopma ve yırtılmaların oluştuğunu göstermektedir. Tablo 20'de çekme yüzeyinden uzaklaşıldıkça birim şekil değiştirme ve mukavemet değerinde azalma olduğu görülmektedir.

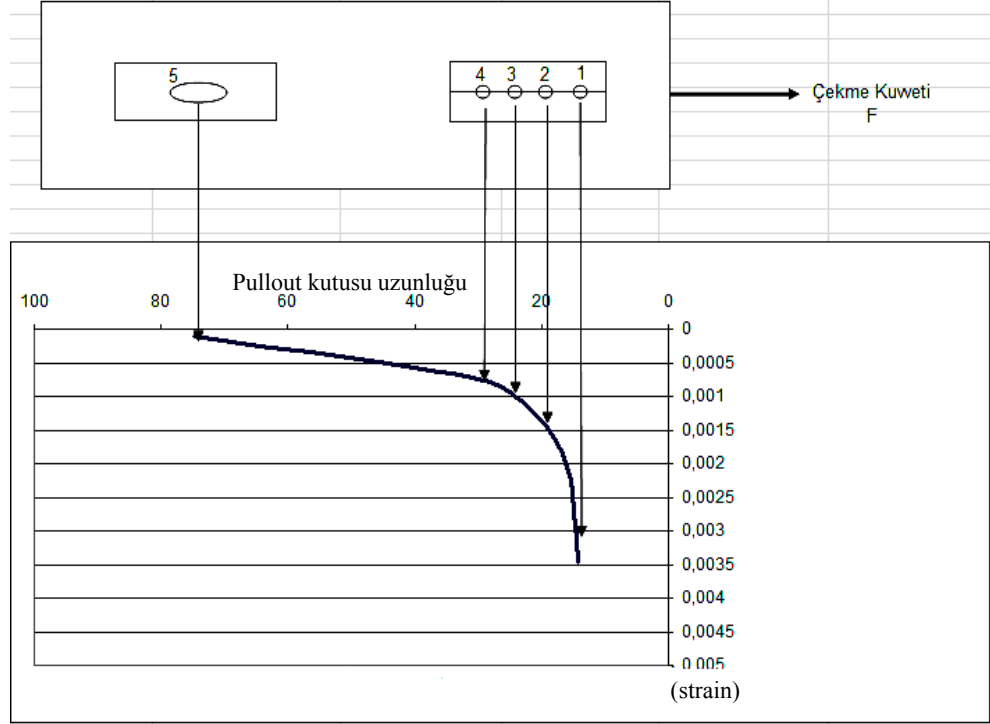
Tablo 19. Pullout kutusu içerisinde her bir deneye ait kayma mukavemeti değerleri

Pullout kutusu içinde gözlemlenen kayma mukavemeti değerleri (kN/m ²)						
Geogrid Türleri	Deney No	1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta	5. Nokta
5cmx5cm	1	32x10 ⁻⁵	21x10 ⁻⁵	11x10 ⁻⁵	5,8x10 ⁻⁵	0,84x10 ⁻⁵
	2					
	3					
4cmx4cm	1	31x10 ⁻⁵	20x10 ⁻⁵	10x10 ⁻⁵	5,5x10 ⁻⁵	0,8x10 ⁻⁵
	2					
	3					
3cmx3cm	1	31x10 ⁻⁵	20x10 ⁻⁵	10x10 ⁻⁵	5,5x10 ⁻⁵	0,8x10 ⁻⁵
	2					
	3					
Petek (Altıgen)	1	33x10 ⁻⁵	22x10 ⁻⁵	12x10 ⁻⁵	6x10 ⁻⁵	0,87x10 ⁻⁵
	2					
	3					
Çapraz	1	33x10 ⁻⁵	22x10 ⁻⁵	12x10 ⁻⁵	6x10 ⁻⁵	0,87x10 ⁻⁵
	2					
	3					

Tablo 20. Prexiglass pencerelerden belirlenmiş 4 nokta için birim şekil değiştirme tablosu

Birim Şekil Değiştirme Miktarı [Tüm geogrid türleri için yaklaşık eşit değer almaktadır]				
1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta	5. Nokta
0.00375	0.00210	0.00140	0.0007	Bu noktada strain değeri görüntüden değilde sensör ölçümünden alınmıştır. 100 mstrain= 0.0001 strain

Tablo 20'ye göre birim şekil değiştirme değeri çekme yüzeyine en yakın noktada 0,00375 iken en uzak noktada 0,0001 olarak kaydedilmiştir. Birim şekil değiştirme değerinin yaklaşık % 3'lük kısmı aktarılmıştır. (% 97 kadar kayıp söz konusudur). Kayma mukavemeti ise; matematik modelden hesaplandığı şekliyle, çekme yüzeyine en yakın noktada 0,00032 kN/m² iken en uzak noktada 0,0000084 kN/m² olarak kaydedilmiştir. Şekil 94'te pencereler şematik olarak çizilmiş ve bu pencerelerden hesaplanmış olan birim şekil değiştirme değerlerine göre bir eğri çizilmiştir (Şekil 94). Çekme yüzeyine yakın kısımlarda birim şekil değiştirmeler daha fazladır ancak çekme bölgesinden uzaklaştıkça değerler azalmaktadır.



Şekil 94. Prexiglass pencerelere göre çizilen birim şekil değiştirme değişimi

Kutu dışında geogridin yırtıldığı bölgede çekme mukavemeti yaklaşık $5-6 \text{ kN/m}^2$ iken kutu içerisinde bu değer yaklaşık $1/10.000$ değerine düşmektedir. Yani pullout kutusu içerisine çekme mukavemetinin yaklaşık 10.000 'de 1 'i aktarılmaktadır. Bu da çok iyi bir sıkıştırma yapıldığından ve geogrid-agrega kenetlenmesinin çok iyi olmasındandır. Böylece düşey plakanın uygulamış olduğu yükün granüler malzemeye eşit dağıtıldığı söylenebilir. Benzer şekilde Moraci vd.'nin (2006), çalışmasında iki farklı yükleme şekline bahsedilmiş olup birisi esnek olan yani yükün agrega yüzeyinin her yerine uygulanabildiği yükleme şeklidir. Diğeri ise rijit yani sadece belli bir noktaya yük uygulanan yükleme şeklidir. Esnek yük uygulanan sistemde rijit yüklü sisteme kıyasla daha büyük bir çekme kuvveti elde edilmiştir. Bu da esnek yükleme şeklinin yükü agrega üzerinde eşit dağıtabildiğinden dolayı çekme kuvvetinin pullout kutusu içerisinde iyi dağıtılabilmesini bu yüzden de kuvvet değeri olarak daha az hissedildiğini göstermektedir. Bu doktora tezinde elde edilen bulgu ve hesaplamalarda da kutu dışındaki çekme kuvveti değerinin kutu içerisine aktarılandan büyük olması bu şekilde açıklanabilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre hiperbolik model kullanarak kayma mukavemeti belirleme yönteminin avantajları şu şekilde irdelenebilir:

- Kuvvetin alana oranlanmasıyla gerilme hesaplama yöntemi genel bir kabul olup

daha çok kutu dışında oluşan gerilme değerini vermektedir. Ancak hiperbolik model kullanarak kayma mukavemeti belirleme yönteminde esas olan kayma-deplasman eğrisinden yola çıkarak deney sonuçlarına en uygun hiperbol eğriyi geçirebilmektedir. Böylece bu eğri denkleminin katsayıları kullanılarak pullout kutusu içerisinde sıkıştırılmış zemindeki kayma mukavemeti değerleri bulunabilmektedir.

- Geogridin pullout kutusu dışında kalan bölgesindeki mukavemet değerlerinin pullout kutusu içerisinde oluşan kayma mukavemeti olarak nitelendirilmesi doğru değildir. Çünkü özellikle bu tez çalışmasında görülmüştür ki geogrid çekme etkisiyle pullout kutusu dışında kopmakta ve kutu içine çekme değerinin çok az bir kısmı aktarılmaktadır. Yine buna bağlı olarak kutu içinde çok düşük bir kayma etkisi meydana gelmektedir. Kuvvetin çok az bir kısmının kutu içerisine aktarıldığı ise kutu içerisinde çok az ya da sıfıra yakın deplasman olmasıyla açıklanabilir. Prexiglass pencerelerden çekme boyunca alınan kayıtlarda göstermiştir ki geogrid kutu içerisinde fazla hareket etmemekte, sıyrılıp çıkmamaktadır.
- Hiperbolik model yöntemi kuvvetin alana oranlandığı kayma mukavemeti-yatay deplasman eğrilerinden alınan noktaların MATLAB programında kullanılarak katsayıların hesaplanması ve kutu içinde kayma gerilmelerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

3.11.2.2. Hiperbol Model Kullanılarak Zemin-Geogrid Arayüzündeki Aderans Faktörünün Belirlenmesi

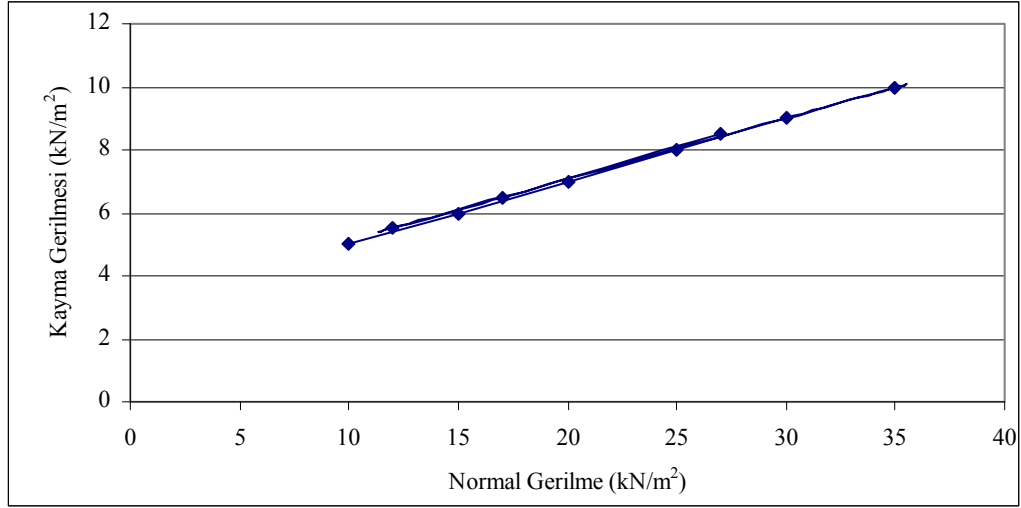
Zemin-geogrid arayüzündeki aderans faktörü pullout deneylerinde kayma davranışını belirlemede son derece önemli bir parametredir (Lopes ve Ladeira, 1996). Arayüzdeki kenetlenme (aderans) ne kadar kuvvetli olursa geogridin zemin arasından sıyrılıp çıkması durumu o kadar az olur. Aderans faktörünün yüksek olması, geogridin agrega tanelerini o kadar iyi penetre ettiğini gösterir ki bu da zemin tanelerinin dağılmasını önlediği için geogridin o kadar iyi bir zemin donatısı olduğu anlamına gelir. Şekil 95'te kayma gerilmesi-normal gerilme dağılışı görülmektedir.

$$f = \frac{\tau}{(\sigma_n \times \tan \phi)} \quad (26)$$

τ : Kayma gerilmesi (kN/m²)

σ_n : Normal gerilme (kN/m²)

ϕ : İçsel Sürtünme Açısı



Şekil 95. Arayüzdeki efektif içsel sürtünme açısını veren normal gerilme-kayma gerilmesi ilişkisi

Pullout deney sonuçlarına göre çizilmiş olan Şekil 95'teki grafiğe göre zemin-geogrid arayüzündeki içsel sürtünme açısı $\theta=12.56^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Tüm deneylerde sabit düşey basınç $\sigma_n=35 \text{ kN/m}^2$ olarak uygulanmıştır. Her bir deney sonucuna göre kayma mukavemeti değerleri de Tablo 18'den alınarak (26). eşitlikten aderans faktörü değerleri hesaplanmıştır. Aderans faktörü belirlenirken bir geogrid türünün birkaç farklı düşey basınç altında göstermiş olduğu gerilme değerleri işaretlenmiş, bu değerler eğrisel olarak birleştirilmiştir. Eğrinin eğimi hesaplanarak ise içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Tablo 21 incelenirse deney sonuçlarına göre en yüksek aderans kuvvetinin 5 cm x 5 cm göz açıklığındaki geogrid=petek göz açıklıklı geogrid=çapraz göz açıklıklı geogridde olduğu gözlenmiştir. 4 cm x 4 cm ve 3 cm x 3 cm göz açıklıklı geogridlerde diğerlerine kıyasla daha düşük bir aderans faktörü ortaya çıkmıştır. Bu durum geogridin göz açıklığının iri olmasıyla agrega tanelerini daha iyi penetre edebildiği şeklinde açıklanabilir.

