



**GÖMÜLÜ İLETİM HATTI YAPILARINDA DARBE ETKİLERİNİN  
GEOSENTETİKLER VASITASI İLE AZALTIMI**

**Güneş BABAGİRAY**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2017**

Güneş BABAGİRAY tarafından hazırlanan “GÖMÜLÜ İLETİM HATTI YAPILARINDA DARBE ETKİLERİNİN GEOSENTETİKLER VASITASI İLE AZALTIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. Süleyman PAMPAL

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Nejan HUVAJ SARIHAN

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Doç. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 09/02/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

Güneş BABAGİRAY

09/02/2017

# GÖMÜLÜ İLETİM HATTI YAPILARINDA DARBE ETKİLERİNİN GEOSENTETİKLER VASITASI İLE AZALTIMI

(Doktora Tezi)

Güneş BABAGİRAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2017

## ÖZET

Bu çalışmada, çeşitli kombinasyonlarda geosentetikler ile koruyucu tabakalar oluşturularak, gömülü boruların darbe yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla laboratuvar ve sahada, uygulamada sıkça kullanılan HDPE borular ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında uygulanan deneylerde, 110 mm ve 160 mm dış çaplı borular, değişken derinliklerde tek tabaka geosentetik serimi, çift tabaka geosentetik serimi ve bu geosentetiklerin boru üzerine tek kat ve dört kat sargılanması yapılarak darbe etkileri altında test edilmiştir. Sahada yapılan tam ölçekli deneylerde ise, 600 mm dış çaplı boru üzerinde belirli bir derinlikte tek tabakalı ve lamine yapıları geosentetik malzeme serimi yapılarak deneyler tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda boru üzerinden alınan ivme ölçümleri kullanılarak, koruyucu tabakaların enerji sönümlenme kapasiteleri hesaplanmış ve maliyetleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Gömülü boru üzerindeki koruyucu geosentetik tabakalarının serilme derinliği zemin yüzeyine yaklaştıkça koruma performansları artmıştır. Tek tabakalı geosentetik içeren deneylerde en başarılı koruma yapısı % 72,9 ivme sönümlenme kapasitesi ile geonet 3D olmuştur. Çift tabakalı güçlendirme elemanlarının 120 mm derinliğe serilerek gerçekleştirildiği deneylerde ise, ivme sönümlenme kapasitesi açısından en başarılı performansı geonet 3D ve geocell (h=50 mm, t=1 mm) kombinasyonu sergilemiştir. Sargılama sayısının artırılması, maliyeti artırmakla birlikte, maksimum ivmeyi düşürmüş ve performansı artırmıştır. Geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil elemanlarının tek tabaka halinde serilmesi ve sargılama tekniğiyle kullanıldığı test sonuçları karşılaştırıldığında, % 83,0 ivme sönümlenme kapasitesi ile geonet 2D (rockshield) kullanılarak dört kat sargılama en başarılı uygulama olmuştur. Laboratuvarda yapılan 29 adet darbe yükleme testi değerlendirildiğinde, en iyi koruma performansını % 91,7 ivme sönümlenme kapasitesi ile geocell (h=50 mm, t=1,5 mm) ve geotekstil kombinasyonundan oluşan güçlendirme yapısı sergilemiştir. Saha deneylerinde ise geotekstil, özellikle yoğunluğu arttıkça, % 83,3 ivme ve % 46,6 basınç sönümlenme kapasitesi ile en iyi performansı sergilemiştir. Arazi ve laboratuvar deneylerinde ortak kullanılan geosentetiklerin sonuçları değerlendirildiğinde geocell ivme sönümlenme performansı bakımından en düşük başarıyı sergilemişken, geotekstil elemanının daha yüksek koruma potansiyeli bulunduğu ortaya çıkmıştır. Tüm laboratuvar ve saha deneylerinde “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” hesaplanarak, optimum uygulamanın tek tabaka geogrid kullanılması ile sağlandığı gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Geosentetikler, geocell, geogrid, geonet, kaya kalkanı, geotekstil, gömülü boru sistemleri, darbe yüklemesi, sargılı boru, deneysel çalışma, kaya düşmesi, serbest düşme, çok katmanlı, zemin güçlendirme

Sayfa Adedi : 177

Danışman : Doç. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

# A STUDY ON THE REDUCTION OF IMPACT EFFECTS ON BURIED LIFELINE SYSTEM COMPONENTS BY GEOSYNTHETICS

(Ph. D. Thesis)

Güneş BABAGİRAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2017

## ABSTRACT

In this study, the behaviors of buried pipes protected by geosynthetics in various combinations under impact loading were examined. For this purpose, laboratory and field impact load experiments were carried out with HDPE pipes that are frequently used in practice. In the laboratory experiments, 110 and 160 mm diameter pipes were tested under impact load with protective layers consisting of single and double layer geosynthetics laid at varying depths and wrapped one and four times around the pipe. In the full-scale impact load experiments carried out in the field, different types of single-layer and laminar geosynthetic material types at a fixed depth were used as the protective layer on 600 mm outer diameter pipes. In these experimental studies, using the acceleration measurements taken from the pipe surface, the energy adsorption capacities of the various protective layers were calculated and evaluated together with their cost. As the depth of the protective geosynthetic layers laid on the buried pipe approaches to the ground surface, better protection performances have been observed. In the experiments with single-layer geosynthetics, the most successful protection was obtained through the use of geonet 3D with 72,9% acceleration adsorption. In the experiments where two layers of geosynthetic materials were placed at a depth of 120 mm, the most successful performance in terms of acceleration adsorption capacity was obtained by the combination of geonet 3D and geocell (h=50 mm, t=1 mm). Increasing the number of turn of wrappings increased the cost, but it also reduced the maximum acceleration exerted on the pipe through the impact load, thereby increasing the protection performance. Comparing the results of tests using single layers of geonet 2D, geonet 3D and geotextile elements and those with wrapping technique, quadruple wrapping using geonet 2D (rockshield) has been the most successful application, with an acceleration adsorption capacity of 83,0%. Considering the 29 laboratory impact tests, the protective structure consisting of the combination of geocell (h=50 mm, t=1,5 mm) and geotextile with 91,7% acceleration adsorption capacity has demonstrated the best performance. In the field tests, geotextile exhibited the best performance, especially with increasing density, with a 83,3% acceleration and a 46,6% pressure adsorption capacity. Evaluating the results of geosynthetics that were used both in the field and laboratory experiments, it can be stated that geocell exhibited the lowest success in terms of acceleration adsorption performance, whereas geotextile element was observed to have a higher protection potential against impact loads. In terms of "acceleration adsorption rate per unit cost", it has been shown that the optimum performance has been achieved by using single layer of geogrid.

Science Code : 91105

Key Words : Geosynthetics, geocell, geogrid, geonet, rockshield, geotextile, buried pipeline, impact load, wrapped pipe, experimental study, rock fall, free falling weight, multi-layered, soil reinforcement

Page Number : 177

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Doç. Dr. Sami Oğuzhan Akbaş'a, teknik konularda ve zorlu test çalışmalarında yardımını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Özgür Anıl'a,

Değerli katkılarıyla çalışmamı geliştirmeme vesile olan jüri üyeleri Prof. Dr. Nail Ünsal, Prof. Dr. Süleyman Pampal, Doç. Dr. Berna Unutmaz ve bu katkıların yanı sıra, International Geosynthetics Society tarafından layık görüldüğüm 2016 Student Award ödülüne başvuru yapmama vesile olan sevgili hocam Yrd. Doç. Dr. Nejan Huvaj Sarıhan'a,

Maddi ve manevi desteklerini hep yanımda hissettiğim sevgili anneciğime ve babacığım, Hayatımda her an en büyük destekçilerimden olan ve her zaman örnek alacağım değerli abime,

Sevgisini, desteğini ve sabrını benden hiçbir zaman esirgemeyen çok sevgili eşime,

Bu çalışmayı tamamlayabilmek için kimi zaman yanında olamadığım sevimli oğluma, Akademik çalışmalara her zaman destek olma taraftarı ve bu çalışmalara katkısı göz ardı edilemez Sadık Şerefoğlu ve firması Geoplas Plastik Zemin Teknikleri ve Kimya San. Tic. Ltd. Şti.'nin kıymetli çalışanlarına, ayrıca eski çalışanlarından olan Birol Akın ve Hüseyin Dinçer'e,

Çalışmalar esnasında öğrencilerimiz olan, şimdi meslektaş olmaktan gurur duyduğum Selçuk Mercan, Haydar Yıldız, Ayşe Karaaslan, Selçuk Malatyalı, Ayşen Közer, Ayşegül Kara, Mustafa Erol, Kaan Şifa Kulaksız, Uğur Arslan, Tahsin Ömür Budak, Burak Kayhan ve Resul Özkan Kendir'e,

Dürüst kişiliği ile çalışmalarımdaya verdiği her sözü tutmaya gayret gösteren Kolsan A.Ş. fabrika müdürü Derya Barlas'a,

Laboratuvar çalışmalarımdaya katkılarıyla Uzm. Faruk Ogün ve Uzm. Aydın Gökçe'ye, Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü tüm çalışanları ve başta aynı odayı yıllarca paylaştığım arkadaşım Özge Bican Sayılır olmak üzere arkadaşlarıma,

Çalışmamı ödüle layık gören Uluslararası Geosentetikler Derneği-International Geosynthetics Society (IGS)'ye,

Ve bu çalışmaya başlamam konusunda fikir veren Doç. Dr. Ayhan Gürbüz'e,

Sevgi ve saygılarım eşliğinde teşekkürlerimi sunarım...

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	5
3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....	23
3.1. Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği .....	23
3.2. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi .....	25
3.2.1. Elek analizi .....	26
3.2.2. Özgül ağırlık deneyi.....	27
3.2.3. Maksimum ve minimum boşluk oranları tayini.....	28
3.2.4. Kesme kutusu deneyi .....	28
3.3. Laboratuvar Çalışmalarında Kullanılan Geosentetiklerin Özellikleri.....	30
3.3.1. Geotekstil .....	31
3.3.2. Geogrid.....	32
3.3.3. Geocell .....	32
3.3.4. Geonet 3D .....	33
3.3.5. Geonet 2D (Rockshield).....	34



3.4. PE 100 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borunun Özellikleri .....	35
3.5. Ölçüm Aletlerinin Özellikleri .....	36
3.5.1. İvmeölçerler .....	36
3.5.2. Veri toplayıcı.....	39
3.5.3. Ölçüm aygıtları bağlantı kabloları .....	40
3.6. Laboratuvar Deney Elemanlarının Hazırlanması.....	41
3.7. Laboratuvar Deneylei .....	42
3.8. Laboratuvar Deneylei Maliyet Analizi .....	74
3.9. Laboratuvar Çalışmalarının Sonuçları ve Değerlendirmeler .....	78
3.9.1. Tek tabaka geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmeler.....	79
3.9.2. Çift tabaka geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmeler.....	83
3.9.3. Serilme derinliği ve boru çapı değiştirilerek yapılan güçlendirmeler.....	88
3.9.4. Et kalınlığı değiştirilerek yapılan güçlendirmeler.....	89
3.9.5. Farklı serilme derinliklerinde çift tabaka geosentetik ile güçlendirmeler..	90
3.9.6. Çift tabaka geosentetik kombinasyonunun serilme derinliği değiştirilerek yapılan güçlendirmeler .....	90
3.9.7. Boru çevresinin sargılanması ile yapılan güçlendirmeler .....	92
4. SAHA ÇALIŞMALARı .....	101
4.1. Deney Sahası .....	101
4.2. Kazı Kesiti ve Planı.....	102
4.3. Beton Bloğun Özellikleri .....	105
4.4. PE 100 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borunun Özellikleri .....	106
4.5. Ölçüm Aletlerinin Özellikleri .....	107
4.5.1. Basınçölçer.....	107
4.5.2. İvmeölçerler, veri toplayıcı, bağlantı kabloları .....	108

	<b>Sayfa</b>
4.6. Saha Çalışmalarında Kullanılan Geosentetiklerin Özellikleri .....	109
4.6.1. Geocell .....	109
4.6.2. Geogrid.....	110
4.6.3. Şerit geogrid .....	111
4.6.4. Geotekstil .....	112
4.6.5. Geogrid kompozit.....	113
4.6.6. Şerit geogrid kompozit.....	114
4.7. Saha Deneylei .....	115
4.8. Saha Deneylelerinin Maliyet Analizi.....	129
4.9. Saha Çalışmalarının Sonuçlarına ait Değerlendirmeler .....	130
4.10. Laboratuvar ve Saha Deneylelerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	135
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>139</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>147</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>151</b>
EK-1. Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri .....	152
EK-2. Laboratuvar testlerinde uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri .....	157
EK-3. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri .....	162
EK-4. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri.....	167
EK-5. Saha testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri...	172
EK-6. Saha testleri sonucunda basınçölçerlerden elde edilen basınç-zaman grafikleri ..	174
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>177</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Laboratuvar deneysel çalışmasında kullanılan kumun özellikleri.....	25
Çizelge 3.2. Elek analizi sonuçları.....	26
Çizelge 3.3. Özgül ağırlığın bulunması .....	27
Çizelge 3.4. Maksimum ve minimum boşluk oranları deneyi sonuçları .....	28
Çizelge 3.5. Kesme kutusu deneyi verileri .....	29
Çizelge 3.6. Geotekstil teknik özellikler tablosu .....	31
Çizelge 3.7. Geogrid teknik özellikler tablosu .....	32
Çizelge 3.8. Geocell teknik özellikler tablosu .....	33
Çizelge 3.9. Geonet 3D teknik özellikler tablosu .....	34
Çizelge 3.10. Geonet 2D (Rockshield) teknik özellikler tablosu.....	35
Çizelge 3.11. Kullanılan PE 100 borulara ait teknik özellikler .....	35
Çizelge 3.12. HDPE boruların üretiminde ve kalite kontrolünde uygulanan testler .....	36
Çizelge 3.13. Model 353B02 ivmeölçerinin teknik özellikleri.....	38
Çizelge 3.14. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri .....	40
Çizelge 3.15. 2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları ....	75
Çizelge 3.16. Laboratuvar deneylerinde kullanılan geosentetik türü ve miktarına bağlı olarak deney maliyetleri .....	76
Çizelge 3.17. Tek tabakalı geosentetik kullanılan deneylerin maliyetleri .....	77
Çizelge 3.18. Tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan laboratuvar deney sonuçları .	79
Çizelge 3.19. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan laboratuvar deney sonuçları .	84
Çizelge 3.20. Serilme derinliği değiştirilerek yapılan güçlendirmelere ait deney sonuçları.....	89
Çizelge 3.21. Çift tabaka geosentetik kombinasyonunun serilme derinliği değiştirilerek yapılan güçlendirmelerin deney sonuçları .....	91

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.22. Boru sargılama deneyleri sonuçları .....	92
Çizelge 3.23. Tek tabaka ve sargılama ile geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil kullanımı .....	96
Çizelge 3.24. Laboratuvar deneyleri sonuçları .....	98
Çizelge 4.1. Basınçölçere ait teknik özellikler.....	108
Çizelge 4.2. Geocell teknik özellikler tablosu .....	110
Çizelge 4.3. Şerit geogrid teknik özellikler tablosu .....	111
Çizelge 4.4. Geotekstil teknik özellikler tablosu .....	112
Çizelge 4.5. Geogrid kompozit teknik özellikleri.....	113
Çizelge 4.6. Şerit geogrid kompozit teknik özellikleri .....	115
Çizelge 4.7. 2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları .....	129
Çizelge 4.8. Saha deneylerine ait sonuçları .....	133

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Boru üzerinde yer alan çatlaktan gaz sızıntısı .....	8
Şekil 2.2. Gömülü boru üzerinde koruyucu eleman kullanım şekilleri .....	8
Şekil 2.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.4. Deneye ait şematik gösterim.....	12
Şekil 2.5. Koruma tabakası kullanım şekilleri .....	13
Şekil 2.6. Kauçuk-zemin karışımı ve geocell tabakası kullanım şekilleri .....	16
Şekil 2.7. Araç yükü altındaki zemine gömülü boru üzerinde geotekstil ve geocell koruması.....	19
Şekil 2.8. Büyük ölçekli deneylerin kesit ve üç boyutlu görüntüleri.....	19
Şekil 2.9. Deney düzeneğine ait şematik gösterim .....	21
Şekil 2.10. Deneyde kullanılan boru üzerine darbe testi .....	21
Şekil 3.1. Elek analizinden elde edilen granülometri eğrisi .....	27
Şekil 3.2. Kumun farklı düşey gerilmelere karşı kayma gerilmesi deformasyon grafiği.....	29
Şekil 3.3. İçsel sürtünme açısının belirlenmesi.....	30
Şekil 3.4. Referans deney (Deney 1)'de orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği.....	44
Şekil 3.5. Referans deney (Deney 1) yük-zaman grafiği .....	44
Şekil 3.6. Referans deney (Deney 1) yük-deplasman grafiği .....	45
Şekil 3.7. Deney 2'de orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği .....	47
Şekil 3.8. Deney 2 yük-zaman grafiği .....	47
Şekil 3.9. Deney 2 yük-deplasman grafiği.....	48
Şekil 3.10. 2014 yılı geosentetik birim fiyatları üzerinden deneylerin maliyetleri .....	77
Şekil 3.11. İvmeölçerlerden alınan ivme değerleri dağılımı.....	78

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.12. 160 mm dış çaplı boru üzerinde tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme değerlerinin karşılaştırılması .....	80
Şekil 3.13. Tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme sönümlenme performanslarının karşılaştırılması.....	81
Şekil 3.14. Kullanılan geosentetik dikkate alınarak, deney maliyetlerinin karşılaştırılması .....	82
Şekil 3.15. Tek tabakalı serimlerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı .....	83
Şekil 3.16. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme değerlerinin karşılaştırılması.....	85
Şekil 3.17. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme sönümlenme performanslarının karşılaştırılması .....	85
Şekil 3.18. Kullanılan geosentetikler dikkate alınarak, deney maliyetlerinin karşılaştırılması .....	86
Şekil 3.19. Çift tabakalı serimlerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı .....	87
Şekil 3.20. Tek ve çift tabaka serilerek yapılan güçlendirmelerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı.....	88
Şekil 3.21. Geosentetik alt yüzünün, ivmeölçere uzaklığının etkisi .....	89
Şekil 3.22. Boru çevresinin geosentetikler ile sargılanması sonucu maksimum ivme değerleri .....	92
Şekil 3.23. Deney 1 referans deneyine göre sargılama sonucu performanslar .....	93
Şekil 3.24. Sargılama ile güçlendirimin maliyet analiz grafiği.....	94
Şekil 3.25. Sargılama yapılan deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı .....	95
Şekil 3.26. Geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D elemanlarının kullanım şekillerine göre birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı.....	96
Şekil 3.27. Geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D elemanlarının kullanım şekillerine göre ivme değerleri .....	97
Şekil 3.28. Yapılan tüm deneylerde orta ivmeölçerden elde edilen maksimum ivme değerleri .....	99
Şekil 3.29. Yapılan tüm deneylerde maksimum ivme değerlerinin referans deneylere göre düşme oranı.....	99

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.30. Tüm deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlleme oranı.....	100
Şekil 4.1. Saha deneylerine ait kazı kesiti.....	103
Şekil 4.2. Saha deneylerine ait kazı planı .....	104
Şekil 4.3. Saha deneylerine ait kazı profili .....	105
Şekil 4.4. Beton kütle boyutları ve donatı metrajı .....	106
Şekil 4.5. Saha referans deneyi sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği .....	117
Şekil 4.6. Saha referans deneyi sonucunda basınçölçerlerden elde edilen basınç-zaman grafiği.....	117
Şekil 4.7. Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit.....	118
Şekil 4.8. Saha referans deneyi sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği .....	120
Şekil 4.9. Saha referans deneyi sonucunda alt basınçölçerden elde edilen basınç-zaman grafiği.....	120
Şekil 4.10. Geogridle güçlendirme yapılmış deneye ait kesit.....	121
Şekil 4.11. Şerit geogridle güçlendirme yapılmış deneye ait kesit .....	122
Şekil 4.12. Geogrid kompozit ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit .....	123
Şekil 4.13. Geotekstil (800 gr/m <sup>2</sup> ) ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit.....	125
Şekil 4.14. Şerit geogrid kompozit ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit.....	126
Şekil 4.15. Geotekstil (600 gr/m <sup>2</sup> ) ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit.....	128
Şekil 4.16. 2014 yılı geosentetik birim fiyatları üzerinden deneylerin maliyetleri .....	130
Şekil 4.17. Saha deneyleri sonucu ölçülen basınç değerlerinin karşılaştırılması .....	131
Şekil 4.18. Saha deneyleri sonucu ölçülen ivme değerleri .....	131
Şekil 4.19. Saha deneylerinin basınç sönümlleme performansları .....	134
Şekil 4.20. Saha deneylerinin ivme sönümlleme performansları.....	134
Şekil 4.21. Saha deneylerinde birim maliyet başına ivme sönümlleme oranı .....	135

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.22. Laboratuvarda ve sahada kullanılan geosentetiklerin ivme değerleri.....	137
Şekil 4.23. Laboratuvarda ve sahada kullanılan geosentetiklerin ivme sönümleme performansları .....	138





## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneği .....	23
Resim 3.2. Çekiç .....	24
Resim 3.3. Geotekstil .....	31
Resim 3.4. Geogrid .....	32
Resim 3.5. Geocell .....	33
Resim 3.6. Geonet 3D .....	34
Resim 3.7. Geonet 2D (Rockshield) .....	34
Resim 3.8. Boruya monte edilmiş iki adet piezoelektrik ivmeölçer .....	38
Resim 3.9. NI 9233-USB-9162 modeli veri toplayıcı .....	39
Resim 3.10. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo .....	40
Resim 3.11. 003A20 Model kablo içyapısı .....	41
Resim 3.12. İvmeölçerlerin ve borunun yerleşimleri .....	42
Resim 3.13. Deney 2'ye ait resim ve şematik gösterim .....	46
Resim 3.14. Deney 3'e ait resim ve şematik gösterim .....	49
Resim 3.15. Deney 4'e ait resim ve şematik gösterim .....	50
Resim 3.16. Deney 5'e ait resim ve şematik gösterim .....	51
Resim 3.17. Deney 6'ya ait resim ve şematik gösterim .....	52
Resim 3.18. Deney 7'ye ait resim ve şematik gösterim .....	53
Resim 3.19. Deney 8'e ait resim ve şematik gösterim .....	54
Resim 3.20. Deney 9'a ait resim ve şematik gösterim .....	55
Resim 3.21. Deney 10'a ait resim ve şematik gösterim .....	56
Resim 3.22. Deney 11'e ait resim ve şematik gösterim .....	57
Resim 3.23. Deney 12'ye ait resim ve şematik gösterim .....	58

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.24. Deney 13'e ait resim ve şematik gösterim.....	59
Resim 3.25. Deney 14'e ait resim ve şematik gösterim.....	60
Resim 3.26. Deney 15'e ait resim ve şematik gösterim.....	61
Resim 3.27. Deney 16'ya ait resim ve şematik gösterim.....	62
Resim 3.28. Deney 18'e ait resim ve şematik gösterim.....	63
Resim 3.29. Deney 19'a ait resim ve şematik gösterim.....	64
Resim 3.30. Deney 20'ye ait resim ve şematik gösterim.....	65
Resim 3.31. Deney 21'e ait resim ve şematik gösterim.....	66
Resim 3.32. Deney 22'ye ait resim ve şematik gösterim.....	67
Resim 3.33. Deney 23'e ait resim ve şematik gösterim.....	68
Resim 3.34. Deney 24'e ait resim ve şematik gösterim.....	69
Resim 3.35. Deney 25'e ait resim ve şematik gösterim.....	70
Resim 3.36. Deney 26'ya ait resim ve şematik gösterim.....	71
Resim 3.37. Deney 27'ye ait resim ve şematik gösterim.....	72
Resim 3.38. Deney 28'e ait resim ve şematik gösterim.....	73
Resim 3.39. Deney 29'a ait resim ve şematik gösterim.....	74
Resim 4.1. Saha deneyleri uygulama noktası .....	101
Resim 4.2. Arazi çalışmasına ait resim ve şematik gösterim.....	102
Resim 4.3. 600 mm dış çaplı HDPE boru.....	107
Resim 4.4. Arazi deneylerinde kullanılan basınçölçer.....	108
Resim 4.5. 600 mm dış çaplı boruya monte edilmiş piezoelektrik ivmeölçer.....	109
Resim 4.6. Arazi çalışmalarında güçlendirme elemanı olarak yerleştirilen geocell.....	110
Resim 4.7. Şerit geogrid.....	111
Resim 4.8. Geotekstil .....	112

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.9. Geogrid kompozit .....	113
Resim 4.10. Şerit geogrid kompozit .....	114
Resim 4.11. Referans deney kazısı .....	116
Resim 4.12. Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) uygulanması .....	119
Resim 4.13. Geogrid kompozit uygulanması.....	124
Resim 4.14. Şerit geogrid kompozit uygulaması .....	127



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>AC</b>	Alternatif akım
<b>bar</b>	100 kPa eşdeğerinde basınç birimi
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>c</b>	Kohezyon
<b>cm</b>	Santimetre
<b>C<sub>c</sub></b>	Eğrilik katsayısı
<b>C<sub>u</sub></b>	Üniformluk katsayısı
<b>D</b>	Çap
<b>dak</b>	Dakika
<b>dB</b>	Desibel
<b>D<sub>r</sub></b>	Rölatif sıklık
<b>D<sub>10</sub></b>	Zeminin ağırlıkça %10'unun geçtiği elek çapı
<b>D<sub>30</sub></b>	Zeminin ağırlıkça %30'unun geçtiği elek çapı
<b>D<sub>50</sub></b>	Zeminin ağırlıkça %50'inin geçtiği elek çapı
<b>D<sub>60</sub></b>	Zeminin ağırlıkça %60'ının geçtiği elek çapı
<b>e</b>	Boşluk oranı
<b>g</b>	Yerçekimi ivmesi
<b>gr</b>	Gram
<b>G<sub>s</sub></b>	Özgül ağırlık
<b>h</b>	Geocell hücre yüksekliği
<b>H</b>	Geosentetik serilme derinliği
<b>Hz</b>	Hertz
<b>J</b>	Joule (Nm)
<b>kg</b>	Kilogram
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>kPa</b>	Kilopascal
<b>m</b>	Metre

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>M</b>	Kütle
<b>Mg</b>	Megagram
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>ms</b>	Milisaniye
<b>mm</b>	Milimetre
<b>N</b>	Newton
<b>R</b>	Yarıçap
<b>s</b>	Saniye
<b>Shore</b>	Esnek olan malzemelerin sertlik birimi
<b>Sr</b>	Doygunluk derecesi
<b>VDC</b>	Volt, doğru akım
<b>t</b>	Et kalınlığı
<b>w</b>	Kaynak aralığı
<b>W</b>	Ağırlık
<b>γ</b>	Birim hacim ağırlık
<b>γ<sub>w</sub></b>	Suyun birim hacim ağırlığı
<b>γ<sub>d</sub></b>	Kuru birim hacim ağırlık
<b>φ</b>	İçsel sürtünme açısı
<b>Ø</b>	Çap
<b>μ</b>	Mikro
<b>ρ<sub>w</sub></b>	Suyun yoğunluğu
<b>ρ</b>	Kumun yoğunluğu
<b>σ</b>	Normal gerilme
<b>τ</b>	Kayma gerilmesi
<b>"</b>	İnç
<b>#</b>	Numara
<b>%</b>	Yüzde

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AASHTO</b>	American association of state highway and transportation officials
<b>ASTM</b>	American society for testing and materials
<b>BOTAŞ</b>	Boru hatları ile petrol taşıma anonim şirketi
<b>DIN</b>	Deutsches institut für normung
<b>HDPE</b>	High density polyethylene
<b>ICP</b>	Integrated circuit piezoelectric
<b>IEPE</b>	Integrated electronics piezo electric
<b>IGS</b>	International geosynthetics society
<b>ISO</b>	International organization for standardization
<b>İD</b>	İmalat doğrultusunda
<b>İDD</b>	İmalat doğrultusuna dik
<b>Max</b>	Maksimum
<b>MFI</b>	Melt flow index
<b>Min</b>	Minimum
<b>NI</b>	National instruments
<b>No</b>	Numara
<b>Ort</b>	Ortalama
<b>PCB</b>	Printed circuit board
<b>PE</b>	Polietilen
<b>PP</b>	Polipropilen
<b>PVC</b>	Polivinilklorür
<b>Ref</b>	Referans deney
<b>SW</b>	İyi derecelenmiş kum
<b>TS</b>	Türk standardı
<b>USCS</b>	Birleşik zemin sınıflama sistemi
<b>USD</b>	Amerikan doları
<b>UV</b>	Ultraviyole
<b>VK</b>	Varyasyon katsayısı
<b>2D</b>	Two dimensional
<b>3D</b>	Three dimensional

## 1. GİRİŞ

Enerji ve su gibi ihtiyaçların kesintisiz bir şekilde karşılanabilmesi hususunda borular ile teşkil edilen “yaşam hatlarının” önemi açıktır. Türkiye sınırları içinde mevcut olan, yapımı devam eden veya yapılması planlanan petrol ve doğalgaz taşıma sistemleri yanında, su veya atık su gibi zaruri malzemelerin kilometrelerce mesafelere iletilmesi için gerekli olan boru hatları bulunmaktadır. Çeşitli maddelerin taşınmasında kullanılan boru hatları, geçiş bölgeleri üzerinde heyelan veya kaya düşmesi gibi birçok doğal afetle karşılaşabilmektedirler.

Zeminler, çekme dayanımı yönünden zayıf oldukları için, taşıma gücünü arttırmak ve oturmaları azaltmak amacıyla gerektiğinde geosentetik malzemeler ile güçlendirilmektedirler. Yapılar için uygun zeminin hazırlanmasında önemli rol oynayan geosentetikler, zemin özelliklerini iyileştirerek yapı sistemlerini tamamlamakta, böylelikle inşaat projelerine hız kazandırabilmektedirler.

Bu noktadan hareket ile gerçekleştirilen çalışmada, gömülü boruların hizmet süreleri boyunca maruz kalabilecekleri çeşitli darbe yükleri (kaya düşmesi, çarpma vb.) altındaki davranışlarını, koruma tabakaları varlığında incelemek amaçlanmıştır. Darbe yüklerinden dolayı meydana gelebilecek hasarların ekonomik biçimde önüne geçilebileceğini gösterebilmek amacıyla, altyapı uygulamalarında sıkça kullanılan HDPE (High Density Polyethylene-Yüksek Yoğunluklu Polietilen) borular, geosentetik koruyucu malzeme koruması altında teste tabi tutulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, gömülü olan boru üzerine çeşitli kombinasyonlarda geosentetikler ile koruyucu tabakalar oluşturulmuş ve darbe yüklemesi yapılmıştır. Belirli bir derinlikte bulunan boruya aktarılan maksimum ivme, maksimum deplasman, maksimum yükün yanı sıra, geosentetiklerin enerji ve basınç sönmüleme yetenekleri maliyetler de dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilmiş deneylerde, geosentetiklerin çeşitleri, kullanım şekilleri, serilme derinlikleri ve boru çapları değişken olarak seçilerek, darbe yüklerinin, geosentetikler vasıtası ile korunan gömülü boruya etkilerinin ortaya çıkartılması öngörülmüştür. Çalışmada kullanılan geosentetikler, çeşitli yükseklik ve et kalınlıklarında

geoceller, geogrid, geogrid kompozit, geotekstil, geonet 2D, geonet 3D, şerit geogrid, şerit geogrid kompozitlerdir.

Literatürde geosentetiklerin ve farklı tiplerdeki geosentetiklerin birleştirilmesi ile oluşturulan kompozitlerin davranışının darbe etkisi altında mevcut kapsamda yeterli biçimde incelenmediği görülmüştür. Bu doğrultuda çalışmanın esas amacı, gömülü yer altı sistemlerinde geosentetik kullanımının önemini araştırmak, geosentetik kullanımının yararlarını ortaya koymak ve yapılan çalışmalar ile sonuçları tasarımcıların hizmetine sunmak olmuştur. Hangi geosentetik ürünün, ne tip koşullarda, ne kadar miktarının, ne sebeple kullanıldığı konusunda uygulamada bir fikir oluşması ve ihtiyaç duyulduğunda başvurulabilmesi için sonuçların abaklaştırılması, ekonomik kıyasların kamu ve özel sektörde yer alan hesap ve uygulama basamağındaki tüm kullanıcıların hizmetine sunulması planlanmıştır. Böylelikle laboratuvar ortamında ve arazide tam ölçekli boyutlarda yapılmış olan deneyler ile ulaşılabilecek sonuçların literatüre ve piyasa kullanımına faydalı olacağı öngörülmektedir.

Konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalara bu çalışmanın ikinci bölümünde yer verilmiştir. Literatürde geosentetiklerin iyileştirme etkisi ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalarda, genellikle statik yükleme üzerinde durulduğu görülmüştür. Gömülü boruların geosentetik kullanılarak dayanımlarını artırmaya yönelik çalışmalar ise, basınçlı boruların çevreye zarar vermemesi veya sivri uçlu bir cisimle delinmeleri yönündedir. Koruyucu yapı olarak büyük çoğunlukla geocell, geogrid veya geotekstile yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, laboratuvar ortamında uygulanan deneyler ile ilgili deney düzeneği, kullanılan kum ve boru ile ölçüm aletlerinin özelliklerine yer verilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, 110 mm ve 160 mm dış çaplı HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) boru, değişken derinliklerde tek tabaka geosentetik serimi, çift tabaka geosentetik serimi ve bu geosentetiklerin boru üzerine bir kat ve dört kat sargılanması yapılarak darbe etkileri altında test edilmiştir. Elde edilen ivme ve deformasyon değerleri, koruyucu tabakaların darbe yüklemesi karşısındaki enerji sönümleme performansları ve maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise sahada yapılan tam ölçekli deneyler ele alınmıştır. Belirli bir derinlikte tek tabaka geosentetik serimi ve kompozit yapıları geosentetik serimi



yapılarak darbe etkileri altında test edilen 600 mm dış çaplı HDPE boru üzerinden ivmeölçerler yardımıyla zamana bağlı veriler elde edilmiştir. Ayrıca zemine yerleştirilmiş basınçölçerler ile ölçülen basınç değerleri, koruyucu tabakaların basınç sönümlene yeteneklerini ortaya koymuştur. İvme ve basınç ölçümleri yanında, deformasyon değerleri, koruyucu tabakaların darbe yüklemesi karşısındaki enerji sönümlene performansları ve maliyetleri de karşılaştırılmıştır.

Son bölümde, laboratuvar ve saha deneyleri birlikte ele alınarak tüm deneylerden elde edilen veriler değerlendirilmiş ve sonuçlara yer verilmiştir. İvme, deplasman, basınç ölçümleri sonucunda elde edilen bilgilerin yanı sıra maliyet ilişkilerinden bahsedilmiş ve ileride bu çalışmaya ek olarak geliştirilebilecek konulara değinilmiştir.



## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde geosentetiklerin iyileştirme etkisi ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalarda, genellikle statik yükleme üzerinde durulduğu görülmüştür. Buna ek olarak ulaşım yapıları altında yaygın kullanımları düşünülerek tekrarlı yükleme yapılan testler de mevcuttur. Gömülü boruların geosentetik kullanılarak dayanımlarını artırmaya yönelik çalışmalar ise, basınçlı boruların çevreye zarar vermemesi veya sivri uçlu bir cisimle delinmeleri yönündedir. Büyük çoğunlukla geocell kullanılan testlerde kimi zaman geogrid veya geotekstile rastlanmış ancak bu çalışma kapsamında yer alan şerit geogrid, kompozit yapılı geogridler ve kaya kalkanı olarak bilinen iki boyutlu geonet çeşidine ait çalışmalara rastlanmamıştır. Bu bağlamda, bu bölümde, daha önce yapılmış bazı önemli çalışmalar özetlenmiştir.

Dash, Krishnaswamy ve Rajagopal (2001), yaptıkları çalışmalarında kum üzerinde yer alan şerit temel altındaki zeminin, geogridlerden örülen geocell ile güçlendirilme etkinliği incelemişlerdir. Deneyler, 1200 mm uzunluğunda, 332 mm genişliğinde ve 700 mm yüksekliğindeki çelik tank içinde, kumun sıklığı, geocell hücre yükseklik ve genişliği, geocell modeli oluşturma tekniği, geocell serilme derinliği ve geogrid rijitliği değişkenleri altında yapılmıştır. Kullanılan geoceller, geogridlerin belli uzunluk ve yüksekliklerde kesilerek plastik klipslerle bağlanması ile oluşturulmuştur. Paralel şeritler arasına zikzak şeklinde klipslenen geogridler, zikzaklar iç içe geçecek ve karşılıklı gelerek kareler oluşturacak şekilde iki farklı bağlama yöntemiyle bir araya getirilmiştir. Maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 17,41 ve 14,30 kN/m<sup>3</sup> olarak belirtilmiş, USCS sınıflandırma sistemine göre kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır. Standart üç eksenli basınç deneyinden % 30, % 50 ve % 70 rölatif sıklık değerleri için sırasıyla 39,2°, 41,0°, 42,2° içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Kullanılan model temel 100 x 330 mm boyutlarında ve 25 mm et kalınlığındadır. Temelin her iki yanına deformasyon ölçer bağlanmış ve yenilme olmadığında temel oturması 50 mm civarına ulaşıncaya kadar yükleme devam etmiştir. Yük hidrolik krikolo ile yavaş yavaş artırılarak uygulanmıştır.

Geocell tabaka ile temel yüklerinin daha derinlere aktarılması nedeniyle performansta iyi bir ilerleme elde edilebilmiştir. İç içe geçmiş zikzaklar şeklinde bağlanan geocell formu daha iyi sonuçlar vermiştir. Geocell donatısı kullanıldığında, donatısız kumun nihai taşıma

kapasitesinin 8 katı kadar bir yükte ve temel genişliğinin % 50'sine eşit bir oturmada bile yenilme gözlenmemiştir. Geocellin zeminde oluşacak tüm olası kırılma düzlemlerini engelleyeceği aşamadaki en uygun genişliği temel genişliğinin yaklaşık 4 katı kadar bulunmuştur. Maksimum fayda, geocell tabakanın temelin altından, temel genişliğinin 0,1 katı kadar derinlikte olması durumundan elde edilmiştir. Geocell yapısını oluşturan geogridlerin çekme dayanımı, performans değerlendirmede yeterli bir parametre değildir. Bunun yanında gözenek açıklığının ve eksen yöneliminin de geocell ile güçlendirilmiş temel yatağının taşıma kapasitesinde önemli etkisi vardır. Geocell hücrelerinin optimum en/boy açıklık oranı, güçlendirilmiş zemindeki şerit temeller için 1,67 civarında çıkmıştır.

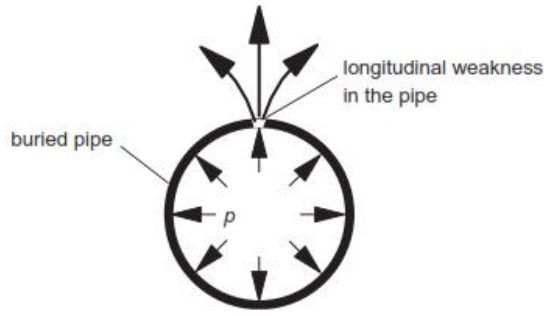
Laman ve Yıldız (2003), geogrid donatılı kum zemin üzerinde halka model temeller ile yapmış oldukları deneylerde, temel iç çapı, ilk geogrid derinlik etkisi, geogrid tabaka sayısı ve tabaka uzunluğu değişkenleri altında, tek eksenli bir geogrid tabakanın bile üç kata kadar taşıma gücünü iyileştirdiğini bulmuşlardır. Ayrıca tam dairesel olan bir temel ile, halka şeklindeki model temel aynı dış çapta benzer performans sergilemiştir. Bu durum pratikteki uygulamalar için ekonomik bir çözüm sağlamıştır.

Deney tankı, 700 x 700 x 700 mm boyutlarındadır. Tankın ön ve arka yüzü 8 mm cam, diğer yanları ise 20 mm kalınlıkta ahşap malzemeden oluşmuştur. Halka iç çapı  $r$ , dış çapı  $R$  olarak tanımlanmıştır ve  $r/R=0; 0,30; 0,53; 0,65; 0,75$  boyutlarında 5 farklı dairesel temel kullanılmıştır. İlk tam dairesel olan halka temellerin tümünde  $R = 85$  mm ve model temel et kalınlığı 20 mm'dir. Kuru birim hacim ağırlığı  $17,1 \text{ kN/m}^3$  ve içsel sürtünme açısı  $41^\circ$  olarak belirlenen kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır. Deney tankına 25 mm tabakalar halinde serilip el vibratörü ile sıkıştırılarak yerleştirilen kum, temel altına kadar konulmuştur.

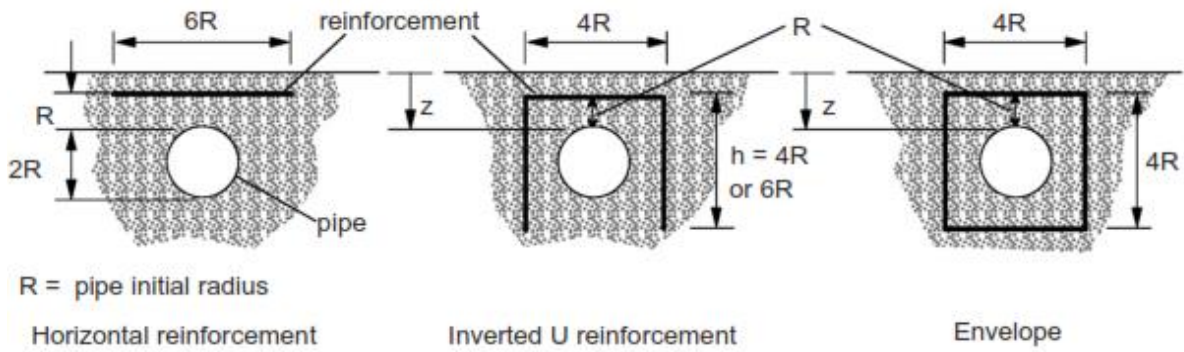
İlk test serisinde, geogrid tabaka sayısı dört; temelin ilk donatıya uzaklığı temel çapının 0,3 katı; donatılar arası mesafe temel çapının 0,3 katı; donatı uzunluğu temel çapının beş katı olmak üzere sabit tutulmuştur. Böylelikle iç çapın dış çapa oranı değişken alınarak taşıma gücüne etkisi incelenmiştir. Optimum iç çapın temel çapının 0,3 katında sabitlendiği görülmüştür. İkinci test serisinde ilk donatı mesafesinin temel çapına oranı 0,2 ile 1 arasında değiştirilerek, taşıma gücüne etkisi için iç çapın dış çapa oranı 0,3, donatı sayısı dört, donatılar arası mesafenin çapa oranı 0,3 ve donatı uzunluğunun temel çapına oranı beş olarak sabit tutulmuştur. Güçlendirmeden maksimum yararın sağlanabilmesi için, ilk

geogrid tabakasının optimum yerleşimi halka temelin alt kısmından itibaren temel çapının 0,3 katı mesafede aşağıda olduğu durumda ortaya çıkmıştır. Üçüncü seride ise iç çapın dış çapa oranı 0,3, donatı uzunluğunun temel çapına oranı beş, temelin ilk donatıya uzaklığı temel çapının 0,3 katı, donatılar arası mesafe temel çapının 0,3 katı olmak üzere bu değerler sabit tutularak donatı tabaka sayısının optimum değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesi artmıştır. dört donatıdan sonra taşıma kapasitesi üzerinde etki ortadan kalkmaya olmamaya başlamıştır. Dördüncü test serisinde geogrid tabaka uzunlukları temel çapının bir katından beş katına değiştirilmiş ve uzunluğun taşıma gücüne etkisi diğer tüm değişkenler sabit tutularak incelenmiştir. Geogrid katman uzunluğunun temel çapının üç katından büyük olduğu durumda taşıma kapasitesinin sabitlenmeye başladığı gözlenmiştir.

Tupa ve Palmeira (2007), gömülü basınçlı boruları çelik bir tank içinde, geotekstil ve 20 x 20 mm gözenek açıklıklı geogrid zemin koruması altında test etmişlerdir. Böylece basınçlı boruların patlaması durumunda çevre yapılara ve insanlara zarar vermesinin önlenilme yöntemleri araştırılmıştır. İki çeşit boru deformasyonu düşünülmüştür. Bunlardan birincisi, silindirik bir boşluğun yenilmeye kadar sürekli genişlemesinden ibarettir ve ikincisi boru içinde uzunlamasına bir çatlaktan gaz sızıntısı şeklindedir (Şekil 2.1). Bu amaçla, 75 mm dış çaplı, 2 mm et kalınlığı olan boru üzerinde, 25 mm uzunluğunda ve et kalınlığı 0,45 mm'ye düşürülerek zayıflatılmış şerit bölge oluşturulmuştur. Her iki tür de boruların çökme mekanizmalarını açıklamayı, zemin, boru ve güçlendirme tabakası arasındaki etkileşimi belirlemeyi ve güçlendirmelerin farklı düzenlemelerinin, tiplerinin ve özelliklerinin etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Model testler 1,6 x 0,5 m uzunluk ve genişliğe, 0,5 m yüksekliğe sahip metal tank içinde yapılmıştır. Donatılar, borunun yarıçapı kadar üst mesafesine serilerek, boru çevresinden yarıçapı kadar uzağına boruyu zeminle birlikte çevreleyecek şekilde ters U tipte ve zeminle birlikte sargılama olmak üzere 3 şekilde kullanılmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. Boru üzerinde yer alan çatlaktan gaz sızıntısı (Tupa ve Palmeira, 2007)



Şekil 2.2. Gömülü boru üzerinde koruyucu eleman kullanım şekilleri (Tupa ve Palmeira, 2007)

Söz konusu çalışmada, geotekstil, geogridten daha iyi performans sergilemiştir, çünkü geotekstil korumasında zemin parçacıkları koruyucu yapı içinde kalmıştır. Geogridte gözenek açıklığından geçen zemin partikülleri koruyuculuk özelliğinin etkisini azaltmıştır. Yapılan güçlendirme ne kadar sınırlandırma yapıyorsa deney performansı da o kadar iyi sonuç vermiştir. Bu çalışmada test edilen düzenekler içinde en iyi performansı gösteren uygulama, zemin ve boruyu birlikte saran sargılama tekniği olmuştur. Bunu ters U sargılaması izlemiştir.

Silindirik boşluğun genişleme testlerinde ters U ve sargılama düzenekleri kullanılan testlerde, zemine aktarılan basınç sabit kalmak koşulu ile boşluğun şekli güçlendirilme yapılmamış teste kıyasla silindirik şekline yakın kalmıştır. Yine ters U ve sargılama düzeneklerindeki güçlendirme testlerinde, zemin yüzeyinin kabarması güçlendirilmemiş testlere göre hatırı sayılır şekilde daha küçük olmuştur. Herhangi bir güçlendirme yapılmamış testlerde önemli ölçüde düşey yer değiştirme görülürken, güçlendirme olan testlerde ihmal edilebilecek ölçülerde bir hareket olmuştur. Borunun gaz patlamasına bağlı

bu hareketinin azalması, boru hatlarının bağlantı noktaları ve diğer parçalarına gelecek hasarı da azaltacaktır.

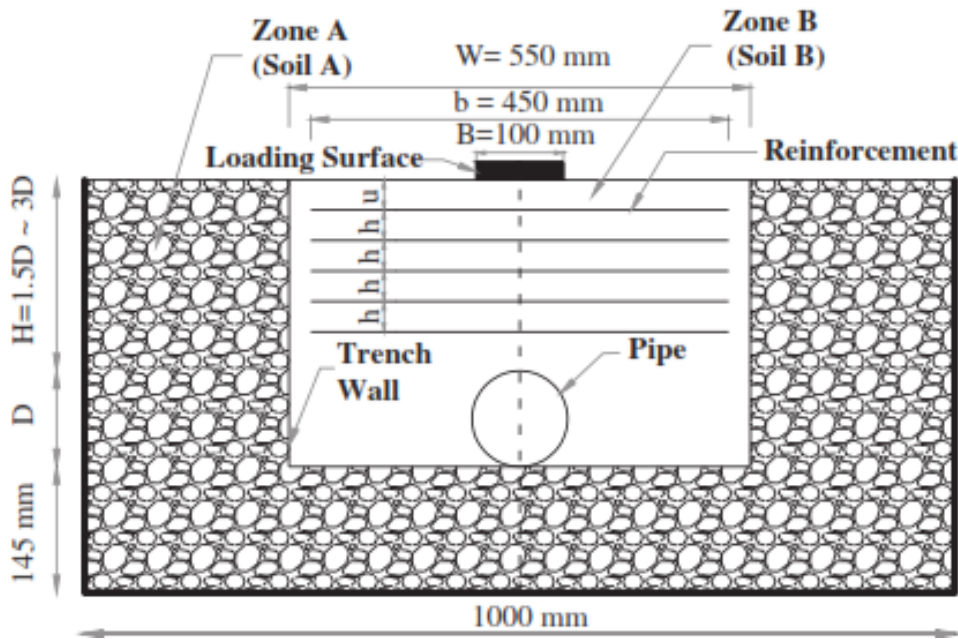
Zhou ve Wen (2008), yumuşak zeminler üzerindeki kum tabakaların güçlendirilmesi deneyi için, 3060 x 1180 mm boyutlarında, 2000 mm yükseklikli çelik bir tank kullanmışlardır. Tank, 1700 mm boyunca kohezyonu 3 kPa, içsel sürtünme açısı  $6,7^\circ$ , likit limiti 30,4 ve plastik limiti 20,3 olan yumuşak zeminle doludur. Üzerinde duruma göre geogrid veya geocell takviyeli 300 mm'lik kum tabaka vardır. Onun üzerinde basıncın uygulandığı hava yastığı bulunmaktadır. Geosentetikler üzerinde deformasyon ölçerler bulunurken, basınçölçerler yumuşak zeminle kum arasına konulmuştur.

Bir veya iki tabaka geosentetik serimi yapılarak dört seri test yapılmıştır. İlkinde yumuşak zemini kaplayan 300 mm kum yastık, ikincisinde kum yastık içine bir tabaka geogrid, üçüncüsünde iki tabaka geogrid, sonuncusuna ise bir tabaka geocell denenmiştir.

Geocell güçlendirmeli kum tabakası, alttaki yumuşak zemin tabakasındaki oturmaları oldukça azaltmıştır. Oturma eğilimleri yalnız yumuşak zemin üzerinde yer alan kum tabakası dikkate alındığında simetrik noktalarda benzer eğilimdeyken tam ortada basıncın artmasıyla artış göstermektedir. Tek tabaka geogridle desteklenmiş kum tabaka, yumuşak zeminin gerilim alanına adapte olabilmıştır. Uygulanan basınç, geogrid zemin ara yüzünde sürtünmeye fayda sağlayarak ve oturmada azalma sağlamıştır. Kum tabakada geocell donatı, geogrid donatıya göre oturmalarda nispeten daha iyi bir performans sergilemiştir. Üzerine uygulanan basıncı yanal kilitleme ile yeniden dağıtan geocell, alttaki yumuşak zeminde basıncı azaltan bir etki sergilemiştir. Deformasyonlar, referans deney sayılan donatısız teste göre kum tabaka içinde tek tabaka geogrid, çift tabaka geogrid ve tek tabaka geocell varken sırası ile % 39, % 40, % 44 azalma göstermiştir.

Moghaddas Tafreshi ve Khalaj (2008) çalışmalarında, kötü derecelenmiş kum zeminde % 42, % 57 ve % 72 sıklık oranlarında, boru çapının 1,5 ile üç katı derinlikte gömülü boru üzerinde, araç yükünü benzeştirme amaçlı tekrarlı yük modellenmesi yapmışlardır. 1000 x 200 mm boyutlarında, 1000 mm yüksekliğinde çelik tank kullanılmıştır. 784,5 kPa'a kadar farklı büyüklüklerde düşey tekrarlı yük uygulayabilen yükleme hücresi 0,5 Hz'ye kadar frekans aralığına izin vermektedir. Tüm testlerde 539,4 kPa basınç uygulanmıştır. 1000 devre kadar yükleme yapılmıştır. Radyal deformasyonlar, 110 mm çaplı, 4 mm kalınlıklı, 210 mm uzunluklu plastik boru üzerinden sekiz noktadan alınmıştır. Kumun rölatif sıklığı,

donatı tabakası sayısı ve boru gömülme derinliği değişken olarak seçilmiştir (Şekil 2.3). Üç değişik rölatif sıklıkta, dört farklı boru gömülme derinliğinde ve beş geosentetik tabaka serimiyle sonuçlar incelenmiştir. Toplam deformasyon ile karşılaştırıldığında, tüm testlerde boru deformasyonunun ve zemin yüzeyi oturmasının büyük kısmı, yük tekrarlarının sayısına bağlı olarak, ilk darbenin sonunda olmuştur. Boru deformasyon oranı, yük tekrarının artması ile azalmaktadır. Boru üzerindeki deformasyonlar, yaklaşık 400 saniye (120 tekrar) sonra sabit kalmaktadır. Geogridle güçlendirilmiş zeminde boru deformasyonu ve zemin yüzey oturması azalmaktadır. Ayrıca gevşek zeminde geosentetik güçlendirme performansı sıkı ve orta zemine göre daha başarılıdır. Zemin yüzey oturması ve boru deformasyonu, zemin rölatif sıklığı arttıkça azalmaktadır. Boru gömülme derinliği arttıkça, boru deformasyonu azalarak zemin yüzey deformasyonu artış göstermiştir. 27 x 27 mm gözenek açıklığı olan geogrid kullanımı ile boru deformasyonu % 56, yüzey oturması % 65 azalmıştır. Borunun maksimum deformasyonu beş tabaka donatı kullanıldığında ve serilme derinliği boru çapının üç katı olduğunda gevşek zeminde % 54 oranında ve sıkı kumda % 40 oranında azalmaktadır. Maksimum oturma beş tabaka donatı kullanıldığında ve serime derinliği boru çapının üç katı olduğunda gevşek kumda % 58 oranında ve sıkı kumda % 51 oranında azalmaktadır. Sonuçlardan elde edilen geogrid optimum uzunluğu, boru çapının 4-5 katı kadardır. İlk geogridin optimum serilme derinliği ise yükleme plakasının yaklaşık 0,35 katı kadardır. Boru deformasyonu, borunun çapının 2,5 katı derinliğe gömüldüğü tüm testlerde donatı tabakası sayısı ne olursa olsun % 5'ten fazla olmuştur.



Şekil 2.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Moghaddas Tafreshi ve Khalaj, 2008)



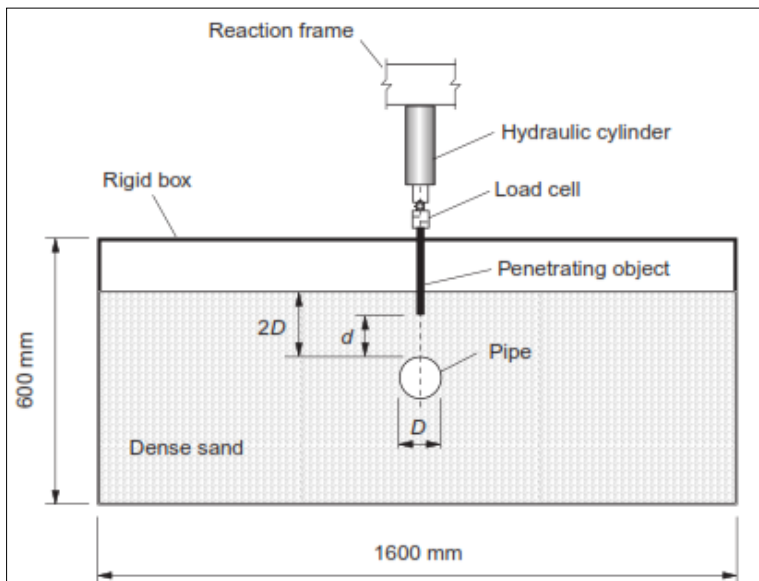
Geonet ile yapılan çalışmalar ise diğer geosentetiklerin kullanımında göre oldukça kısıtlıdır. Madhavi, Latha ve Somwanshi (2009), geonet ve geogrid kullanarak gerçekleştirdikleri laboratuvar testlerinde,  $44^\circ$  içsel sürtünme açısına sahip kötü derecelenmiş kum zemin üzerinde kare temel yüklemeleri yapmışlardır. Model kare temel, 150 mm kenar uzunluğu, 25 mm et kalınlığına sahiptir. Geosentetik tipi ve konumu, çekme kuvveti miktarı gibi parametreler çalışılmıştır. Bu bağlamda 900 x 900 x 600 mm boyutlarında çelik tank kullanılmıştır. Geogridten daha zayıf olan geonet bile optimum tabakalandırıldığında, aksi şekilde konumlandırılmış güçlü geogridten iyi sonuçlar verebilmiştir. Bu da donatıların çekme kuvvetleri dışında, yerleşim şekillerinin de taşıma gücünde önemli rol aldığını göstermiştir. Geosentetik optimum etki derinliğinin temel genişliğinin iki katı ve geosentetik tabakaları arası optimum mesafenin ise temel genişliğinin 0,4 katı olduğu görülmüştür.

Dong, Han ve Hong (2010), üçgen göz açıklığı olan geogridlerin statik yükleme altındaki davranışlarını incelemek amacıyla,  $6400 \text{ cm}^2$  kare plan alanına sahip deney tankında 150 mm çaplı yükleme plakasına 1000 kPa basınç uygulanarak Kansas nehrine ait kötü derecelenmiş kum üzerinde deneyler yapmışlardır. Geogrid göz açıklık şekli, yerleşimi ve sayısı değişkenlerdir. Sonuçlar, yükleme plakasının çapının  $1/3$ 'ü kadar derinlikte yer alan geogrid varlığında performansın daha iyi olduğunu göstermiştir. Üçgen göz açıklıklı geogridde arayüz kesme dayanımı daha fazla olduğundan, çift eksenli geogridlerden daha iyi kapasite sergilemişlerdir. İkinci katman geogrid taşıma gücünü artırırken sistem etkinliğini azaltmıştır. Geogrid 50 mm (model temel çapının  $1/3$ 'ü) veya 100 mm'ye (model temel çapının  $2/3$ 'ü) yerleştirildiğinde, donatısız durumdan daha iyi sonuç vermiştir. En iyi sonuç ise 50 mm'ye yerleştirildiğinde elde edilmiştir. Bu çalışmada da zemin yüzeyine yakın güçlendirme elemanları daha iyi performans sergilemiştir.

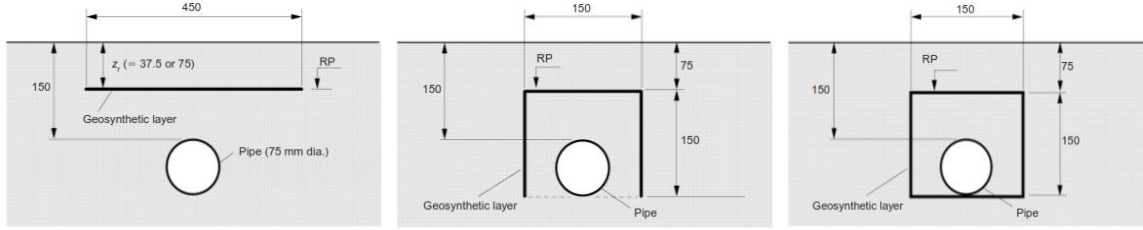
Palmeira ve Andrade (2010), rijit bir nesnenin zemine batmasıyla gömülü boruların görebileceği zararları değerlendirmek için deneyler yapmışlardır. Deney tankı 1600 mm uzunlukta, 500 mm genişlikte ve 600 mm yükseklikte (Şekil 2.4). Batırılan nesne 20 mm kalınlıklı, 100 mm uzunluklu çelik bir cisimdir. Düşey yönde veya farklı açılarla delici nesne zemine batırılarak uygulanan yük ve borudaki deformasyonlar ölçülmüştür. Boru üstü ve boru altına dış yüzeye deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Batırma nesnesi düşeyle  $16^\circ$  ve  $45^\circ$  eğim yaparak, boru merkezinden geçecek şekilde uygulanmıştır. 75 mm çapında 1,5 mm et kalınlığında olan çelik boru, zemin yüzeyinden 150 mm derine

serilmiştir. Kullanılan zemin dane çapı 0,5-2,2 mm arasında değişen üniform kumdur. 50 mm çapında basınçölçerler 20, 87,5 ve 162,5 mm mesafelerde boru yanlarına, 25 mm mesafede boru üstüne ve 50 mm mesafede boru altına yerleştirilmiştir. Güçlendirmeler geotekstil ve 20 x 20 mm gözenek açıklıklı geogrid ile yapılmıştır. Üç farklı konumda geosentetik kullanılmıştır. Birincisi zemin yüzeyinden 37,5 ve 75 mm derine, 450 mm uzunluğunda geosentetik serilerek, ikincisi boruyu içine alacak şekilde ters U şeklinde ve üstten 75 mm yanlardan 37,5 mm mesafe kalacak şekilde zeminle birlikte sargılanarak, üçüncüsü ise aynı sargının boru alt kısmı direkt geosentetik üzerine oturacak şekilde olmak üzere zarflama şeklinde sargılanarak denenmiştir (Şekil 2.5).

Donatılı zeminde borunun zarar görebilmesi için uygulanması gereken yükün artırılması gerekmiştir. Cismin donatılı durumda batması için gereken kuvvet donatısız durumda yapılan deneydekinin yaklaşık iki katından fazla olmuştur. Geogrid elemanının performansı geotekstile göre daha başarılı olmasına rağmen, son delgi yükü gözeneklerden dolayı biraz daha düşük olarak ortaya çıkmıştır. Ters U ve zarflama şeklinde zeminle birlikte boru sargılaması sırasında donatıların düşey bölümlerinin zemin tarafından yanlara itildiği ve zemin danelerinin geogrid açıklıklarından geçmesinin zemin ile arasındaki bağı azalttığı görülmüştür. Fakat bu durum zarflama şeklinde sarılı düzenlemede ters U'ya göre daha az olmuştur. Bunun sebebi sargılı olan durumda, tabandaki sargının sınırlayıcı etki yapması olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.4. Deneye ait şematik gösterim (Palmeira ve Andrade, 2010)



Şekil 2.5. Koruma tabakası kullanım şekilleri (Palmeira ve Andrade, 2010)

Deneyleerde en iyi performansı zarflama şeklinde zeminle birlikte kutu şeklinde sargılama yöntemi vermiştir. Bu durumda uygulanan yük, donatısız zemine göre 9,3 kat daha büyük çıkmıştır. 16°lik batma sırasında cismin donatılı durumda batması için gereken kuvvet donatısız durumda yapılan deneydekenden yaklaşık 5,2 kat fazla olmuştur. Kuvvetin düşeyle yaptığı açılı donatı sarımının en üst yatay kısmı boyunca zemin kütlelerinin düşey kısmının kaymasına neden olarak, geogrid ara yüz boyunca daha büyük sürtünmeler ile karşılaşmasını sağladığından geogrid daha iyi performans sergilemiştir. 45° eğimle batırmada ekipmanların boyutlarının yeterli olmadığı bildirilmiştir. En düşük basınç ölçümleri zemin yüzeyinden 37,5 mm derinliğe geosentetik serilmesi ile elde edilmiştir. Batan cisim daha yüzeysel olan bu geosentetikleri çok az bir miktar geçtiğinde boru üstünde yer alan basınçölçerdeki düşey gerilme büyük bir hızla artmaya başlamıştır. Fakat boru üstünden 25 mm mesafede yer alan bu basınçölçerden okunan değerler sarılı geosentetik durumlarında donatı katmanına henüz gelmemişken büyük artışlar göstermiştir. Ters U düzenlemesinde, geogrid ve geotekstilde benzer fakat sargılı uygulamada geotekstil testinde daha büyük gerilmeler ölçülmüştür. Bu durum, geogridin gözenekli yapısının aksine, her iki uygulama şeklinde de donatı düşey kısmın yanal deformasyonu ile ve sürekli geotekstil tabakası ile sağlanan sarılı uygulamadaki yanal hapsedilme ile alakalıdır. Batan cismin düşeyle açısı arttıkça, boru üzerindeki yatay gerilmelerde azalma meydana gelmiştir. Maksimum çekme deformasyonları boru yanlarında meydana gelirken, maksimum basınç deformasyonu boru üstünde oluşmuştur. Donatı varlığı maksimum deformasyonlarda azalma sağlamıştır. 16° eğimle batırılan cisim için donatılı durumlar için birçok noktada ölçülen deformasyonlar, donatısız durumlardaki değerler ile benzer veya daha küçük çıkmıştır. Donatının bulunması cismin zemine batması için gereken kuvvetin önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Geosentetiğin yatay bir şekilde zemin yüzeyine paralel serilmesi durumu en yaygın uygulama olmasına rağmen, cismin zemine batmasını sağlayan kuvvete karşı daha az dirençli olmuştur. Yüzeyden 37,5 mm mesafedeki yatay donatı, 75 mm mesafedekinden daha iyi performans sergilemiştir.

Düşeyle  $16^\circ$  açı yapan cisim ile yapılan testlerde donatı katmanının bulunması ayrıca cismin zemine batması için gereken yükü de artırmıştır.  $45^\circ$  açı yapan cisim ile yapılan testlerde donatının varlığının çok az da olsa etkisi görülmüştür. Bu etki boru yüzeyi ile cisim arasındaki mesafenin aynı kuvvet değerinde daha büyük olmasından kaynaklıdır. Zeminle birlikte geosentetik sargılama uygulaması cisim batmasına neden olacak kuvvet bakımından özellikle geotekstil kullanımında en iyi performansı sergileyen düzenlemedir. Çünkü geogrid açıklıklarından kaçan zemin taneleri, bu uygulamanın etkisini azaltmıştır. Ters U uygulamasında ise her iki geosentetik benzer sonuçları vermiştir. Donatı varlığı sargılı düzenlemede borudaki deformasyonları diğer uygulamalardan daha çok azaltmıştır.

Moghaddas Tafreshi ve Dawson (2010) tarafından, 750 mm uzunluk, 375 mm yükseklik ve 150 mm genişlikli test tankında, özgül ağırlığı 2,68 olan kötü derecelenmiş kum kullanılarak donatı verimi, geotekstil tabaka sayısı ve geocell yüksekliği değişkenleri çerçevesinde incelenmiştir. Kum için % 72 rölatif sıklıkta,  $37,5^\circ$  içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Model temel 148 mm uzunluğunda, 75 mm genişliğinde ve 20 mm kalınlığındadır. Çalışmada geotekstil ve geocell donatılar kullanılmıştır. Geocell yüksekliğinin temel genişliğine oranı, geosentetik katman sayısı, katmanlar arası mesafe, ilk serilen geosentetiğin zemin yüzeyine mesafesi, geosentetik uzunluğunun temel genişliğine oranı, serilen geosentetiklerin uzunlukları gibi değişkenler altında yapılan testler sonucunda, aynı kütlede kullanılan geocell, taşıma gücü ve oturmalarda geotekstilden daha iyi sonuçlar vermiştir. Geocell yüksekliği, kalınlığı ve tabaka sayısı arttıkça, donatı verimi azalma göstermiştir. Aynı kütleyle sahip geocell ve geotekstil kullanıldığında, geocell donatılı sistem, geotekstil sisteme göre daha az oturan bir yapı sergilemiştir. Aynı kütleyle sahip geotekstil ve geocell kullanıldığında, oturma miktarının % 4'ü seviyesinde geocell taşıma gücü için % 2,73, temel oturması için % 63, geotekstil ise taşıma gücü için % 1,88, temel oturması için % 47 iyileşme sağlamıştır. Bu nedenle, taşıma gücü ve oturmada belirgin bir iyileşmenin geotekstile oranla kütlece daha az miktarda geocell ile sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

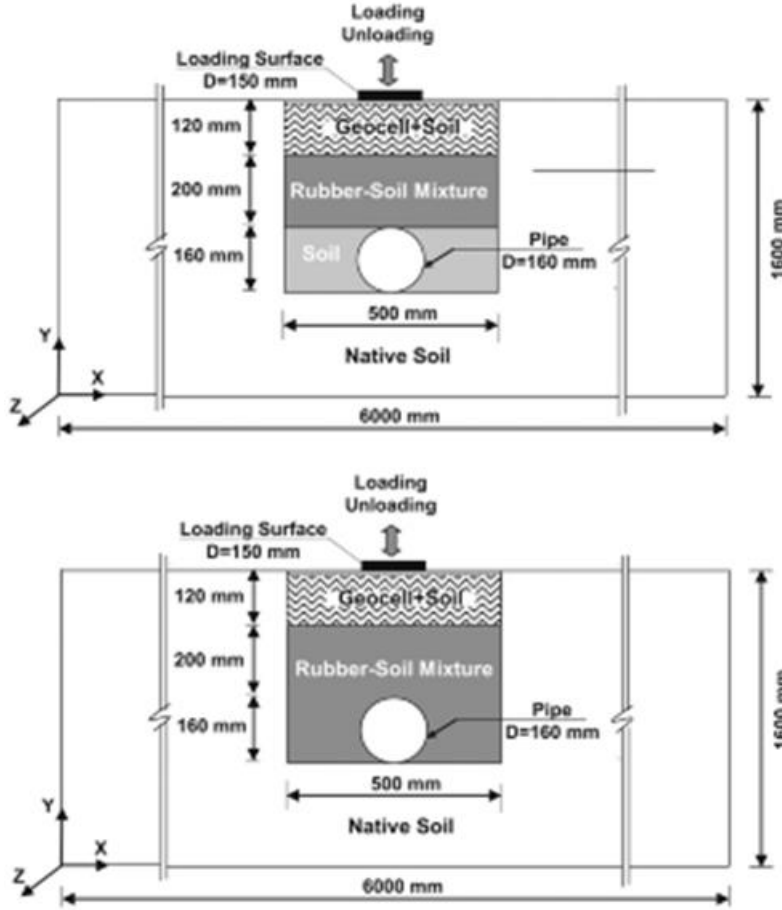
Geotekstil tabaka sayısının ve geocell hücre yüksekliğinin artması oturmayı azaltırken, taşıma gücünü artırmıştır. En üstteki geotekstilin bulunduğu derinlik, temel genişliğinin 0,35 katı kadarken, geocell için optimum derinlik temel genişliğinin 0,1 katı kadar olmuştur. Serilen geosentetiklerin uzunlukları, geocell ve geotekstil için sırası ile temel genişliğinin yaklaşık 4,2 ve 5,5 katı olduğunda taşıma gücü veya oturma için daha fazla

fayda sağlamadığı görülmüştür. Geocell taşıma gücü için % 200, oturma için % 75 iyileşme sağlarken, geotekstil tüm testlerinde en iyi sonucu sırası ile % 150 ve % 64 olarak verebilmiştir.

Gürbüz ve Mertol (2012), geocell güçlendirme yapısını 3D HDPE bal peteği formundaki hücreler olarak tanımlamış ve temel altı zeminde kullanıldıklarında yük taşıma kapasitesini artırıp, oturmaları azalttığını göstermişlerdir. Test tankı 700,5 x 700,5 mm boyutlarında ve 800 mm yüksekliğindedir. Şerit temeli temsil eden model 70 x 695 mm boyutlarındadır. Özgül ağırlığı 2,60 olan, kötü derecelenmiş, % 55 rölatif sıklıkta içsel sürtünme açısı 30° olan kum üzerinde deneyler yapılmıştır. Geocell hücre yükseklikleri 75 ve 150 mm'dir. Bu hücrelerin genişlik, yükseklik ve tabaka sayıları gibi özellikleri tabakalar arası mesafeleri çalışılmıştır. Test sonuçları kohezyonsuz zeminde tek katmanlı geocell kullanımı ile oturmaların donatısız zemine göre % 62 azaldığını ve taşıma gücünün de % 3 civarında iyileşme gösterdiğini göstermiştir. Geocell hücreleri arasındaki optimum mesafenin temel genişliğinin 0,142 katı, etki derinliğinin temel genişliğinin 2 katı kadar olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca optimum hücre genişliği temel genişliğinin 4,2 kat civarında çıkmıştır. Geocell serilme uzunluğunun, temel genişliğine oranı yaklaşık 8,2 iken taşıma gücünü etkilememeye başlamıştır.

Tavakoli Mehrjardi, Moghaddas Tafreshi ve Dawson, (2012) tekrarlı yükleme altında geocell ile kauçuk-zemin karışımı kullanılarak güçlendirilmiş zeminde gömülü boru üzerindeki deformasyonlar ile gerilme dağılımlarını hesaplamışlardır. Zemin iyi derecelenmiş kumdur. Dış çapı 160 mm ve et kalınlığı dört mm olan boru, 1100 mm uzunluğundadır. Boru yanına, üstüne ve geocell tabakasının altına (yüzeyden 120 mm derine) olmak üzere üç basınçölçer konulmuştur. Yükleme plakası 150 mm çaplıdır. İlk test boru çevresi 160 mm'ye kadar zemin, sonra 200 mm kalınlığında kauçuk-zemin ve sonra 100 mm geocell ve en üste 20 mm zemin konularak gerçekleştirilmiştir. İkinci deneyde boru çevresi 360 mm yükseklik boyunca kauçuk-zemin ile kaplanmıştır. Kalan kısma 120 mm geocell ve zemin konulmuştur (Şekil 2.6). Kumla karıştırılacak olan kauçuk 17 ve 45 mm parçacık boyutlarına sahiptir. Geocell hücre yüksekliği 10 mm'dir. Kazı hendeği 500 x 480 mm boyutlarındadır. Zemin oturması ve boru deformasyonu donatısız kum zemindeki deneye göre sırasıyla 0,3 ve 0,53 kat fazladır. Donatılı kelimesi % 5 kauçuk-zemin ve geocell tabakalı zemini ifade etmektedir. Geocell destekli zemin tabakası olan borular için oturmanın % 68, boru deformasyonunun % 33 azaltılabildiği görülmektedir.

Böylelikle kazı derinliği azaltılarak giderlerin azalması sağlanabilir. Boyuta önem verilmeden kauçuk parçaları ağırlıkça % 5 oranında eklendiğinde dolgu malzemesinin daha sıkıştırılabilir olması yanında burada daha büyük değerlerde deforme olmuştur.



Şekil 2.6. Kauçuk-zemin karışımı ve geocell tabakası kullanım şekilleri (Tavakoli Mehrjardi, Moghaddas Tafreshi ve Dawson, 2012)

Moghaddas Tafreshi ve Dawson (2012), statik ve tekrarlı yük kombinasyonu altında donatısız ve geocell donatılı zemin üzerindeki şerit temelleri laboratuvarında test etmişlerdir. Geogridlerin kesilerek yapıldığı geoceller, delikli geoceller ve deliksiz geoceller olarak iki tiptir. Test tankı 750 mm uzunluğunda, 375 mm yüksekliğinde, 150 mm genişliğindedir. Model temel 75 x 148 mm boyutlarında ve 20 mm kalınlığındadır. Özgül ağırlığı 2,68 olan kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır.

Geocell serilme uzunluğu, geocell yüksekliği, tekrarlı yük genlik değişimi değişkenleri altında yapılan testlerde, donatı varlığı oturmayı hem geciktirmiş hem de azaltmıştır. Ayrıca, uygulanan yükün veya tekrarlanan yükün artırılmasına olanak sağlamıştır. Plastik deformasyon, tekrarlı yük altında, statik yüklemeye göre geoceller tarafından daha fazla

sınırlandırılmış, daha fazla donatı mevcutken ve en hızlı yükleme olduğunda bile bu sınırlandırma artarak devam etmiştir.

Yapılan tüm donatısız testlerde nihai temel oturması oldukça büyüktür. Tüm testlerde toplam oturmanın % 35-65 civarı, ilk 10 tekrarda meydana gelmektedir. Daha önceki çalışmalarda 0,05-0,1 aralığında çıkan ilk donatı derinliğinin temel genişliğine oranı bu çalışmada optimum 0,1 bulunmuştur. Herhangi bir tekrarlı yükleme değerinde serilmiş güçlendirme elemanı uzunluğu arttıkça, oturma miktarı düşmektedir. Bu durumun geocell serilme uzunluğu temel genişliğinin 3,2 katı olduğu durumdan sonra ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Herhangi bir tekrarlı yükleme değerinde geocell yüksekliği arttıkça, oturma miktarı azalmaktadır. Sıklığı az olan tekrarlı yükleme arttığında, geocell yüksekliğinin yararları azalma eğilimi sergilemiştir. Tekrar sayısı arttıkça oturmadaki değişim miktarları azalmaktadır.

Moghaddas Tafreshi, Khalaj ve Dawson (2013), kauçuk karışımlı zemin ve çok katmanlı geocell donatılı zemini, 300 mm çaplı çelik plaka yüklemesi altında test etmişlerdir. 2000 mm uzunluk ve genişliğe sahip, 700 mm derinliği olan deney çukurunda, deliksiz 100 mm hücre yüksekliğe sahip geoceller, geotekstillerin birleştirilmesinden oluşmuştur.

İlk geocell tabakasının yüzeyden optimum derinliği ve geocell tabakaları arası mesafe plaka çapının 0,2 katı kadardır ve özgül ağırlığı 2,68 olan iyi derecelendirilmiş kum zeminde karışımının ağırlıkça % 8'i kauçuktan oluşmuştur. Kazı derinliğinde eşit aralıklarla zemin ve geocell tabakalar sırasıyla serilmiştir. Geocell tabakalar arasında üç adet basınçölçer konulmuştur. Tek, çift ve üç tabaka geocell serimlerinde yüzeyde 550 kPa basınç olduğunda, 510 mm derinlikte sırasıyla % 48, % 34 ve % 27 basınç azalması görülmüştür. Kauçuk-zemin ve geocell tabakalarının birlikte kullanıldığı zemin, yalnız geocell güçlendirmeli zemine göre basınç transferini azaltmada daha etkilidir. 830 kPa değerindeki yüzey gerilmesi, iki geocell tabakası aralarındaki iki kauçuk-zemin kombinasyonu varlığında 350 mm derinde elde edilen gerilme yalnız iki tabaka geocell kullanıldığında sonuçtan % 15 daha az olmuştur.