Deneylerde kullanılan agrega alttemel ve taban zemini malzemesi olup geogrid altına taban zemini, geogrid üstüne ise alttemel malzemesi serilmiştir. Yani iki tabaka arasında donatı olarak kullanılan geogrid doğrudan alttemel malzemesiyle etkileşim içerisinde. Alttemel malzemenin ihtiva ettiği agrega taneleri de çok ince kumlu malzeme olmayıp iri taneli malzemedir. Bu durumda 3 cm x 3 cm ve 4 cm x 4 cm göz açıklıklı geogridler agrega tanelerini yeteri kadar penetre edemeyip iyi bir kenetlenme (aderans) ortaya çıkaramamışlardır. Ancak 5 cm x 5 cm göz açıklığındaki geogrid, petek göz açıklıklı geogrid ve çapraz göz açıklıklı geogridler malzemeleri iyi penetre etmişlerdir. Bu 3 tür

geogridin aderans faktörleri Tablo 21’den de görüldüğü gibi yaklaşık eşit olmasına rağmen yine de büyüklük olarak aralarında bir sıralama yapılacak olursa;

- Petek Göz Açıklıklı Geogrid
- 5 cm x 5 cm Göz Açıklıklı Geogrid
- Çapraz Göz Açıklıklı Geogrid şeklinde sıralama yapılabilir.

Tablo 21. Aderans Faktörü değerleri

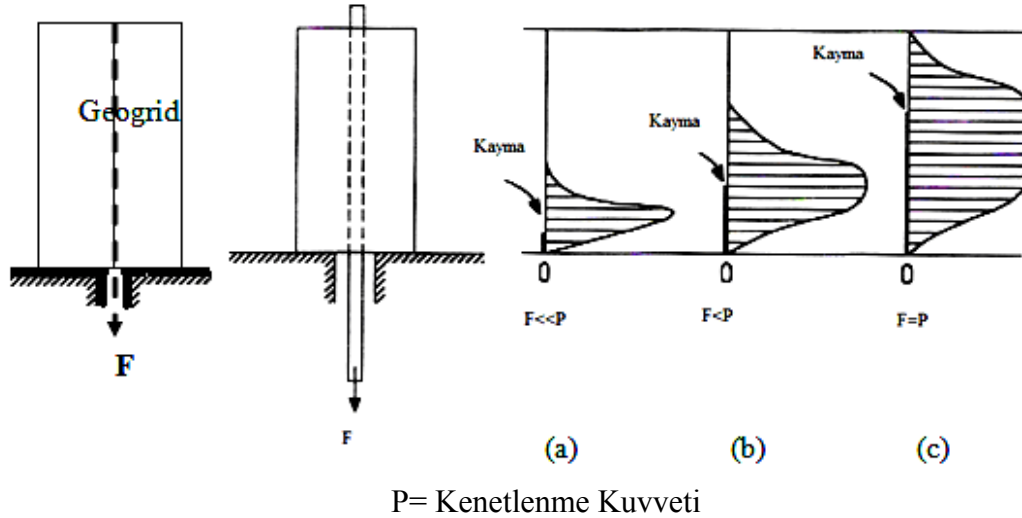
Geogrid Göz Açıklığı Türü	Deney No.	Zemin-Geogrid Arayüzündeki Aderans Faktörü (f) Değerleri
5 cm x 5 cm	1	1,2
	2	1,09
	3	1,36
4 cm x 4 cm	1	0,37
	2	0,52
	3	0,44
3 cm x 3 cm	1	0,56
	2	0,69
	3	0,63
Petek (Altıgen)	1	1,21
	2	1,19
	3	1,17
Çapraz	1	0,97
	2	1,03
	3	1,13

3.11.3. Zemin-Geogrid Arasında Gözlenen Aderansın Beton-Çelik Arasındaki Aderansla İlişkisi

Bu çalışmada pullout testlerinde geogrid malzemenin sıkıştırılmış zemin içerisindeki kenetlenmesi araştırılmıştır. Kenetlenme vasıtasıyla agrega ile geogrid bir bütün olarak hareket etmiş ve geogrid agregaları bir arada tutan donatı gibi çalışmıştır. Sonuçta göz açıklıkları içerisinde agregaları penetre eden geogrid ile iri ve ince agregalar arasında iyi bir aderans oluştuğu gözlenmiştir. Zemin güçlendirmelerinde kullanılan geogrid donatı ile zemin arasında gözlemlenen kenetlenme (interlock) olayı betonarme beton ile çelik donatı arasında meydana gelen aderans kavramı ile teorik olarak benzerlik göstermektedir. Beton ile çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme eleman gibi çalışabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekmektedir (Ersoy, 1985).

Aderans olayına göre; beton ile donatı arasında bir etkileşim meydana gelir ve bu etki şekil değiştirme etkisidir. Bu şekil değiştirme etkisiyle çelik ile beton arasında gerilme geçişi oluşur. Arada kayma olmadan böyle bir gerilme geçişinin ortaya çıkmasına aderans denir (Celep ve Kumbasar, 2001). Aderans sayesinde iki malzemenin birlikte çalışması sağlanır. Zemin donatısı olarak geogrid kullanıldığında ise geogrid ile zeminin birlikte çalışabilmesi için kenetlenmesi gerekir ki bu durumda geogrid-zemin arasında da aderansın öneminden söz edilebilir.

Genellikle aderansın çelik ile çimento harcı arasındaki kimyasal yapı sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Ama bu kimyasal etkiden çok çekilip çıkarılmaya çalışılan çelikle beton arasındaki sürtünme ve kenetlenmeden dolayı aderans oluşmaktadır (Şekil 96). Benzer şekilde iyi sıkıştırılmış zemin içerisinde geogride çekme uygulandığında geogridle agrega taneleri arasındaki kenetlenmeden ötürü geogrid çok az deplasman yapmakta, buna bağlı olarak sıyrılıp çıkmamaktadır. Bu da geogridle zemin arasında da aderansın varlığını göstermektedir.



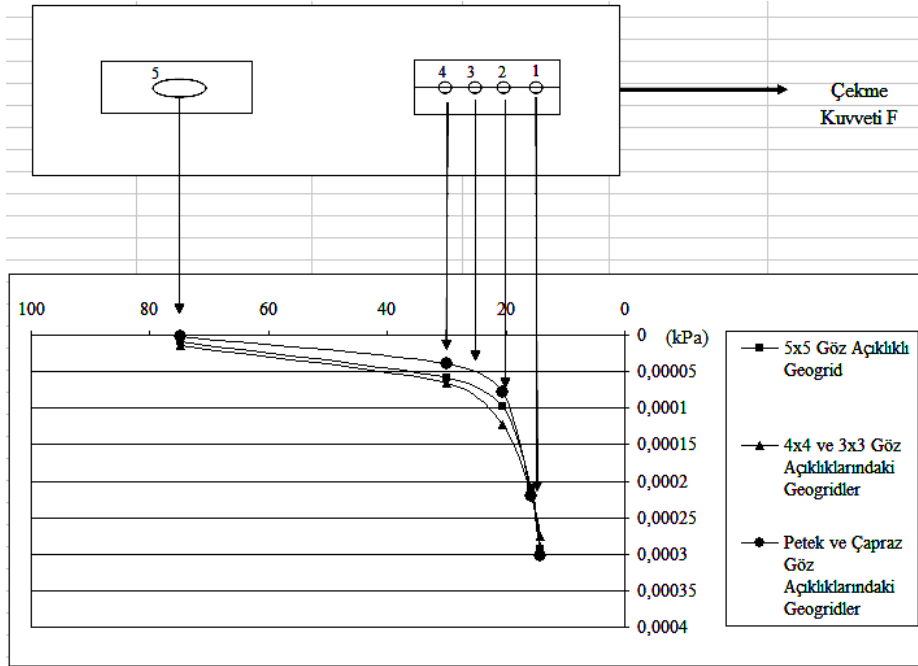
Şekil 96. Çekip-çıkarma deneyinde aderans gerilmelerinin değişimi (Ersoy,1985)

Şekil 96'da Betonarme'de ki çekip çıkarma deneyi olarak bilinen deneye ait gerilme dağılışları görülmektedir. Çekip çıkarma deneyi olarak bilinen işlemde beton içerisine gömülü çelik donatıya uygulanan kuvvet beton kütle içine aderans gerilmeleri yoluyla aktarılır. F, çelik donatıya uygulanan çekme kuvveti P ise donatının kenetlenme kuvvetidir. Şekil 95'te a, b ve c olarak 3 farklı tür kayma durumu görülmektedir. Bu hususlar irdelenecek olursa:

(a) Çeliğe uygulanan çekme kuvveti çeliğin beton kütle içindeki kenetlenmesinden çok küçüktür. Uygulanan F kuvveti çelik çubuğu hareket ettirmemektedir ve çubukta sıyrılma meydana gelmemektedir. Kayma gerilmeleri sadece çubuğun çekme bölgelerine yakın kısımlarda meydana gelmektedir.

(b) Çekme kuvveti (F), kenetlenme kuvvetinden (P) küçük olduğu durumlarda yine çelik donatı beton içinden fazlaca sıyrılıp çıkmamaktadır. Ancak ilk duruma göre kayma gerilmesi sadece çekme bölgesinde olmayıp beton kütleinin yarı derinliğine kadar uzanmaktadır.

(c) Çekme kuvveti (F), kenetlenme kuvvetine (P) yaklaşık eşit olduğu durumda çekme kuvveti çeliğin beton içindeki uzunluğu boyunca aktarılmakta ve çelik donatının uzunluğu boyunca kayma gerilmeleri görülmektedir. Kayma, donatı boyunca üniform bir dağılım göstermektedir. Laboratuvar çalışmalarında gerçekleştirilen pullout deneylerinde kayma dağılımı Şekil 96'da açıklanan (a) maddesi ile benzerlik göstermektedir

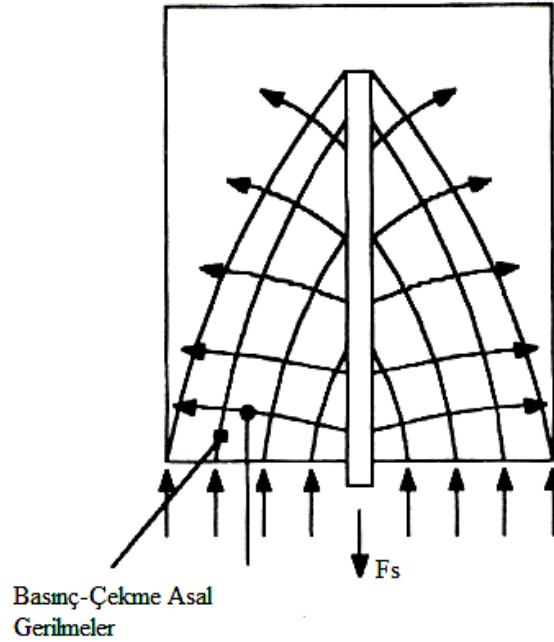


Şekil 97. Çekme Bölgesinden uzaklaşıldıkça kayma mukavemetinin azalması

Şekil 97'de görülen durum, uygulanan çekme kuvveti etkisiyle pullout kutusu içinde sıkışmış halde bulunan agreganın geogrid ile çok iyi kenetlenmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu husus betonarmedeki çekilmeye çalışılan çeliğin bu kuvveti beton kütle içinde yanal doğrultularda betona aktarması teorisiyle açıklanabilir (Şekil 98).