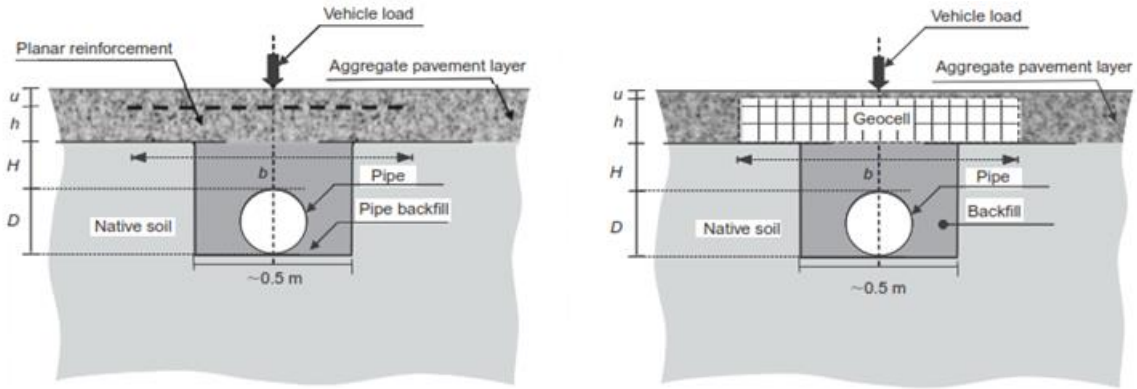
Geocell tabaka sayısı ve kauçuk-zemin karışım tabaka sayısı artması ile zemin taşıma gücü artıp oturmalar azalmıştır. Plaka çapının % 2'si kadar bir oturma miktarında, taşıma gücü oranları sırasıyla donatısız, üç tabaka geocell serimli ve üç tabaka geocell ve kauçuk karışımlı zeminde 1:2.3:3 olarak çıkmıştır. Taşıma gücü değerleri, oturmanın temel

genişliğinin % 2'si olduğu durumda, üç katman geocell referans deneye göre 2,3 kat ve kauçuk-zemin ile geocell kombinasyonu referans deneye göre 3 kat daha büyüktür.

Geosentetiklerin birlikte kullanılması ile oluşturulmuş kombinasyonlu güçlendirme elemanları ile ilgili Sitharam ve Hegde (2013) bir vaka analizi yapmışlardır. 3000 mm yüksekliğe sahip bir dolgunun yapım aşamasında kullanılan güçlendirmelerden bahsetmişlerdir. Çalışmalarında yalnız geocell donatılı zemin ile geocell ve geogrid kombinasyon donatılı zemin güçlendirmelerini değerlendirmişlerdir. 35 x 35 mm göz açıklıklı geogrid ile 150 mm hücre yüksekliğine sahip geocell kullanılmıştır. Düşük plastisiteli kilin kohezyonu 10 kPa, likit limiti 40 ve plastik limiti 19 olarak verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda geocell-geogrid kombinasyonunun yalnız geocell kullanılan uygulamadan daha yararlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Geocell ve geogrid kombinasyonu sayesinde taşıma gücü 4-5 kat kadar artmıştır. Sonuç olarak, testler geocell ve geogrid kombinasyonunun daha yararlı olduğunu ortaya koymuş olsa da, 3000 mm yüksekliğindeki bir dolguyu yalnız geocell ile güçlendirerek inşa etmişler ve iki defa muson yağmurları ile karşılaşmasına rağmen yapıda herhangi bir sızıntı veya çatlak yaşanmadığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, bu çalışma kapsamında da farklı birçok tür geosentetik türünün farklı kombinasyonları ve bunların birbirine ve donatısız duruma göre faydalarından bahsedilmiştir.

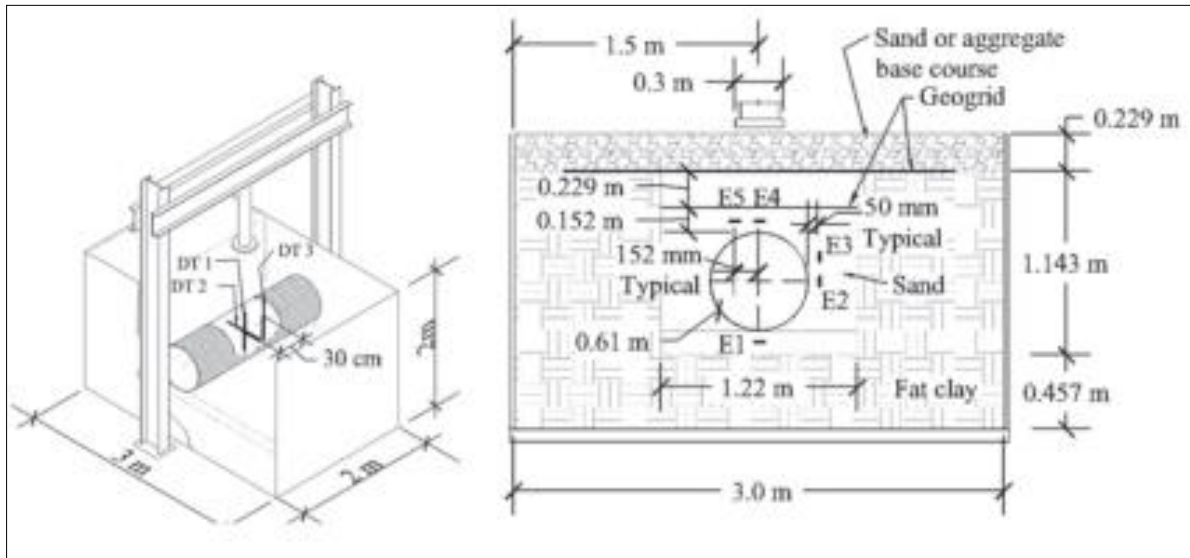
Tavakoli Mehrjardi, Moghaddas Tafreshi ve Dawson (2013), trafik yüklerinin boru sistemlerinin fonksiyonelliğini azaltmasından, ekonomik ve sosyal yönlerden aksaklıklara neden olmasından yola çıkarak, gömülü boruların geoceller ile güçlendirilmiş zemindeki performanslarını tekrarlı yük altında incelemişlerdir. Dolgu malzemesi iyi derecelenmiş kumdur. Deney şeması Şekil 2.7'de yer alan gömülü PVC boru, 160 mm dış çapa, dört mm et kalınlığa ve 110 mm uzunluğa sahiptir. Daha küçük hücre boyutları daha kötü sıkışmaya neden olduğundan, farklı yükleme durumları için 50 mm hücre yüksekliğine sahip geocell ile yapılan deneyde yüzey oturması gözlenmiştir. 100 mm yükseklikte olan geocell, hacimce daha büyük sargılama sınırları oluşturduğu için rijit bir tabaka oluşturarak daha iyi bir performans sergilemiştir. Donatısız zemine kıyasla, geocell donatılı zemin, tekrarlı yük altında zemin üst yüzey oturmalarını % 65; düşey çapsal deformasyonları da % 35 oranında azaltmıştır.





Şekil 2.7. Araç yükü altındaki zemine gömülü boru üzerinde geotekstil ve geocell koruması (Tavakoli Mehrjardi, Moghaddas Tafreshi ve Dawson, 2013)

Corey, Han ve Khatri (2014), çelik donatılı HDPE gömülü boru üzerinde geogridli ve geogridsiz zemin güçlendirmesi ile statik yükleme yapmışlardır. 610 mm çaplı gömülü boru ile dört adet statik yükleme testi yapılmıştır. Kullanılan kum 152 mm tabakalar halinde serilip, son katmanda 72 mm serilmiştir. Her bir katman % 70 rölatif sıklıkta sıkıştırılmıştır. Detayları Şekil 2.8’de görülen deneylerde boru etrafına basınçölçerler yerleştirilmiştir. Yüzey oturmaları, boru deformasyonları, geogrid deformasyonları ve basınçlar test boyunca izlenmiştir. Geogrid 25 x 33 mm gözenek açıklığına sahiptir ve 300 mm çaplı plaka statik yükleme yapmak için kullanılmıştır.

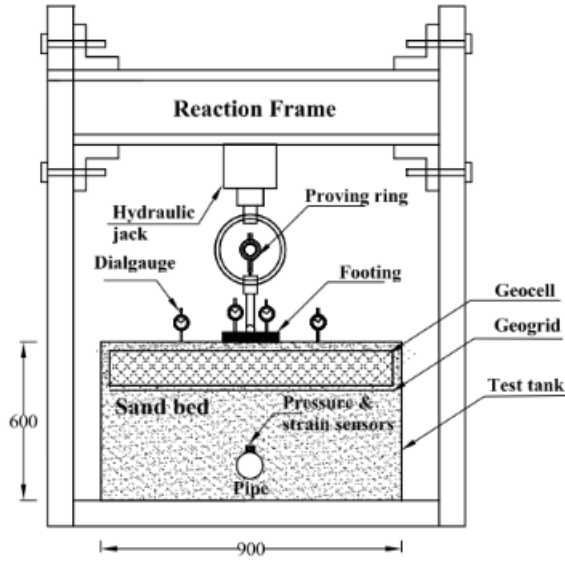


Şekil 2.8. Büyük ölçekli deneylerin kesit ve üç boyutlu görüntüleri (Corey, Han ve Khatri, 2014)

Laboratuvarda yapılmış bu deneyler, boru üzerindeki boyuna çekme deformasyonlarının geogrid ile azaldığını göstermiştir. Ayrıca en üstte kullanılan geogrid tabaka borudaki düşey deformasyonları düşürmede oldukça işe yaramıştır. Statik yüklemelerde geogrid uygulaması ile boru üzerindeki boyuna deformasyonların azaldığı tespit edilmiştir. Yüzey oturması % 11, boru boyuna deformasyonları % 25, düşey gerilmeler % 10 azalma göstermiştir.

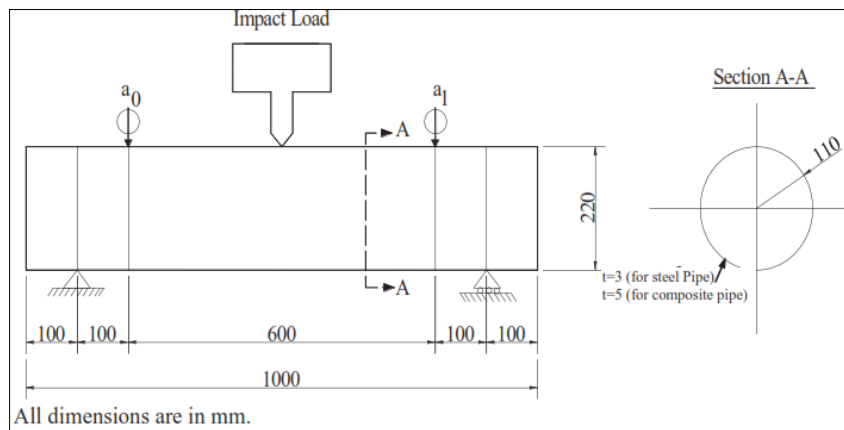
Hegde, Kadabinaatti ve Sitharam (2014), 75 mm çaplı ve 1,4 mm et kalınlıklı gömülü PVC boruları, laboratuvar ortamında geosentetik donatılı ve donatısız kuma gömerek statik yükleme yapmıştır. Şekil 2.9'da görülen, 900 x 900 mm boyutlarında, 600 mm yüksekliğindeki dökme demirden deney tankında, 20 mm et kalınlığında, 150 mm boyutlarında kare plakaya yükleme yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde donatı serilme uzunluğu, temel genişliğinin 5,5 katı alınmıştır. Basınçölçer de, deformasyon ölçer de borunun üst merkezine yerleştirilmiştir. 25 mm çaplı basınçölçer kullanılmıştır. USCS sistemine göre kötü derecelenmiş olarak sınıflandırılmış, özgül ağırlığı 2,64 olan deney kumu kurudur. 150 mm hücresel yüksekliğe sahip geoceller ve 35 x 35 mm gözenek açıklıklı geogridler kullanılmıştır. Çalışmada boru, temel genişliği ve onun iki katı derinliklerde gömülerek denenmiştir. Geocell ve geogrid kombinasyonunun boru gömülme derinliğini önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir.

Gömülü boruların geocell ve geogrid ile korunumunu içeren söz konusu çalışma ile geocell ve geogrid kombinasyonunun borudaki deformasyonları donatısız zemine göre azalttığı sonucuna varılmıştır. Temel altından en az 1,5 temel genişliği kadar derinlikte, geocell ve geogrid kombinasyonu ile yapılan güçlendirmede boru üzerindeki basınç neredeyse ihmal edilebilir seviyeye gelerek, temel basıncının 0,1 katından küçük bir basınç ölçülmüştür. Tüm test derinliklerinde yani derinlik temel genişliğine eşit ve 2 katı arasında değişirken, basınçta % 50'den fazla ve deformasyonda % 40'tan fazla bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 2.9. Deney düzeneğine ait şematik gösterim (Hegde, Kadabinakatti, Sitharam, 2014)

Çarpma testinin kullanıldığı bir çalışma ise Anıl, Erdem ve Kantar (2015) tarafından gerçekleştirilmiştir. 1000 mm boyunda, 220 mm çapında borulardan, çelik boru 3 mm et kalınlığına; çelik ve beton kompozit yapısındaki boru ise 5 mm et kalınlığına sahiptir. İki direk boruya darbe testi (Şekil 2.10), ikisi kum tabaka üzerine darbe testi ve dördü de koruyucu yapılmak üzere toplamda sekiz deney yapılmıştır. 32° içsel sürtünme açısı olan iyi derecelenmiş kuru kum kullanılmıştır. Gömülü boru, geofom isimli bir koruyucu tabaka ile darbe etkilerine karşı korunmuş ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu bağlamda çelik ve kompozit boru kullanılarak zemine serili iki farklı geofom ile ani darbe yükünden doğan boru üzerinde enerji sönümlenme kapasiteleri incelenmiştir. Her iki boru tipinde de 50 mm kalınlıklı geofom darbe kuvveti karşısında ivme ve deplasmanda düşüş, enerji sönümlenmede artış sergilemiştir.



Şekil 2.10. Deneyde kullanılan boru üzerine darbe testi (Anıl, Erdem ve Kantar, 2015)

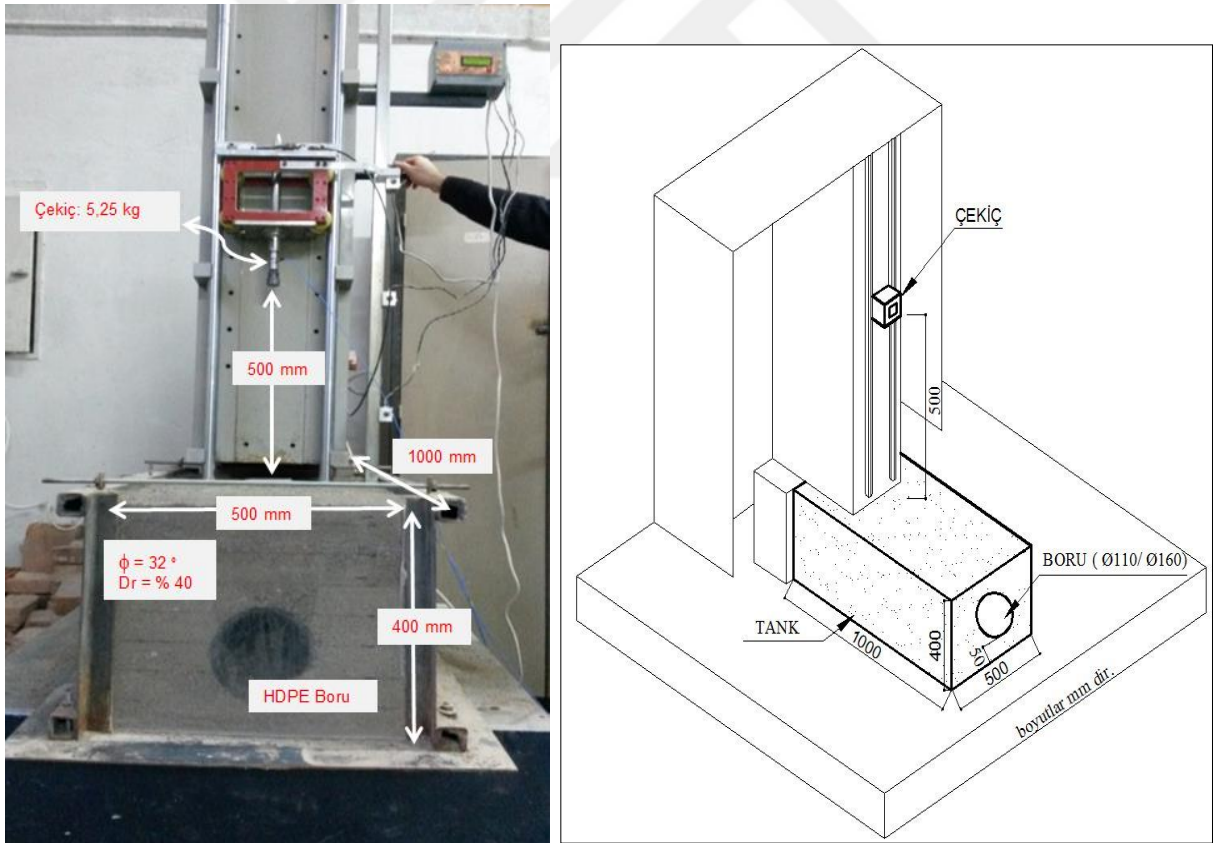


### 3. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Yürütülen deneysel çalışmada, geocell, geogrid, geonet 2D, geonet 3D, geotekstil ve geosentetik kombinasyonlar ile güçlendirilmiş zeminlerde bulunan iyi derecelenmiş kuma gömülen HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen) boruların darbe yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Değişken olarak boru çapı, geosentetiklerin çeşitleri, kullanım şekilleri ve geosentetiklerin serilme derinlikleri seçilmiştir.

#### 3.1. Ağırlık Düşürücü Deney Düzeneği

Çalışmada deney düzeneği olarak, Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Labaratuvarı'nda bulunan ağırlık düşürücü deney düzeneği kullanılmıştır (Resim 3.1).

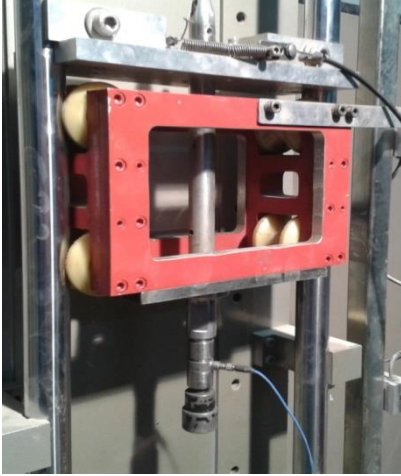


Resim 3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneği

Kullanılan deney düzeneği, farklı yükseklikler ve farklı ağırlıklar seçme imkânı sağlamaktadır. Test tankının yerleştirildiği taban kaidesi 1000 x 1000 x 70 mm ebatlarında

kare şeklinde çelik levhadan yapılmış ve bir kaide üzerine yerleştirilmiştir. Deney tankı 500 mm genişliğinde, 400 mm yüksekliğinde, 1000 mm uzunluğunda olup yan duvarları çelikten, ön ve arka yüzleri ise fleksi camdan imal edilmiştir. Tankın ön ve arka yüzlerinde cam kullanılmasının sebebi, deneyde kullanılan boruların yapmış oldukları deformasyonların izlenebilmesi ve kayıt altına alınabilmesi amaçlıdır (Kantar, 2009).

Deney düzeneğinde bulunan çekiç olarak adlandırılan düşen kütle farklı deneyler yapabilmek için ağırlığı artırılabilir şekildedir. (Resim 3.2). Çekiç alüminyum malzemeden yapılmıştır. Çekicinin kütlesi 5,250 kg'dır. Çekiç kütlesini değiştirmek için iç kısmına ağırlık takılmasını sağlayan ve çarpma anında eklenen ağırlıkların hareket etmesini engelleyen vidalama sistemi yerleştirilmiştir. Çekicinin sürtünmesini en aza indirebilmek için yatakların sürtünen yüzeyleri azaltılmış ve dört köşesinde bulunan iç yüzeyleri yuvarlatılmış kestamit malzemesinden yapılmış tekerleklerle yatağına oturtulmuştur (Kantar, 2009).



Resim 3.2. Çekiç

Kestamit, polyamit grubundan bir malzemedir, döküm yoluyla imal edilir, sıkı bir dokuya ve sertliğe sahiptir. Dişli yapımında özellikle büyük çapta dişlilerde uzun süreli dayanım ve aşınma mukavemetinin çok yüksek olması sebepleri ile tercih edilir. Özellikle darbelere, yüke, yorulmalara karşı yüksek dirençlidir. Isı dayanımı yüksek, sürtünme katsayısı düşüktür (Kantar, 2009).

Düşme noktasında bölgesel çarpmanın boyutlarını ve etkilerini değiştirebilmek amacıyla küresel yapıdaki çekicinin ucu değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen

deneylerde uygulanan darbe yükünü dağıtmak için çekiç, 100 x 100 mm boyutlarında 10 mm kalınlığındaki plaka üzerine düşürülmüştür. Çekicinin düşürme mekanizması mekanik olarak imal edilmiştir. Böylelikle deney yapılacak yüksekliğe çekiç ve tutma mekanizması birlikte pratik ve hızlı bir şekilde çıkarılabilmektedir. Çekiç, aynı ekseninde kalarak serbest düşme yapması için iki tarafından millerle kısıtlanmıştır. Mil boyu 2500 mm olup deney maksimum yüksekliğini belirlemektedir. Çekicinin oturduğu miller 30 mm çapında kromdan imal edilmişlerdir. Sürtünmeyi en aza indirmek için yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Miller, deney düzeneğinin kulesine belirli noktalardan sabitlenmiştir. Ayrıca üst kısmı özel olarak tasarlanmış olup yüksekliği arttırmaya imkân vermektedir. Kızaklar arası mesafe 200 mm'dir. Kızak bağlantı kulesi 300 x 300 mm kesitindedir.

Ağırlık düşürücü deney düzeneğinde, potansiyel enerjinin çarpma anında kinetik enerjiye dönüşmesi kullanılan temel yaklaşımdır. Buradaki enerji dönüşümü eleman üzerinde çok hızlı bir şekilde gerçekleşen gerilme yığılmasına neden olmaktadır. Enerjinin korunumu kanununa göre düşme sırasında kaybedilen enerji sistem tarafından kazanılan enerjiye eşittir.

### 3.2. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada zeminlerin mühendislik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve bir sınıflandırmaya gidilebilmesi için deneylerde kullanılan kum zemin üzerinde zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler; elek analizi, özgül ağırlık, maksimum ve minimum boşluk oranlarının tayini ve kesme kutusu deneyleridir.

Çalışmada TS 1900 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri referans olarak alınmıştır. Standartta göre yapılan zemin mekaniği deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Ayrıntılar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Laboratuvar deneysel çalışmasında kullanılan kumun özellikleri

$G_s$	$\rho_{\min}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\max}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$e_{\min}$	$e_{\max}$	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$C_c$	$C_u$
2,949	1,51	1,86	0,57	0,94	0,19	0,7	1,4	9,5

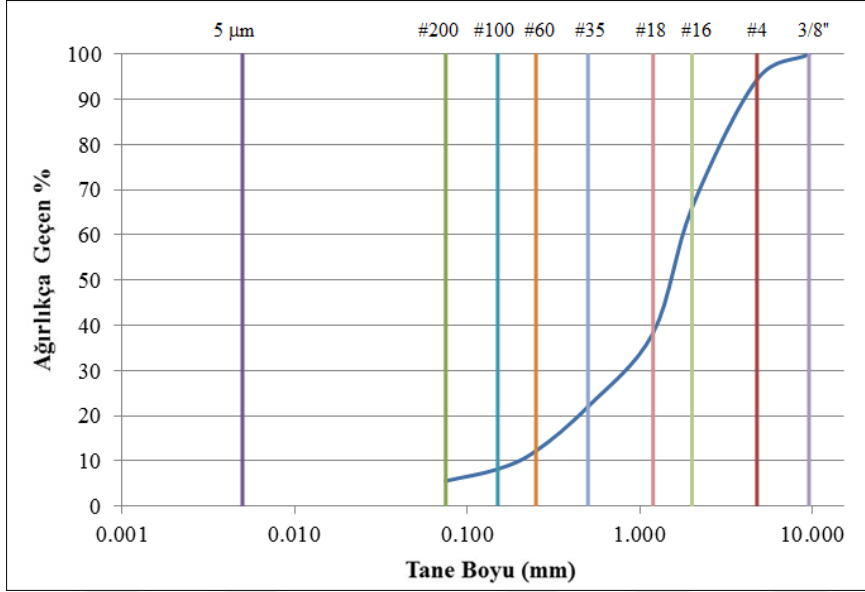
### 3.2.1. Elek analizi

Zeminlerin sınıflandırılmasında tane boyutlarının ve çakıl, kum, silt, kil tanelerinin yüzde miktarlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Değişik boyutlardaki tanelerin elek analizi sonucunda tane boyu- yüzde ağırlıkça geçen malzeme miktarı kullanılarak granülometri eğrisi çizilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan kum için Çizelge 3.2’de verilmiş elek analizi sonuçları kullanılarak zemin sınıflaması yapılmıştır ve granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir. Buna göre Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) dikkate alınarak kullanılan kum iyi derecelenmiş kum (SW) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Elek analizi sonuçları

Elek No	Elek Açıklığı (mm)	Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Kalan (gr)	Kalan (%)	Geçen (%)
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100
#4	4,75	76,16	76,16	5,6	94,4
#10	2,00	381,25	457,41	33,9	66,1
#18	1,00	374,56	831,97	61,7	38,3
#35	0,50	219,43	1051,4	77,9	22,1
#60	0,25	132,46	1183,86	87,7	12,3
#100	0,15	54,49	1238,35	91,8	8,2
#200	0,075	35,20	1273,55	94,4	5,6
Toplam Malzeme: 1349 gr					
Çakıl miktarı (%): 5,65					
Kum miktarı (%): 88,76					
İnce (kil+silt) malzeme (%): 5,6					
D <sub>10</sub> (mm): 0,19					
D <sub>30</sub> (mm): 0,7					
D <sub>60</sub> (mm): 1,8					
Uniformluluk katsayısı $C_u = D_{60} / D_{10}$ : 9,5					
Eğrilik katsayısı $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$ : 1,4					
USCS sınıfı: SW					





Şekil 3.1. Elek analizinden elde edilen granülometri eğrisi

### 3.2.2. Özgül ağırlık deneyi

Deney, TS 1900-1'e göre yapılmış ve Eş. 3.1 ile özgül ağırlık hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{M2 - M1}{(M4 - M1) - (M3 - M2)} \quad (3.1)$$

M1: Piknometrenin boş ağırlığı (gr)

M2: Piknometre + numune ağırlığı (gr)

M3: Piknometre + numune + su ağırlığı (gr)

M4: Piknometre + su ağırlığı (gr)

Deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kumun özgül ağırlığı  $G_s=2,949$  olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.3. Özgül ağırlığın bulunması

Piknometre No	M2-M1	M4-M1	M3-M2	G <sub>s</sub>
Piknometre1	99,57	516,24	482,41	2,943
Piknometre2	114,83	518,73	479,88	2,956
Piknometre3	121,28	517,96	476,83	2,949
Ortalama G <sub>s</sub>				2,949

### 3.2.3. Maksimum ve minimum boşluk oranlarının tayini

Zeminler taneli bir yapıya sahip olup, taneler arası boşluklar, kısmen su ve hava ile dolu olabildiği gibi suya doygun zeminlerde tamamen su, kuru zeminlerde ise tamamen hava ile doludurlar. Zeminlere ait belirlenmesi gereken önemli indeks özelliklerinden biri de birim hacim ağırlık değeridir (Yılmaz, Yıldırım ve Keskin, 2014: 1). ASTM D 4253-4254 standardına göre, gevşek birim hacim ağırlık (maksimum boşluk oranı) ve sıkı birim hacim ağırlık (minimum boşluk oranı) için, testler üçer kez tekrarlanmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Deneyler sonucu elde edilen değerler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Maksimum ve minimum boşluk oranları deneyi sonuçları

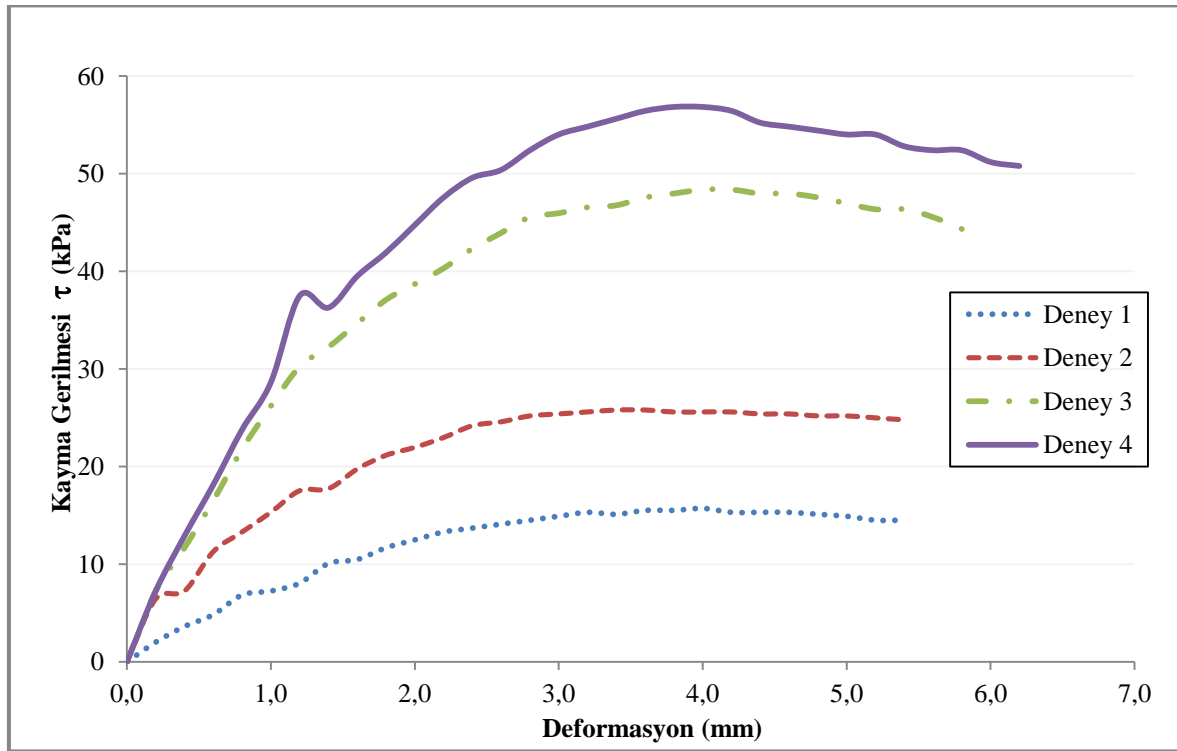
Deney No	1	2	3	
Kalıp + Gevşek Kum (gr)	5207	5201,5	5219,5	
Gevşek Kum (gr)	1027,5	1022	1040	
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	14,80	14,72	14,98	
$\gamma_{ort}$ (kN/m <sup>3</sup> ) (gevşek)	14,83			
Kalıp + Sıkı Kum (gr)	5446,5	5447,5	5462,5	
Sıkı Kum (gr)	1267	1268	1283	
Sıkı Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )	18,25	18,26	18,48	
$\gamma_{ort}$ (kN/m <sup>3</sup> ) (sıkı)	18,33			
$G_s = 2,949$	$e_{min}$ değerleri	0,5802	0,5789	0,5605
	$e_{max}$ değerleri	0,9485	0,9590	0,9251
$\gamma_{min} = 14,83 \text{ kN/m}^3$				
$\gamma_{max} = 18,33 \text{ kN/m}^3$				
$e_{min} = 0,57$				
$e_{max} = 0,94$				

### 3.2.4. Kesme kutusu deneyi

Zemin numunesinin farklı aksenal gerilmeler altında kesmeye zorlanarak yenilmenin gerçekleştiği kesme gerilmesi değerleri belirlenmek suretiyle yapılan deney serisinden elde edilen noktalar üzerinde oluşturulan eğrinin eğimi ile içsel sürtünme açısı elde edilir. Çizelge 3.5 ve Şekil 3.2 verilerinden yola çıkılarak Şekil 3.3 elde edilmiştir.

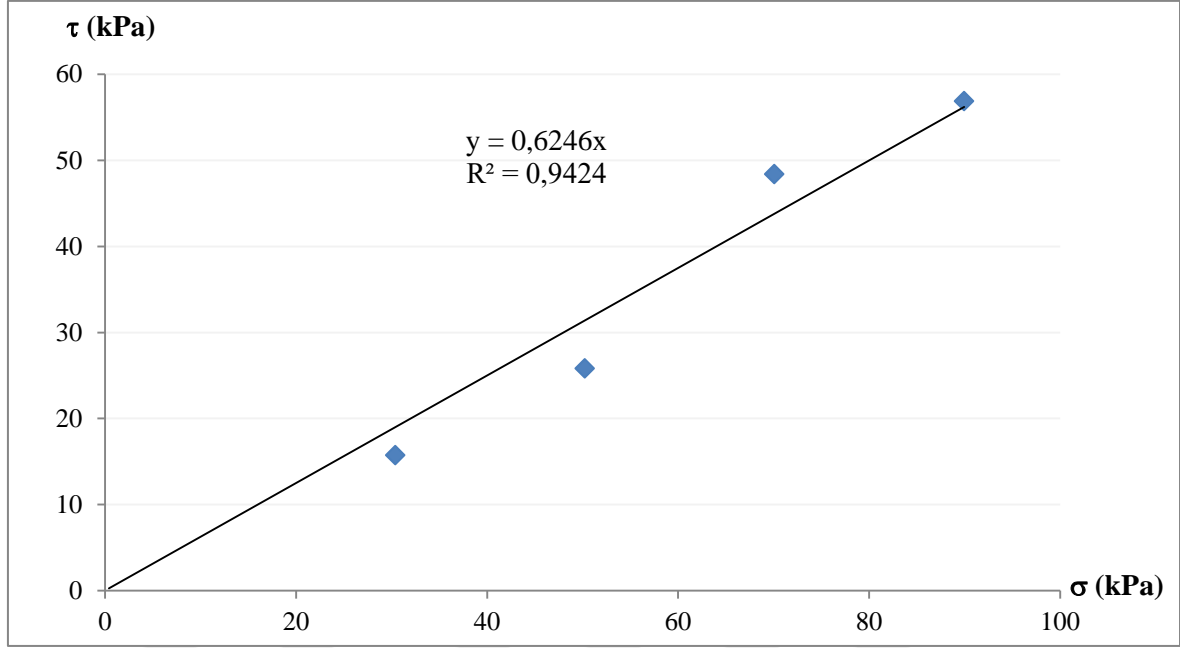
Çizelge 3.5. Kesme kutusu deneyi verileri

Deney	Düşey yük P (gr)	En kesit alanı A (cm <sup>2</sup> )	Normal gerilme $\sigma$ (kPa)	Maksimum kayma gerilmesi $\tau$ (kPa)	Maksimum kayma gerilmesindeki deformasyon (mm)
1	11162,5	36	30,40	15,72	4,0
2	18450,0	36	50,26	25,80	3,6
3	25737,0	36	70,11	48,38	4,2
4	33026,5	36	89,97	56,85	4,0



Şekil 3.2. Kumun farklı düşey gerilmelere karşı kayma gerilmesi-deformasyon grafiği

Deneyleerde kullanılan başlangıçta % 40 görelî sıklılığa sahip kuru kum numunesi üzerinde yapılan kesme kutusu deneyi ile elde edilen kayma gerilmesi-normal gerilme grafiğinin eğimi dikkate alındığında, içsel sürtünme açısı  $\phi=32^\circ$  bulunmuştur.



Şekil 3.3. İçsel sürtünme açısının belirlenmesi

### 3.3. Laboratuvar Çalışmalarında Kullanılan Geosentetiklerin Özellikleri

Geosentetikler ile ilgili terimler ve tanımları veren prEN ISO 10318 no'lu taslak Avrupa standardına göre geosentetik tanımı ürünün içerebileceği doğal ve sentetik polimerleri ve diğer malzemeleri de kapsayacak şekilde aşağıdaki gibi verilmektedir (Wasti, 2007: 1-5):

“Geosentetik, geoteknik ve inşaat mühendisliği uygulamalarında zemin ve/veya diğer malzemelerle temas halinde kullanılan, en az bir bileşeni doğal veya sentetik bir polimerden imal edilmiş tabaka, şerit veya üç boyutlu bir yapı içeren ürünleri tanımlayan jenerik bir terimdir” (Floss ve Brau, 2004: 85-103).

Geosentetiklerin polimer bileşenlerinin hemen hemen tamamının hammaddesi termoplastik grubuna giren polimerlerdir. En yaygın kullanılan polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC)'dir. Geosentetiklerin yapımı sırasında genellikle polimerlere renk, plastiklik ve akışkanlık gibi özellik kazandırıcı veya hava etkisine (ultroviyole/morötesi/UV ışınları, ısı, oksijen, nem, havada taşınan kimyasal veya biyolojik etkenler), hidrolik etkiye (su ve su buharının yarattığı moleküler bozulma) ve biyolojik etkenlere (bakteri, yosun, mantar gibi mikro-organizmalar; kemirgenler, böcekler gibi makro-organizmalar) karşı koruyucu katkı maddeleri de ilave edilir. Karbon siyahı ve UV

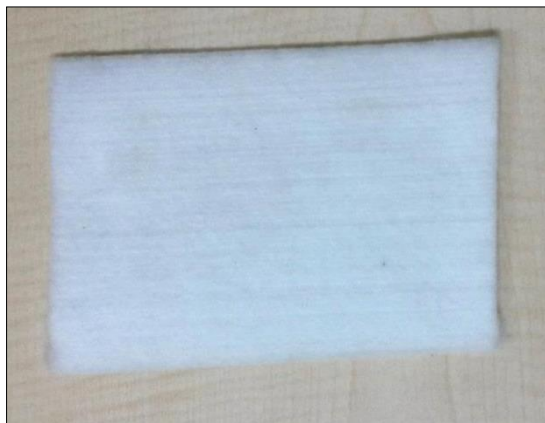
koruyucuları hava etkilerine karşı en yaygın kullanılan katkı maddeleridir (Wasti, 2007: 1-5).

### 3.3.1. Geotekstil

Geotekstiller, esnek ve tekstil ürünü görünümünde malzemeler olup geosentetiklerin ilk ve miktar bazında halen en fazla kullanılan türüdür. İlk türleri sentetik elyaflardan geleneksel dokuma yöntemleri ile üretilen örgülü geotekstillerdir. 1960'lardan sonra tekstil sanayisinde daha ucuz olan örgüsüz imal yöntemlerinin geliştirilmesine paralel olarak gelişen örgüsüz geotekstil (Resim 3.3) üretimi bir dönüm noktası olmuştur (Wasti, 2007: 1-5). Uygulama alanları, ayırma, filtrasyon, drenaj, güçlendirme, koruma, yalıtım olarak sıralanabilir. Deneyler esnasında kullanılan örgüsüz geotekstile ait özellikler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Geotekstil teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellik	Birim	Değer	Metot
Hammadde	Polipropilen (PP)		
Birim yüzey ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	500	TS EN ISO 9864
Kalınlık	mm	4,0	TS EN ISO 9863-1
Kopma mukavemeti	kN/m	27-29	TS EN ISO 10319
Kopmadaki uzama	%	50-80	TS EN ISO 10319
Statik delinme dayanımı	N	5500	TS EN ISO 12236
Dinamik delinme dayanımı	mm	3	TS EN ISO 13433
Karakteristik göz açıklığı	mm	0,08	TS EN ISO 12956



Resim 3.3. Geotekstil

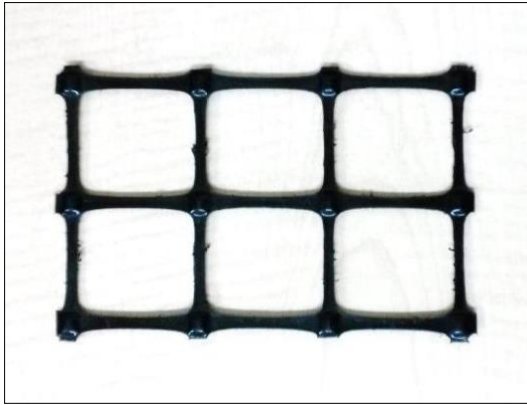
### 3.3.2. Geogrid

Açıklıkları granüler zeminle kenetlenerek büyüklükte olan, tek, çift, üç veya dört eksenli ızgaralar şeklinde imal edilen geogridler (Resim 3.4), yük uygulandığında birbirini dik kesen şeritlerinde dayanım oluştururlar. (Wasti, 2007: 1-5) Deneylerde Çizelge 3.7’de özellikleri yer alan çift yönlü extrude geogrid kullanılmıştır.

Çizelge 3.7. Geogrid teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellikler	Birim	Değerler	Tolerans	Metot
Hammadde	100% UV Dayanımlı Polipropilen			
Birim yüzey ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	240	±% 10	EN ISO 9864
Çekme dayanımı İD/İDD*	kN/m	20/20	±% 10	EN ISO 10319
Azami yükteki uzama İD/İDD	%	≤8/<8	±% 10	EN ISO 10319
% 2 Uzamadaki çekme gücü İD/İDD	kN/m	7/7	-	EN ISO 10319
% 5 Uzamadaki çekme gücü İD/İDD	kN/m	14/14	-	EN ISO 10319
Gözenek açıklığı (İD/İDD)	mm x mm	40x40	±% 10	-
Karbon siyahı	%	20/20		
pH direnci		2-13		
Grid yapısı	Çift eksenli			

\*İD: İmalat Doğrultusunda \*İDD: İmalat Doğrultusuna Dik

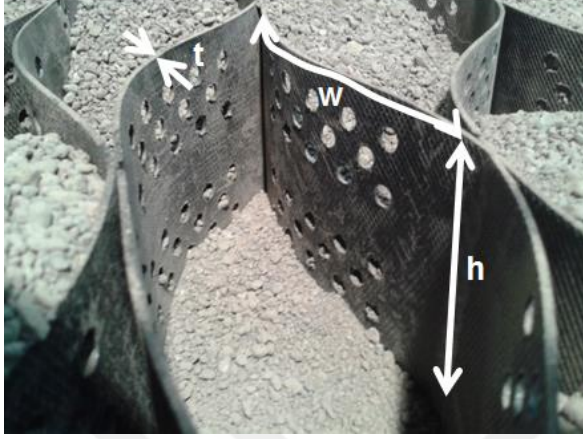


Resim 3.4. Geogrid

### 3.3.3. Geocell

Resim 3.5’te görülen geocell, üç boyutlu, yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerden imal edilmiş, genişletilebilir panelleri olan geosentetik bir üründür. Bu çalışmada, h: geocell

hücre yüksekliği,  $t$ : et kalınlığı,  $w$ : kaynak aralığını temsil etmektedir. Bu ürüne ait fiziksel özellikler Çizelge 3.8’de sunulmaktadır.



Resim 3.5. Geocell

Çizelge 3.8. Geocell teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

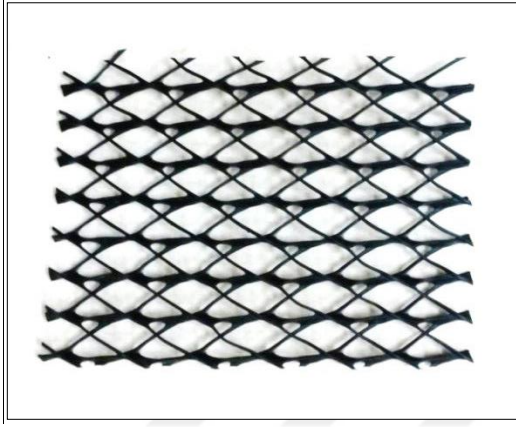
Özellikler	Birim	Değerler		Metot
Hammadde	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)			
Polimer yoğunluk	gr/ cm <sup>3</sup>	0,935-0,965		EN ISO 1183-1/A
Karbon siyahı	%	1-3		ASTM D 1603
Çekme dayanımı-delikli	kN/m	5-10	10	EN ISO 10319
Kaynak aralığı	mm	400	330	
Hücre uzunluğu x hücre genişliği	mm	250x300	210x250	
Kalınlık	mm	1,0-1,5	1,5	EN ISO 9863-1
Hücre derinliği	mm	50	100	
Oksidayson indüksiyon süresi	dak	>20		ASTM D 3895
Lineer ısıl genleşme	±30°C	≤90		

### 3.3.4. Geonet 3D

Geonetler, 60-90° açı ile kesişen, yaklaşık yuvarlak kesitli, birbirine paralel iki polimer çubuk setinden oluşur. Resim 3.6’da görülen geonetler sıvı veya buhar geçişleri için boşluk yaratmaktadırlar (Koerner, 1990: 32-35). Genellikle polietilenden imal edilen bu malzemeye ait teknik özellikler Çizelge 3.9’da sunulmaktadır.

Çizelge 3.9. Geonet 3D teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

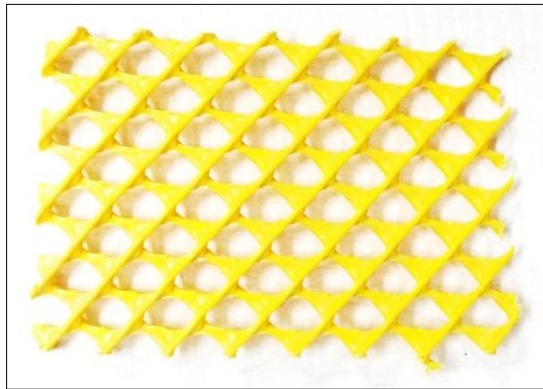
Özellikler	Birim	Değerler	Tolerans	Test Metotları
Hammadde	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)			
Birim yüzey ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	660	10%	TS EN ISO 9864
Polimer yoğunluk	gr/ cm <sup>3</sup>	≥0,94	10%	EN ISO 1183
Çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	13/15	10%	TS EN ISO 10319
Maksimum yükteki uzama	%	50/40	10%	TS EN ISO 10319
Karbon siyahı muhtevası	%	1-3	10%	ASTM D 1603
Kalınlık	mm	6,5	10%	TS EN ISO 9863-1
Delinme dayanımı	kN/m	32/32	10%	TS EN ISO 12236



Resim 3.6. Geonet 3D

### 3.3.5. Geonet 2D (Rockshield)

Kaya kalkanı adı ile anılan ve boru koruması için sargılanarak kullanılan bu geosentetik türü (Resim 3.7) ile ilgili özellikler Çizelge 3.10'da sunulmaktadır.



Resim 3.7. Geonet 2D (Rockshield)



Çizelge 3.10. Geonet 2D (Rockshield) teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellikler	Birim	Değerler	Tolerans	Test Metotları
Hammadde	Polietilen			
Birim ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	>800	10%	TS EN ISO 9864
Çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	>7/2	10%	TS EN ISO 10319
Maksimum yükteki uzama	%	>40	10%	TS EN ISO 10319
Gözenek açıklığı	mm	8/10/8	10%	ASTM D 1603
Kalınlık	mm	>6	10%	TS EN ISO 9863-1
Delinme dayanımı	N	>800	10%	TS EN ISO 12236

### 3.4. PE 100 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borunun Özellikleri

Bu çalışmadaki deneylerde, şehirlerin sulama şebeke sistemlerinde kullanılan PE 100 yüksek yoğunluklu (HDPE) borular tercih edilmiştir. Söz konusu borular düşük et kalınlıklarına rağmen yüksek basınçlarda (16 bar) çalışabilmektedirler. (www.firat.com, 2017)

Laboratuvarında yer alan serbest ağırlık düşürücü düzenek için 1000 mm uzunluktaki, 110 mm ve 160 mm dış çaplı, sırası ile 7 mm ve 10 mm et kalınlığına sahip HDPE borular kullanılmıştır. Teknik özellikleri Çizelge 3.11’de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. Kullanılan PE 100 borulara ait teknik özellikler (pilsa.wavin.com, 2017)

Özellikler	Birim	Değer	Test Metodu
Yoğunluk (23°C)	gr/cm <sup>3</sup>	0,950-0,960	ISO 1183
Erime akış hızı (MFR) (190°C-2,16 kg)	gr/10 dak	0,04-0,07	ISO 1133
Erime akış hızı (MFR) (190°C-5 kg)	gr/10 dak	0,2-0,5	ISO 1133
Kopmada uzama	%	> 600	ISO 527-2/1B/50,TS1398
Akmada gerilme dayanımı	MPa	22-27	ISO 527-2/1B/50,TS1398
Elastik modülü	MPa	950-1400	ISO 527-2/1B/50,TS1398
Karbon siyahı miktarı (190°C - 5kg)	%	>2	ISO 6964
Sertlik	Shore D	59-60	ISO 868
Termal dayanıklılık	dak	>20	EN 728 ISO/TR 10837
Vicat yumuşama sıcaklığı	°C	126	ISO 306 (METOT A)
Kırılma sıcaklığı	°C	< -70	ASTM D-746
Isıl iletkenlik (20°C)	W/Mk	0,4	DIN 52612
Isıl iletkenlik (150°C)	W/Mk	0,2	DIN 52612
ESCR (50°C 'DE), F50	Saat	>10000	ASTM D-1693

HDPE boruların üretiminde ve kalite kontrolünde Çizelge 3.12'deki standartlara göre testler uygulanmaktadır.

Çizelge 3.12. HDPE boruların kalite kontrolünde uygulanan testler (www.firat.com, 2017)

Test adı	Özellik	Metot
Yoğunluk tayini	Yoğunluk	ISO 1183
MFI (Melt Flow Index)	Sıcaklık karşısındaki davranışı (gr/10dak)	ISO 1133
Kopma mukavemeti	Kopma mukavemeti ve elastik modülü	ISO 527
Kopma uzama	Kopma anındaki uzama (%)	ISO 527
Hidrostatik basınç testi	Yüksek basınç altındaki davranış	ISO 9080 EN 921
Homojenlik testi	Pigment dağılımı ve boşlukların incelenmesi	ISO 13949
Karbon siyahı miktar	Karbon miktarı (%)	ISO 6964

### 3.5. Ölçüm Aletlerinin Özellikleri

Bu bölümde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan ölçüm teçhizatı ile ilgili bilgiler verilmiştir.

#### 3.5.1. İvmeölçerler

İvmeölçerler, genel amaçlı mutlak hareket ölçümlerinde, şok ve titreşim ölçümlerinde kullanılırlar. Bir yapının ya da bir makinenin ömrü, genellikle çalışma sırasında maruz kaldığı ivmenin şiddeti ile orantılıdır. Bir yapının çeşitli noktalarındaki titreşimin genliği ve fazı, modal analiz yapılabilmesine izin vermektedir. Yapılacak olan bu analiz sonucunda dinamik olarak çalışacak parçaların çalışma modları belirlenerek tüm sistemin dinamik karakteri ortaya konabilmektedir. Sismik ivmeölçerler ile yer, bina, köprü üzerinde deprem, inşaat, madencilik çalışmaları, büyük nakliye vasıtalarının yol açtığı titreşimler ölçülebilir. Yüksek frekanslı ivmeölçerler ile çarpma testleri, çok yüksek devirli motorların testleri yapılabilir. İvmeölçerler ölçme tekniğine göre de piezoelektrik ivmeölçerler ve kapasitif ivmeölçerler olarak farklı sınıflara ayrılırlar (Kantar, 2009).

#### Piezoelektrik ivmeölçerler

Piezoelektrik ivmeölçerler çok düşük frekanslı sismik uygulamalardan, çok yüksek frekansta doğrusal çalışma aralığı gerektiren çarpma testlerine kadar birçok ölçme

uygulamasında kullanılan, küçük boyutlu, yüksek sıcaklık aralığında çalışabilen, endüstriyel standartlarda kılıf içinde yapılandırılmış transdüserlerdir. Kuvars ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb seviyesinde elektrik yükü üretirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlenin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkir ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali çıkışı verir. Mikro elektronik devreye sahip piezoelektrik ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre vardır. Bu tip algılayıcılar gürültüden minimum etkilenirler. Üzerinde çevirici mikro elektronik devre olmayan algılayıcılar harici bir çevirici ile kullanılırlar. Bu tip algılayıcılar yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda kullanılmak için idealdirler (Kantar, 2009).

#### Kapasitif ivmeölçerler

Kapasitif ivmeölçerler düşük seviyeli ve düşük frekanslı titreşimleri, statik ivmeleri ölçmede kullanılırlar. Karşılıklı yerleştirilmiş kapasitör şeklinde çalışan iki plaka arasındaki kapasitansın değişmesi prensibi ile ölçüm yaparlar. Bu plakalar arasındaki mesafe ve dolayısı ile kapasitans ivme altında değişir ve ivme ile doğrusal bir sinyal doğururlar. Bu tip algılayıcılar özel bir sinyal koşullama gerektirmezler. 12 VDC ya da 24 VDC ile beslenmek sureti ile çalışırlar. Özellikle robotik, otomotiv sürüş kalite testleri, bina dinamiği ölçümü gibi uygulamalarda kullanılırlar (Kantar, 2009).

#### Deneyleerde kullanılan ivmeölçer: Model 353B02

Deneyleerde PCB Group firmasına ait piezoelektrik ICP tipi ivmeölçerler, Model 353B02'dir. İvmeölçerler kum zeminle temas halinde olmayıp, boru içinde kalmak üzere monte edilmiştir (Resim 3.8). Teknik özellikleri Çizelge 3.13'te görülmektedir.

ICP tipi ivmeölçerlerin üstünlükleri;

- Uygun tip ve uzunlukta kabloya bakmaksızın sabit voltaj hassasiyeti,
- Düşük empedanslı çıkış sinyali, oldukça uzun kablolarda bile çevre etkilerine rağmen sinyal kalitesini kaybetmeme,
- Düşük gürültü aralığı, veri toplama donanımları, kaydedici, sinyal çözümleme, standart okuyucu ile voltaj-çıkış sinyali uyuşması olarak sayılabilir.



Resim 3.8. Boruya monte edilmiş iki adet piezoelektrik ivmeölçer

Çizelge 3.13. Model 353B02 ivmeölçerinin teknik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Hassasiyet ( $\pm\%5$ )	mV ( $m/s^2$ )	2,04
Ölçüm aralığı	$m/s^2$	$\pm 2453$
Frekans aralığı ( $\pm\%5$ )	Hz	1-7000
Frekans aralığı ( $\pm\%10$ )	Hz	0,7-10000
Frekans aralığı ( $\pm 3$ dB)	Hz	0,35-18000
Rezonans frekansı	kHz	$\geq 38$
Genişbant hassasiyeti	$m/s^2$	0,05
Düzensizlik	%	$\leq 1$
Çaprazlama hassasiyeti	%	$\leq 5$
Aşırı yük sınırı	$m/s^2$	98-100
Çalışma sıcaklığı	$^{\circ}C$	-54 ile +121
Uyarma voltajı	VDC	18-30
Sabit akım uyarma	mA	2-20
Çıkış empedansı	Ohm	$\leq 100$
Çıkış öngerilim voltajı	VDC	8-12
Boşaltım zamanı	s	0,5-2,0
Hazır hale gelme zamanı	s	$< 5$
Algılama elemanı	Quartz	
Elektrik bağlantısı	Koaksiyal jak	10-32
Ağırlık	gr	10

### 3.5.2. Veri toplayıcı

Deneyleerde kullanılacak olan veri toplayıcı seçilirken kuvvetin etki şekli ve kullanılan ölçme aygıtlarının türü dikkate alınarak National Instruments firmasının ürettiği NI 9233-USB-9162 modeli kullanılmıştır. (Resim 3.9). Bu veri toplayıcı, dört kanallı bir dinamik sinyal yakalayıcısı olup, yüksek doğrulukta ölçüm alabilen IEPE algılayıcılarından yapılmıştır (Kantar, 2009).



Resim 3.9. NI 9233-USB-9162 modeli veri toplayıcı (Kantar, 2009)

Kullanılan veri toplayıcı aygıt iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül veri toplayıcısıdır. Bu modüle ölçüm aygıtları bağlanmaktadır. İkinci bölüm ise sinyal taşıyıcı modüldür. Bu modül de birinci modülden gelen sinyalleri bilgisayara aktarmaktadır. Her iki modül birbirinden bağımsızdır. Veri toplayıcıdan bilgisayar ortamına aktarılan veriler, veri toplayıcı için yazılmış olan bilgisayar programı yardımıyla almak istenilen veri türüne çevrilerek kaydedilir. Ayrıca bu program yardımıyla deney düzeneğine bağlanılan ölçüm aygıtlarının kalibrasyon ayarları yapılmaktadır (Kantar, 2009). Çizelge 3.14'te veri toplayıcısının bazı teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.14. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Kanal sayısı	4 adet analog giriş	
Çözünürlük	bit	24
Dinamik aralık	dB	102
Minimum data oranı	kS/s	2
Maksimum data oranı	kS/s	50
Frekans	MHz	12,8
Hassasiyet	ppm max	$\pm 100$
Giriş akımı	AC	
Minimum AC voltajı	V	5
Maksimum AC voltajı	V	5,8
IEPE minimum uyarma akımı	m.A	2,0
Giriş voltajı aralığı	V	$\pm 5$
Bilgisayar bağlantısı	Hi - Speed USB 2,0	

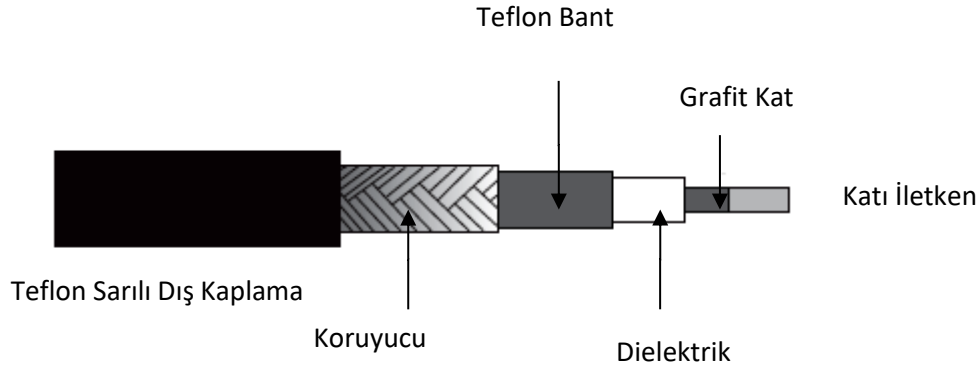
### 3.5.3. Ölçüm aygıtları bağlantı kabloları

Ölçüm aygıtlarından alınan ölçme değerlerinin değer kaybına uğramadan veri toplayıcısına iletilmesi için PCB Group firmasının imal ettiği 003A20 Model numaralı kablo kullanılmıştır (Resim 3.10). Bu kablo düşük gürültülü koaksiyal bir kablodur (Kantar, 2009).



Resim 3.10. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo (Kantar, 2009)

Bu tip kablolar yüksek sıcaklıklarda kullanılan algılayıcılarda, yüksek empedanslı sinyallerde, ICP algılayıcılarda ve düşük empedanslı voltaj sinyallerinin iletilmesinde kullanılmaktadır. Kablo çapı 2 mm olup çalışma sıcaklık aralığı -90 ile 260 °C'dir. Kablo empedansı 50 Ohm'dur. Kablo uzunluğu 6 m'dir. Resim 3.11'de kablonun içyapısı görülmektedir (Kantar, 2009).



Resim 3.11. 003A20 Model kablo içyapısı (Kantar, 2009)

### 3.6. Laboratuvar Deney Elemanlarının Hazırlanması

Kullanılan deney tankı 400 x 500 x 1000 mm boyutlarındadır (Bkz. Resim 3.1). Boru altına temel tabakası olarak 50 mm yüksekliğinde % 40 rölatif sıklıkta, birim hacim ağırlığı  $\gamma = 16,13 \text{ kN/m}^3$  olan kuru deney kumu konulmuştur. Tabaka aşağıdaki Eş. 3.2-Eş. 3.5’de belirlenen 41 kg kum miktarını kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Tüm deneylerde boru altındaki temel tabakası kalınlığı sabittir. HDPE boru eksenleri, deney tankının yan yüzlerinden 250 mm uzakta olacak şekilde konumlandırılmışlardır. Boru üstüne aynı sıklıkta, aynı deney kumu yerleştirilmiştir.

Piezoelektrik ivmeölçerler, 1000 mm uzunluğa sahip HDPE boruda 250 ve 500 mm’de ve toplamda iki adet olmak üzere konumlandırılmışlardır. Yükleme plakasına yakın olan ivmeölçer orta, diğer ivmeölçer uç olarak isimlendirilmiştir ve bundan sonraki açıklamalarda bu şekilde kullanılmıştır. Çekicinin uyguladığı yük noktası, borunun tank ön yüzünden 610 mm mesafededir (Resim 3.12).

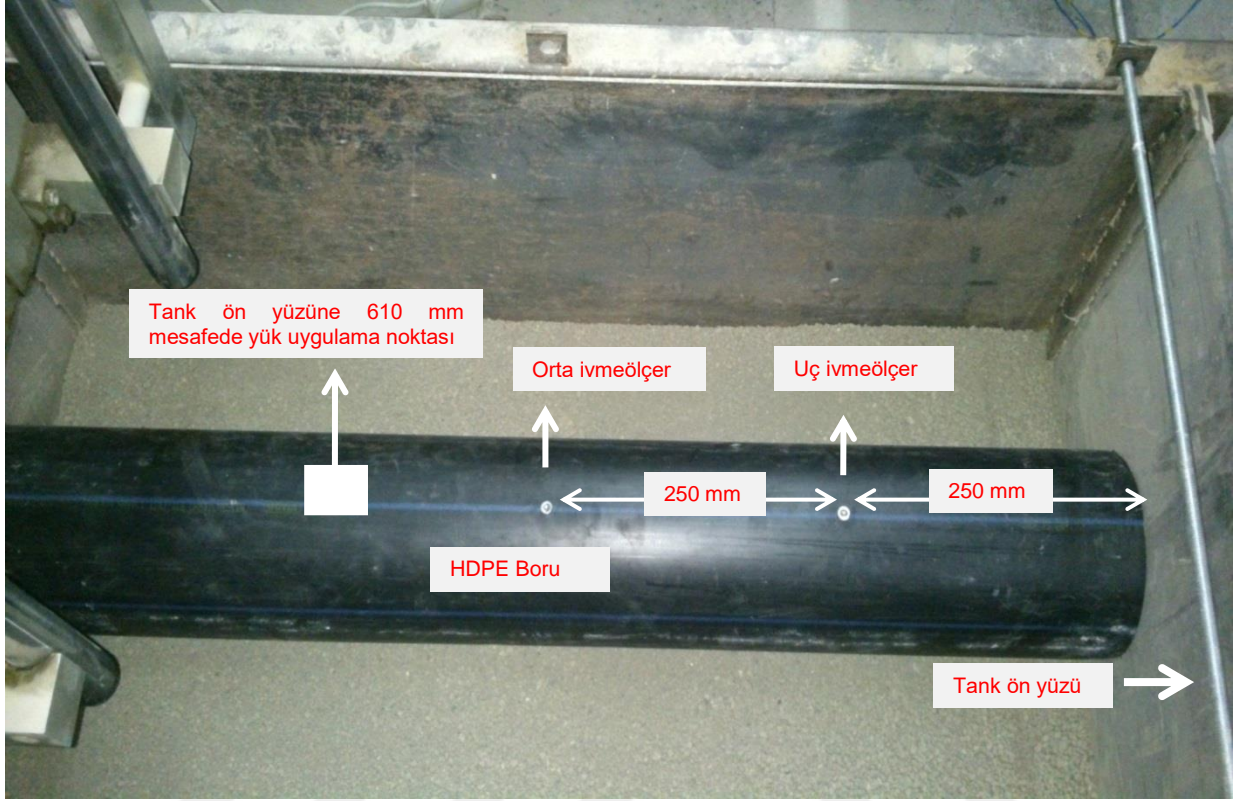
$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \rightarrow 0,4 = \frac{0,94 - e}{0,94 - 0,57} \rightarrow e = 0,792 \quad (3.2)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w \rightarrow \gamma_d = \frac{2,949}{1 + 0,792} \times 9,807 \rightarrow \gamma_d = 16,13 \text{ kN/m}^3 \quad (3.3)$$

$$\gamma_d = 16,13 \times 101,97 = 1644,77 \text{ kg/m}^3 \quad (3.4)$$

$$1644,77 \times 1 \times 0,5 \times 0,05 = 41 \text{ kg}$$

(3.5)



Resim 3.12. İvmeölçerlerin ve borunun yerleşimleri

### 3.7. Laboratuvar Deneyleri

Tüm deneylerde çekiç 500 mm yükseklikten kum tabakası üzerine düşürülmüş, 110 ve 160 mm dış çaplı HDPE borularda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Böylelikle, iki adet referans deney, on adet tek kat geosentetik koruyucu tabaka serimi, on bir adet çift kat geosentetik koruyucu tabaka kombinasyonunun serimi, altı adet boru etrafına sargılama ile geosentetik koruyucu tabaka uygulamak üzere toplamda 29 adet laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deney elemanlarından alınan yükleme ve ivme değerleri dinamik bir veri toplama sistemi ile bilgisayar ortamındaki özel bir yazılıma aktarılarak değerlendirilmiştir. Deneylerin yapılması ve sensörlerin kalibrasyonu için de bu özel yazılım kullanılmıştır. Ölçülen değerler kullanılarak her bir deney için ivme-zaman, deplasman-zaman ve yük-deplasman grafikleri çizdirilmiş ve yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alanın hesaplanması sonucu enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmıştır. Deplasman değerleri boru üzerinden ölçülen ivme değerlerinin integrali alınarak hesaplanmıştır. Bu nedenle deplasman değerinin, ivmeölçerlerin bağlandığı noktaya ait olduğu unutulmamalıdır. Yük-



deplasman grafikleri ise aynı zaman aralığında ölçülen ivme değerlerinin integrali alınarak hesaplanan deplasman ve yük değerlerinin bir grafikte birleştirilmesiyle çizilmiştir.

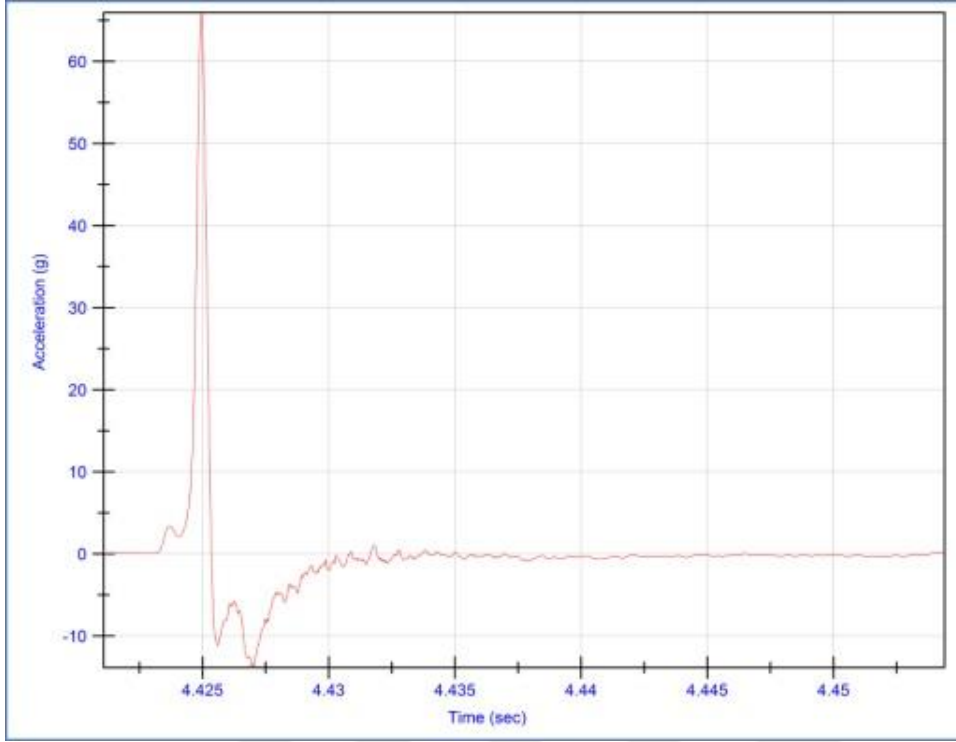
Orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri EK-1'de; uç ivmeölçerlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri EK-2'de; yük-zaman grafikleri EK-3'te ve yük-deplasman grafikleri EK-4'te verilmiştir. Anlatımda süreklilik sağlamak adına yalnızca Deney 1 (referans) ve Deney 2 başlıkları altında örnek olarak grafikler sunulmuştur.

#### Deney 1 : Referans deneyi (160 mm dış çaplı HDPE boru ile)

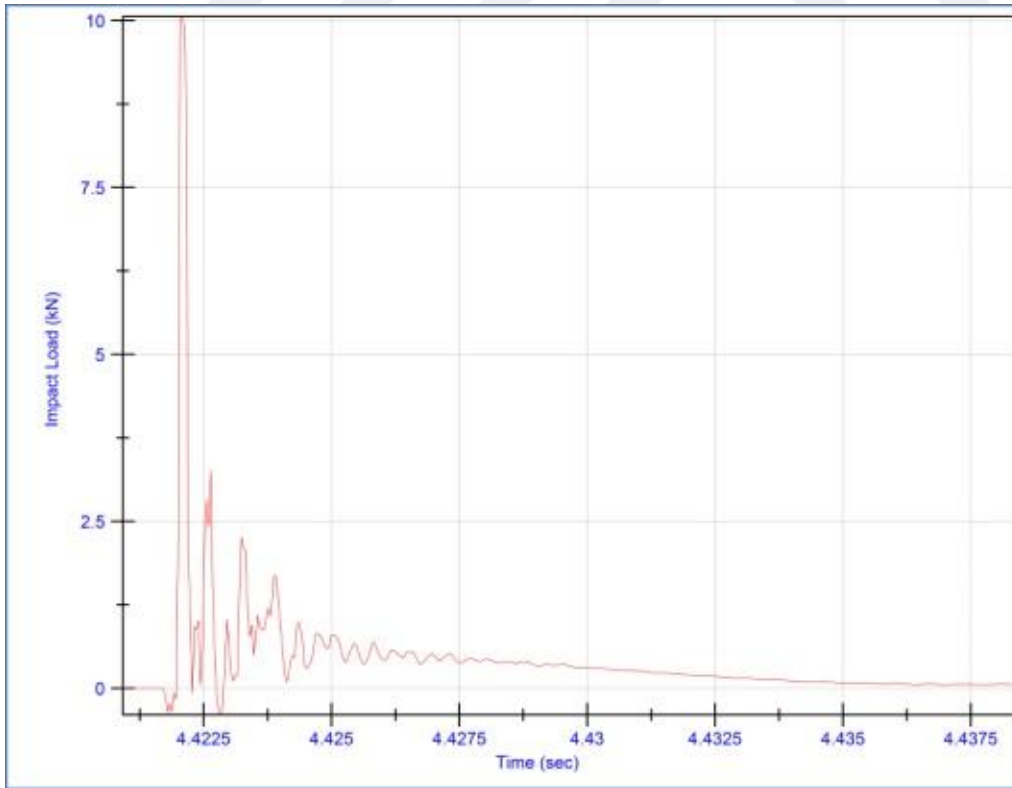
160 mm çaplı boru yerleştirildikten sonra tank üst yüzeyine kadar hiçbir güçlendirme elemanı kullanılmamış, kalan 190 mm boyunca yalnızca zemin yerleştirilmiştir.

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	65,95 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,06 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	5,10 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	21,36 J

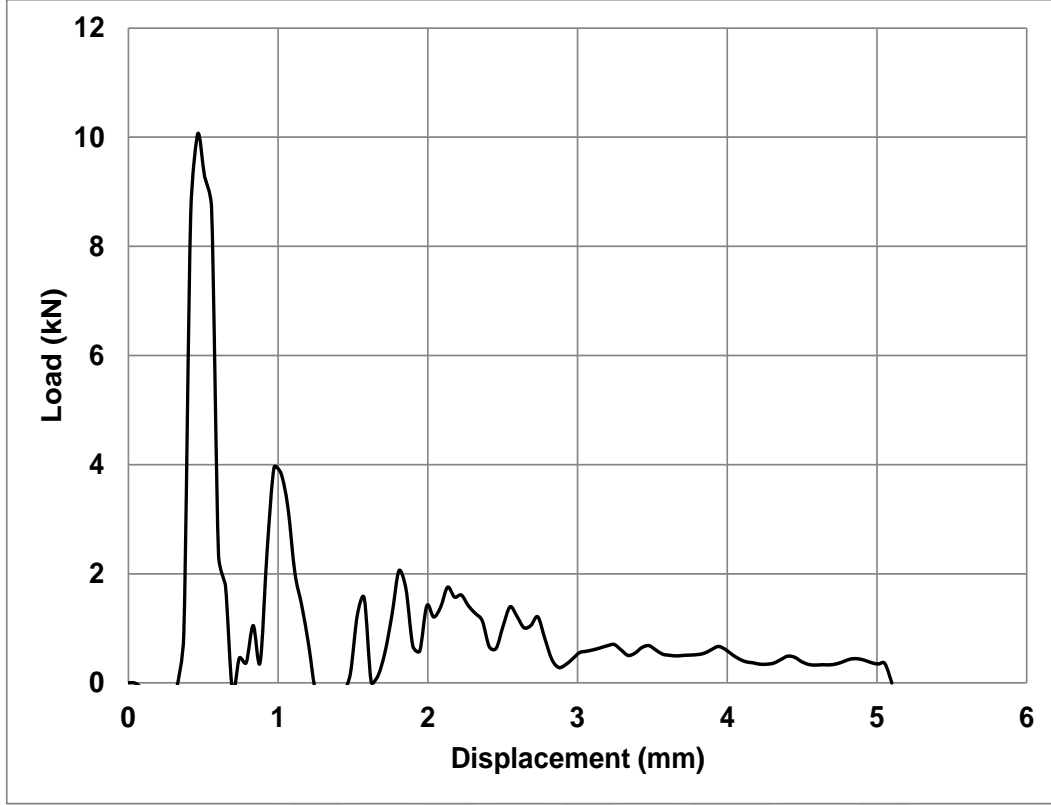
500 mm yükseklikten düşürölen 5,25 kg kütleli çekiç tarafından sisteme uygulanan enerji 25,7512 Joule'dür. Tüm testlerde, enerji yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. Sisteme uygulanan enerjinin boru üzerinden ölçölmüş enerji değerinden farkı, sönmölenen enerjiyi vermektedir. Deney 1'e ait ivme-zaman, yük-zaman ve yük-deplasman grafikleri sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4. Referans deney (Deney 1)'de orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği



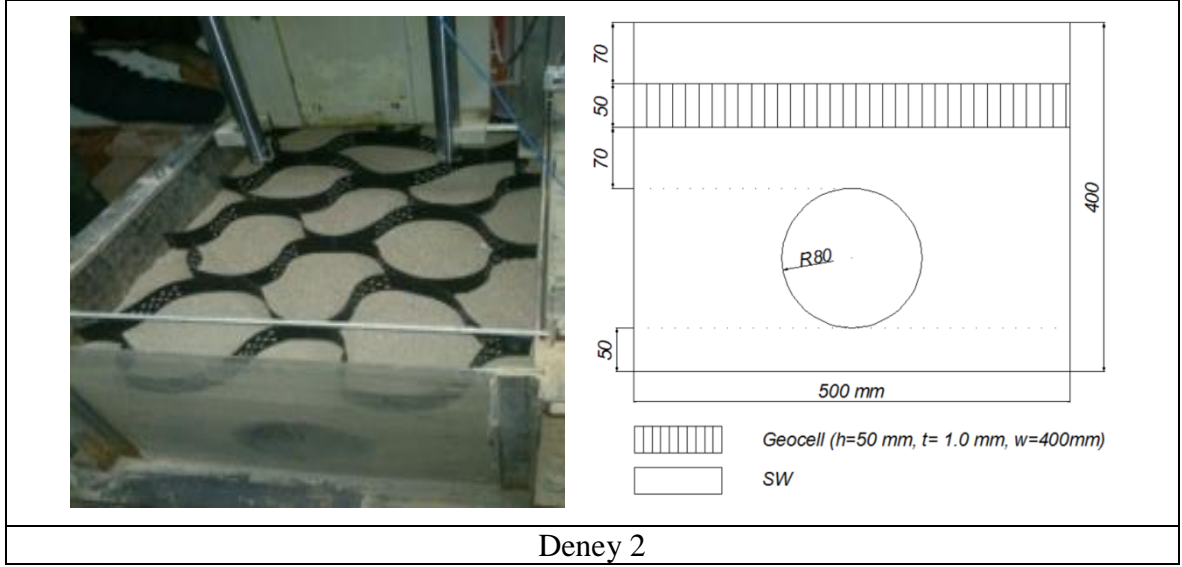
Şekil 3.5. Referans deney (Deney 1)'de orta ivmeölçerden elde edilen yük-zaman grafiği



Şekil 3.6. Referans deney (Deney 1) 'de orta ivmeölçerden elde edilen yük-deplasman grafiği

#### Deney 2: Geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. Geocell hücreleri zemin yüzeyine olabildiğince gerdirilerek serilmiştir. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.13'te yer almaktadır.