Uygulanan yüke ve donatının kopma dayanımına bağlı olarak aderans gerilmeleri beton kütle içinde daha geniş bir alana yayılır. Beton ile donatı arasında etkileşimi sağlayan ve kayma gerilmesi gibi kabul edilebilecek aderans gerilmelerinin yayılışı Şekil 98’de görülmektedir. Sıyrılma bölgesinin diğer uca erişmesiyle donatıda çıkma meydana gelir (Celep ve Kumbasar, 2001).

Şekil 98’de donatıda meydana gelen gerilme azalması veya çoğalması beton bölgelerinde gerilme geçişi olarak meydana gelir. Eğer aderans dayanımı yüksekse veya çubuğun beton içindeki boyu büyükse çubuk sıyrılmadan kopabilir. Pullout testlerinde de benzer olarak geogrid donatı zemin içinden sıyrılıp çıkmadan kutu dışında kopmalar göstermiştir. Bu durum Şekil 98’deki gibi uygulanan kuvvetin pullout kutusu içinde geogrid tarafından kenetlenme kuvveti yoluyla zemine aktarıldığını göstermektedir. Kayma gerilmelerinin pullout kutusu dışındaki çekme gerilmelerinden çok düşük çıkması da bu gerilmelerin pullout kutusu içindeki sıkıştırılmış agrega içerisine yayıldığını ve pullout kutusunun iç çeperleri tarafından sönmülediğini göstermektedir.



Şekil 98. Çekme kuvveti neticesinde oluşan gerilmelerin yayılışı (Celep ve Kumbasar, 2001)

3.12. Karayolu Taban Zemini Elastisite Modülü (E) Değerlerinin Belirlenmesine Ait Bulgular

3.12.1. Pullout Kutusu İç ve Dışındaki Kayma Mukavemeti Değerleri

Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilen çekme deneyleri sonuçlarına göre geogridler maksimum 6 kN/m olacak şekilde kopma dayanımı göstermiştir. Pullout deney sonuçlarına göre ise iki farklı durumla karşılaşılmıştır:

1. Kutu dışında geogrid davranışı: Yukarıdaki şekilden de görülebileceği gibi geogrid pullout kutusu dışında çekme aparatına bağlı halde çekildiğinde maksimum bir çekme değerinden sonra kopma gözlenmiştir.

2. Kutu içinde geogrid davranışı: Sıkıştırılmış zemin içindeki geogrid davranışı kutu dışındakinden farklılık göstermiştir. Ölçülen kayma gerilmesi değeri kutu dışındaki çekme gerilmesine kıyasla çok küçük (yaklaşık 0) değerdedir.

İlk duruma göre kutu dışındaki çekme mukavemeti değerleri Tablo 22'de görülmektedir. Tablo 22 incelendiğinde geogridlerin maksimum 8,5 kN/m² dayanım gösterdikleri belirlenmiştir. İkinci duruma bakıldığında ise yani geogridlerin kutu içinde kalan kısımlarındaki davranışı ile ilgili olarak hiperbol model oluşturulmuş ve elde edilen hiperbol denklem çözülerek kutu içinde oluşan kayma mukavemetleri belirlenmiştir.

Tablo 22. Kutu dışında oluşan çekme mukavemeti değerleri

	Geogrid Göz Açıklığı Türüne göre Çekme Mukavemetleri (kPa)				
	5cmx5cm	4cmx4cm	3cmx3cm	Petek	Çapraz
1. Deney	9,7	2,5	4	9,3	6,5
2. Deney	7,08	3,8	4,5	8,6	7
3. Deney	8,2	3	4,2	7,72	7,3
Deneylerin Ortalaması	8,32	3,1	4,23	8,54	6,94

Tablo 22'de pullout kutusu dışında yani geogridin kenetlenme aparatına sabitlendiği kesimde gözlenen çekme mukavemetleri, Tablo 23'te ise pullout kutusu içinde sıkıştırılmış zemin arasında geogridde gözlenen kayma mukavemetleri verilmiştir. Tablo 22 ile Tablo 23 kıyaslandığında görülmektedir ki; kutu dışında geogridlerin kopma dayanımları 7-8 kN/m² değerinden sıkıştırılmış zemin içerisinde sıfır değerine düşmektedir.

Tablo 23. Kutu içinde oluşan kayma mukavemeti değerleri

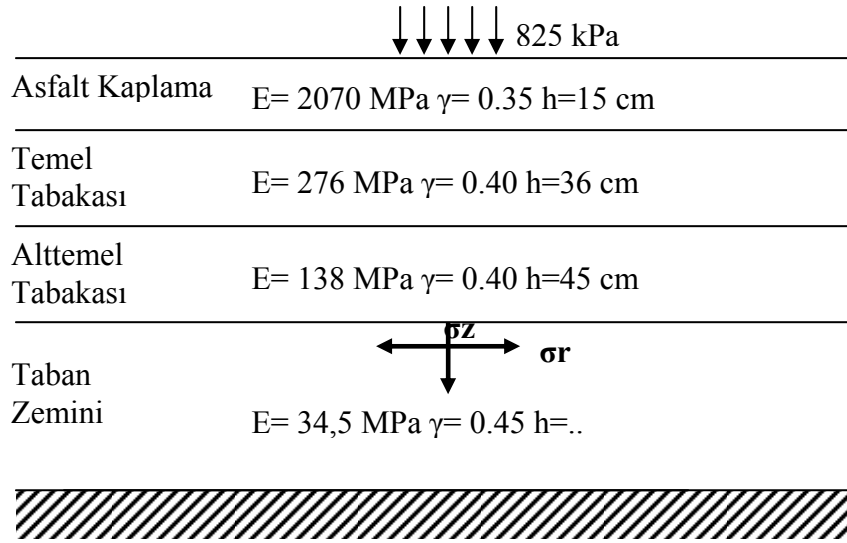
Pullout kutusu içinde hesaplanan kayma mukavemetleri (kPa)						
Geogrid Göz Açıklığı Türleri	Deney No	1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	4. Nokta	5. Nokta
5cmx5cm	1	32x10 ⁻⁵	21x10 ⁻⁵	11x10 ⁻⁵	5,8x10 ⁻⁵	0,84x10 ⁻⁵
	2					
	3					
4cmx4cm	1	31x10 ⁻⁵	20x10 ⁻⁵	10x10 ⁻⁵	5,5x10 ⁻⁵	0,8x10 ⁻⁵
	2					
	3					
3cmx3cm	1	31x10 ⁻⁵	20x10 ⁻⁵	10x10 ⁻⁵	5,5x10 ⁻⁵	0,8x10 ⁻⁵
	2					
	3					
Petek (Altıgen)	1	33x10 ⁻⁵	22x10 ⁻⁵	12x10 ⁻⁵	6x10 ⁻⁵	0,87x10 ⁻⁵
	2					
	3					
Çapraz	1	33x10 ⁻⁵	22x10 ⁻⁵	12x10 ⁻⁵	6x10 ⁻⁵	0,87x10 ⁻⁵
	2					
	3					

Kutu içerisinde mukavemet değerlerinin düşük olması sıkıştırılmış zemin içerisinde deneyin yapıldığı yük ve sıkıştırma koşullarında alttemel ile taban zemini arasında yüksek gerilmeleri karşılayabilen geogridlerin kullanılmasına gerek olmadığı sonucunu ortaya çıkarmıştır. Ama burada dikkat edilecek husus deneylerde uygulanan tabaka kalınlığı, malzeme türü, elastisite modülü ve sıkıştırma miktarı gibi parametrelerin yüksek standartlı yollarda uygulanan şekilde tercih edilmiş olmasından dolayıdır. Yani tabakaların elastisite modülü ve kalınlıkları yeterli olduğundan taban zemininde ekstra olarak geogrid güçlendirmesine gerek görülmeyebilir. Ama zayıf tabakalarda ve yeterli dayanımda inşa edilemeyen yol koşullarında geogrid kullanımı kaçınılmazdır.

Arazi koşullarında karayolu üstü yapı tabakaları için Türkiye standartlarında uygulanan tekerlek basıncı ve elastisite modülü (E) değerleri kullanılarak matematiksel olarak tabakaların radyal gerilme değerleri hesaplanmıştır ve bu hususta literatür araştırması da yapılmıştır. Hesaplamalardan ve literatürden elde edilen sonuç pullout deneylerini destekler niteliktedir. Yani alttemel tabakasının alt kısımlarında ve taban zemininde radyal gerilmeler yani çekme gerilmelerinin sıfıra yakın hatta sıfır olduğu hesaplanmıştır. Aşağıda bu hesaplar daha açık bir şekilde verilmiştir.

3.12.2. Karayolu Tabakalarında Düşey ve Radyal Gerilme Değerlerinin Hesaplanması

Farklı elastisite modülü ve kalınlıklarda tabakalara sahip karayolunda düşey ve radyal gerilmeler Jones (1962) tarafından tasarlanmış hesap yöntemine göre belirlenmiştir. Buna göre, her tabaka için düşey ve radyal gerilmelerin belirlenmesinde aşağıdaki formüller kullanılmıştır. Şekil 99’da tipik karayolu enkesiti görülmektedir.



Şekil 99. Karayolu üstyapı tabakaları elastisite modülü, poisson oranı ve kalınlık bilgileri

$$\sigma_z = q \times \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (27)$$

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{q}{2} \times \left[1 + 2\gamma - \frac{2 \times (1 + \gamma) \times z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (28)$$

Burada σ_z , düşey (normal) gerilmeleri, σ_r ise radyal yani yatay yöndeki çekme gerilmelerini göstermektedir. Tekerlek basıncı olarak arazi çalışmalarında yol yüzeyine gelen kamyon lastik basıncı olan 825 kPa değeri kullanılmıştır. Kaplama yüzeyine etkiyen tekerlek basıncı etkisiyle alt tabakalarda düşey ve radyal gerilmeler oluşur. Formülasyonlara göre her tabaka için gerilmeler hesaplanmış ve Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 24. Her bir tabakada hesaplanan kayma gerilmesi değerleri

	Tabakalarda Gözlenen Düşey ve Radyal Gerilmeler (MPa)			
	Asfalt Kaplama	Temel	Alttemel	Taban Zemini (Subgrade)
σ_r	0,052	0,002	0,0011	0
σ_z	0,440	0,103	0,072	0,059

Hesaplamalar göstermiştir ki alt tabakalara doğru gidildikçe hem düşey gerilmeler ve hem de radyal gerilmeler azalma göstermektedir. Yukarıdaki özelliklere sahip karayolunda alttemel ve taban zemini tabakalarında radyal gerilmelerin daha da azalarak sıfır olduğu görülmektedir. Bu durum böyle yüksek standartlara ve kalın üstyapıya sahip karayolunda özellikle alttemel ve taban zemininde çekme gerilmeleri görülmediğini yani yanal olarak alt tabakalarda kayma ve deformasyonlar olmadığını göstermektedir. Hesaplamalarla bulunan bu sonuç pullout deneylerinden elde edilmiş olan sonuç ile paralel çıkmıştır. Tablo 24 incelendiğinde deneylerde de sıkıştırılmış zemin içinde yani taban zemininde gözlemlenen kayma mukavemeti değerlerinin yaklaşık sıfır olduğu görülmektedir.