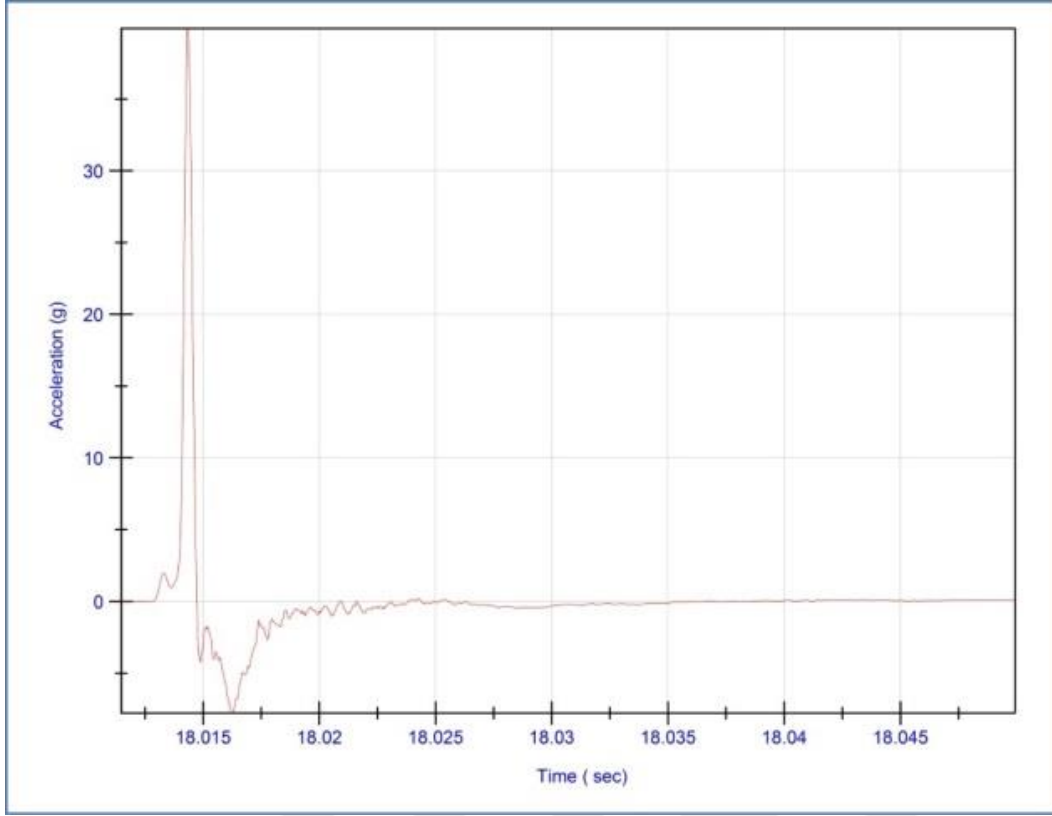


Deney 2

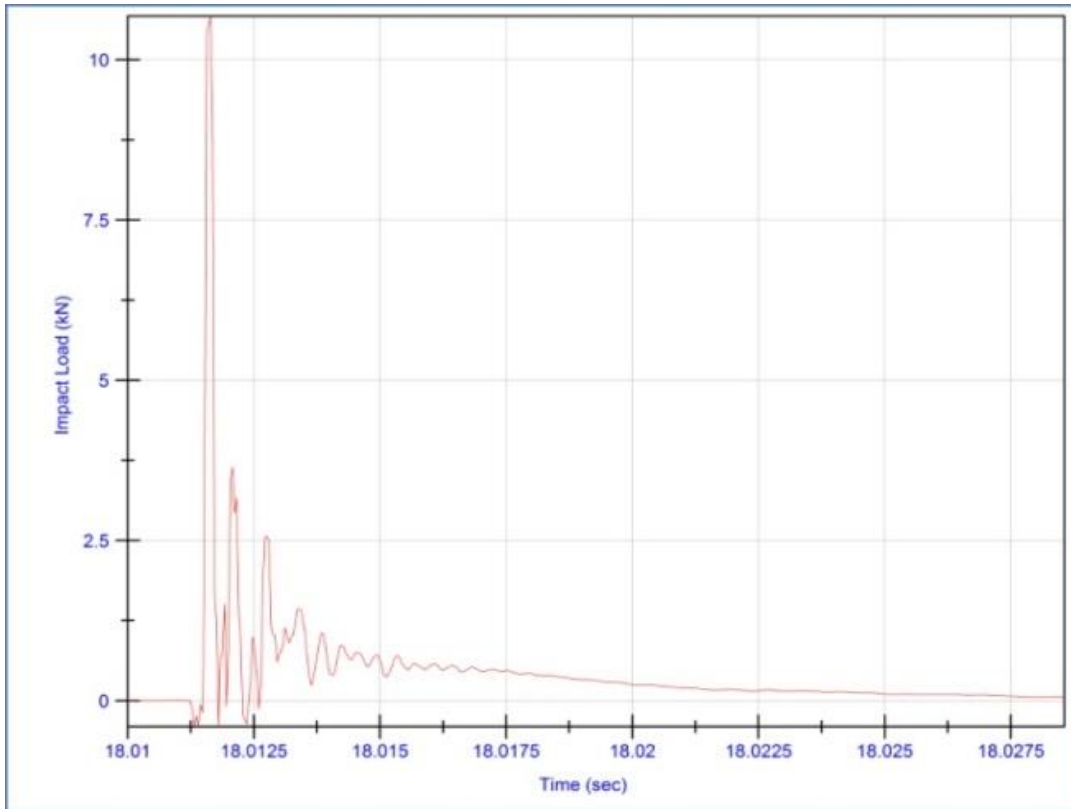
Resim 3.13. Deney 2'ye ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	39,90 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,68 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	2,11 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	23,49 J

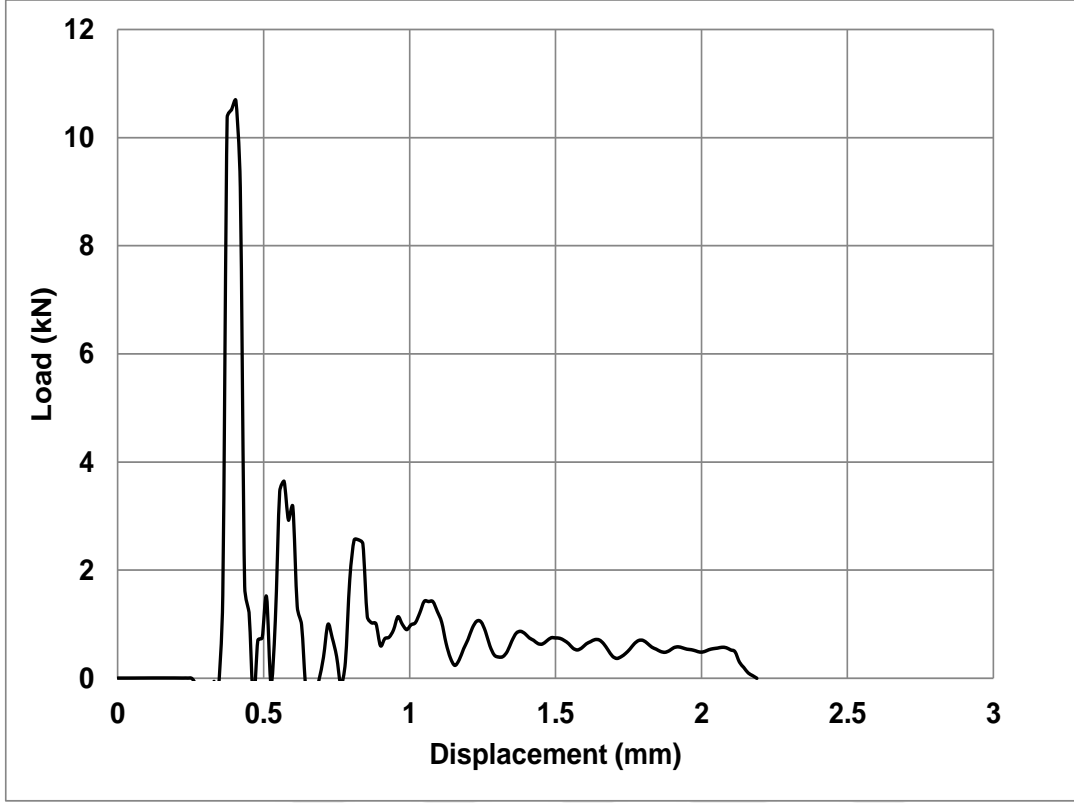
160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 39,5 oranında düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş, tüm testlerde, referans deney maksimum ivme değerinin, ilgili deney maksimum ivme değerinden farkı bulunarak, referans deney maksimum ivme değerine bölünmesi ile bulunan orandır. Örneğin Deney 2 için bu hesap;  $((65,95 \text{ g} - 39,90 \text{ g}) / 65,95 \text{ g}) \times 100$  şeklindedir. Deney 2'ye ait ivme-zaman, yük-zaman ve yük-deplasman grafikleri sırasıyla Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.7. Deney 2’de orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği



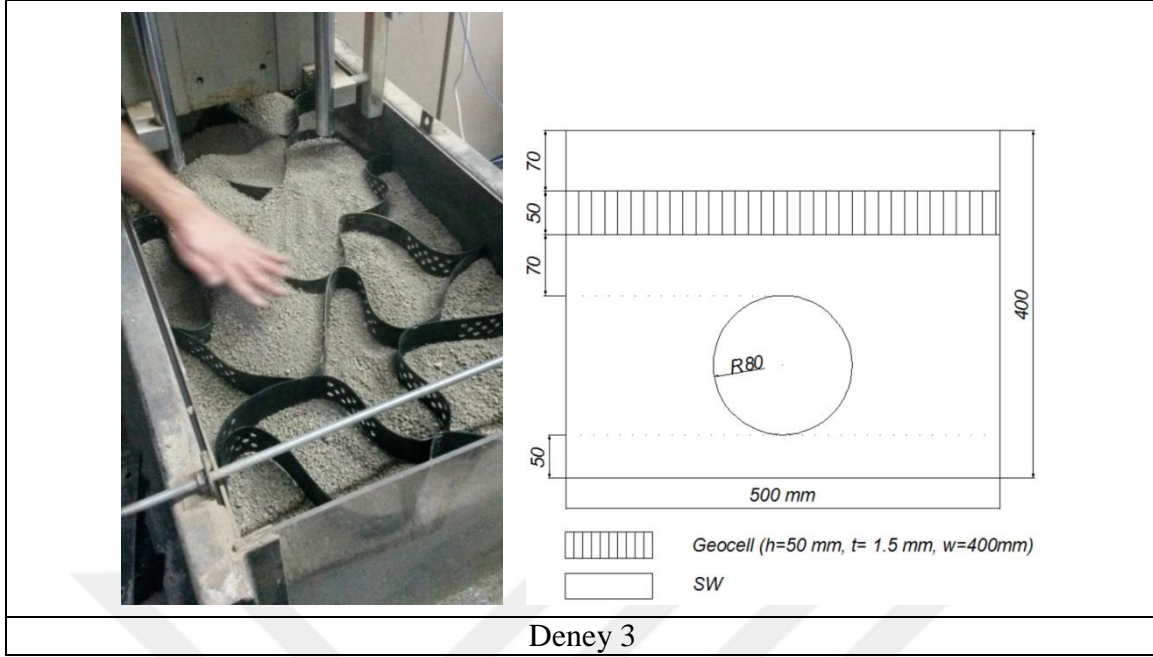
Şekil 3.8. Deney 2’de orta ivmeölçerden elde edilen yük-zaman grafiği



Şekil 3.9. Deney 2’de orta ivmeölçerden elde edilen yük-deplasman grafiği

### Deney 3: Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, Deney 2’den farklı olarak et kalınlığı artırılarak geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.14’te yer almaktadır.



Deney 3

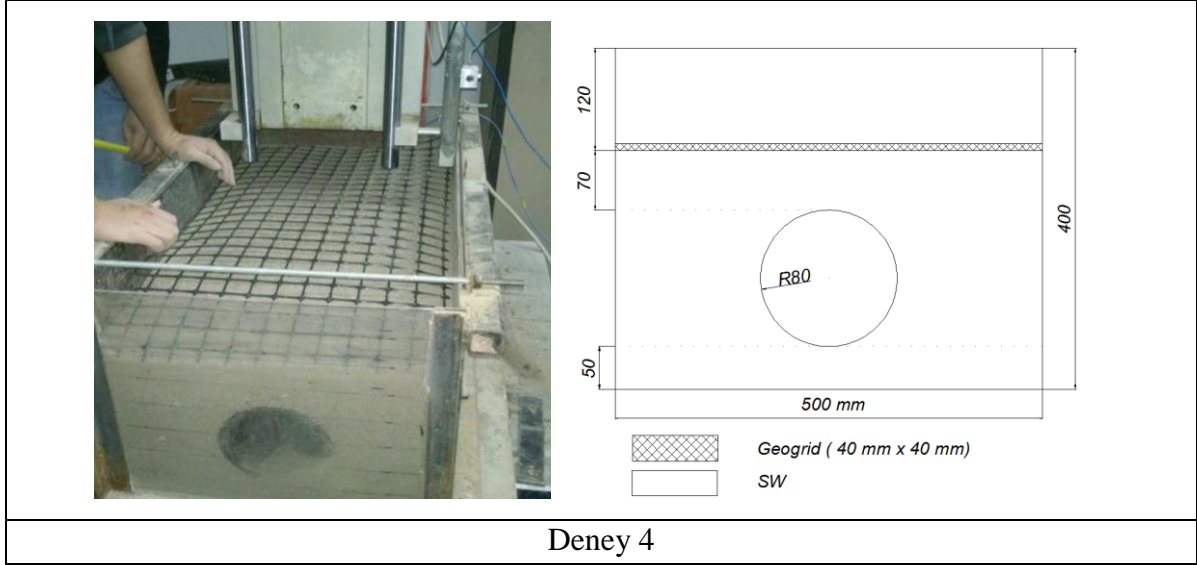
Resim 3.14. Deney 3'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	30,04 g
Uygulanan maksimum yük	:	9,98 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	1,01 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	23,80 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 54,5 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 4: Geogrid güçlendirme elemanı

Zemin, geogrid ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.15'te yer almaktadır.



Deney 4

Resim 3.15. Deney 4'e ait resim ve şematik gösterim

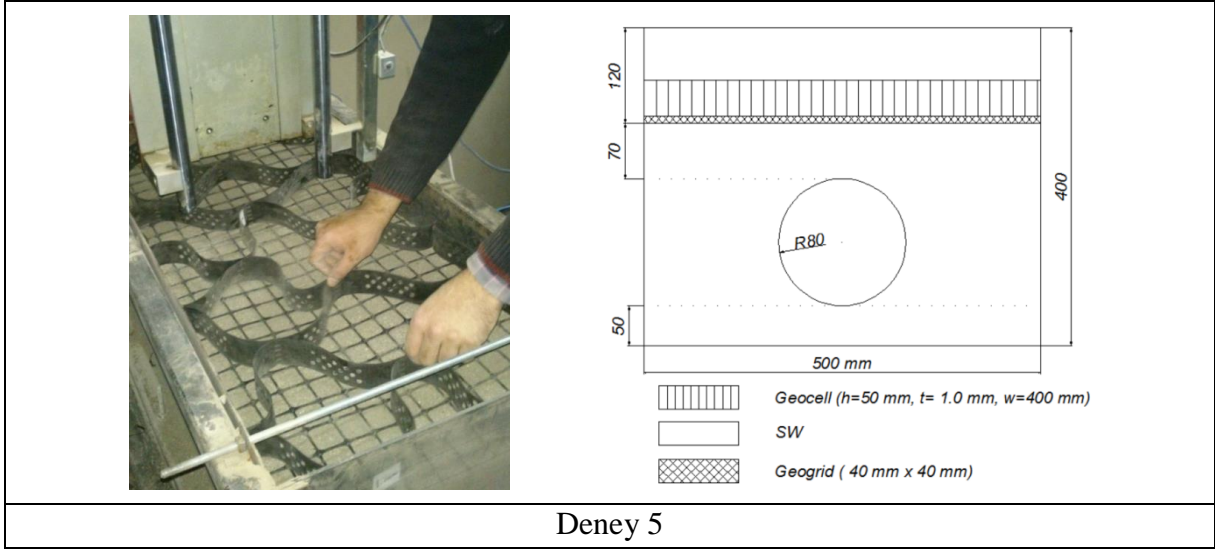
Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	25,20 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,78 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,58 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	24,66 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 61,8 oranında düşüş gözlenmiştir.

Deney 5: Geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ve Geogrid güçlendirme elemanları

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ve geogrid ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.16'da yer almaktadır.





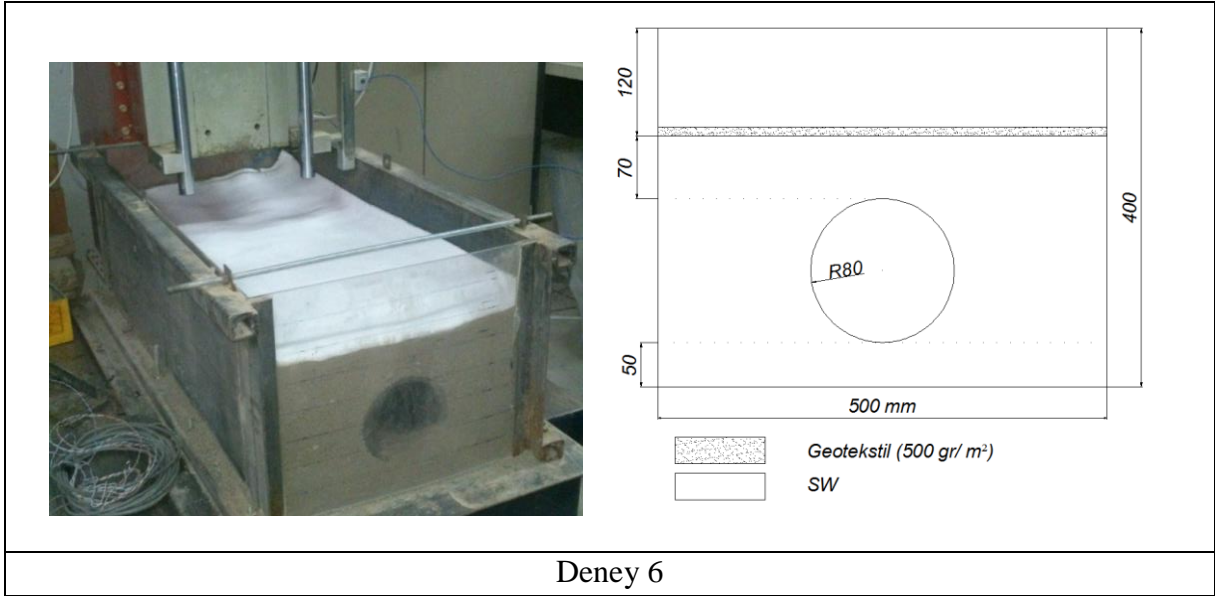
Resim 3.16. Deney 5'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	16,03 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,49 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,33 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,20 J

İki farklı geosentetik elemanın birlikte kullanılması ile ivme sönmöleme kapasitesi incelenmiştir. 160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 75,7 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 6: Geotekstil güçlendirme elemanı

Zemin, geotekstil ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.17'de yer almaktadır.



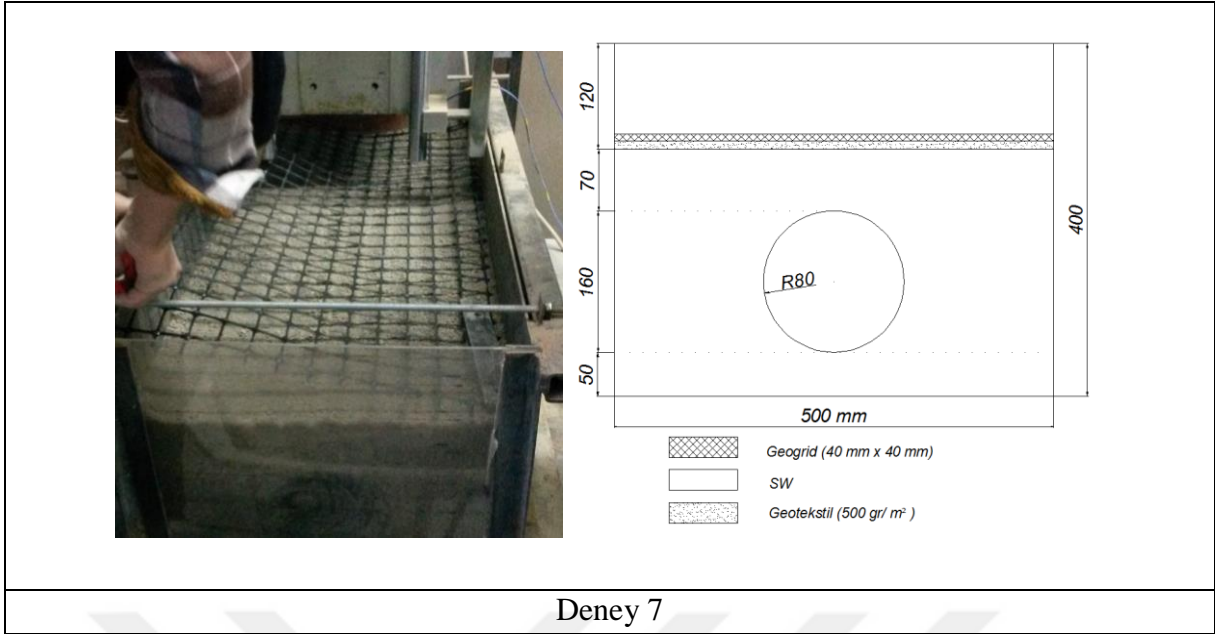
Resim 3.17. Deney 6'ya ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	19,63 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,93 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,56 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	24,84 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değeri % 70,2 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 7: Geogrid ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geogrid ve geotekstil ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.18'de yer almaktadır.



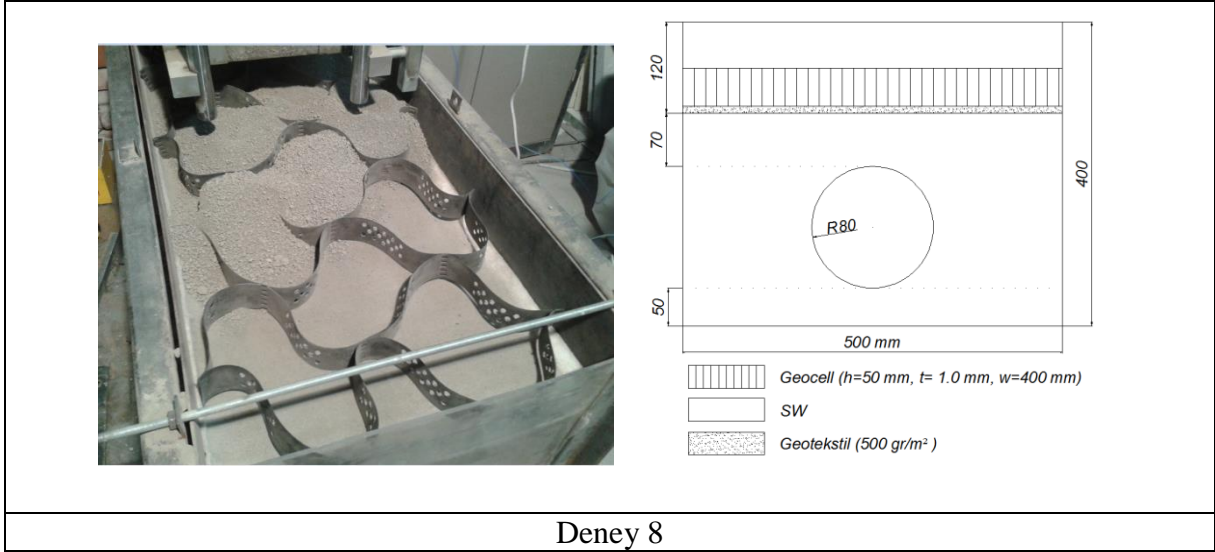
Resim 3.18. Deney 7'ye ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	10,02 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,79 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,27 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,64 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 84,8 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 8: Geocell ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geocell ( $h=50$  mm,  $t=1$  mm,  $w=400$  mm) ve geotekstil ile takviye edilmiştir.  $h$ : geocell hücre yüksekliği,  $t$ : et kalınlığı,  $w$ : kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği,  $H=120$  mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.19'da yer almaktadır.



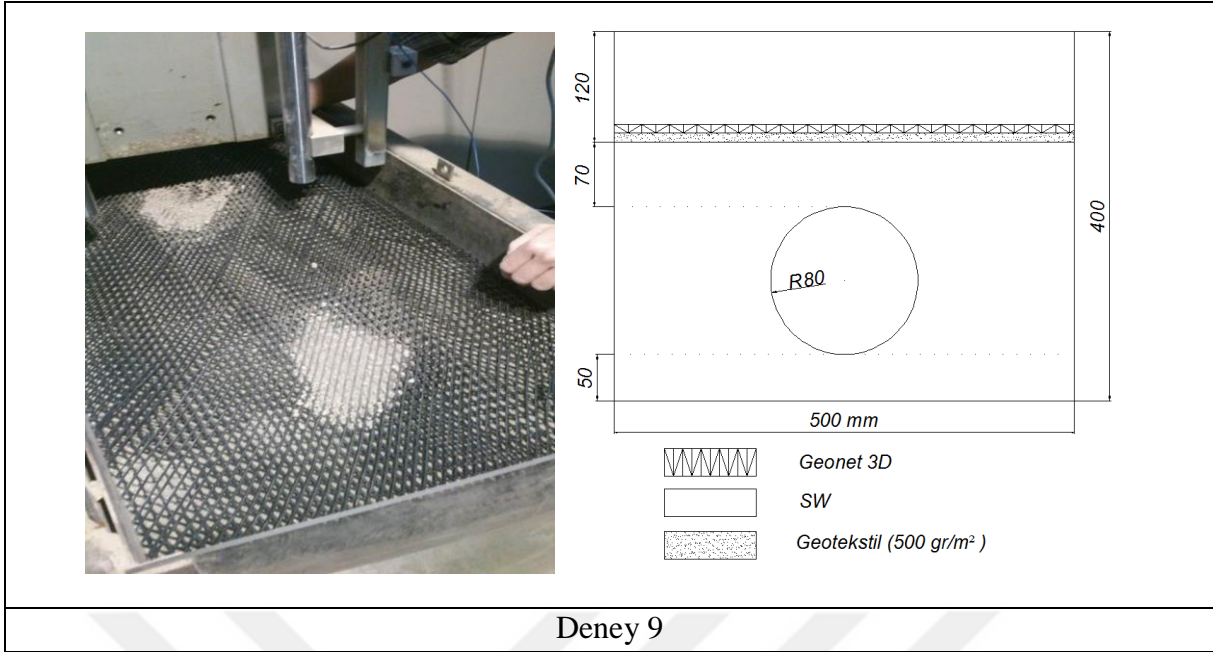
Resim 3.19. Deney 8'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	12,03 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,27 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,29 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,61 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 81,8 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 9: Geonet 3D ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geonet 3D ve geotekstil ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.20'de yer almaktadır.



Deney 9

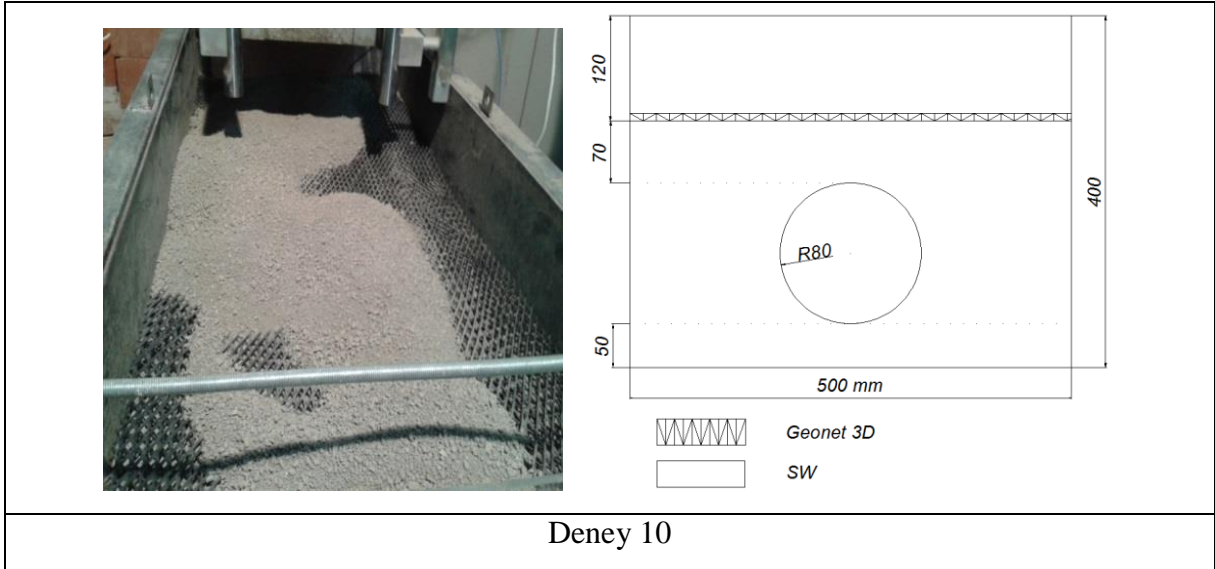
Resim 3.20. Deney 9'a ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	9,12 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,45 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,26 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,65 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 86,2 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 10: Geonet 3D güçlendirme elemanı

Zemin, geonet 3D ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.21'de yer almaktadır.



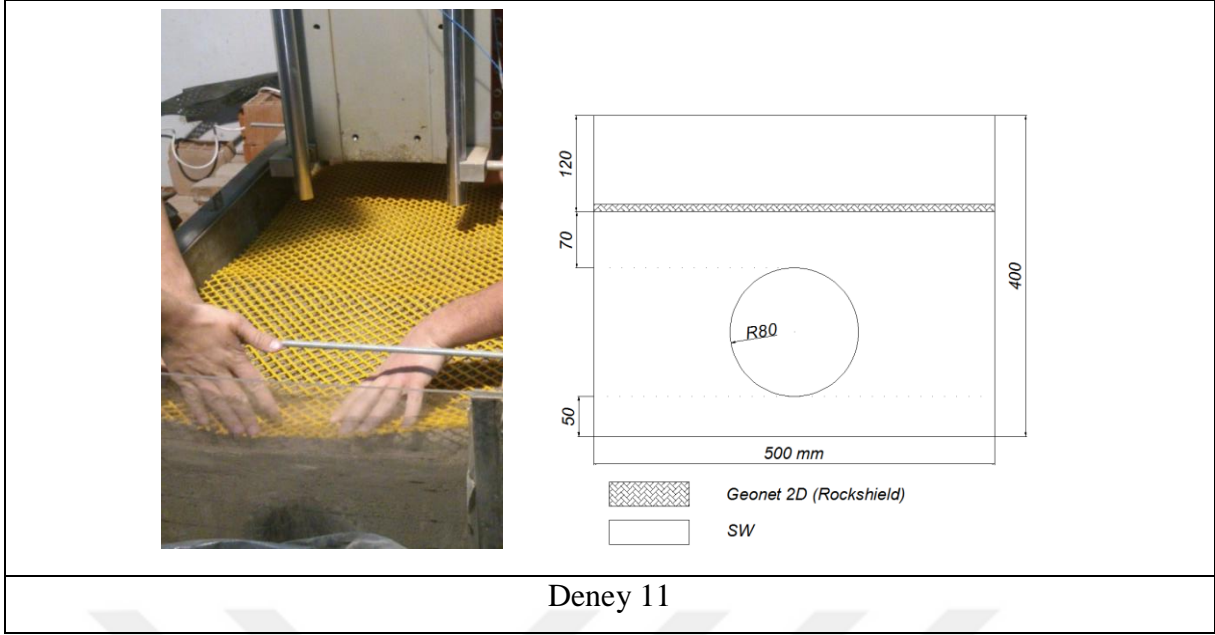
Resim 3.21. Deney 10'a ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 17,90 g
Uygulanan maksimum yük	: 11,10 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,53 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	: 25,11 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 72,9 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 11: Geonet 2D (Rockshield) güçlendirme elemanı

Zemin, geonet 2D (rockshield) ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.22'de yer almaktadır.



Deney 11

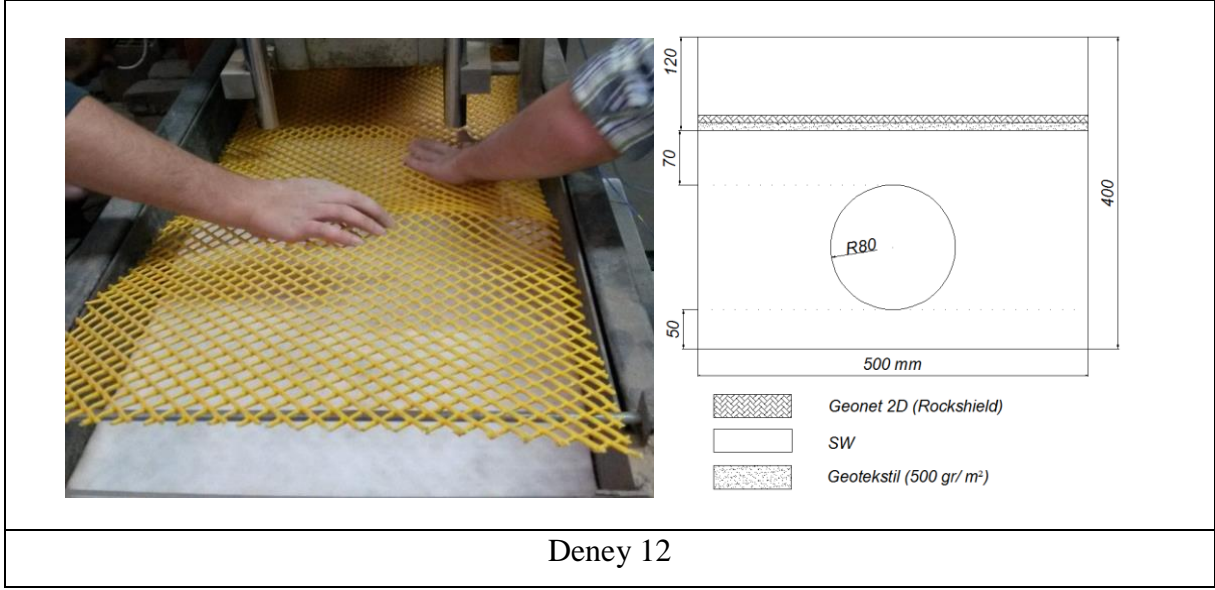
Resim 3.22. Deney 11'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	18,48 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,54 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,54 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,02 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 72,0 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 12: Geonet 2D (Rockshield) ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geonet 2D (rockshield) ve geotekstil ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.23'te yer almaktadır.



Resim 3.23. Deney 12'ye ait resim ve şematik gösterim

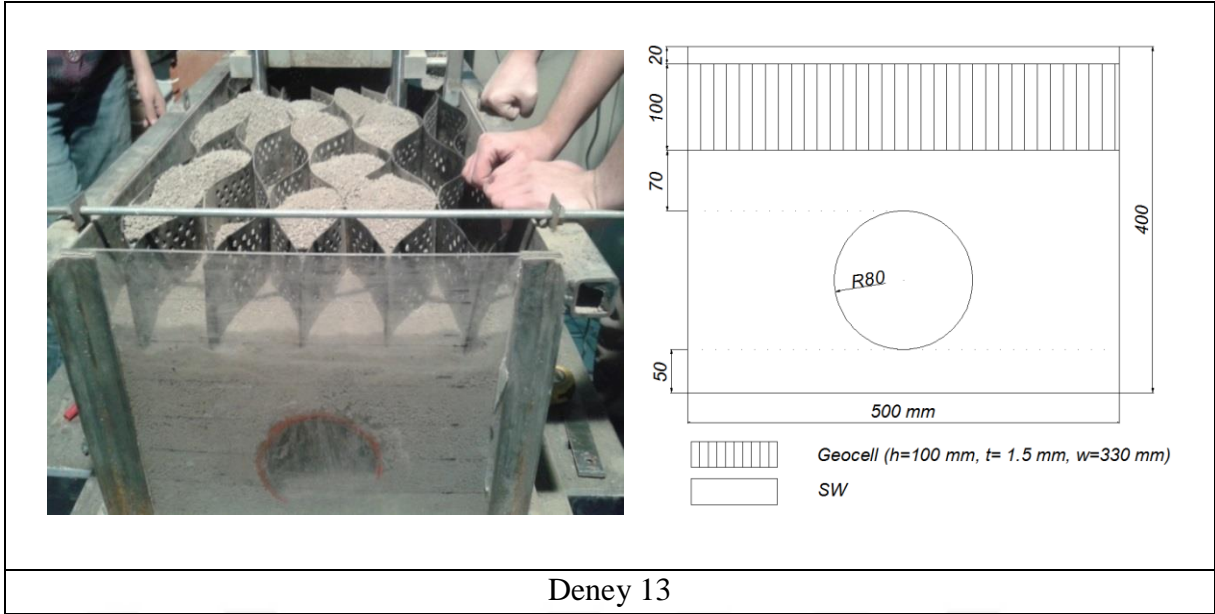
Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	11,01 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,94 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,28 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	25,62 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 83,3 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 13: Geocell ( h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, geocell ( h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.24'te yer almaktadır.





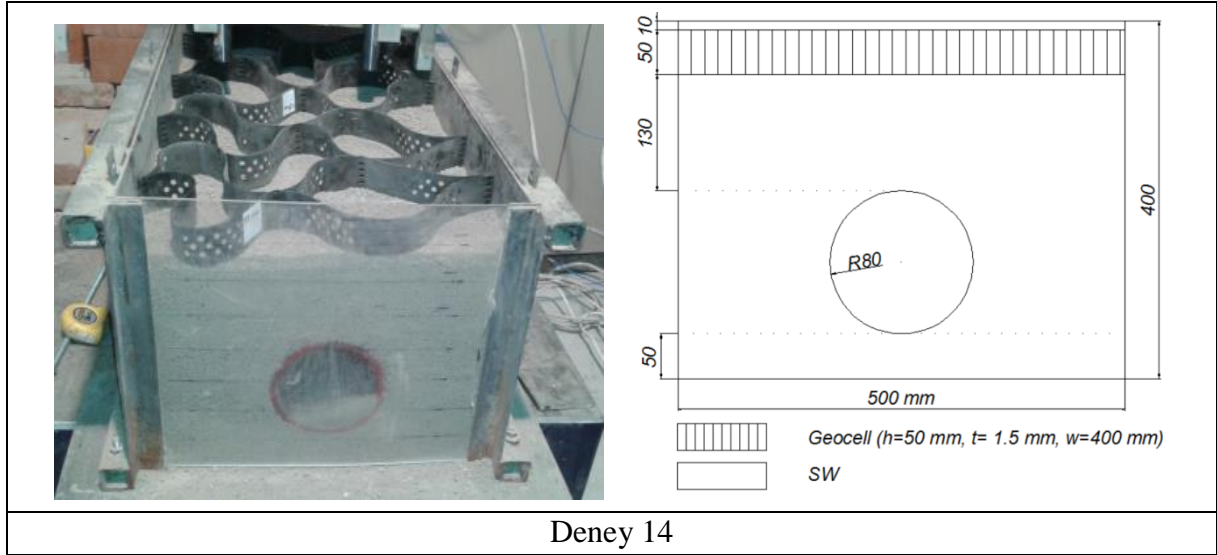
Resim 3.24. Deney 13'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	21,04 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,26 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,56 mm
Sistem tarafından sökülünen enerji	:	24,81 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 68,1 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 14: Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=60 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.25'te yer almaktadır.



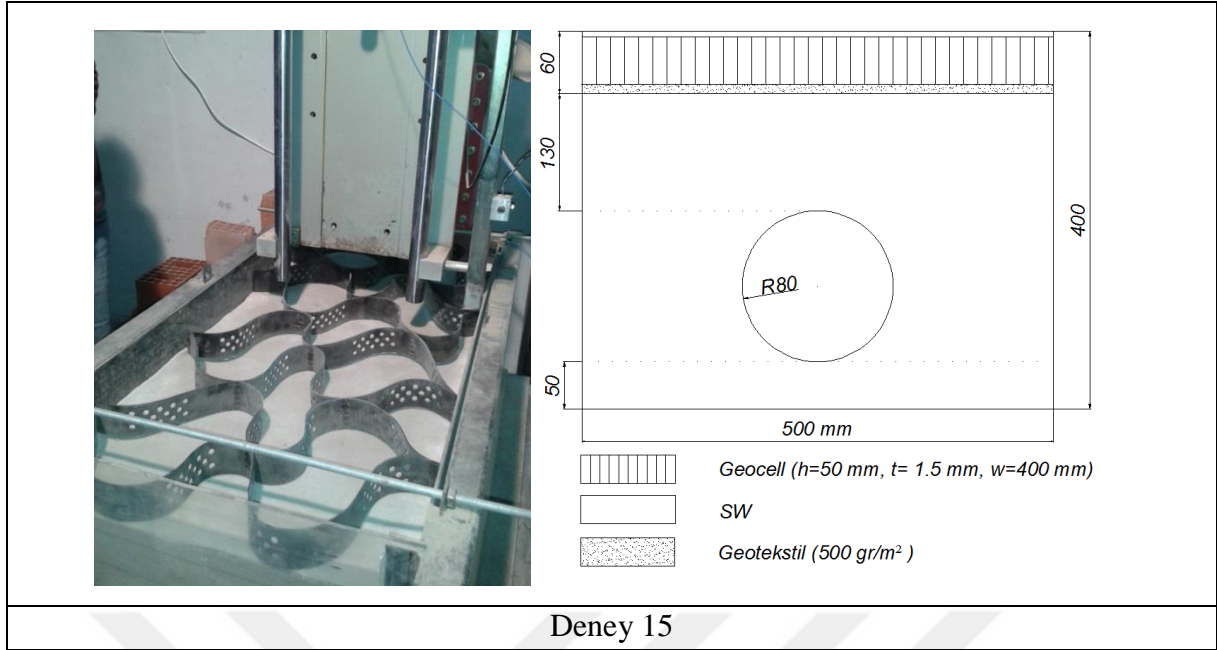
Resim 3.25. Deney 14'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	26,46 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,52 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,59 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	24,57 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 59,9 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 15: Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve geotekstil ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=60 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.26'da yer almaktadır.



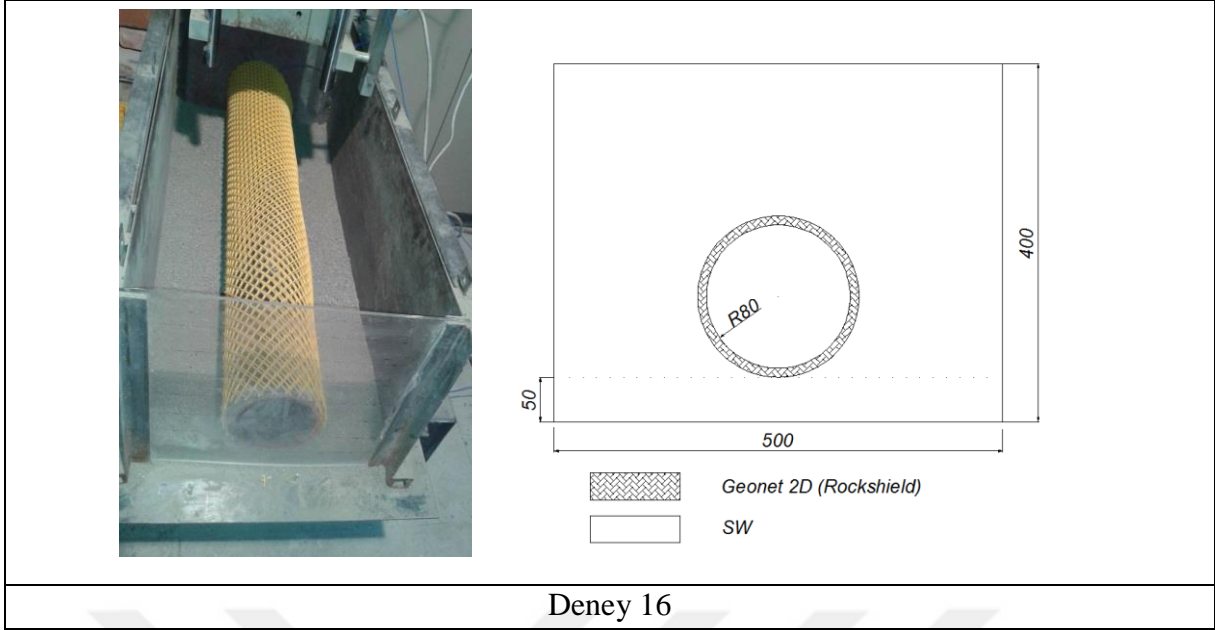
Resim 3.26. Deney 15'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	5,48 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,09 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,21 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,69 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değeri % 91,7 oranında düşüş görölmüştür.

#### Deney 16: Geonet 2D (Rockshield) güçlendirme elemanı ile sargılama

160 mm dış çaplı HDPE boru, geonet 2D (rockshield) ile tek kat sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.27'de yer almaktadır.



Deney 16

Resim 3.27. Deney 16'ya ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	15,45 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,08 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,31 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,50 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 76,6 oranında düşüş görölmüştür.

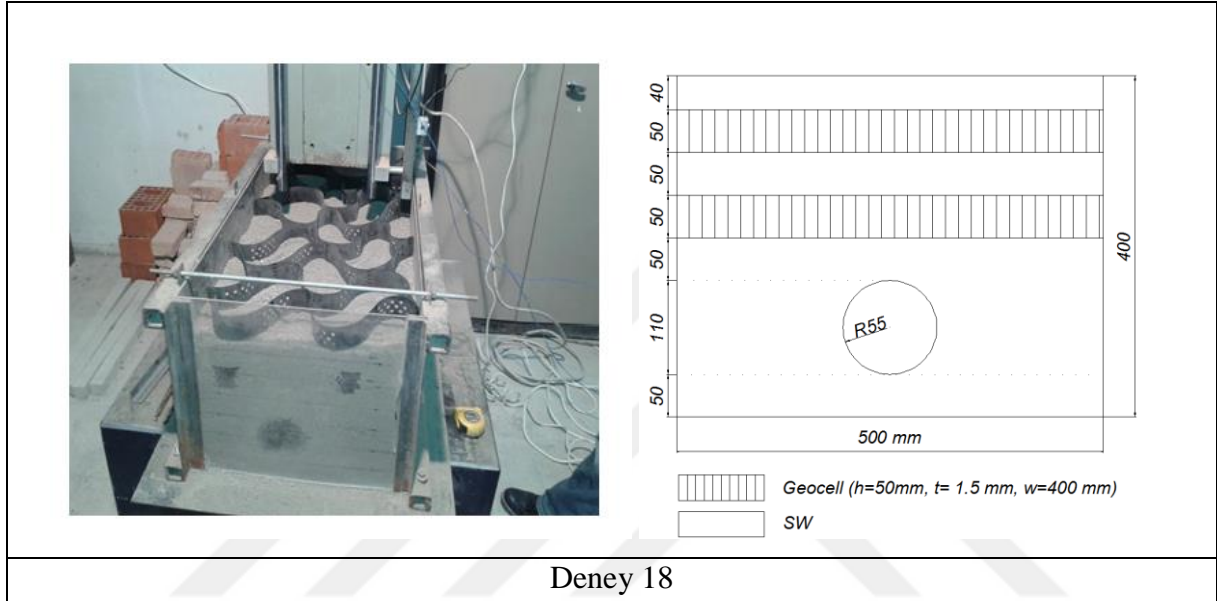
#### Deney 17: Referans deneyi (110 mm dış çaplı HDPE boru ile)

110 mm çaplı boru yerleştirildikten sonra tank üst yüzeyine kadar hiçbir güçlendirme elemanı kullanılmamış, kalan 240 mm boyunca yalnızca zemin yerleştirilmiştir.

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	52,99 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,95 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	2,30 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	22,63 J

Deney 18: Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, farklı gömülme derinlikli iki tabaka geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinlikleri, H=90 mm ve H=190 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.28’de yer almaktadır.



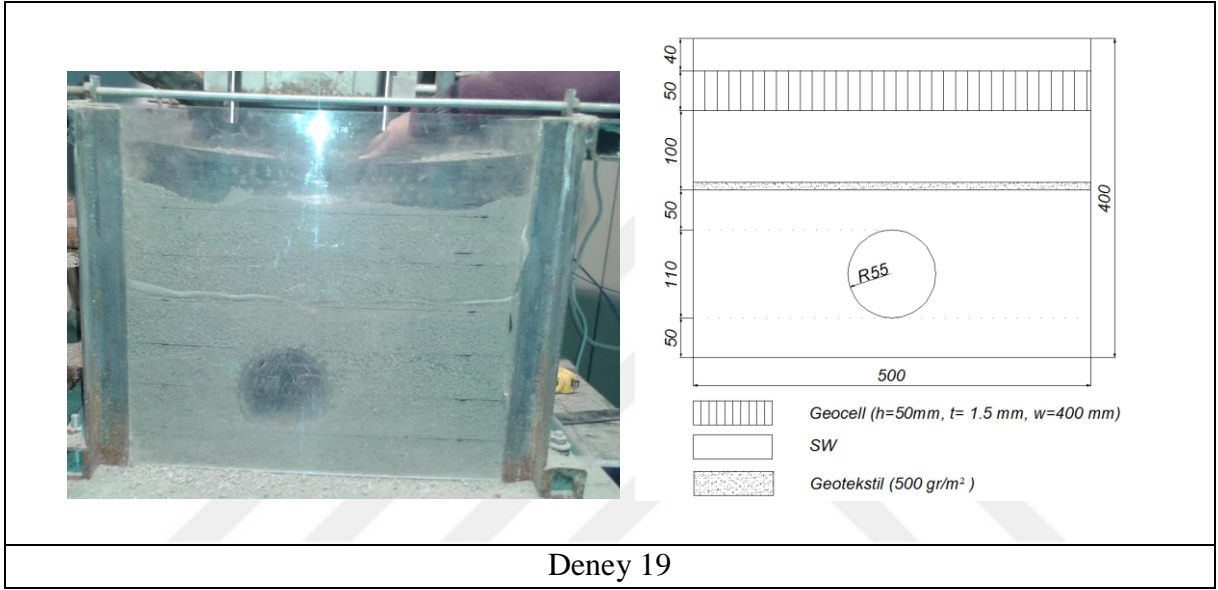
Resim 3.28. Deney 18’e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 17,48 g
Uygulanan maksimum yük	: 11,69 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,52 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	: 25,18 J

110 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 17) göre ivme değerinde % 67,0 oranında düşüş gözlenmiştir. Bu düşüş, tüm testlerde, referans deney maksimum ivme değerinin, ilgili deney maksimum ivme değerinden farkı bulunarak, referans deney maksimum ivme değerine bölünmesi ile bulunan orandır. Örneğin Deney 18 için bu hesap;  $((52,99 \text{ g} - 17,48 \text{ g}) / 52,99 \text{ g}) \times 100$  şeklindedir.

Deney 19: Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve geotekstil ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) serilme derinliği, H=90 mm ve geotekstil serilme derinliği H=190 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.29’da yer almaktadır.



Resim 3.29. Deney 19’a ait resim ve şematik gösterim

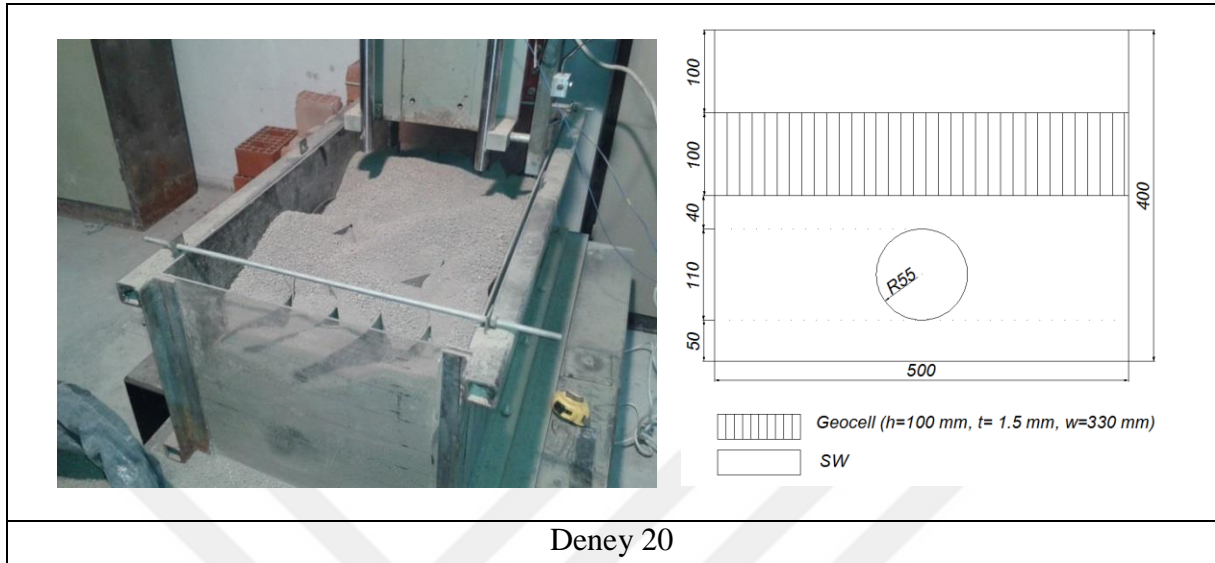
Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 7,48 g
Uygulanan maksimum yük	: 11,78 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,22 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	: 25,67 J

110 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 17) göre ivme değerinde % 85,9 oranında düşüş gözlenmiştir.

Deney 20: Geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği,

H=200 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.30'da yer almaktadır.



Deney 20

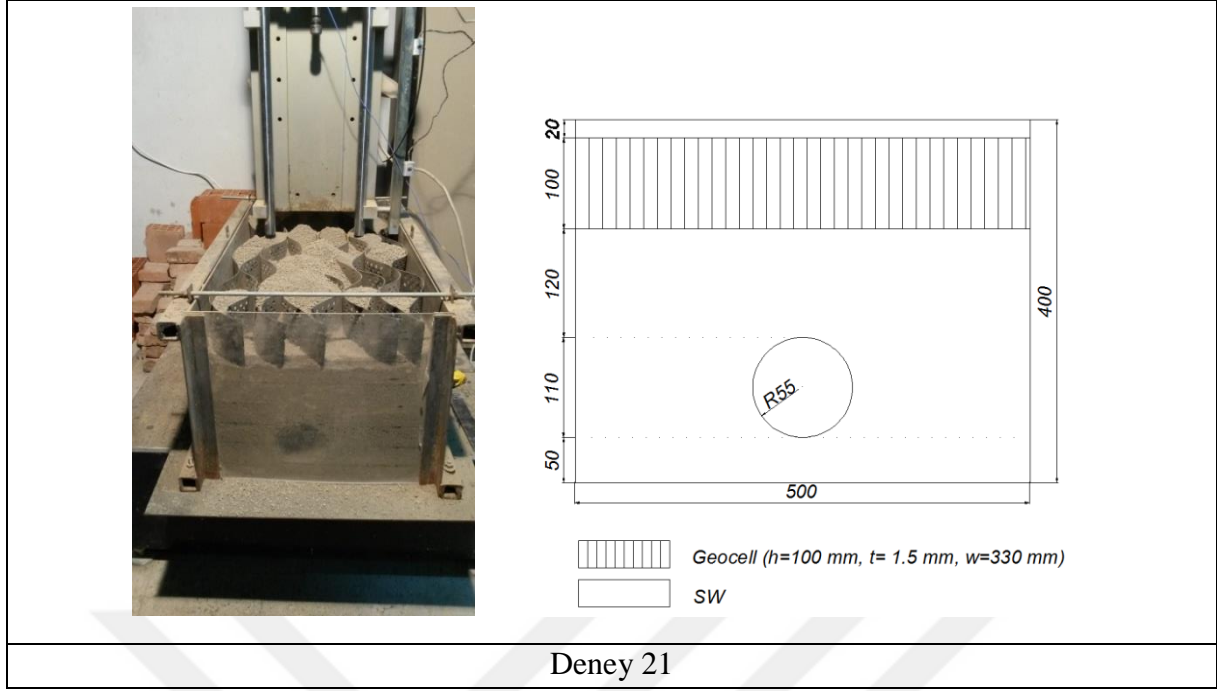
Resim 3.30. Deney 20'ye ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 24,99 g
Uygulanan maksimum yük	: 10,76 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,57 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	: 24,75 J

110 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 17) göre ivme değerinde % 52,8 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 21: Geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) güçlendirme elemanı

Zemin, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.31'de yer almaktadır.



Resim 3.31. Deney 21'e ait resim ve şematik gösterim

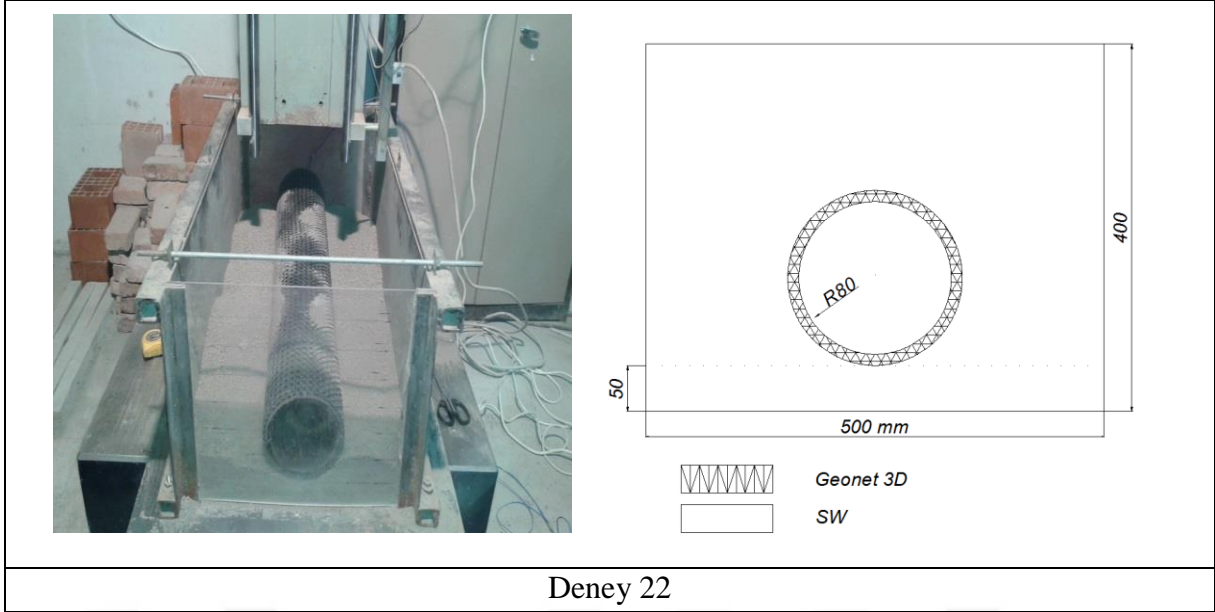
Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	19,49 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,35 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,55 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	24,93 J

110 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 17) göre ivme değeri % 63,2 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 22: Geonet 3D güçlendirme elemanı

160 mm dış çaplı HDPE boru, geonet 3D ile sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.32'de yer almaktadır.





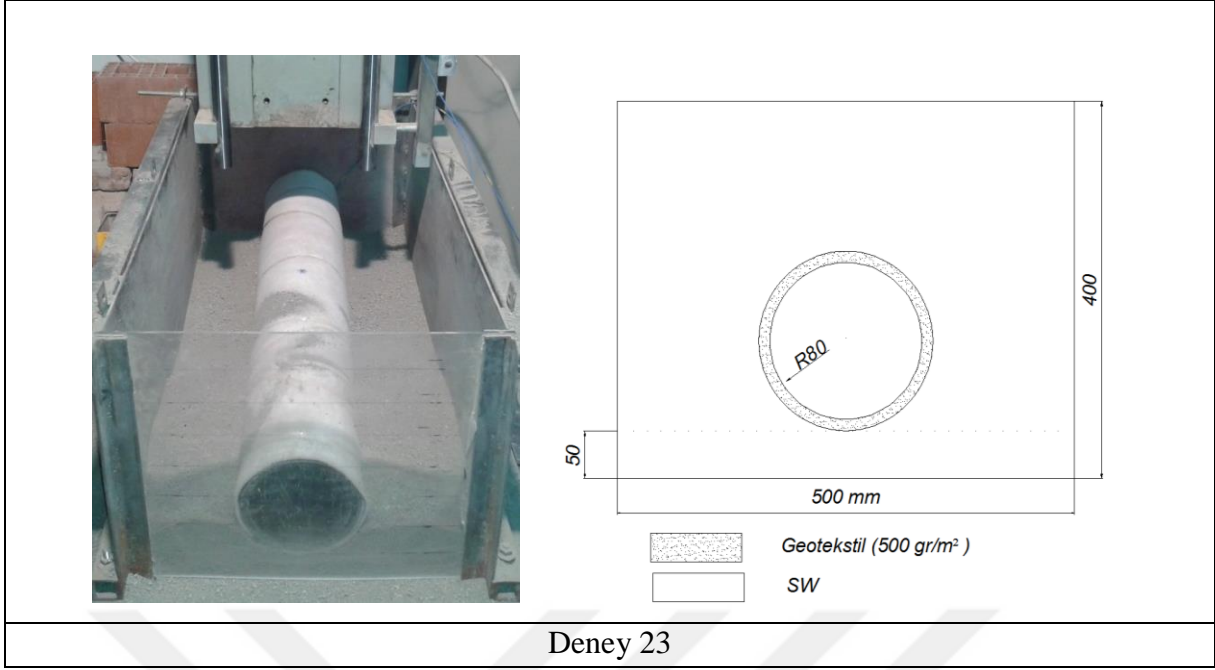
Resim 3.32. Deney 22'ye ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	18,46 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,78 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,54 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,06 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değeri % 72,0 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 23: Geotekstil güçlendirme elemanı

160 mm dış çaplı HDPE boru, geotekstil ile sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.33'te yer almaktadır.



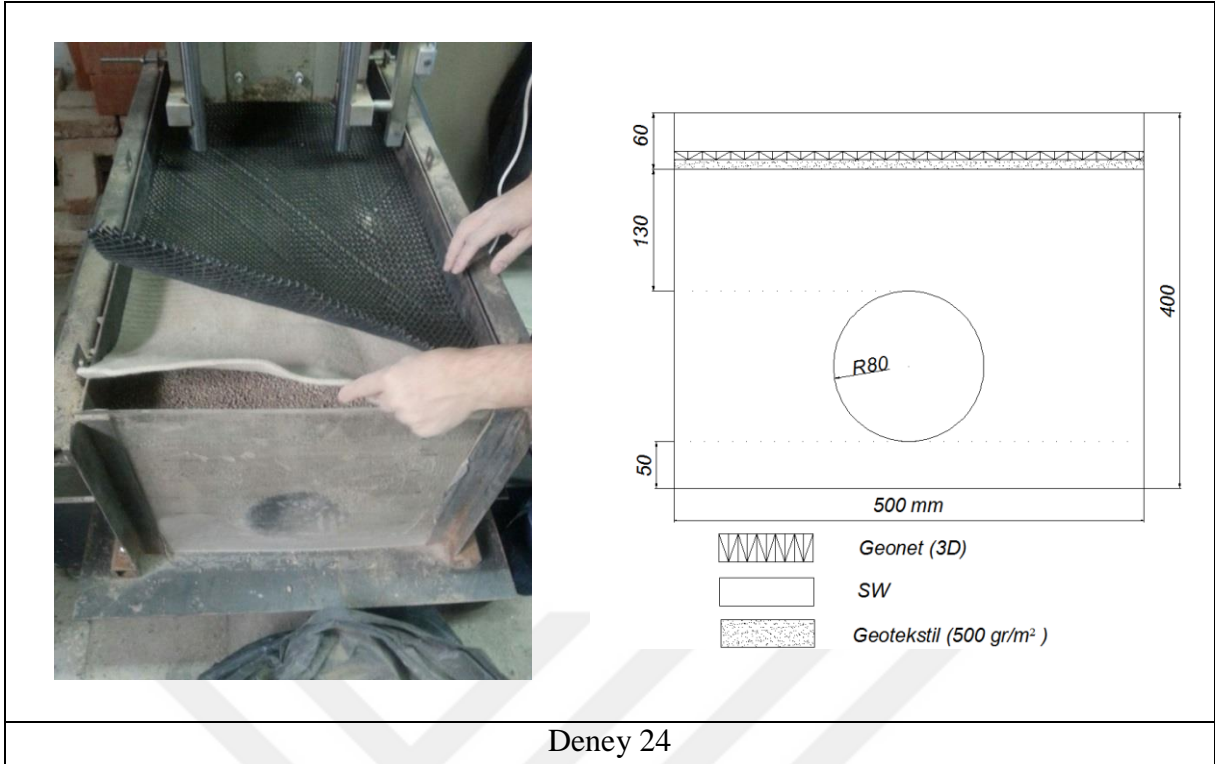
Resim 3.33. Deney 23'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	28,01 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,28 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,78 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	24,30 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 57,5 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 24: Geonet 3D ve Geotekstil güçlendirme elemanları

Zemin, geonet 3D ve geotekstil ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinliği yaklaşık H=60 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.34'te yer almaktadır.



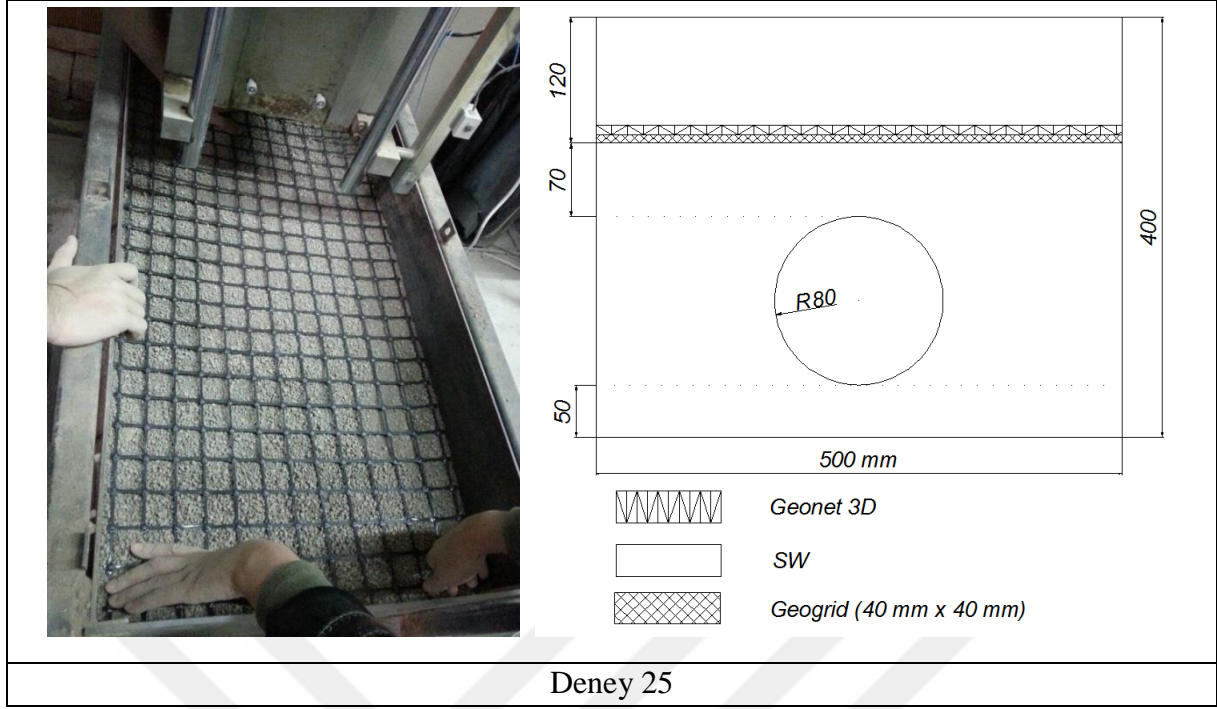
Resim 3.34. Deney 24'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 6,35 g
Uygulanan maksimum yük	: 11,41 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,22 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	: 25,68 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 90,4 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 25: Geonet 3D ve Geogrid güçlendirme elemanları

Zemin, geonet 3D ve geogrid ile takviye edilmiştir. Geosentetik serilme derinlikleri, yaklaşık H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.35'te yer almaktadır.



Deney 25

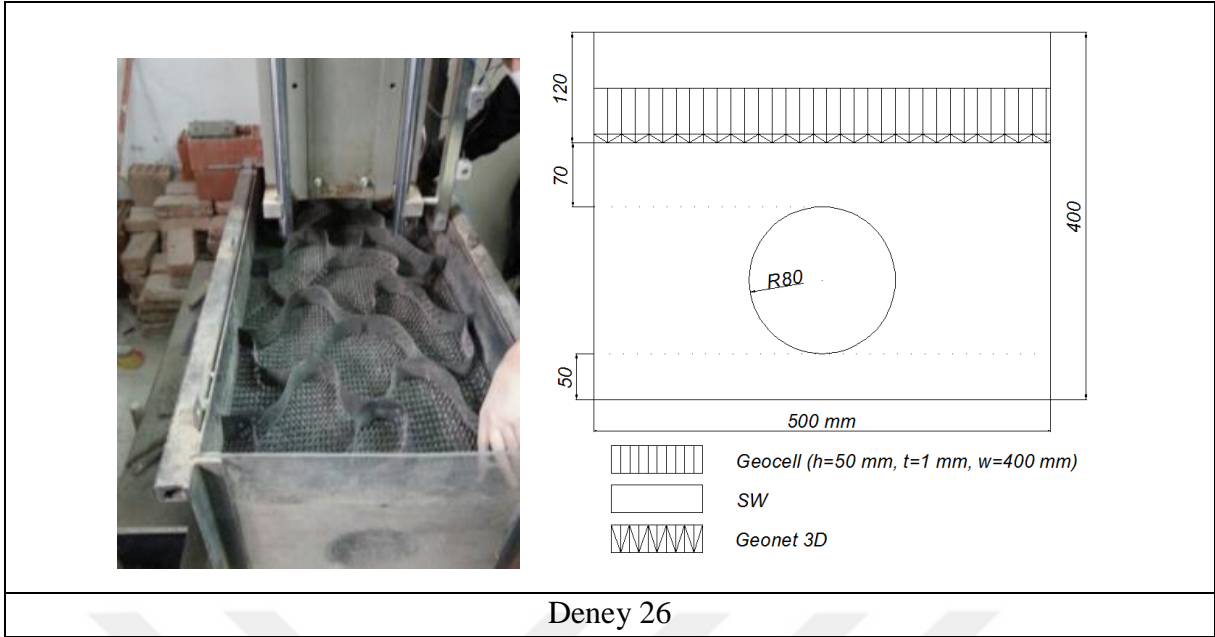
Resim 3.35. Deney 25'e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	10,51 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,14 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,28 mm
Sistem tarafından sönmölen enerji	:	25,63 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 84,1 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 26: Geocell ( h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ve Geonet 3D güçlendirme elemanları

Zemin, geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ve geonet 3D ile takviye edilmiştir. h: geocell hücre yüksekliği, t: et kalınlığı, w: kaynak aralığını temsil etmektedir. Geosentetik serilme derinliği, yaklaşık H=120 mm olmuştur. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.36'da yer almaktadır.



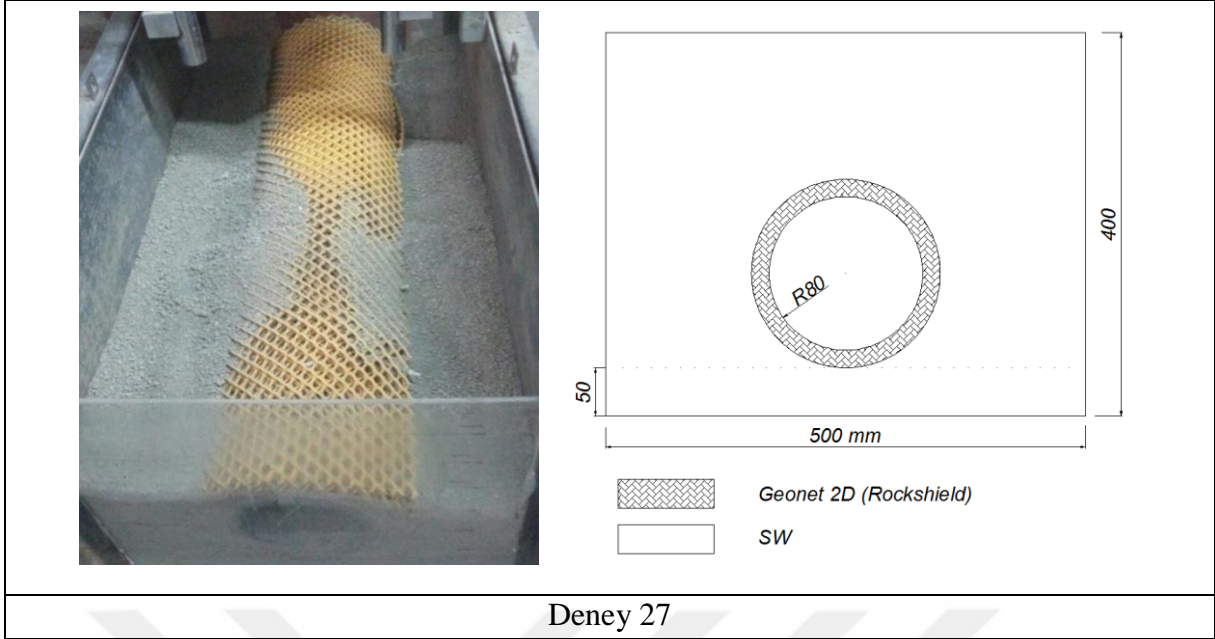
Resim 3.36. Deney 26'ya ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	7,89 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,36 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,23 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,65 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değerinde % 88,0 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 27: Geonet 2D (Rockshield) güçlendirme elemanı ile 4 Kat sargılama

160 mm dış çaplı HDPE boru, geonet 2D (rockshield) ile 4 kat sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.37'de yer almaktadır.



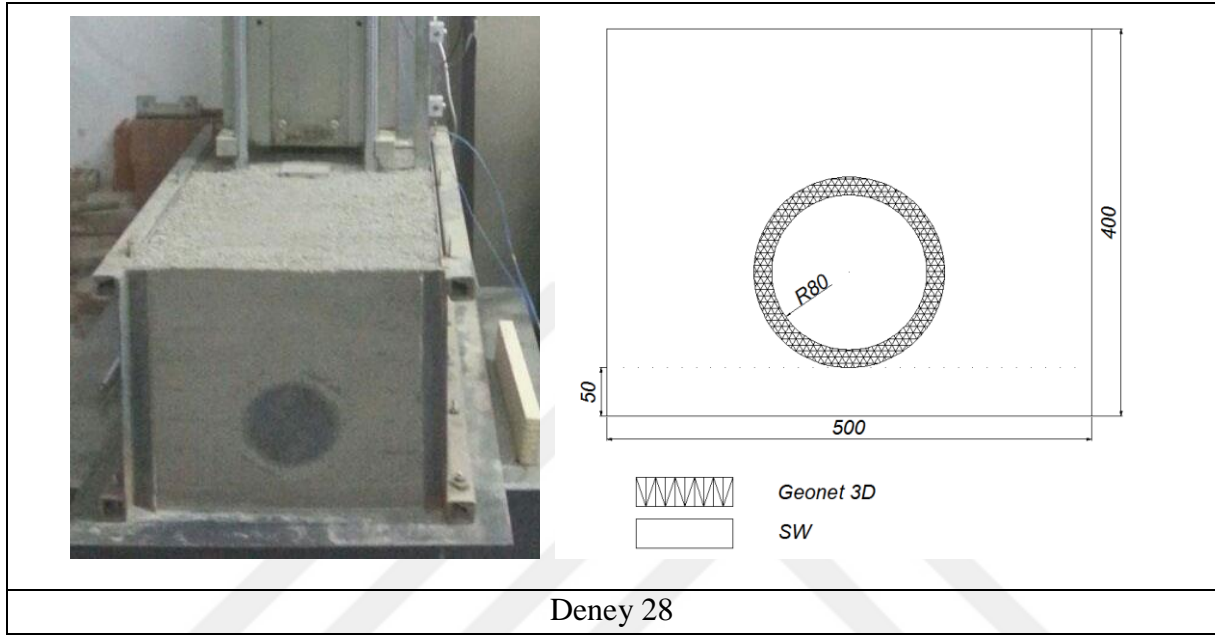
Resim 3.37. Deneý 27'ye ait resim ve Őematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	11,23 g
Uygulanan maksimum yük	:	11,34 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,28 mm
Sistem tarafından sönümlenen enerji	:	25,62 J

160 mm dıŐ çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deneý 1) göre ivme deęerinde % 83,0 oranında düŐüŐ gözlenmiŐtir.

### Deney 28: Geonet 3D güçlendirme elemanı ile 4 Kat sargılama

160 mm dış çaplı HDPE boru, geonet (3D) ile 4 kat sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.38’de yer almaktadır.



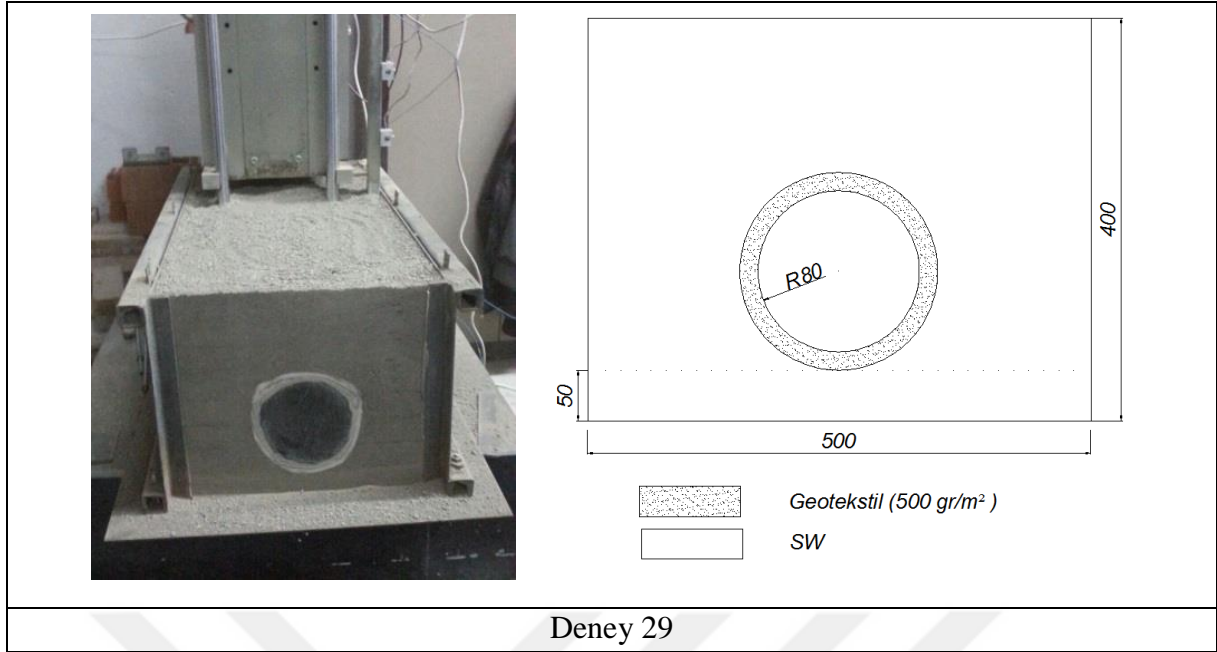
Resim 3.38. Deney 28’e ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	: 13,67 g
Uygulanan maksimum yük	: 10,95 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	: 0,30 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	: 25,51 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değeri % 79,3 oranında düşüş gözlenmiştir.

### Deney 29: Geotekstil güçlendirme elemanı ile 4 Kat sargılama

160 mm dış çaplı HDPE boru, geotekstil ile 4 kat sargılanmıştır. İlgili deneye ait resim ve şematik gösterim Resim 3.39’da yer almaktadır.



Resim 3.39. Deney 29'a ait resim ve şematik gösterim

Orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri	:	15,48 g
Uygulanan maksimum yük	:	10,56 kN
Maksimum ivme değeri kullanılarak hesaplanan deplasman değeri	:	0,31 mm
Sistem tarafından sönmölenen enerji	:	25,34 J

160 mm dış çaplı HDPE boru ile yapılan referans deneye (Deney 1) göre ivme değeri % 76,5 oranında düşüş gözlenmiştir.