Wu (2007), tarafından yapılmış olan çalışmalar, bu tezde yapılan pullout deneylerini ve Jones (1962) tarafından öngörülen hesap yöntemine göre bulunmuş olan sonuçları destekler niteliktedir. Wu (2007), çalışmasında asfalt kaplama, temel ve alttemel tabakalarından oluşan karayoluna 21000 kgf ve 26000 kgf düşey yükler uygulamıştır. 21000 kgf temas yükü uygulanan durumda alttemel ile taban zemini arasında 3-3,5 kPa düşey yük oluştuğu görülmüştür. Bunun yarısı kadarının radyal yük olarak aktarıldığı düşünülürse yaklaşık 1-1,5 kPa kadar radyal gerilme oluştuğu söylenebilir. 21000 kgf temas yükü olarak karayoluna uygulanabilecek aşırı bir yükleme durumda bile 1-1,5 kPa çekme gerilmesi oluştuğu sonucu asfalt kaplamaya temas eden düşey yükün zemin tabakasına aktardığı radyal gerilmelerin (çekme gerilmeleri) çok küçük olduğu sonucunu ortaya koymuştur.

Pullout deneylerine, literatürde yapılmış benzer çalışmalara ve Jones (1962) tarafından öngörülen hesap yöntemine göre alttemel ve taban zemininde kayma gerilmelerinin çok az hatta yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Buradan çıkarılacak sonuç, hesaplamada kullanılan değer olan 34,5 MPa taban zemini elastisite modülü değeri geogrid güçlendirmeye gerek olmaksızın kayma ve bozulma olmadan dayanımını koruyabilmektedir. Yani 34,5 MPa elastisite modülü değerine sahip taban zemininde geogrid kullanımına gerek kalmamaktadır.

Bu durumda;

Elastisite modülü değeri düşürülerek tekrar hesaplama yapılmıştır. Yani daha zayıf tabakada geogrid kullanımı gerekeceğinden hesaplar düşük elastisite modülü değerlerine sahip (13,7 MPa, 6,89 MPa, 3,4 MPa, 1,4 MPa) taban zeminleri için tekrarlanmıştır.

3.12.3. Taban Zemininin Farklı Elastisite Modülü Değerleri için Çekme Gerilmelerinin Hesabı

Taban zemininin farklı elastisite modülüne sahip olduğu durumlarda gösterdiği radyal yani çekme gerilmeleri hesaplanırken iki farklı hesap yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri, Jones'in (1962) öngördüğü formüllerin ve tabloların kullanıldığı matematiksel çözüm yöntemidir (Huang, 1993). Diğeri ise ELSYM Sonlu Elemanlar Programı kullanılarak bilgisayar ortamında hesaplanan analiz yöntemidir.

3.12.3.1. Matematiksel Bağıntılar Kullanılarak Gerilme Hesabı

Farklı elastisite modüllerine sahip 5 durum için gerilme analizi işlemleri Jones (1962) tarafından belirlenmiş gerilme faktörü tabloları kullanılmak suretiyle hesaplanmıştır. Buna göre Şekil 98'deki tabaka kalınlıkları, uygulanan düşey basınç ve elastisite modülleri sabit kalmak koşuluyla sadece taban zemini elastisite modülü değeri değiştirilmiş ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$k_1 = \frac{E_{Temel}}{E_{alttemel}} \quad (29)$$

$$k_2 = \frac{E_{alttemel}}{E_{subgrade}} \quad (30)$$

$$A = \frac{a}{h_2} \quad (31)$$

$$H = \frac{h_1}{h_2} \quad (32)$$

$$\sigma_{z2} = q \times (ZZ2) \quad (33)$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = q \times (ZZ2 - RR2) \quad (34)$$

Jones tabloları ve formülleri kullanılarak 5 farklı durum için radyal gerilmeler hesaplanmıştır. Her bir durumda k_2 değeri taban zemini elastisite modülü değiştirilerek tekrar hesaplanmıştır. ZZ2 ile ZZ2-RR2 değerleri tablolardan alınmıştır. Bu tablolarda k_1 , k_2 , A ve H değerlerine göre hesaplamalar yapılmıştır.

k_1 ve k_2 : Elastisite modülleri oranları

h_1 : Temel tabakası kalınlığı (cm)

h_2 : Alttemel tabakası kalınlığı (cm)

H: Temel ve alttemel tabaka kalınlıklarının birbirine oranı

a: Tatbik edilen yükün temas genişliği (cm)

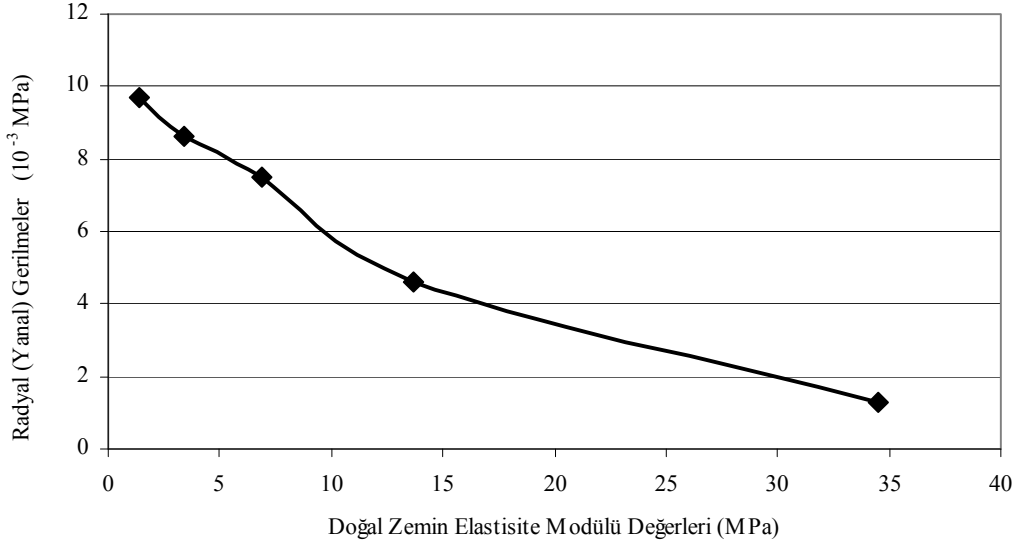
A: a'nın alttemel tabakası yüksekliğine (h_2) oranlanmasıyla bulunan değeri ifade etmektedir. Farklı elastisite modüllerindeki taban zemini tabakaları için hesaplanmış olan radyal gerilmeler Tablo 25'te görülmektedir.

Tablo 25. Farklı elastisite modüllerine sahip taban zemini tabakalarında gerilme tabloları kullanılarak hesaplanan çekme gerilmesi değerleri

	Taban Zemini Elastisite Modülü Değerleri (MPa)				
	34,5	13,7	6,89	3,4	1,4
$\sigma_{r2} (10^{-3} \text{ MPa})$	1,3	4,6	7,5	8,6	9,7

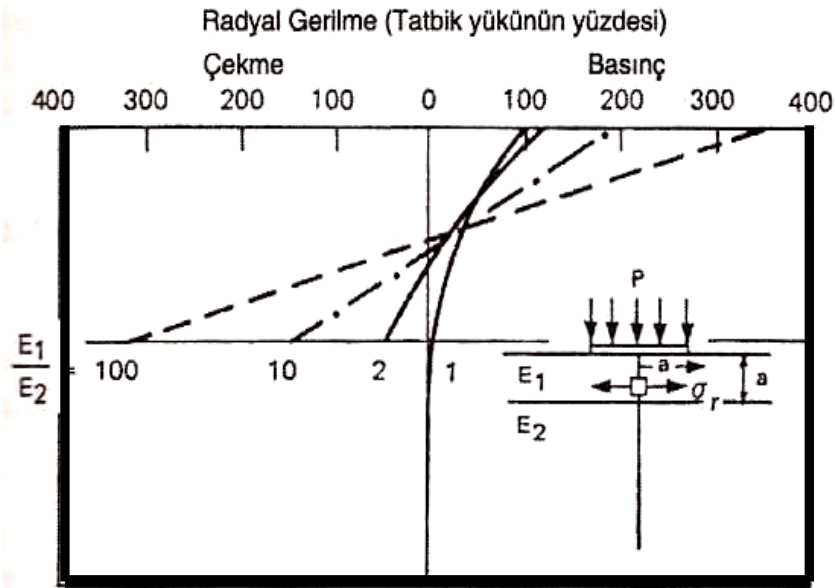
Şekil 100, taban zemini elastisite modülü ile çekme gerilmeleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Elastisite modülü değeri azaldıkça radyal gerilmeler artış göstermektedir. Yani Şekil 100'de en düşük çekme gerilmesi 34,5 MPa elastisite modülünde, en yüksek çekme gerilmesi ise 1,4 MPa elastisite modülü değerinde elde edilmiştir. Elastisite modülü değeri 25'te birine düşürülünce radyal gerilmeler de yaklaşık 9-10 kat artmaktadır. Düşük elastisite modülündeki tabakalarda daha fazla gerilme ortaya çıkması durumu literatürde de açıklanmıştır.

Croney Teorisine göre üst tabakadan alt tabakaya doğru yük aktarılırken alttaki tabakanın elastisite modülü değeri azaldıkça ortaya çıkan gerilmeler de o kadar artmaktadır.



Şekil 100. Taban zemininde elastisite modülü değişiminin çekme gerilmesine etkisi

Şekil 101'e göre radyal gerilme değişimlerinde E_1/E_2 oranı 2 iken oluşan çekme gerilmesi değeri E_1/E_2 oranı 10 olmasında görülen çekme gerilmesi değerinden daha düşüktür. E_1 'in, alttemel tabakası elastisite modülü; E_2 'nin ise taban zemini elastisite modülü olduğu düşünülürse E_1/E_2 oranının 2'den 10'a çıkması taban zemini elastisite modülü değerinin azalması demektir ki elastisite modülü değeri azaldıkça oluşan radyal gerilmeler artış göstermektedir.

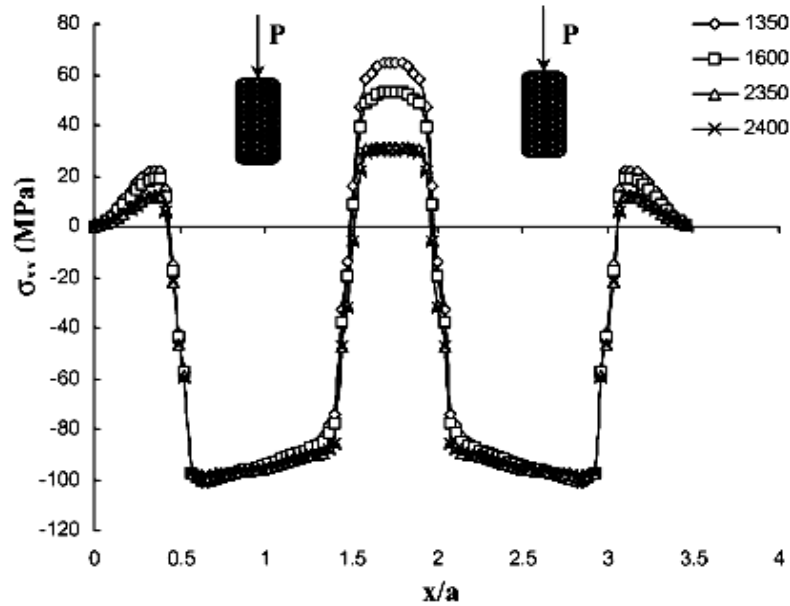


Şekil 101. Croney Teorisine göre tabakalı sistemde eksenel radyal gerilmelerin elastisite modülü oranına bağlı olarak değişimi (Tunç, 2004).

Bu teoriye göre farklı derinliklere sahip olan iki tabakalı sistemde düşey gerilmelerde de alttaki tabakanın elastisite modülü arttığında oluşan gerilme değeri azalmaktadır. E_1/E_2 oranı 10 kabul edildiği durumda düşey gerilme % 70'den % 31'e azalmaktadır. Ancak elastisite modüllerinin oranının 1/1000 olacağı varsayılırsa zemindeki düşey gerilmenin miktarı % 1 ile % 2'si mertebesinde olacaktır. Elastisite modülleri oranlamasına göre buradan çıkarılabilecek sonuç ise; elastisite modülü arttıkça eksenel gerilmelerin azalmakta olduğu hususudur (Tunç, 2004).

Tabakaların elastisite modülü arttıkça yük yayma kapasiteleri artmakta ve tabakanın alt yüzeyindeki gerilmeler önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle çok tabakalı esnek kaplamalarda gerilmenin fazla olduğu üst tabakalar yüksek kaliteli ama alt tabakalar düşük kaliteli olarak inşa edilir (Tunç, 2004).

Akbulut ve Aslantaş (2005), tabakalar arası gerilme aktarımı ile ilgili yaptıkları çalışmada elastisite modülünün artması ile çekme gerilmelerinin azaldığını belirlemişlerdir. Bir tabakanın elastisite modülünün yüksek olması taşıma gücünün daha iyi olması anlamına gelmektedir. Elastisite modülü yüksek olan daha mukavemetli bir yol tabakasında yük etkisiyle oluşacak gerilmeler daha az olacaktır. Şekil 102'de temel tabakası elastisite modülünün 4 farklı değeri için (1350 MPa, 1600 MPa, 2350 MPa ve 2400 MPa) analiz yapılmıştır ve gerilmeler aşağıda görülmektedir (Akbulut ve Aslantaş, 2005).



Şekil 102. 4 farklı elastisite modülündeki temel tabakalarında görülen gerilme dağılımları (Akbulut ve Aslantaş, 2005)

Şekil 102'ye göre temel tabakası içinde gerilme dağılışı tam tekerlek altına gelen noktalarda gerilmeler yakın değerlerde çıkmakta, ancak tekerlek orta noktasının dışında kalan kenar noktalarda ise farklı elastisite modüllerinde farklı gerilmeler oluşmaktadır. Elastisite modülü düşük tabakada (1350 MPa) daha yüksek, elastisite modülü yüksek tabakada (2400 MPa) ise daha düşük gerilmeler olduğu görülmüştür. Yatay ekseninde görülen a değeri tekerlek genişliğidir, x ise eksenindeki noktalardır. Akbulut ve Aslantaş'a (2005) göre kaplama tabakasında tekerleğin temas ettiği noktada farklı elastisite modüllerinde farklı gerilmeler oluşmuştur. Ancak kaplamadan alt tabakalara doğru inildikçe kaplamaya gelen yükün yayılarak aktarılması etkisinden dolayı kaplamaya gelen yük temel tabakasında farklı elastisite modüllerinde farklı gerilmeler oluşturmaktadır. Bu çalışmada da hem Croney Teorisini ve hem de bu tez çalışmasını destekler yönde düşük elastisite modülündeki tabakada daha yüksek gerilmeler ortaya çıktığı görülmüştür.

3.12.3.2. ELSYM Sonlu Elemanlar Analizleri Yardımıyla Gerilme Hesabı

Son yıllarda mekanistik-ampirik çözüm yöntemleri karayolu üstyapı tabakaları tasarımında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Özellikle yol alt tabakalarında oluşan gerilme analizleri sonlu elemanlar programları aracılığı ile hesaplanmaktadır. Bu maksatla birçok yazılım programı geliştirilmiştir. Bisar, Chevron, Elsym, Kenlayer ve Michpave bu bilgisayar programlarına örnek olarak gösterilebilir. ABAQUS ve ANSYS gibi sonlu elemanlar analizi yapabilen programlarda da karayolu tabakalarının elastisite modülü, poisson oranı ve kalınlıkları gibi parametreler tanımlanarak yol altında oluşan radyal ve düşey gerilmeler hesaplanabilir.

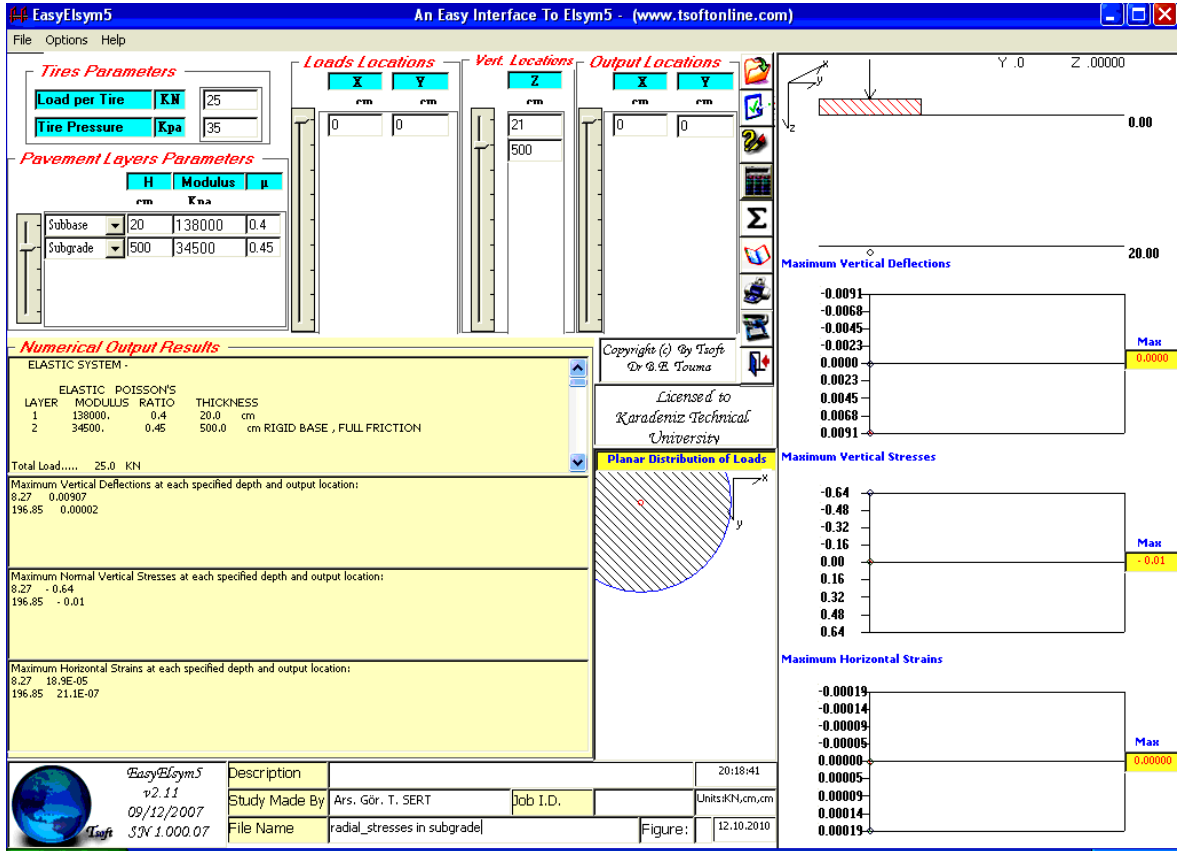
ELSYM Sonlu Elemanlar Programı, yol tabakaları için geliştirilmiş özel bir yazılım olup karayolu üst yapısı tabakalarında farklı derinliklerde düşey ve yatay yönde gerilme analizi yapma imkanı vermektedir (Şekil 103).

ELSYM programı 5 tabakaya kadar analiz yapma imkanı veren bir lineer elastik hesaplama programıdır. Programda, tabaka yüzeyine bir veya daha fazla yükleme yapılabilir (Dokuz taneye kadar yük değeri girilebilir). Ancak program, dinamik yüklemeye imkan vermemekte sadece statik yükleme yapılabilir. Bu yazılım, granüler yol tabakalarını lineer, elastik ve homojen kabul ederek analiz yapmaktadır. Geogrid gibi tabakanın dayanımını artıran herhangi bir güçlendirme malzemesi girdisi programda modellenememiştir. Çünkü programın yazılımı buna uygun değildir. Alttemel-

taban zemini arayüzünde geogrid gibi bir güçlendirme malzemesi programa girilmeden hesaplama yaptırılmıştır. Araziye güçlendirme malzemesi olmaksızın gelen düşey yükün taban zemini üst yüzeyinde oluşturduğu radyal (çekme) gerilmeleri belirlenmiştir.

ELSYM programında analizler yapılırken program girdisi olarak düşey yük, basınç, alttemel tabaka kalınlığı gibi parametreler pullout testlerinde uygulanan değerler olarak seçilmiştir. Bu şekilde tercih edilmesinin sebebi deneysel olarak yapılan çalışmaların bilgisayar modelinde de aynı koşullarda uygulanmasıyla daha gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmek istenmesidir. ELSYM Sonlu Elemanlar Programında yapılmış analizlerden birisine ait ekran çıktısı Şekil 103'te görülmektedir.

Jones (1962) tarafından öngörülen formüller vasıtasıyla farklı elastisite modüllerine sahip 5 durum için gerilme analizleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 25'te verilmişti. ELSYM Sonlu Elemanlar Programı yardımıyla yapılan analizlerde ise daha fazla elastisite modülü değişiminin radyal gerilmelere etkisinin araştırılması için analizler genişletilmiş ve 10 farklı elastisite modülü değerine göre hesaplama yapılmıştır.

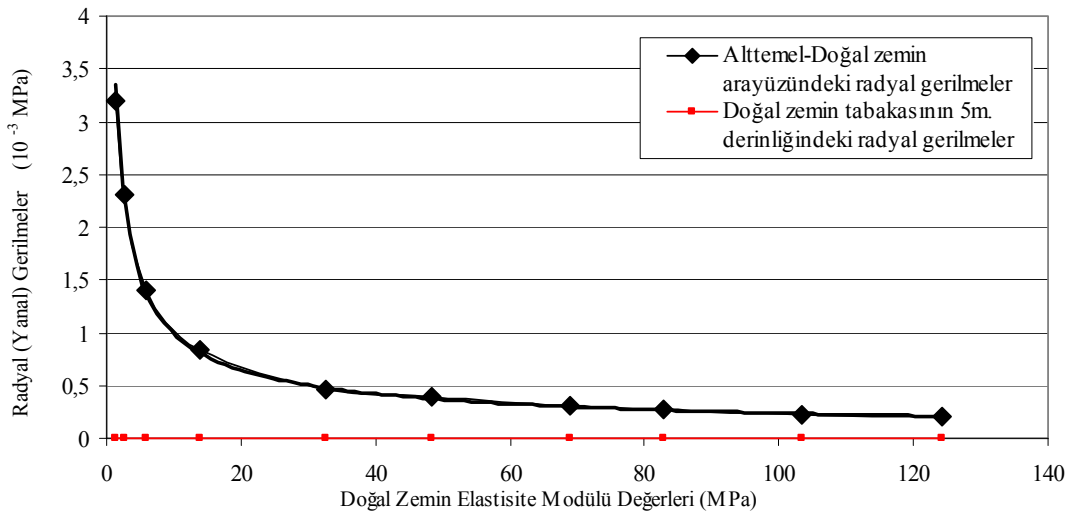


Şekil 103. ELSYM Sonlu Elemanlar Programı ekran çıktısı

10 farklı elastisite modülü değerleri şunlardır: 1,4 MPa, 3,4 MPa, 6,89 MPa, 13,7 MPa, 34,5 MPa, 48,3 MPa, 69 MPa, 82,8 MPa, 103,5 MPa, 124,2 MPa'dır. Tablo 26'da bu elastisite modülü değerlerindeki taban zeminlerinde düşey basınç etkisiyle oluşan radyal gerilmeler görülmektedir. Her bir elastisite modülünde oluşmuş olan radyal ve normal gerilmeler Tablo 26'da görülmektedir. 10 farklı elastisite modülündeki taban zemininde radyal gerilmelerin dağılışı Şekil 104'te verilmiştir. Yüksek elastisite modülüne sahip taban zeminde düşük gerilmeler, düşük elastisite modülünde de yüksek gerilmeler ortaya çıktığı durumu grafikte açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 26. ELSYM Sonlu Elemanlar Programı kullanılarak 10 farklı elastisite modülündeki taban zemin tabakaları için hesaplanan radyal ve normal gerilmeler