### 3.8. Laboratuvar Deneyleri Maliyet Analizi

Deneylerin uygulandıkları 2014 yılı birim fiyatları üzerinden üretici firma tarafından sağlanan gider kalemleri ve toplam maliyet tutarları Çizelge 3.15'te görölmektedir. Çizelge 3.16'da, tüm deneylerin yalnızca kullanılan geosentetik malzeme boyutları üzerinden maliyetleri belirtilmiştir. Sonuçların görsel olarak daha kıyaslanabilir olması bakımından maliyetler Şekil 3.10'da görselleştirilmiştir.



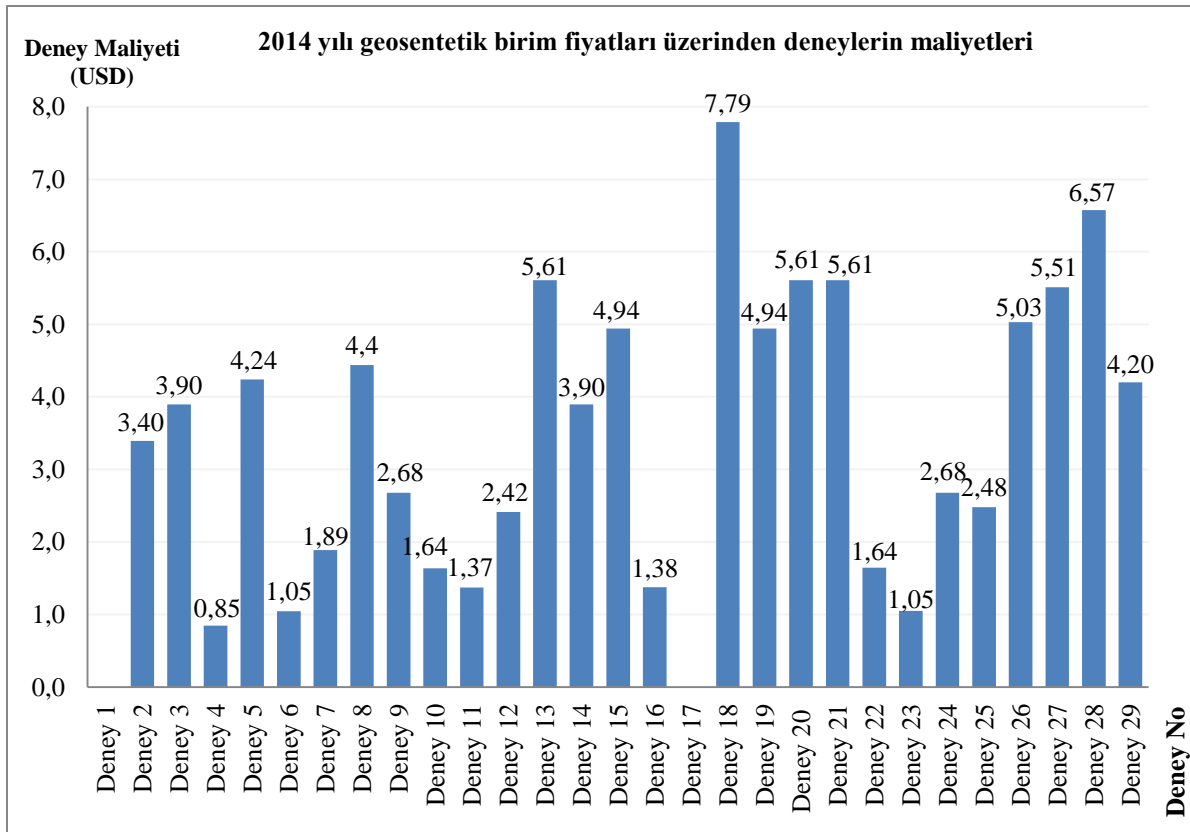
Çizelge 3.15. 2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları

2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları (USD)					
İşin Tanımı	Malzeme Bedelleri	İşçilik Bedelleri	Nakliye Bedelleri	Genel Giderler ve Müteahhit Kârı (%25)	Toplam Tutarı
Geogrid serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,05	0,2	0,1	0,34	1,69
Geotekstil serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,37	0,2	0,1	0,42	2,09
Geonet 2D serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,89	0,2	0,1	0,55	2,74
Geonet 3D serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	2,31	0,2	0,1	0,66	3,27
Geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,83	3,5	0,1	1,36	6,79
Geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	2,63	3,5	0,1	1,56	7,79
Geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	5,37	3,5	0,1	2,25	11,22

Çizelge 3.16. Laboratuvar deneylerinde kullanılan geosentetik türü ve miktarına bağlı olarak deney maliyetleri

Deney No	Kullanılan Geosentetik Çeşidi h: yükseklik t: et kalınlığı w: kaynak aralığı	Geosentetik yaklaşık derinliği* (mm)	2014 birim fiyata göre maliyet (USD/m <sup>2</sup> )	Kullanılan malzeme boyutları (m <sup>2</sup> )	Deney maliyeti (USD)
1	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	Referans	Referans	Referans
2	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	120	6,79	0,5	3,40
3	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	120	7,79	0,5	3,90
4	GEOGRİD	120	1,69	0,5	0,85
5	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	120	6,79	0,5	4,24
	GEOGRİD		1,69	0,5	
6	GEOTEKSTİL	120	2,09	0,5	1,05
7	GEOGRİD	120	1,69	0,5	1,89
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
8	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	120	6,79	0,5	4,44
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
9	GEONET 3D	120	3,27	0,5	2,68
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
10	GEONET 3D	120	3,27	0,5	1,64
11	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	120	2,74	0,5	1,37
12	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	120	2,74	0,5	2,42
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
13	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	11,22	0,5	5,61
14	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	60	7,79	0,5	3,90
15	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	60	7,79	0,5	4,94
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
16	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	1 Kat Sargılama	2,74	0,5	1,37
17	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	Referans	Referans	Referans
18	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	90	7,79	0,5	7,79
	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	190	7,79	0,5	
19	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	90	7,79	0,5	4,94
	GEOTEKSTİL	190	2,09	0,5	
20	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	200	11,22	0,5	5,61
21	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	11,22	0,5	5,61
22	GEONET 3D	1 Kat Sargılama	3,27	0,5	1,64
23	GEOTEKSTİL	1 Kat Sargılama	2,09	0,5	1,05
24	GEONET 3D	60	3,27	0,5	2,68
	GEOTEKSTİL		2,09	0,5	
25	GEONET 3D	120	1,69	0,5	2,48
	GEOGRİD		3,27	0,5	
26	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	120	6,79	0,5	5,03
	GEONET 3D		3,27	0,5	
27	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	4 Kat Sargılama	2,74	2,0	5,51
28	GEONET 3D	4 Kat Sargılama	3,27	2,0	6,57
29	GEOTEKSTİL	4 Kat Sargılama	2,09	2,0	4,20

\*Geosentetik serilme derinliği, deney tankının üst yüzeyinden geosentetiğin alt yüzüne olan yaklaşık uzaklıktır.



Şekil 3.10. 2014 yılı geosentetik birim fiyatları üzerinden deneylerin maliyetleri

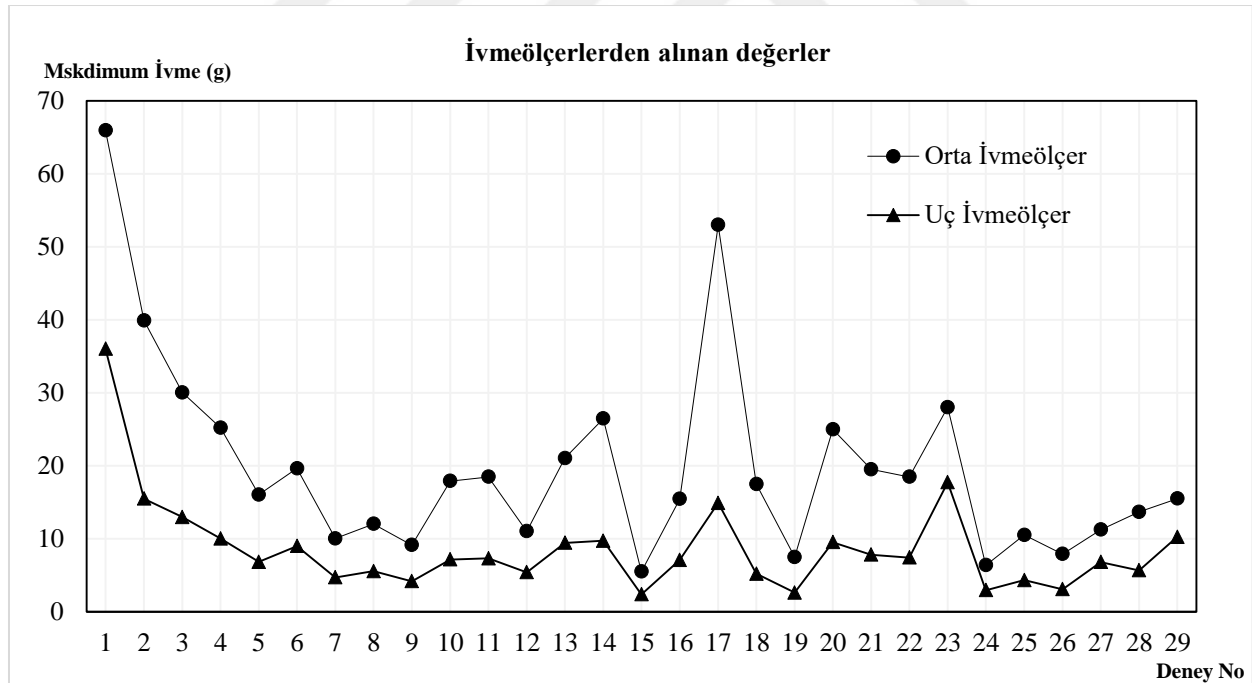
Şekil 3.10'da da görüldüğü üzere birim fiyatı diğer geosentetiklere göre oldukça yüksek olan geocell içerikli deneyler daha maliyetli olmuştur. Örneğin, tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan deneyler dikkate alındığında (Çizelge 3.17), geocellin et kalınlığı da yüksekliği de en az olan Deney 2, diğer geosentetik malzemelerin uygulanmasından pahalı sonuç vermiştir. Geogrid (Deney 4) malzemesinin ise daha ekonomik olduğu çizelgeden görülmektedir.

Çizelge 3.17. Tek tabakalı geosentetik kullanılan deneylerin maliyetleri

Deney No	Kullanılan Geosentetik Çeşidi	Deney maliyeti (USD)
2	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	3,40
3	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	3,90
4	GEOGRİD	0,85
6	GEOTEKSTİL	1,05
10	GEONET 3D	1,64
11	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	1,37
13	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) Boru çap: 160 mm	5,61
21	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) Boru çap: 110 mm	5,61

### 3.9. Laboratuvar Çalışmalarının Sonuçları ve Değerlendirmeler

Bu çalışma kapsamında, çeşitli kombinasyonlarda geosentetikler ile güçlendirilen zemine gömülü boruların darbe yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Farklı serilme derinlikleri ve kullanım şekillerine sahip geosentetiklerin çeşitleri ve boru çapları değişken olarak seçilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan geosentetikler; geocell, geogrid, geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D'dir. Dış çapı 110 mm ve 160 mm olan iki adet HDPE boru kullanılmıştır. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan ağırlık düşürücü deney düzeneği kullanılmıştır. Borular üzerinde bulunan orta ivmeölçerlerden alınan sonuçlar ve bu sonuçlardan elde edilen deformasyonlar ile geosentetiklerin enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Deneyde kullanılan boruda bulunan uç ivmeölçerden alınan ivme değerleri dağılımı, orta ivmeölçerden alınan ivme değerleri dağılımı ile genel anlamda uyum göstermiştir (Şekil 3.11). Değerlendirmeler, yük uygulama noktasına daha yakın olduğu için maksimum sonuçlar veren orta ivmeölçerden alınan ivme değerleri ile yapılmıştır.



Şekil 3.11. İvmeölçerlerden alınan ivme değerleri dağılımı

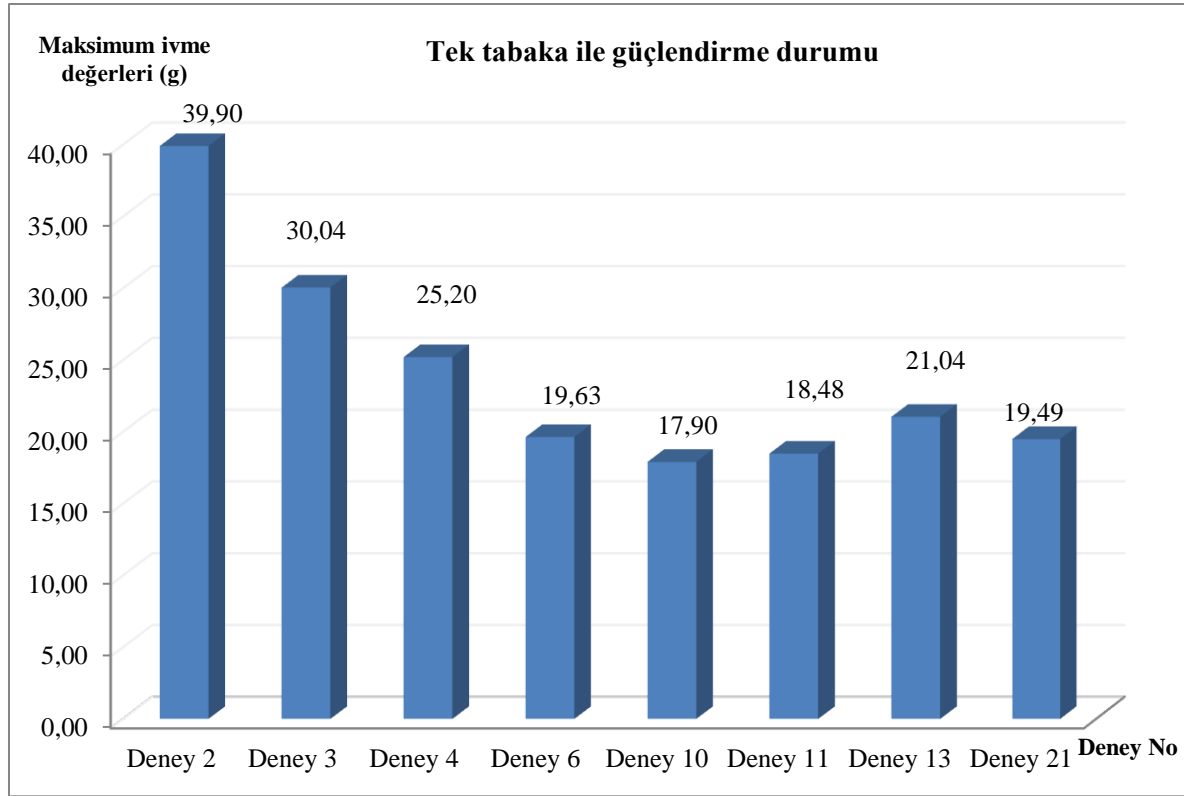
### 3.9.1. Tek tabaka geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmeler

Referans deneyi ve tankın üst yüzünden 120 mm serilme derinliğine sahip tek tabaka geosentetik serimi ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması bu bölümde sunulmaktadır. 160 mm HDPE boru kullanılarak yapılan referans deney (Deney 1) ile kıyaslanmak üzere; geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ile güçlendirme yapılan Deney 2; geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ile güçlendirme yapılan Deney 3; geogrid kullanılarak gerçekleştirilen Deney 4; geotekstil koruyucu tabakasının kullanıldığı Deney 6; geonet 3D kullanılan Deney 10; geonet 2D (rockshield) kullanılan Deney 11; geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) kullanılan Deney 13 geosentetik elemanın tek tabaka şeklinde serilerek teste tabi tutulduğu deneylerdir. Bu deneylerden elde edilen ivmeler Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

Tek tabakalı geosentetik koruyucu tabaka etkilerini değerlendirebilmek bakımından, 110 mm çaplı boru ile yapılmış olmasına rağmen, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) (Deney 21)’e ait ivme sönümlenme oranı da sonuçlara dahil edilerek tüm tek tabaka serim deneyleri Çizelge 3.18’de gösterilmiştir. Çizelgede yer alan sönümlenme kapasitesi, uygulanan enerji ( $5,25 \times 9,81 \times 500/1000 = 25,7512$  Joule) ile boru üstünde hesaplanan enerjinin farkıdır. Elde edilen ivme değerlerinin daha kolay karşılaştırılabilmesi için ivme değerlerindeki düşüş yüzdelerini gösterir sonuçlar Şekil 3.13’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 3.18. Tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan laboratuvar deney sonuçları

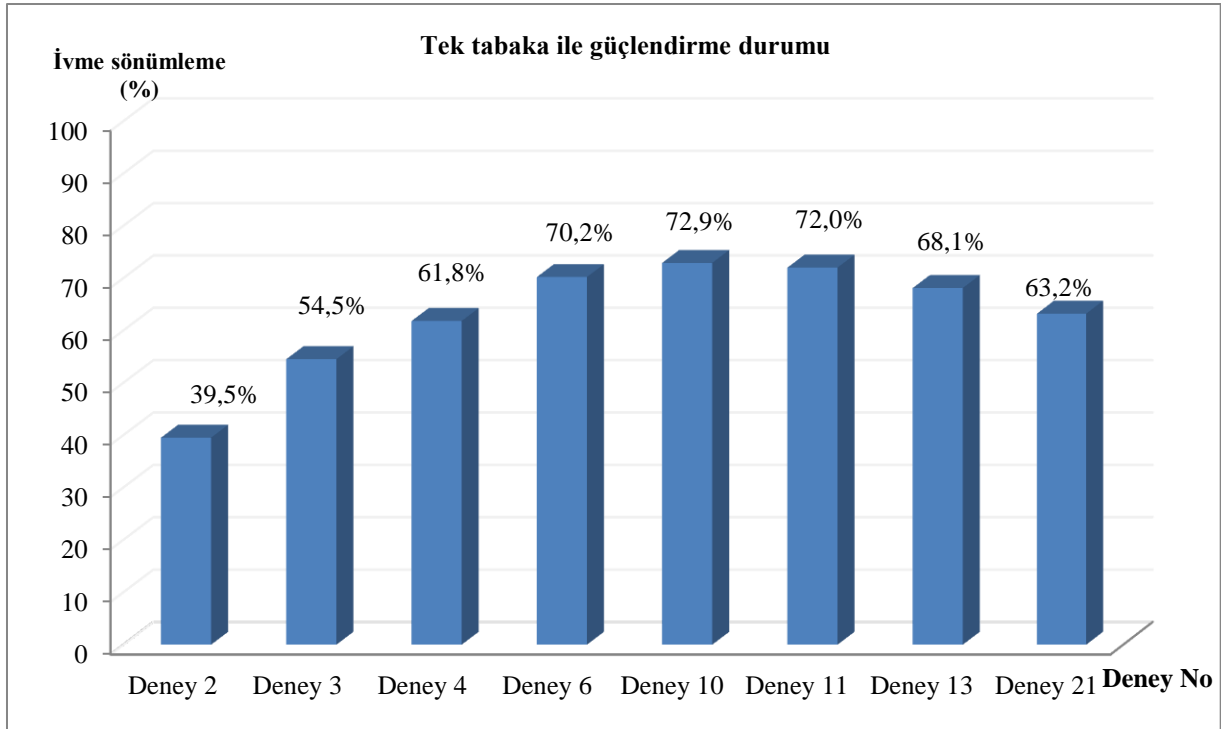
Deney no	Boru dış çapı (mm)	Kullanılan geosentetik çeşidi	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Enerji sönümlenme kapasitesi (J)
1	160	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	65,95	5,10	Referans	21,36
2	160	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	39,90	2,11	39,5	23,49
3	160	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	30,04	1,01	54,5	23,80
4	160	GEOGRİD	25,20	0,58	61,8	24,66
6	160	GEOTEKSTİL	19,63	0,56	70,2	24,84
10	160	GEONET 3D	17,90	0,53	72,9	25,11
11	160	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	18,48	0,54	72,0	25,02
13	160	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	21,04	0,56	68,1	24,81
17	110	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	52,99	2,30	Referans	22,63
21	110	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	19,49	0,55	63,2	24,93



Şekil 3.12. 160 mm dış çaplı boru üzerinde tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme değerlerinin karşılaştırılması

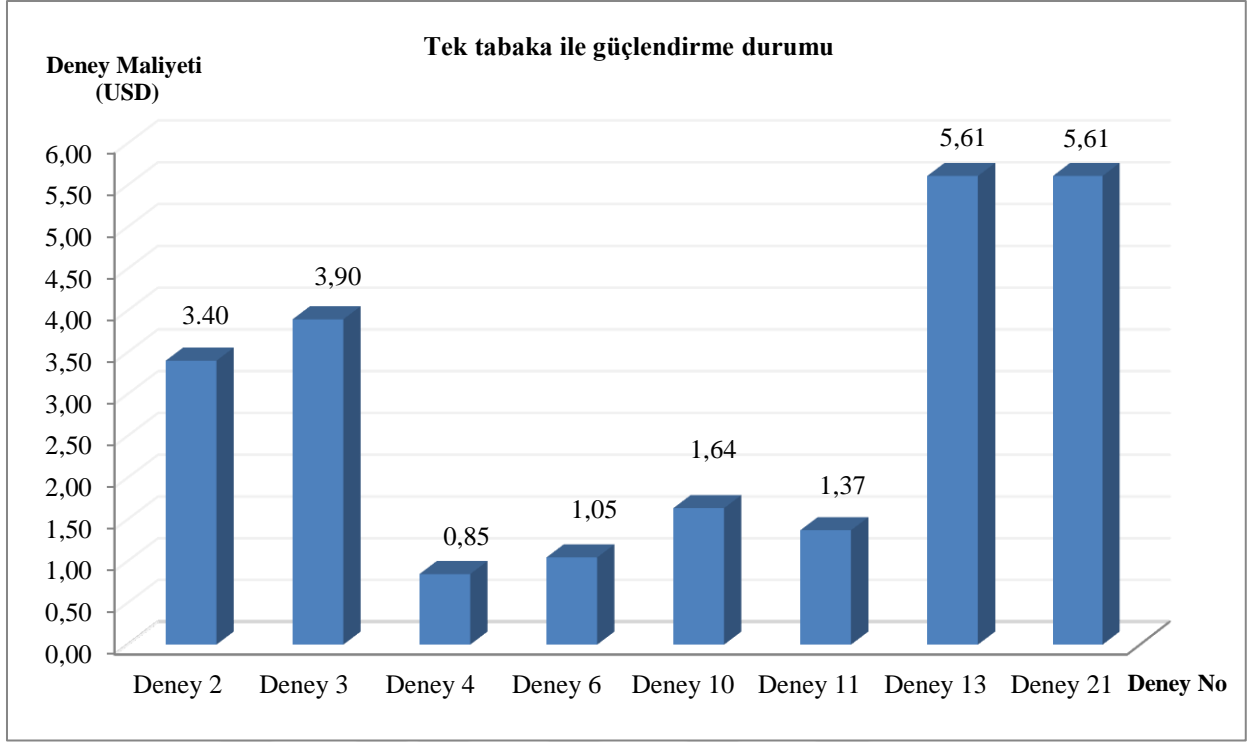
Deney sonuçlarını değerlendirmek için fikir verecek olan ivme ve deplasman değerleri, performans değerlendirmede paralellik göstermiştir.

160 mm dış çaplı boru dikkate alınarak tek tabakalı geosentetik kullanımı ile gerçekleştirilen deneylerde % 72,9 ivme sönümlenmesi; 0,53 mm maksimum deplasman ve 25,11 Joule enerji sönümlenme verileri ile en başarılı uygulama geonet 3D (Deney 10) kullanımı ile ortaya çıkmıştır. Geocell elemanının kullanıldığı deneylerde maksimum deplasmanlar 2,11 mm ve 1,01 mm olarak belirlenmiş olup, bu değerler tek tabaka serimlerinde kullanılan diğer deneylere göre oldukça yüksektir. Buna karşılık geogrid elemanının kullanımı ile boru üzerinde oluşan maksimum deplasman 0,58 mm olmuştur. Maksimum ivme ve maksimum deplasman değerleri oldukça yakın sonuçlar veren geotekstil, geonet 2D, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) kullanılan deneylerde ise, geocell oldukça yüksek maliyete sahiptir.



Şekil 3.13. Tek tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme sönümlenme performanslarının karşılaştırılması

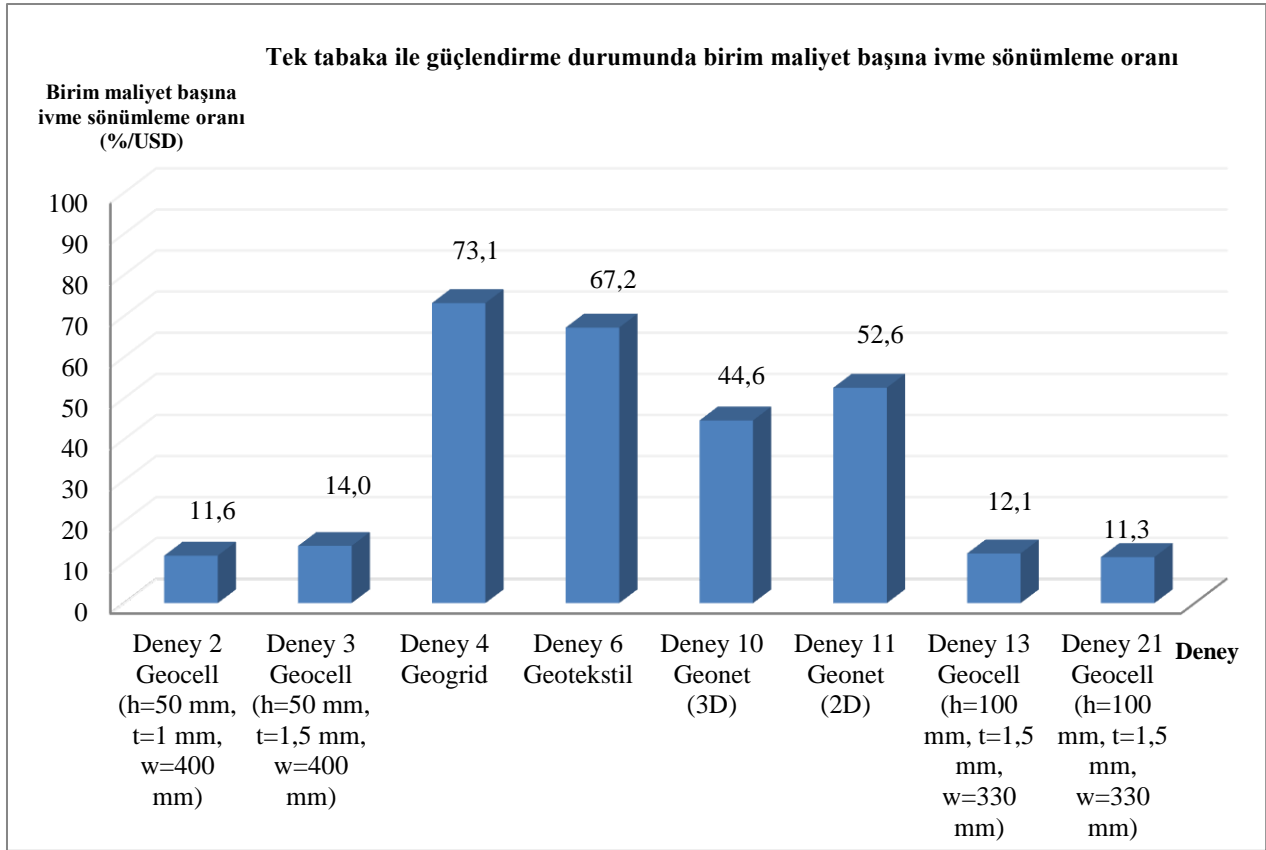
Şekil 3.14'te yalnızca tek tabakalı geosentetik serimi deneylerinde kullanılan geosentetik miktarı dikkate alınarak 2014 birim fiyatı üzerinden hesaplanmış deney maliyetlerinin (Bkz. Çizelge 3.16) kıyaslanması görülmektedir. Buna göre en maliyetli deney, kullanılan geocell ( $h=100$  mm,  $t=1,5$  mm,  $w=330$  mm) malzemesi ile Deney 13 ve 21 olmuştur. Maliyeti yükselten geocell koruyucu tabakasının kullanıldığı Deney 2 ve Deney 3 ile en düşük maliyetli geogrid kullanılan Deney 4 karşılaştırıldığında, burada ölçülen ivme değerinin geogrid kullanımı ile daha düşük yani ivme sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Enerji sönümlenme ve ivme sönümlenme açısından en başarılı uygulama geonet 3D (Deney 10) ise ekonomik açıdan dördüncü sırada yer almıştır.



Şekil 3.14. Kullanılan geosentetik dikkate alınarak deney maliyetlerinin karşılaştırılması

Tek tabaka koruyucu eleman kullanılan deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlenme değerleri Şekil 3.15'te verilmiştir. Her bir geosentetik koruyucu tabakanın tankın birim yüzey alanı için serilerek oluşturduğu deney maliyetleri ile aynı malzemenin ivme değerindeki düşüşle sağlamış olduğu performansı kıyaslayabilmek için düzenlenmiş olan, “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum uygulamanın geogrid (Deney 4) tarafından sağlandığı görülmektedir.





Şekil 3.15. Tek tabakalı serimlerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı

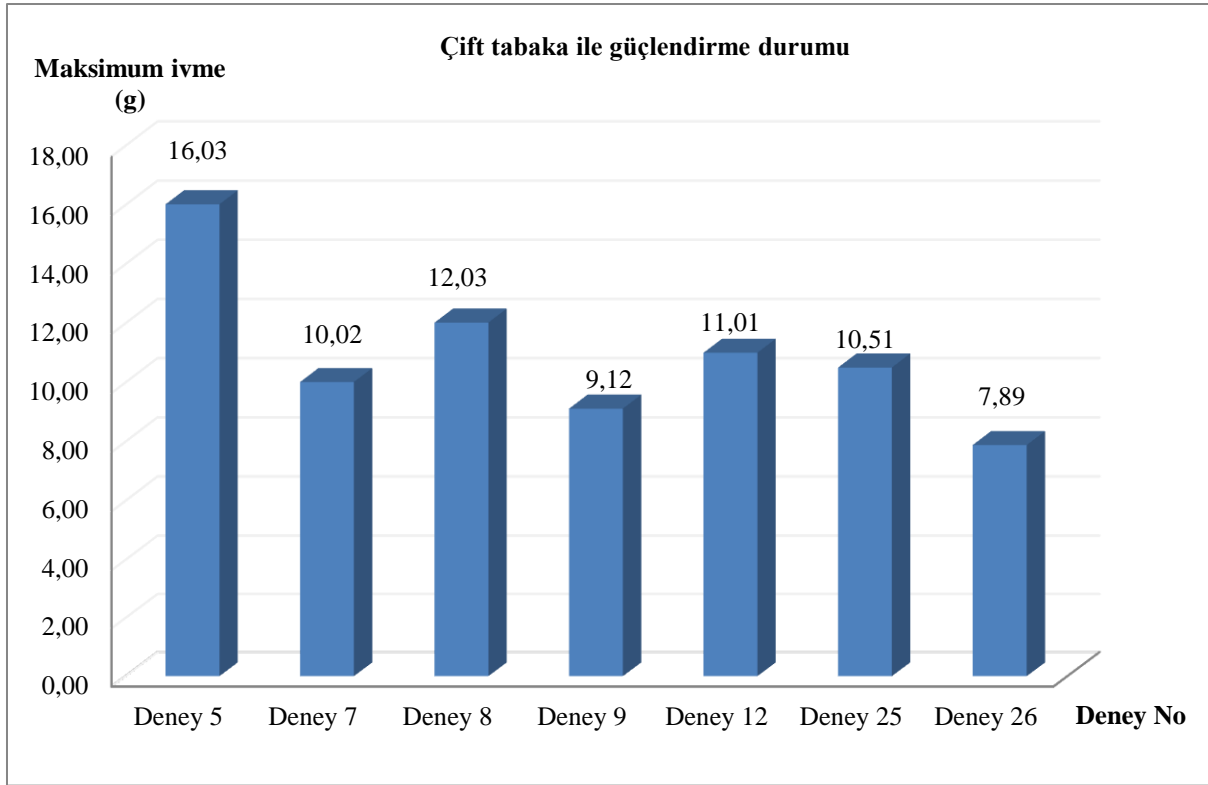
### 3.9.2. Çift tabaka geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmeler

İki geosentetik elemanın kombinasyonlu kullanımlarının performanslarına etkisini görebilmek için tankın üst yüzünden geosentetik serilme derinliği 120 mm sabit kalarak gerçekleştirilen Deneý 5, Deneý 7, Deneý 8, Deneý 9, Deneý 12, Deneý 25 ve Deneý 26 için gerekli veriler Çizelge 3.19’da özetlenmiştir. Kıyaslamalar referans deneý (Deneý 1) ile yapılmıştır.

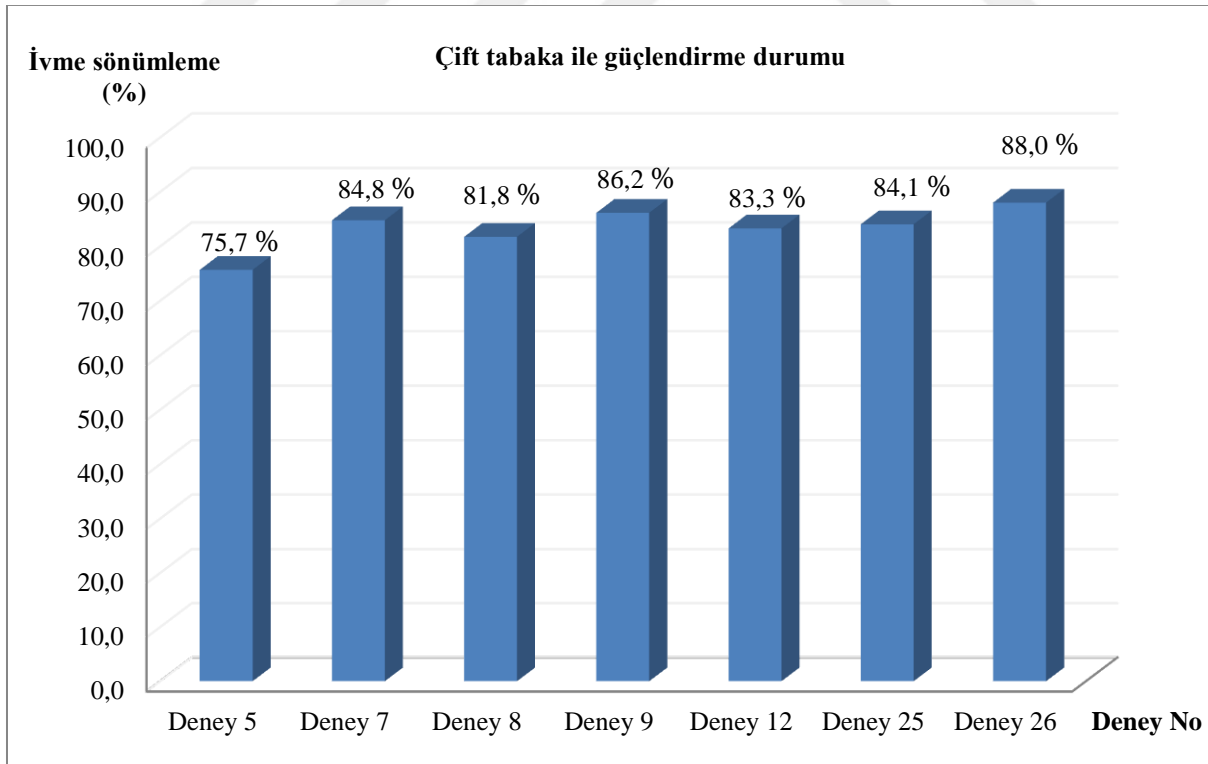
Çizelge 3.19. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan laboratuvar deney sonuçları

Deney no	Kullanılan geosentetik çeşidi	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Enerji sönümlenme kapasitesi (J)
1	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	65,95	5,10	Referans	21,36
5	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEOGRİD	16,03	0,33	75,7	25,20
7	GEOGRİD GEOTEKSTİL	10,02	0,27	84,8	25,64
8	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	12,03	0,29	81,8	25,61
9	GEONET 3D GEOTEKSTİL	9,12	0,26	86,2	25,65
12	GEONET 2D (ROCKSHIELD) GEOTEKSTİL	11,01	0,28	83,3	25,62
25	GEONET 3D GEOGRİD	10,51	0,28	84,1	25,63
26	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEONET 3D	7,89	0,23	88,0	25,65

Çift tabakalı güçlendirme elemanları ile gerçekleştirilen deneylere ait maksimum ivmeleri gösteren grafik Şekil 3.16'da sunulmuştur. Görüldüğü gibi 120 mm derinlikte çift tabakalı güçlendirme yapıldığında, % 88,0 ivme sönümlenme kapasitesi ile geonet 3D ve geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) (Deney 26) kombinasyonu en başarılı performansı sergilemiştir. Geogridin aynı geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ile birlikte kullanıldığı Deney 5'in ivme değeri, bu kıyaslama gurubu için en yüksek çıkarak, en az ivme sönümleyen sistem olmuştur (Şekil 3.17).