	Taban Zemin için Farklı Elastisite Modülü (E) Değerleri (MPa)									
	1,4	3,4	6,89	13,7	34,5	48,3	69	82,8	103,5	124,2
Alttemel-Taban zemin arayüzündeki radyal (yanal) gerilmeler (10^{-4} MPa)	32	23	17	10	5	4	3,3	3	3	2
Taban zeminin 5 m derinliğinde radyal (yanal) gerilmeler (10^{-4} MPa)	0,045	0,046	0,047	0,047	0,048	0,048	0,048	0,048	0,049	0,049
Alttemel-Taban zemin arayüzündeki normal (düşey) gerilmeler (10^{-4} MPa)	63	41	27	15	5	2	0,9	0,9	0,2	0,2



Şekil 104. ELSYM Programına göre 10 farklı elastisite modülündeki taban zemininde radyal gerilmeler

Şekil 104'e göre taban zemininin elastisite modülü arttıkça alttemel-taban zemini arasında görülen radyal gerilmeler exponansiyel olarak azalmaktadır. Sıfıra yaklaşan bir eğilim göstermektedir. Taban zemininin 5m altında oluşan gerilmeler ise çok düşük çıktığından x eksenini ile çakışmış ve sıfır değerini almıştır. Bu durum, elastisite modülü değiştirilse bile taban zemininin içinde radyal gerilmeler oluşmadığını gösterir.

3.12.4. Laboratuarda Kullanılan Geogridlerin Arazi Çekme Değerlerinin Hesabı ve Taban Zemininde Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Laboratuvar deneylerinde hesaplanan çekme mukavemetleri arazi koşullarını tam olarak yansıtamayabilir. Çünkü geogrid malzeme arazide yağış, nem gibi doğal şartlara daha fazla maruz kalabilmektedir. Bundan dolayı geogridlerin arazi şartlarında göstermiş oldukları dayanım laboratuvarda hesaplanandan düşük çıkabilmektedir. Yapılan araştırmalarda (FHWA, 2003; Montanelli ve Recalcati, 2003) laboratuvar ile arazi şartları arasındaki ilişkiyi gösteren F_s emniyet faktörü değeri 1,5 olarak kabul edilmiştir. Literatürde de bu durumu destekler nitelikte çalışmalar yer almaktadır. Jeon vd. (2006), geogridlerin arazide kullanıldığı durumda laboratuvarda ölçülmüş çekme değerlerinden daha az dayanım gösterdiklerini ortaya koymuşlardır. Geogridlerin arazi koşullarında daha az dayanım göstermelerinin sebepleri zemine serilmeleri sırasında agrega ile geogridin iyi kenetlenmemesi, zamanla görülen sünme problemleri, çevresel şartlara bağlı olarak ortaya çıkan kimyasal, biyolojik ve iklimsel faktörlerdir. Laboratuvar ortamı, araziye kıyasla bu olumsuz çevre şartlarının etkilerinin olmadığı ideal bir ortamdır. Arazi koşulları ile laboratuvar arasındaki farklılık bundan kaynaklanmaktadır. Koerner'e (1997) göre $T_{allow} < T_{ult}$ olmaktadır. T_{ult} , laboratuvar testlerinden elde edilen çekme gerilmesi değerleridir, T_{allow} ise geogridlerin arazide kullanımı için izin verilen çekme değeridir. Sabit değerler (RF değerleri) tablodan alınmak suretiyle aşağıdaki bağıntıda yerine yazılarak da geogridlerin arazideki çekme değerleri hesaplanabilmektedir.

$$T_{allow} = T_{ult} \left[\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CD} \times RF_{BD}} \right] \quad (35)$$

RF_{ID} = Geogridin arazide serilmesinden doğan hasarlar

RF_{CR} = Sünme problemi

RF_{CD} = Kimyasal etkiler

RF_{BD} = Biyolojik ve çevresel etkiler

Montanelli ve Recalcati'nin (2003) çalışmasında da yine laboratuvar ile arazi koşulları arasındaki gerilme farklılığına değinilmiştir. Arazide laboratuvar koşullarına kıyasla geogridin dayanımını azaltacak pek çok çevresel faktörün varlığına dikkat çekilmiş ve aşağıdaki tabloda görüldüğü üzere laboratuvar sonuçlarına göre geogridin dayanımının arazi koşullarında elde edilen dayanımdan yaklaşık 1,5 katı fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Tablo 27'de farklı arazi durumlarında karşılaşılan F_s değerleri görülmektedir.

$$F_s = \frac{T_{allow}}{T_{req}} \quad (36)$$

F_s = Geogrid emniyet faktörü

T_{allow} = Laboratuvar testlerinden elde edilen çekme mukavemeti

T_{req} = Arazi şartlarındaki çekme mukavemeti

Tablo 27 Arazide karşılaşılan farklı durumlar için F_s (emniyet Faktörü) değerleri (Montanelli ve Recalcati, 2003)

Geogrid Kullanımı Gerektiren Arazi Durumları	F_s (emniyet Faktörü)
Genel Stabilite Problemleri	1,3-1,5
İstinat Duvarı Kaymaları	1,5
İstinat Duvarı Devrilmeleri	2
Taşıma Kapasitesi Problemleri	2
Aşırı Gerilmeli Durumlar	1,5
Pullout Direnci	1,5
Yüzey Kaymaları	1-1,5

Tablo 27'den görülebileceği üzere farklı zemin problemlerinde F_s değeri farklı olabilmektedir. Yukarıdaki tablo geogridlerin kullanıldığı arazilerde F_s değerinin 1 ile 2 arasında değişebildiğini göstermektedir. Zemin taşıma kapasitesi problemi olan ya da herhangi bir istinat yapısının devrilmesini tehdit edecek kadar güçlendirilmeye ihtiyaç duyan zeminlerde kullanılacak geogridler için F_s yaklaşık 2 kabul edilmiştir. Bu demektir ki böyle zayıf zeminlerde hesaplanandan 2 katı fazla dayanımda geogrid kullanmak gerekmektedir. Tabloya göre pullout direnci için ise 1,5 değeri önerilmektedir. Bu tez çalışmasında ise F_s değeri 1,5 kabul edilerek (FHWA, 2003; Montanelli ve Recalcati, 2003; Jeon vd., 2006) geogridlerin arazi performansları hesaplanmıştır. Tablo 28'de laboratuvarında kullandığımız 5 farklı geogrid örneğinin laboratuvar ortamındaki çekme

gerilmesi değerleri ile arazi şartlarına göre Fs emniyet faktörü kullanılarak hesaplanmış değerleri görülmektedir.

Tablo 28. Laboratuardaki geogridlerin çekme dayanımları ve Fs (Emniyet Faktörü) kullanılarak hesaplanan arazi eşdeğerleri

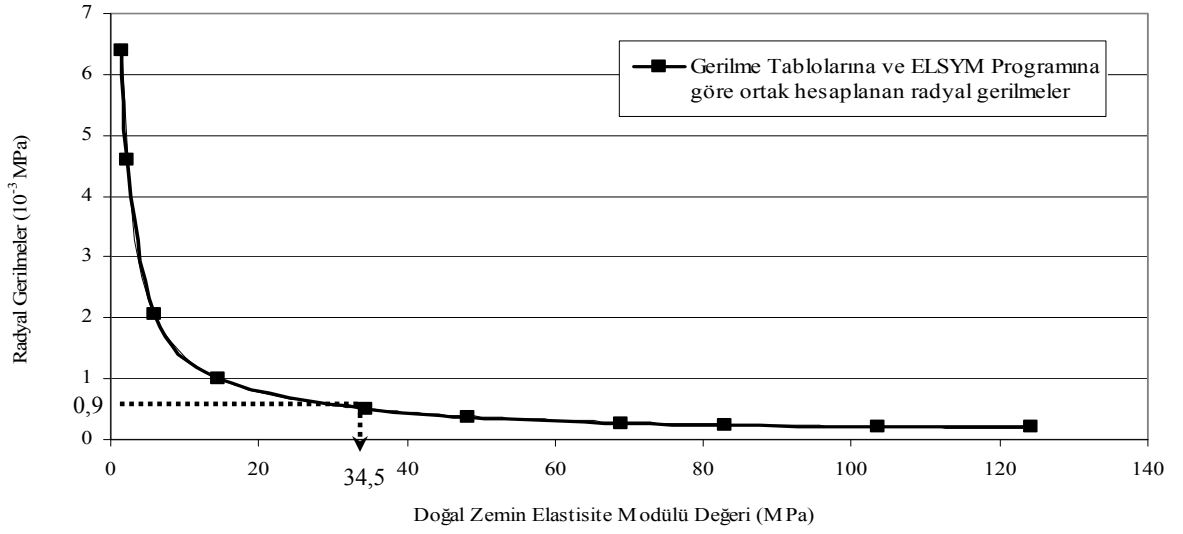
		5cmx5cm	4cmx4cm	3cmx3cm	Petek	apraz
Geogridlerin ekme Gerilmeleri (MPa)	Laboratuarda llen değerler	$8,32 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$4,23 \times 10^{-3}$	$8,54 \times 10^{-3}$	$6,94 \times 10^{-3}$
	Fs kullanılarak hesaplanan arazi koŐullarındaki değerleri	$5,54 \times 10^{-3}$	$2,06 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-3}$	$5,69 \times 10^{-3}$	$4,62 \times 10^{-3}$

Tablo 25 ve Tablo 26'dan elde edilmiş taban zeminlerinin farklı elastisite modülü değerleri ile Tablo 28'de görülen laboratuvar geogrid malzemelerinin Fs emniyet faktörü hesaba katılarak belirlenmiş olan çekme gerilmesi değerleri kıyaslanarak laboratuvar geogridlerinin hangi elastisite modülüne sahip taban zeminlerinde gerilmeleri karŐılayabileceęi ve ideal olarak kullanılabilen analize edilmiştir. Nümerik analizlerle ve ELSYM Sonlu elemanlar programına göre hesaplanmış radyal gerilme dağılışları Tablo 29 ve Şekil 105'te görülmektedir.

Tablo 29. Farklı elastisite modüllerine sahip taban zemininde gerilme tabloları ve ELSYM Programı kullanılarak hesaplanan ortalama çekme gerilmesi değerleri

	Taban Zeminini için Farklı Elastisite Modülü (E) Değerleri (MPa)									
	1,4	3,4	6,89	13,7	34,5	48,3	69	82,8	103,5	124,2
Alttemel-Taban zeminini arayüzündeki radyal (yanal) gerilmeler (10^{-3} MPa)	6,4	5	4,6	2,8	0,9	0,4	0,33	0,3	0,3	0,2

Şekil 105'teki grafiğe göre taban zemininin elastisite modülü arttıkça oluşan radyal gerilmeler exponansiyel olarak azalmaktadır. Nümerik analizlerde de grldği gibi 34,5 MPa elastisite modülündeki taban zeminlerinde ise gerilmeler sifıra yaklaŐmakta, bu değerden daha büyük elastisite modülündeki taban zeminlerinde ise sifır olmaktadır.



Şekil 105. 10 farklı elastisite modülündeki taban zemini tabakalarında radyal gerilmeler

Türkiye Karayolları için CBR değeri % 8'den küçük olan malzemelerin üstyapı tabanında kullanılması istenmemektedir (Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008). Böyle durumlarda üstyapı tabanında zayıf zeminin etkisini azaltmak için koruyucu tabaka serilebilir.

Karayolları için önerilen CBR değeri % 8'den büyük olan (Elastisite modülü 82,6 MPa ve daha fazla) yol alt tabakaları yüksek standartlı olduğundan geogrid güçlendirmeye gerek kalmayabilir. Hatta yapılan hesaplamalarda ve pullout testlerinde görülmüştür ki deneylerin yapıldığı koşullarda ve kullanılan agrega granülometrisine göre 34,5 MPa değerinde ve daha yüksek elastisite modülüne sahip taban zeminlerinde bile radyal gerilmeler çok az oluşmakta hatta sıfır olmaktadır. Ancak, 34,5 MPa'dan daha az elastisite modülüne sahip tabii zeminler eğer yol alt tabakası olarak kullanılacaksa geogrid güçlendirme gerekebilir. Ya da bu zayıf tabakayı tamamen kaldırıp uzaklaştırarak yerine koruyucu tabaka serimi yapılabilir. Ancak bu daha maliyetli olacağından dolayı geogrid kullanımı tercih edilebilir.

3.12.5. Taban Zemin Elastisite Modülü Sabit Tutulup Alttemel Kalınlığının Değiştirilmesi Durumunda Radyal Gerilme Değişiminin İrdelenmesi

Yukarıdaki işlemlerde 34,5 MPa elastisite modülü değeri için radyal gerilme 0,0013 MPa olarak hesaplanmıştı. Elastisite modülü sabit tutulmak kaydıyla alttemel tabakası kalınlıkları değiştirilmek suretiyle işlemler tekrarlanmıştır. 45 cm olarak hesaplarda

kullanılan alttemel tabakası kalınlığı 40 cm ve 35 cm'e düşürülmüş ve diğer parametrelerin tümü sabit kalmak kaydıyla hesaplamalar tekrar yapılmıştır. Buna göre üç farklı alttemel tabaka kalınlığına göre yapılan işlemlerin sonucunda Tablo 30'da verilen radyal gerilme değerleri elde edilmiştir:

Tablo 30. Alttemel kalınlığının düşürülmesiyle radyal gerilme değerindeki artış

Alttemel Tabaka Kalınlıkları (cm)	Radyal Gerilme Değerleri (MPa)
45	0,0013
40	0,005
35	0,0066

Tablo 30'a göre alttemel tabaka kalınlığının azaltılması alttemel altında oluşan çekme gerilmelerini artırmaktadır. Kalınlığın 45 cm'den 35 cm'e düşmesi yani 10 cm azalma, gözlemlenen çekme gerilmelerini 5 kat artırmaktadır. 45 cm ile 35 cm'lik tabaka kalınlıkları rastgele seçilmeyip Türkiye karayollarında alttemel kalınlığı için önerilen kalınlıklar kullanılmıştır. Buradan çıkarılabilecek sonuç; yüksek kalitede inşa edilen bir karayolunda alttemel kalınlığı fazla seçildiğinde geogrid kullanımına gerek kalmayabilir. Ancak, yüksek standartlı olarak yapılamayan yani tabaka kalınlığının yeteri kadar inşa edilemeyeceği şartlarda tabakalar daha az kalınlıkta serilebilir, bu durumda da bu çalışmada laboratuvar deneylerinde kullanılan geogridler güçlendirme amaçlı alttemel tabakası altına radyal gerilmeleri karşılaması için serilebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel amacı, farklı göz açıklıklarındaki geogridlerin belirlenmiş olan agrega granülometreleri için karayolu alttemel tabakası ile taban zemini arasındaki kayma mukavemeti performanslarının pullout testleriyle belirlenmesidir. Geogrid malzemelerin sahip oldukları çekme dayanımları üretici firmadan temin edilemediği için, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'ndaki çekme aletinde yapılan çekme testleri ile belirlenmiştir. Karayollarında farklı elastisite modülüne sahip taban zeminleri için radyal gerilmeler hem bağıntı ve tablolar kullanılarak hem de ELSYM Sonlu Elemanlar Programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

Pullout kuvveti-yatay deplasman değişimlerine göre, 5 cm x 5 cm kare göz açıklıklı geogrid ile petek göz açıklıklı geogrid en yüksek çekme kuvveti değeri göstermişlerdir (yaklaşık 7 kN/m). 3 cm x 3 cm ve 4 cm x 4 cm kare göz açıklıklı geogridler diğerlerinden düşük dayanım göstermiş olup ortalama 2,5-3,5 kN/m değerinde, çapraz göz açıklıklı geogridler ise ortalama olarak 4,5 kN/m değerinde kopmuşlardır. Sonuçta, petek göz açıklıklı geogridin çekme dayanımının yüksek olduğu ve koptuktan sonra da bir süre dayanımını kaybetmediği görülmüştür.

Çekme kuvvetinin geogrid alanına bölünmesiyle elde edilen kutu dışında serbest çekme bölgesindeki çekme mukavemeti grafiklerinin değişimi, literatürle uyumluluk göstermiştir. Ancak deplasmanlar ve maksimum mukavemet değerleri literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu da kullanılan geogrid malzemenin fabrikasyon olarak üretimde sahip olduğu mukavemet değeriyle açıklanabilir. Geogridlerin düşey yüksüz haliyle çekmeye tabi tutulduğu çekme deneyleri de göstermiştir ki, pullout deneylerinde kullanılan geogridler 3,5-7 kN/m çekme kuvvetine sahiptir.

Çekme testleri ile pullout testleri kıyaslandığında, tüm geogrid türleri için geogridlerin kopmadan dayanabileceği maksimum çekme mukavemetlerinin yaklaşık yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Tüm geogrid türlerinde ortalama olarak $\sigma_{\text{pullout}} / \sigma_{\text{çekme testi}} = 1,03$ değeri tespit edilmiştir. 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ve çapraz göz açıklıklı geogridlerde boş halde geogride çekme uygulandığında okunan değer, pullout testlerinden elde edilen değerden daha yüksek çıkmıştır. Ancak 5 cm x 5 cm ve Petek göz açıklıklı geogridlerde ise aksi durum gözlenmiştir. Yani çekme testlerinden elde edilen

mukavemet değeri pullout testlerinden elde edilenden düşük çıkmıştır. Sonuç olarak 4 cm x 4 cm, 3 cm x 3 cm ve çapraz göz açıklıklı geogridlerin pullout test sonuçları çekme test sonuçlarından ortalama olarak % 5 daha az; 5 cm x 5 cm ve petek göz açıklıklı geogridlerin ise yaklaşık % 15 daha fazla olduğu görülmüştür.

Pullout kutusunda kenarlarda açılmış olan ve görüntü alınan prexiglass pencerelerden kaydedilmiş görüntüler kullanılmak suretiyle, pullout kutusu içerisinde 4 nokta belirlenmiş ve bu noktaların yaptıkları yatay deplasmanlar ile birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Belirlenen bu değerler modelde de kullanılmıştır. Ancak model sonuçlarına göre; sıfıra yakın gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin elde edilmiş olması geogridlerin pullout kutusu dışında koparak mukavemetini kaybetmesinden ve kutu içine kuvvet aktaramamasından dolayıdır. Deneylerde kutu içinde sıkışmış zeminde geogridlerin gerilmelerini ölçme imkanı bulunmadığından teorik analizler ile tabakalar arasında oluşan gerilmeler belirlenmeye çalışılmıştır. Jones gerilme tabloları ve ELSYM sonlu elemanlar programı kullanılarak alttemel ve taban zemini arasında oluşan radyal gerilmeler yaklaşık 1 kPa olarak belirlenmiştir.

En fazla yatay deplasman geogridin çekme bölgesine yakın kısımlarında gözlenmiştir. Çekme bölgesine en yakın noktada birim şekil değiştirme değeri 0,00375 iken en uzak noktada 0,0001 olarak kaydedilmiştir yani birim şekil değiştirmenin yaklaşık % 3'lük kısmı aktarılmıştır.

Tabakalarda ölçülen düşey basınç değerleri incelendiğinde, pullout kutusu içerisinde basınç değerleri konusunda düzgün bir dağılım olmadığı görülmektedir. Çünkü, deneyin hazırlanması, basınç sensörlerinin zemine yerleştirilmesi ve deneye başlanması aşamalarında bu sensörlerin az da olsa yerinden kaydığı ve dolayısıyla farklı sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Ya da tam deney esnasında basınç ölçerlere temas eden sivri uçlu agregalar basınçların farklı okunmasına sebep olabilir. Pullout kutusu içerisinde geogrid alt ve üst seviyelerindeki basınçların dağılışına bakıldığı zaman, kare göz açıklıklı geogridlerde üst seviyede ölçülmüş olan basınç değerlerinin alt seviyede ölçülmüş olanlara kıyasla yaklaşık 2 katı fazla sonuç verdiği tespit edilmiştir. Petek göz açıklıklı geogrid için de benzer durum söz konusudur. Ancak çapraz göz açıklıklı geogrid kullanıldığında ve geogridsiz kontrol deneyleri için ise geogrid alt ve üst seviyesinde hemen hemen aynı basınç değerleri ölçülmüştür. Kare göz açıklıklı geogrid türü ile petek göz açıklıklı geogrid türünün düşey basınç dağılımını yayması bakımından ideal türler olduğu görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- Akbulut, H. ve Aslantaş, K., 2005. Finite Element Analysis Of Stress Distribution on Bituminous Pavement and Failure Mechanism, Materials and Design, 26, 383–387.
- Alagiyawanna, A. M. N., Sugimoto, M., Sato S. ve Toyota H., 2001. Influence of Longitudinal and Transverse Members on Geogrid Pullout Behavior During Deformation, Geotextiles and Geomembranes, 19, 483–507.
- Alfaro, M. C. , Hayashi, S., Miura, N. ve Watanabe, K, 1995. Pullout Interaction Mechanism of Geogrid Strip Reinforcement, Geosynthetics International, 2, 4, 679-698.
- Austin, R. A. ve Gilchrist, A. J. T., 1999. Enhanced Performance of Asphalt Pavements Using Geocomposites, Geotextiles and Geomembranes, 14, 175-186.
- AASHTO T 190 ve ASTM D 2844: Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils.
- Bakeer, R. M., Sayed, S. M., Cates, P. ve Subramanian, R.,1998. Pullout and Shear Tests on Geogrid Reinforced Lightweight Aggregate, Geotextiles and Geomembranes, 16, 119-133.
- Beech, J. F., 1987. Importance Of Stress-Strain Relationships in Reinforced Soil System Designs. In: IFAI. Geosynthetics '87 Conference. New Orleans, USA., 1, 133-144.
- Bergado, D. T. ve Chai, J., 1994. Pullout Force Displacement Relationship Of Extensible Grid Reinforcements. Geotextiles and Geomembranes 13, 5, 295–316.
- Bergado, D. T. ve Teerawattanasuk, C., 2008. 2D and 3D numerical simulations of reinforced embankments on soft ground. Geotextiles and Geomembranes 26, 1, 39–55.
- Bergado, D. T., Chai, J., Abiera, H. O. ve Balasubramaniam, A. S., 1993. Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements. Geotextiles and Geomembranes, 12, 4, 327–349.
- Celep, Z., Kumbasar N., 2001. Betonarme Yapılar, İstanbul.
- Costalonga, M. A. R. ve Kuwajima, F. M., 1995. Load Transfer İn Geogridsdapplication İn Pullout Tests İn Cohesive Soil. In: 2nd Brazilian Symposium on Applications of Geosynthetics, 1. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS), Sao Paulo, Brazil, 149–158.
- Duskov, M., 1997. Measurements on a Flexible Pavement Structure with an EPS Geofom Sub-base, Geotextiles and Geomembranes, 15, 5-27.

- Ersoy, U., 1985. Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı Cilt-1, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Farrag, K., 2003. Pull-out Resistance of Geogrid Reinforcements, Geotextiles and Geomembranes, 12, 133-159.
- Farrag, K. ve Morvant, M, 2004. Evaluation of Interaction Properties of Geosynthetics in Cohesive Soils: Lab and Field Pullout Tests, FHWA/LA.03/380.
- Federal Highway Administration (FHWA), 2003, No: DTFH61-93-X-00011.
- Gunther, E. B. ve Abd El Halim, A. O, 2003. The Performance of Geogrid Reinforced Road Bases, Construction and Building Materials, 1, 71-75.
- Guo, Y. C., Xin, C., Song, M. ve He, Y., 2005. Study on Short- and Long-term Creep Behavior of Plastics geogrid, Polymer Testing, 24, 793-798.
- Hadi, M. N. S ve Bodhinayake, B. C., 2003. Non-Linear Finite Element Analysis of Flexible Pavements, Advances in Engineering Software, Elsevier, 34, 657-662.
- Haddock, J. E., Fang, H., Hand, A. J. ve White, T. D., 2007. An Object-Oriented Framework For Finite Element Pavement Analysis. Advances in Engineering Software 38, 11-12, 763-771.
- Hamad, A., Abdelfattah, A., Falls L. C., 2006. The Nisku Test Road: Direct Measurement of the Impact of Heavy Loads on Thin Membrane Pavements. Transportation Association of Canada Annual Conference, Charlottetown, P.E.I.
- Huang, H. Y., 1993. Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 07632 New Jersey, 176-214.
- Jones, A., 1962. Tables of Stresses in Three Layer Elastic Systems, Bulletin 342, Highway Research Board.
- Jeon, H. Y., Ju, J. J., Yoo, H. K. ve Kim, S. K., 2003. Assesment of Junction Strength of Geogrids by a Multi-Junction Test Method, Polymer Testing, 22, 267-274.
- Jeon, H. Y., Kim, S. H., Lyoo, W. S., Yoo, C., Koerner, G. R., 2006. Evaluation Of The Long-Term Performance of Geosynthetic Reinforcements From Their Reduction Factors, Polymer Testing, 25, 289-295.
- Ju, J. W., Park, J. B. ve Seo, G.W., 2004. Staged Pullout Test Method of Reinforced Earth using Hyperbolic Function, Research Fellow, Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Construction Technology, Seoul, Kore.
- Karayolları Trafik Kanunu, 2003, Değişik Bend-25076 S. R. G. Yön. 1. md.
- Karayolu Teknik Şartnamesi, 2006.

- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Knight, M., Tighe, S., Adedapo, A., 2004. Trenchless Installations Preserve Pavement Integrity, Annual Conference of the Transportation Association of Canada Quebec City.
- Komatsu, T., Kikuta, H., Tuji, Y., Muramatsu, E., 1998. Durability Assesment of Geogrid Reinforced Asphalt Concrete, Geotextiles and Geomembranes, Elsevier, 16, 257-271.
- Knoth, J. ve Falls, L. C., 2006. Pavement Response to Legal Overloads at the Nisku Test Road, Alberta. Transportation Association of Canada Annual Conference, Charlottetown.
- Koo, H. ve Kim, Y., 2004. Lifetime Prediction of Geogrids for Reinforcement of Embankments and Slopes, 24, 181–188.
- Koerner, R. M., 1997. Designing with Geosynthetics, fourth edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 07458.
- Lopes, M. L., Ladeira, M., 1996. Influence of The Confinement, Soil Density And Displacement Ratio On Soil–Geogrid İnteraction, Geotextiles and Geomembranes; 14, 10, 543–554.
- Mattox, R. M., 2003. Geogrid Reinforcement for Cochrane Bridge Embankment, Geotextiles and Geomembranes, 6, 225-232.
- Moraci, N. ve Gioffre, D., 2005. A Simple Method to Evaluate the Pullout Resistance of Extruded Geogrids Embedded in a Compacted Gronuler Soil, Geotextiles and Geomembranes, 24, 116-128.
- Montanelli, F. ve Recalcati, P., 2003. The Design of Reinforced Soil Retaining Walls Using Tenax Geogrids, Tenax SpA, Geosynthetics Division, TDR 002.
- Moraci, N. ve Recalcati, P., 2006. Factors Affecting the Pullout Behaviour of Extruded Geogrids Embedded in a Compacted Granuler Soil. Geotextiles and Geomembranes, 24, 220-242.
- McKinnon, A.C., 2005. The Economic and Environmental Benefits of Increasing Maximum Truck Weight: The British Experience, Elsevier, 10, 77-95.
- Mohuiddin, A., 2005. Analysis of Laboratuary and Field Pullout Tests of Geosynthetics in Clayey Soils, A Master Thesis, B. E. Osmania University.
- Mulungye, R. M., Owende, P. M. O. ve Mellon, K., 2007. Finite Element Modelling of Flexible Pavements on Soft Soil Subgrades, Materials and Design, 28, 739–756.

- Moraci N. ve Gioffree D., 2006. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, Geotextiles and Geomembranes, 24 116–128.
- Nernheim A., 2004. Design and Test Methods for Geosynthetic Reinforced Structures.
- Ochiai, H., Otani, J., Hayashic, S. ve Hirai, T., 1999. The Pull-out Resistance of Geogrid in Reinforced Soil, Geotextiles and Geomembranes, 14, 19-42.
- Palmeira, E. M., 2004. Bearing Force Mobilisation in Pullout Tests on Geogrids, Geotextiles and Geomembranes, 22, 481-509.
- Priest, A. L., Timm, D. H. ve Barrett, W. E., 2005. Mechanistic Comparison of Wide Base Single vs. Standart Dual Tire Configurations. NCAT Report 05-03.
- Retzlaff, J., Turczynski, U. ve Schwerdt, S., 2004. The Effect Of Geogrids Under Unbound Subbase Layers.
- Ryan, R. B., 2000. Geoseynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures, Geosynthetic Materials Association, June 27.
- Romanoschi, S. A., Hossain M. ve Gisi, A., 2004. Accelerated Pavement Testing Evaluation of Stabilized Foundation Layer Materials for Midwest Flexible Pavements.
- Satish, C., Mehndiratta H. C. ve Chennapragada, U. K., 2006. Structural Adequacy of Flexible Pavements with Types and Widths of Shoulders, Journal of Transportation Engineering, 132, 1, 69-75, ASCE.
- Sharma, J. S. ve Bolton, M. D., 1999. Centrifuge Modelling of an Embankment on Soft Clay Reinforced with a Geogrid, Geotextiles and Geomembranes, 14, 9, 1-17.
- Sert, T. ve Akpınar, M. V., 2011. Pullout Test Aleti ile Karayolu Alttemelinde Geogrid Performansının Araştırılması, İMO Teknik Dergi, 342, 5285-5304.
- Shinoda, M. ve Bathurst, R. J., 2004. Lateral and Axial Deformation of PP, HDPE and PET Geogrids Under Tensile Load, Geotextiles and Geomembranes, 22, 205-222.
- Sieira, A. C. C. F., Gerscovich, D. M. S. ve Saya, A. S. F. J., 2009. Displacement And Load Transfer Mechanisms Of Geogrids Under Pullout Condition, Geotextiles and Geomembranes, 27, 241–253 .
- Sugimoto, M. ve Alagiyawanna, A. M. N., 2003. Pullout Behaviour of Geogrid by Test and Numerical Analysis, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129, 361-371.
- Sugimoto, M. ve Alagiyawanna, A. M., 2003. Pullout Behaviour of Geogrid by Test and Numerical Analysis, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129, 361.

- Teixeira, S. H. C., Bueno, B. S. ve Zornberg, J. G., 2007. Pullout Resistance of Individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 37-50.
- Tunç, A, 2004. Kaplama Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- URL-1, <http://www.tensar.co.uk>. 23 Mayıs 2007.
- URL-2, http://peer.berkeley.edu/publications/peru_earthquake/Ground%20Failure/ground.html, 21 Ekim. 2007.
- URL-3, <http://www.tasimacilar.com>. 24 Temmuz 2008.
- URL-4, <http://www.milliyet.com.tr/2006/08/01/guncel/agun.html>. 11 Ocak 2009
- URL-5, <http://www.ozalpcelikhasir.com.tr>. 2 Temmuz 2009
- Wang, F. ve Machemehl, R., 2006. Predicting Truck Tire Pressure Effects Upon Pavement Performance, SWUTC/06/167864-1.
- White, D. T. ve Haddock, J. E., 2002. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements, HCHRP Reports 468. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
- Wu, Z., 2007. Evaluating Structural Performance of Base/Subbase Materials at the Louisiana Accelerated Pavement Research Facility, Transportation Engineering Conference February 11-14, Baton Rouge.
- Vijayanath, B. K., Wu, Z., Hossain M. ve Gisi, A., 1999. Instrumentation of the Superpave Test Sections at the Kansas Accelerated Testing Laboratory, International Conference on Accelerated Pavement Testing, October 18 -20, Reno, Nevada.

6. EKLER

Ek 1. Kayma Mukavemeti- Deplasman Değişimini Modelleyen MATLAB Yazılımı

```
%
clear all
close all
clc

a=5;
b=3;
x=0:0.1:5;
y=b*sqrt(1+x.^2/a^2);

% x=[0 10 20 30 40 50 75 100 125 150 180];
% y=[0 -2.1 -2.7 -3.5 -4 -5 -5.2 -6 6.5 -6.8 -7];

hedef=0.5;
mu=0.005;
an=1;
bn=1;
dongu=0;
anmat=[];
bnmat=[];
for i=1:20 %while(hedef>0.0000001)

    amac=(y.^2/bn -x.^2/an -1);
    turev1a= 2*sum((x.^2/an^2).*amac); %a ya göre 1.türev
    turev1b= 2*sum(-(y.^2/bn^2).*amac); %b ye göre 1.türev
    turev2aa = sum(-4*an*x.^2/an^4.*amac+2*x.^4/an^4 ); %a ya göre 2.türev
    turev2bb = sum( 4*bn*y.^2/bn^4.*amac+2*y.^4/bn^4 ); %b ye göre 2.türev
```

Ek 1.'in devamı

```

turev2ab = sum(-2*y.^2.*x.^2/(bn^2*an^2)); %a ve b ye göre 2.türev
matris=inv([turev2aa turev2ab;turev2ab turev2bb]);
an=an-matris(1,)*[turev1a;turev1b];
bn=bn-matris(2,)*[turev1a;turev1b];

anmat=[anmat an];
bnmat=[bnmat bn];
hedef=sum(amac)^2;
dongu=dongu+1;
end
dongu
hedef
figure
hold on;plot(x,y,'r');plot(x,y1)
an1=sqrt(an)
bn1=sqrt(bn)

```

ÖZGEÇMİŞ

Araştırmacı, 1981 yılında Erzurum'da doğdu. 1999 yılında Erzurum Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl kazandığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden üçüncülük derecesi ile 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. Doktora öğrenimi sırasında TÜBİTAK Yurt İçi Doktora Başarı Bursu almaya hak kazandı. 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. Halen aynı görevine devam etmekte olan araştırmacı iyi derecede İngilizce bilmektedir.