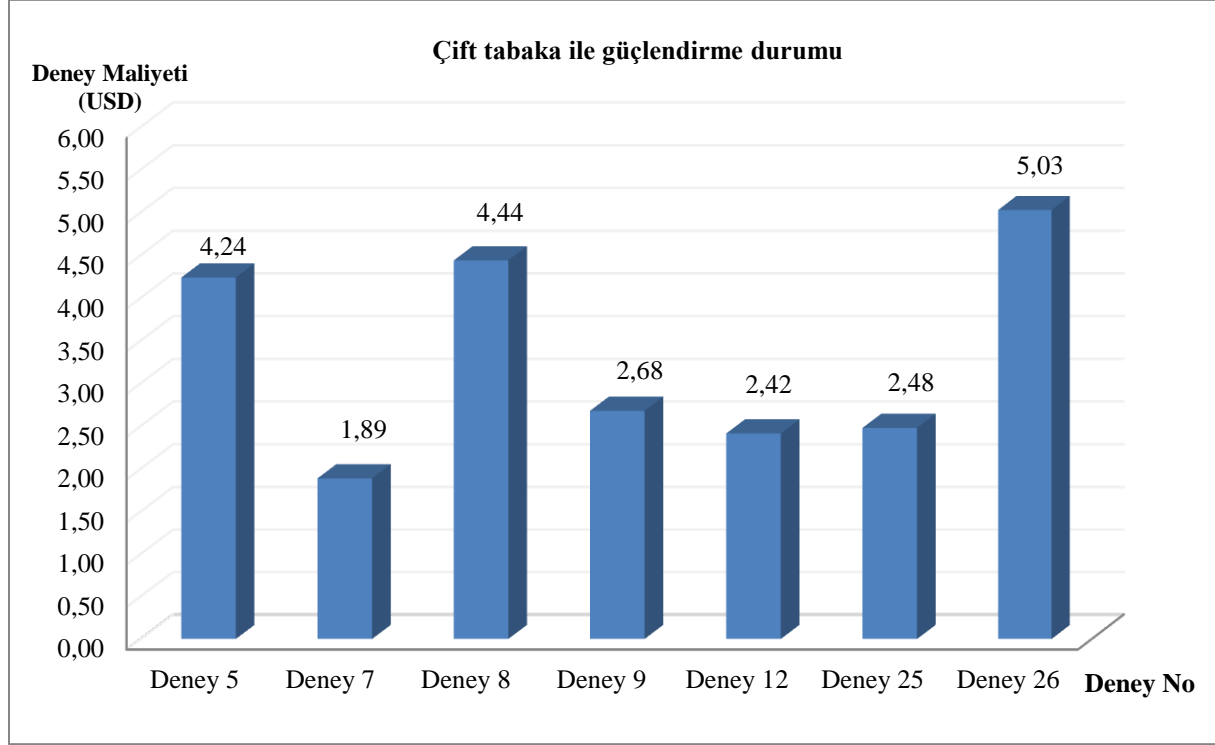


Şekil 3.16. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme değerlerinin karşılaştırılması



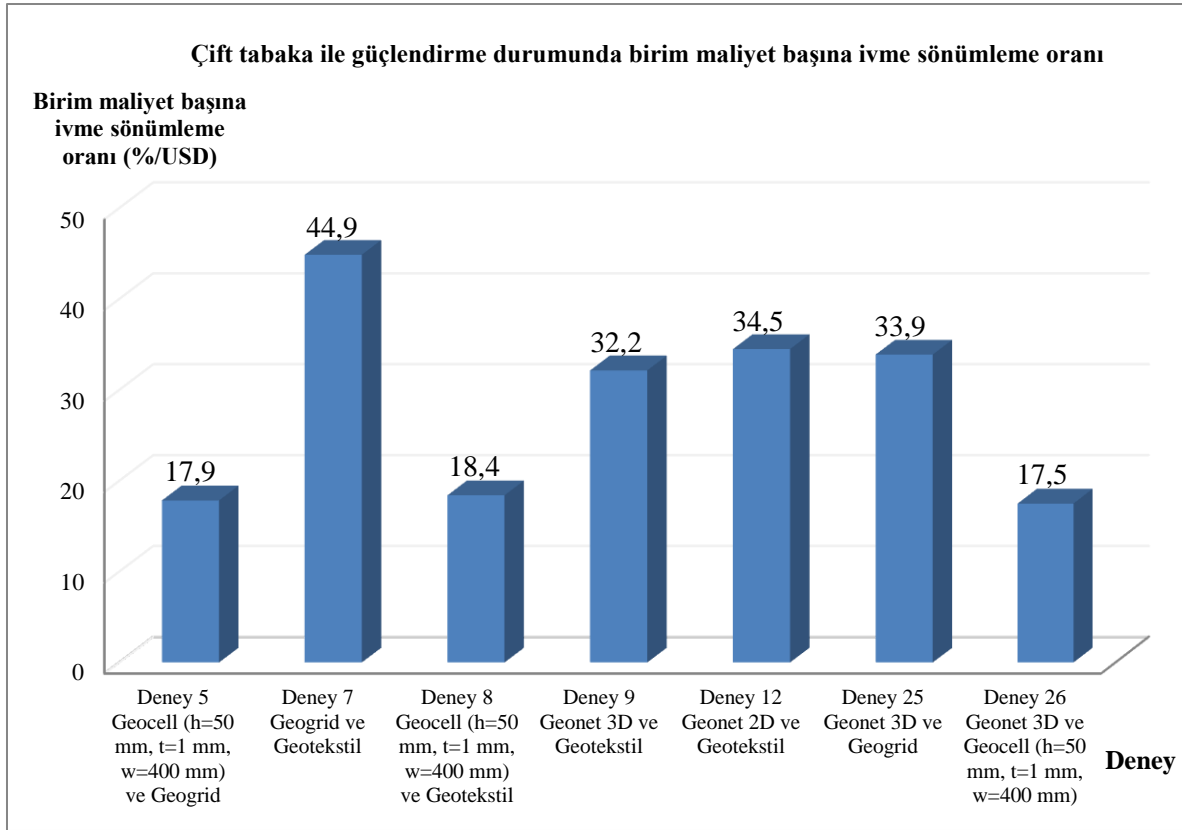
Şekil 3.17. Çift tabakalı geosentetik serimi ile yapılan güçlendirmelerin ivme sönümlenme performanslarının karşılaştırılması

2014 yılı birim fiyatları dikkate alındığında geonet 3D ve geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) (Deney 26) kombinasyonu en maliyetli; geogrid ve geotekstil (Deney 7) kombinasyonu ise en ekonomik güçlendirmeyi sağlamıştır (Şekil 3.18).



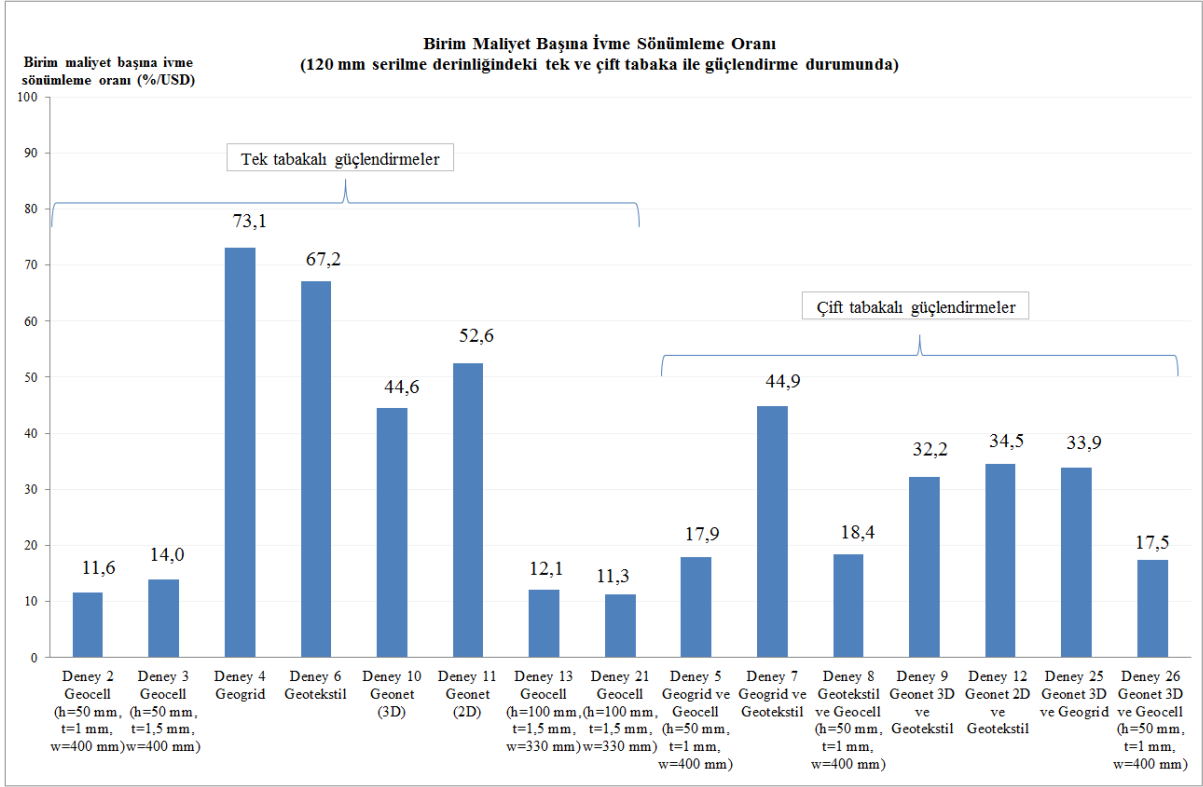
Şekil 3.18. Kullanılan geosentetikler dikkate alınarak, deney maliyetlerinin karşılaştırılması

Çift tabaka serim deneylerinde birim maliyet başına ivme sönümlenme kapasiteleri, Şekil 3.19’da verilmiştir. “Birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum uygulamanın geogrid ve geotekstil (Deney 7) tarafından sağlandığı görülmektedir.



Şekil 3.19. Çift tabakalı serimlerde birim maliyet başına ivme sönümleme oranı

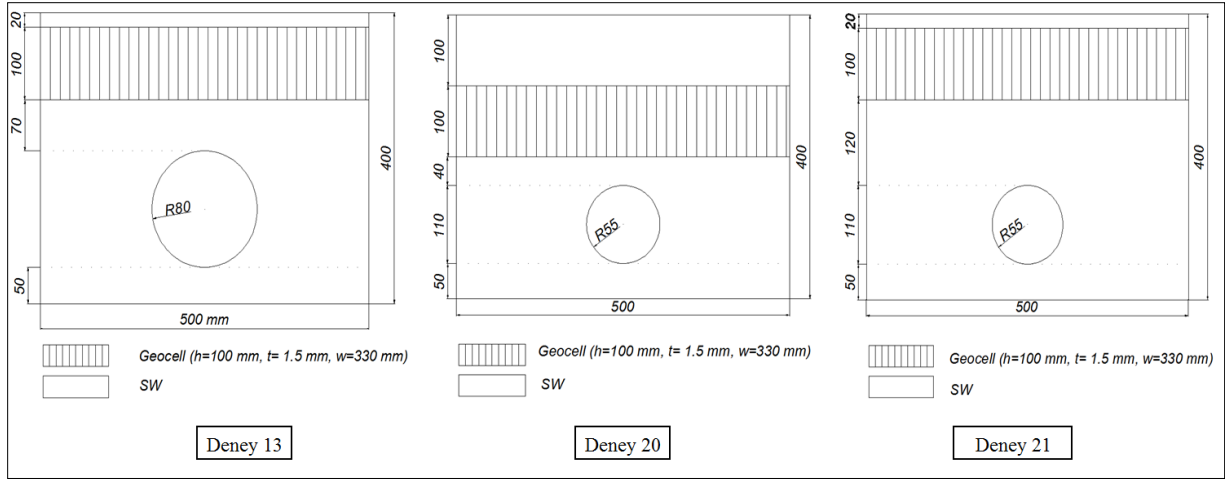
Tek ve çift tabaka güçlendirme elemanları, 120 mm derinliğe serilerek uygulanan deneylerde, “birim maliyet başına ivme sönümleme oranı” Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Optimum uygulama tek tabakalı serilen geogrid (Deney 4) tarafından sağlanmıştır.



Şekil 3.20. Tek ve çift tabaka serilerek yapılan güçlendirmelerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı

### 3.9.3 Serilme derinliği ve boru çapı değiştirilerek yapılan güçlendirmeler

Geosentetik serilme derinliği, deney tankının üst yüzeyinden geosentetiğin alt yüzüne olan yaklaşık uzaklıktır. 160 mm çaplı boru, geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) tabakası 120 mm ve 60 mm derinliklere serilerek sırası ile Deney 3 ve Deney 14 gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, 110 mm çaplı boru, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) tabakası 200 mm ve 120 mm derinliklere serilerek sırası ile Deney 20 ve Deney 21 uygulanmıştır. Amaç, tüm deney sabitleri aynı kalmak üzere, geocell serilme derinliği değiştirildiğinde, performanslarını karşılaştırabilmektir. Deney 13'te ise geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm), boru çapı değiştirilerek (Şekil 3.21) teste tabi tutulmuş, böylece boru üst yüzündeki ivmeölçer ile geocell tabakası arasındaki uzaklığın etkisi incelenmiştir. Deneylere ait veriler Çizelge 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.21. Geosentetik alt yüzünün, ivmeölçere uzaklığının etkisi

Çizelge 3.20. Serilme derinliği ve boru çapı değiştirilerek yapılan güçlendirmelere ait deney sonuçları

Deney no	Boru dış çapı (mm)	Kullanılan geosentetik çeşidi	Geosentetik yaklaşık derinliği (mm)	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	Enerji sönümlenme kapasitesi (J)
3	160	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	120	30,04	1,01	23,80
13	160	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	21,04	0,56	24,81
14	160	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	60	26,46	0,59	24,57
20	110	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	200	24,99	0,57	24,75
21	110	GEOCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	19,49	0,55	24,93

Elde edilen sonuçlara göre geosentetik serilme derinliği azaldıkça ivme ve deplasmanın azaldığı, enerji sönümlenme kapasitesinin arttığı buna bağlı olarak da koruma performansının arttığı sonucuna varılmaktadır.

Diğer faktörler sabit kalmak koşulu ile boru çapı değiştirildiğinde, ölçülen ivme ve enerji sönümlenme kapasitesi bakımından Deney 21, Deney 13'ten daha iyi sonuç vermiştir. Bu durum, ivmeölçerin koruyucu tabakayla arasındaki mesafenin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

### 3.9.4. Et kalınlığı değiştirilerek yapılan güçlendirmeler

Geocell et kalınlığının etkisi ise Deney 2 ve Deney 3 karşılaştırması ile ortaya çıkmaktadır. Geocell (h=50 mm, w=400 mm) et kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında ivme değerinin Deney 2'de 39,90 g iken Deney 3'te 30,04 g' ye düştüğü görülmektedir. Bu sonuç,

et kalınlığı arttıkça ölçülen maksimum ivme değerinin düştüğünü yani performansın arttığını göstermektedir.

Et kalınlığı artırılarak uygulanan geocell deneylerinde, “birim maliyet başına ivme sönümlene oranı” ile optimum sonuç geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) (Deney 3) tarafından sağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.15).

### **3.9.5. Farklı serilme derinliklerinde çift tabaka geosentetik ile güçlendirmeler**

Boru dış çapı 110 mm iken, kombinasyonlu güçlendirme elemanlarının her biri farklı derinliğe serilerek Deney 18 ve Deney 19 gerçekleştirilmiştir.

Deney 18’de farklı serilme derinliği (H=90 mm ve 190 mm) olan iki adet geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) tabakası kullanılmıştır. Maksimum ivme, 17,48 g’dir ve referans deneye (Deney 17) göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 67,0 oranında düşüş gözlenmiştir. Birim maliyet başına ivme sönümlene oranı, 8,6 (%/USD) olarak hesaplanmıştır.

Deney 19’da geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) serilme derinliği, H=90 mm ve geotekstil serilme derinliği, H=190 mm olmuştur. Maksimum ivme 7,48 g olarak ölçülmüştür. Referans deneye (Deney 17’ye) göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 85,9 oranında düşüş gözlenmiştir. Birim maliyet başına ivme sönümlene oranı, 17,4 (%/USD) olarak hesaplanmıştır.

Kombinasyonlu güçlendirme elemanlarının biri tank üst yüzeyinden 90 mm, diğeri 190 mm derinliğe serilerek gerçekleştirilen deneylerde, “birim maliyet başına ivme sönümlene oranı” ve enerji sönümlene kapasiteleri dikkate alındığında, geotekstil ve geocell kombinasyonu, iki geocell tabakasından daha başarılı performans sergilemiştir.

### **3.9.6. Çift tabaka geosentetik kombinasyonunun serilme derinliği değiştirilerek yapılan güçlendirmeler**

İki geosentetik elemanın kombinasyonlu kullanımlarının 60 mm serilme derinliğinde performanslarına etkisini görebilmek için yapılan deneylere ait sonuçlar Çizelge 3.21’de



görülmektedir. Bölüm 3.9.2’de 120 mm derinlikte kullanılan kombinasyonlu güçlendirme yapılarının performanslarından bahsedilmiştir. Bu bölümde derinlik 60 mm olduğunda aynı kombinasyonların performansına etkisi değerlendirilecektir. Geotekstil ve geocell kombinasyonunun söz konusu olduğu Deney 8 ve Deney 15 serilme derinlikleri kıyaslandığında, ivme değerlerinin geosentetik serilme derinliği ile birlikte azaldığını ve buna bağlı olarak koruma performansının arttığı sonucu, çift tabakalı geosentetik koruyucu tabaka etkisiyle de ispatlanmıştır.

Çizelge 3.21. Çift tabaka geosentetik kombinasyonunun serilme derinliği değiştirilerek yapılan güçlendirmelerin deney sonuçları

Deney no	Kullanılan geosentetik çeşidi	Geosentetik yaklaşık derinliği (mm)	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Enerji sönümlenme kapasitesi (J)
1	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	65,95	5,10	Referans	21,36
8	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	120	12,03	0,29	81,8	25,61
9	GEONET 3D GEOTEKSTİL	120	9,12	0,26	86,2	25,65
15	GEOCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	60	5,48	0,21	91,7	25,69
24	GEONET 3D GEOTEKSTİL	60	6,35	0,22	90,4	25,68
26	GEOCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEONET 3D	120	7,89	0,23	88,0	25,65

Benzer şekilde, geonet 3D ve geotekstil güçlendirme elemanlarının birlikte, sırasıyla 120 mm ve 60 mm derinliğe serilmesi ile Deney 9 ve Deney 24 gerçekleştirilmiştir. Geosentetik serilme derinliği azaldıkça ivme değerlerinin düştüğü ve buna bağlı olarak performansın arttığı sonucu bu güçlendirme elemanlarının kombinasyonu da doğrulanmıştır.

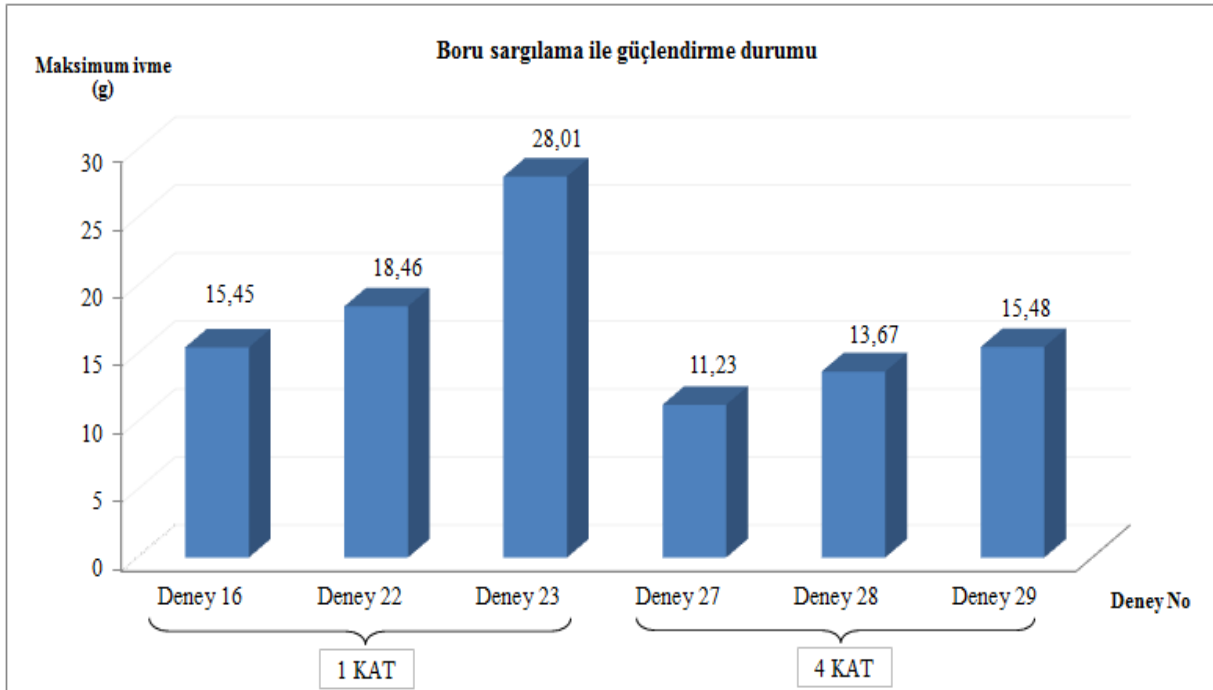
Geosentetik serilme derinliğinin maksimum ivme değerine etkisi yukarıda belirtildiği gibidir. Elde edilen performansın daha da iyileştirilebileceği düşüncesiyle, 120 mm derinliğe koruyucu tabaka serilen deneylerde, en yüksek ivme sönümlenme kapasitesine sahip olan Deney 26 kombinasyonu da göz önünde bulundurularak, 60 mm serilme derinliğinde yer alan Deney 15 kombinasyonu incelenmiştir. Geocell tabakası altına herhangi bir başka geosentetik çeşidi ilave olarak serildiğinde boru üzerinden ölçülen ivme değeri düşüş göstermektedir. Bu şekilde geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve geotekstil tabakası birlikte kullanıldığında (Deney 15) en verimli sonuç elde edilmektedir (Babagiray, Akbaş ve Anıl, 2016).

### 3.9.7. Boru çevresinin sargılanması ile yapılan güçlendirmeler

160 mm dış çaplı boru çevresinin sargılanması, geonet 2D (Deney 16, Deney 27); geonet 3D (Deney 22, Deney 28); geotekstil (Deney 23, Deney 29) olmak üzere 3 tip geosentetik ile yapılmıştır (Çizelge 3.22). Sargılama boru çevresini tek kat ve dört kat saracak şekilde iki türlü denenmiştir (Bkz. Resim 3.27, Resim 3.32, Resim 3.33, Resim 3.37, Resim 3.38, Resim 3.39). Sonuçlar Şekil 3.22’de bir arada gösterilmiştir.

Çizelge 3.22. Boru sargılama deneyleri sonuçları

Deney no	Kullanılan geosentetik çeşidi	Geosentetik yaklaşık derinliği (mm)	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Enerji sönümlenme kapasitesi (J)
1	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	65,95	5,10	Referans	21,36
16	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	1 Kat Sargılama	15,45	0,31	76,6	25,50
22	GEONET 3D	1 Kat Sargılama	18,46	0,54	72,0	25,06
23	GEOTEKSTİL	1 Kat Sargılama	28,01	0,78	57,5	24,30
27	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	4 Kat Sargılama	11,23	0,28	83,0	25,62
28	GEONET 3D	4 Kat Sargılama	13,67	0,30	79,3	25,51
29	GEOTEKSTİL	4 Kat Sargılama	15,48	0,31	76,5	25,34

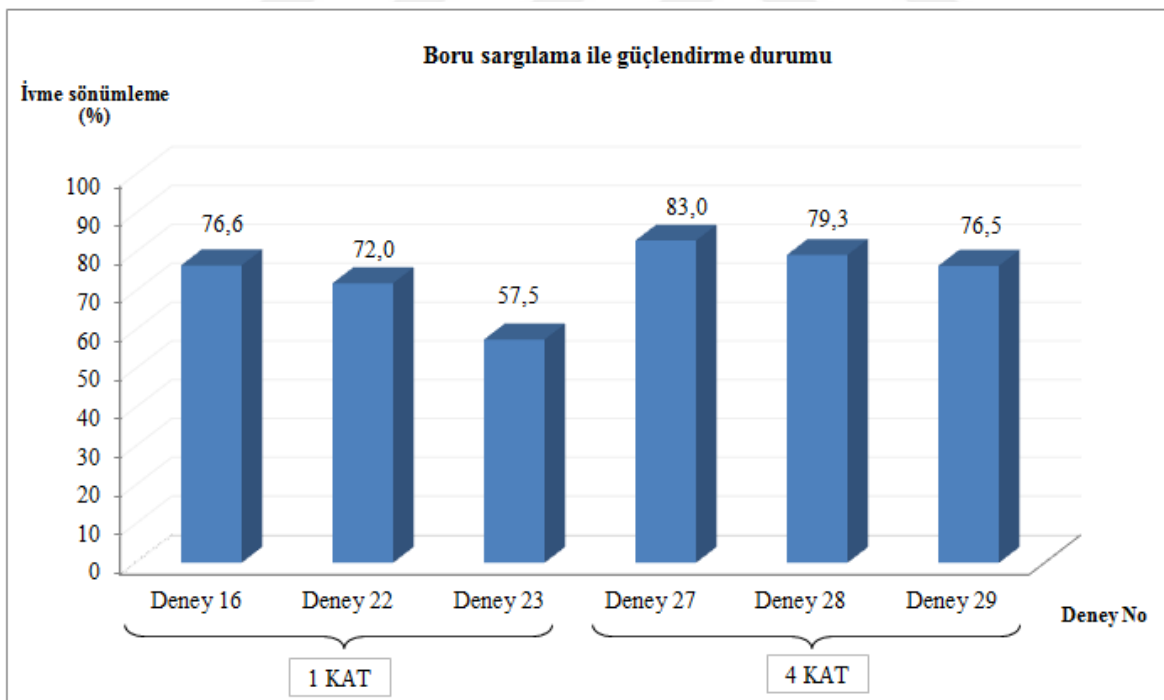


Şekil 3.22. Boru çevresinin geosentetikler ile sargılanması sonucu maksimum ivme değerleri

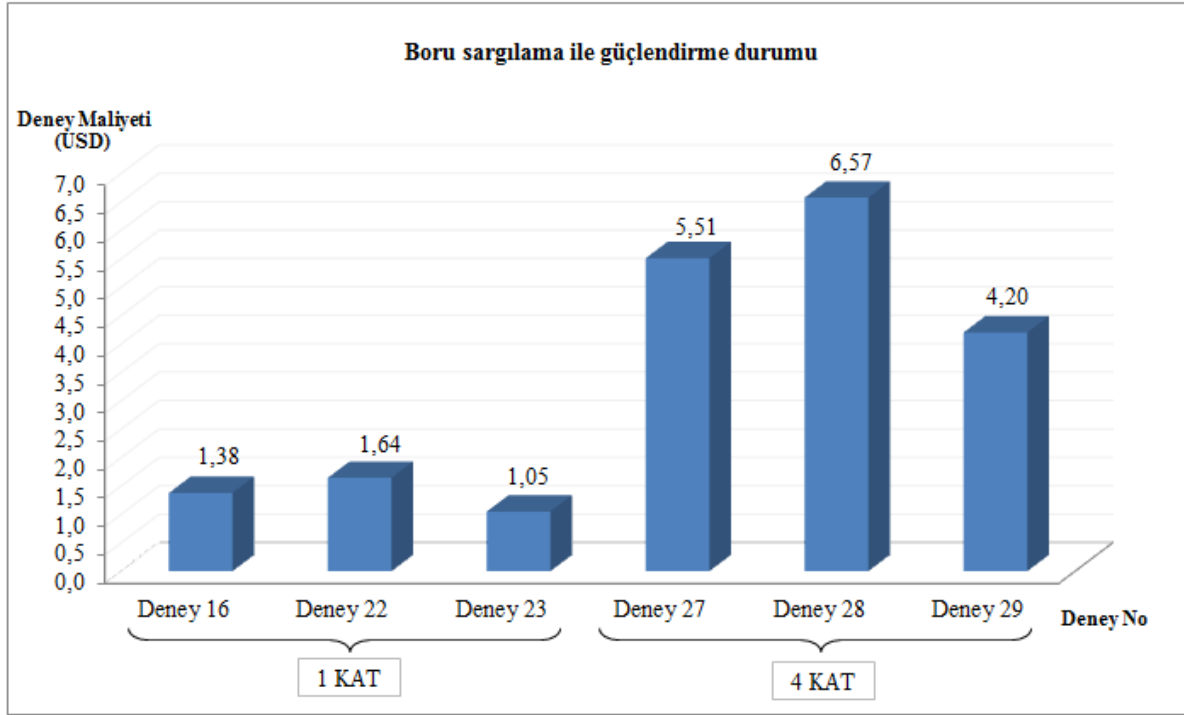
Geonet 2D'nin boru çevresine tek kat sargılanması ile yapılan Deney 16'da ivme sönümleme % 76,6 iken, dört kat sargılama ile yapılan Deney 27'de % 83,0 olmuştur. Sargılama sayısını artırmak ivme ve enerji sönümleme kapasitelerini yükseltmiştir.

Geotekstil (Deney 29), dört kat sarılsa da, boru kalkanı adı verilen geonet 2D (rockshield) (Deney 16) için tek kat sargılama ile elde edilen ivme değerine ancak yaklaşabilmiştir.

Buna karşılık sargılama sayısını artırmak geotekstil kullanımında % 19'luk bir iyileştirme ile ivme değerindeki düşüşü % 57,5'ten % 76,5'e çıkarmıştır. Sargılama sayısının dört kat artması ile elde edilen bu iyileşme geonet 2D (rockshield) için % 6,4 iken, geonet 3D için % 7,3 olmuştur. Sargılama sayısının artırılması maksimum ivmeyi düşürmüş ve performansı artırmıştır (Şekil 3.23). Buna karşılık beklenildiği üzere maliyeti artıracaktır. Sadece bir kat sargılama üzerinden maliyet analizi yapılacak olursa 2014 yılı birim fiyatları için geotekstil daha ekonomik olmasına rağmen, geonet 2D ve geonet 3D'ye göre daha düşük performans sergilemiştir (Şekil 3.24).

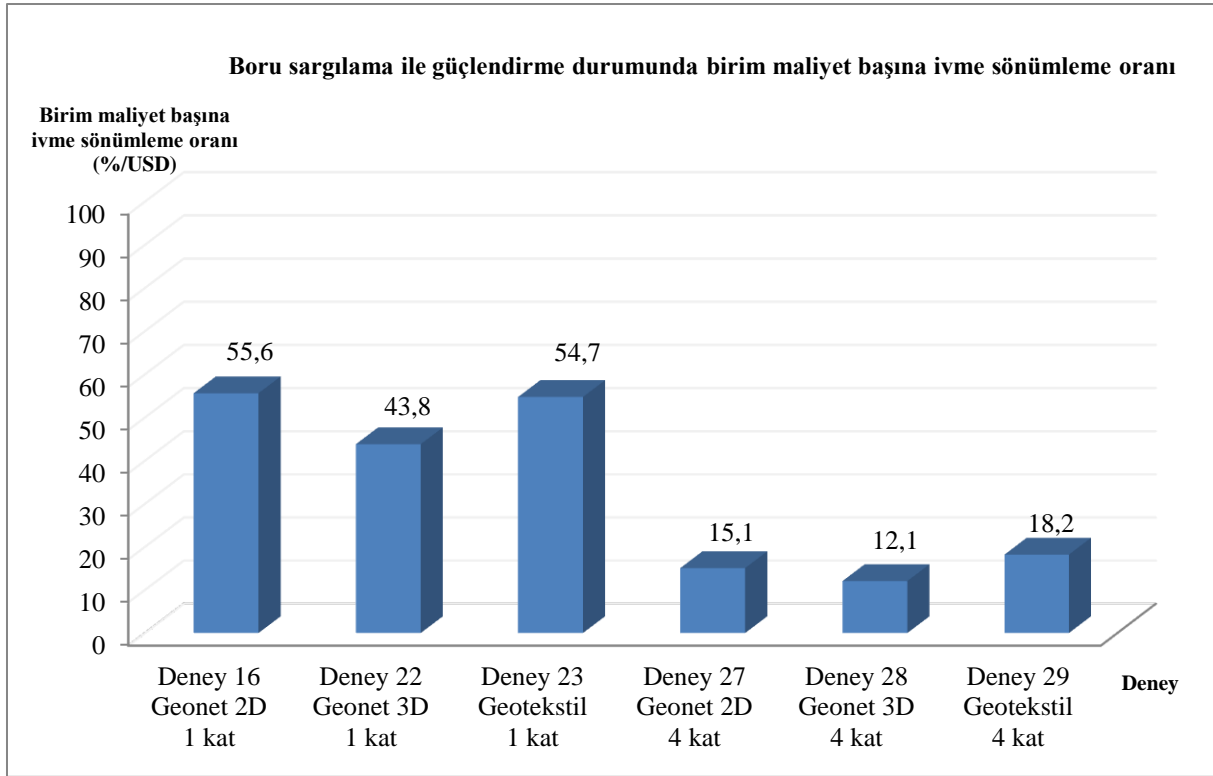


Şekil 3.23. Deney 1 referans deneyine göre sargılama sonucu performanslar



Şekil 3.24. Sargılama ile güçlendirmenin maliyet analiz grafiği

Sargılama yapılan deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlenme performansları Şekil 3.25'te verilmiştir. Her bir geosentetik koruyucu tabakanın borunun çevresine sargılanarak oluşturduğu deney maliyetleri ile aynı malzemenin ivme sönümlenme kapasitesi ile sağlamış olduğu performansı kıyaslayabilmek için düzenlenmiş olan, “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum uygulamanın geonet 2D (Deney 16) tarafından sağlandığı görülmektedir.

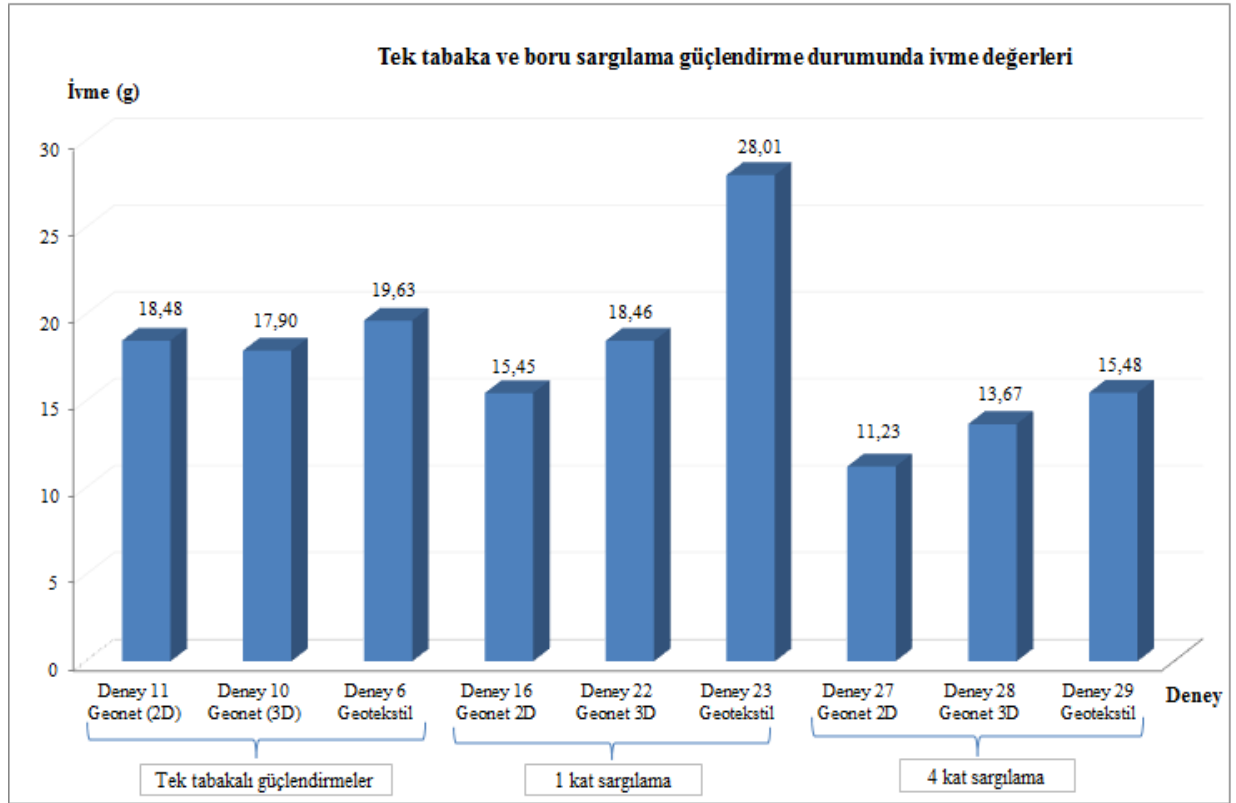


Şekil 3.25. Sargılama yapılan deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı

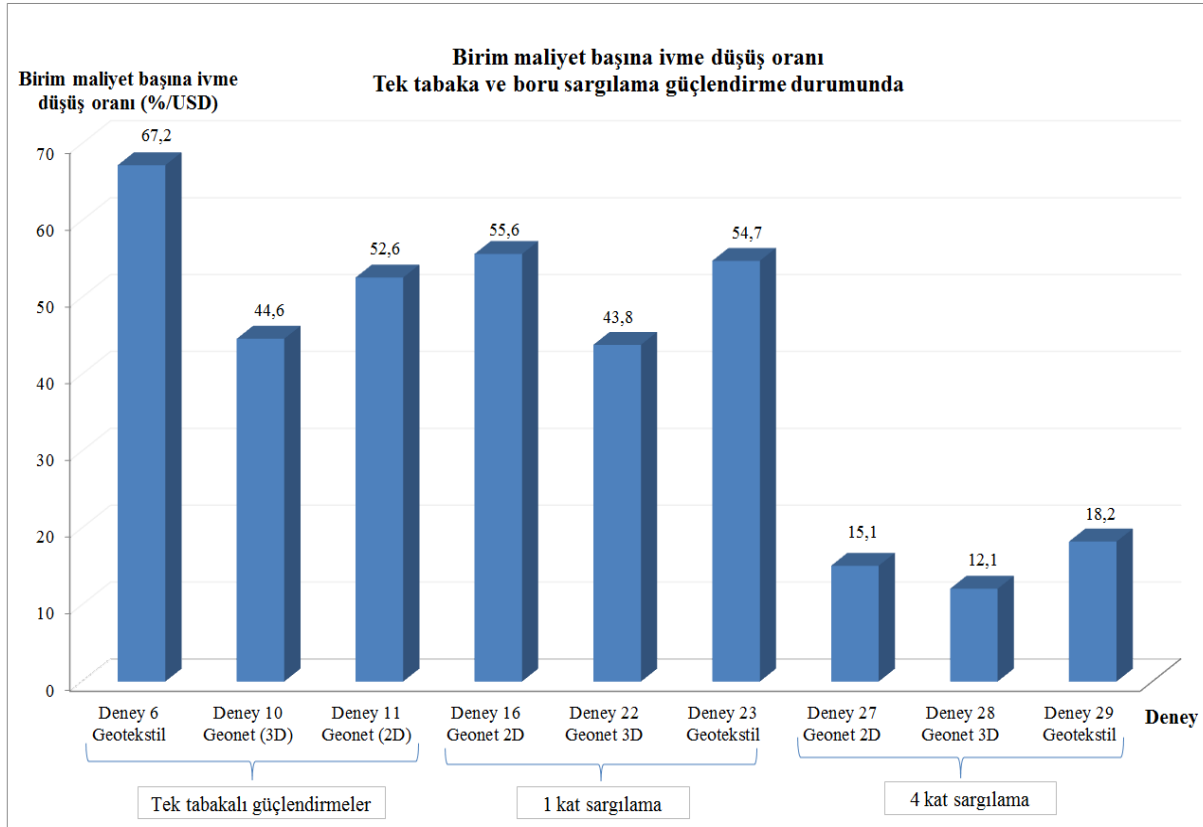
Geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil elemanlarının tek tabaka halinde serilmesi ve sargılama tekniğiyle kullanıldığı test sonuçları Çizelge 3.23'te gösterilmiştir. Şekil 3.26'da ivme değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu malzemelerin sargılama ve tek tabaka serim deney sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük deplasman ve en yüksek ivme sönümlenme kapasitesi açısından geonet 2D (rockshield) kullanılarak dört kat sargılama yapılması en başarılı uygulama olmuştur. Buna göre, geonet 2D (rockshield) için sargılama tekniği uygulamadaki kullanımıyla uyumlu bir sonuç vermiş ve tabaka şeklinde serilmesinden çok daha iyi performans sergilemiştir. Geotekstilin tek kat sargılanması sonucu en kötü performans elde edilmişken bunu geotekstilin tek tabaka serilmesi izlemektedir. Deney performansına karşın sonuçlar maliyetle birlikte düşünüldüğünde, geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil malzemelerinin sargılama ve tek tabaka serim deneylerinde “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” bakımından optimum uygulamanın geotekstil (Deney 6) tek tabaka serimi ile sağlandığı görülmektedir (Şekil 3.27).

Çizelge 3.23. Tek tabaka ve sargılama ile geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil kullanımı

Deney no	Kullanılan geosentetik çeşiti	Geosentetik yaklaşık derinliği (mm)	Maksimum ivme (g)	Maksimum deplasman (mm)	İvme sönümleme kapasitesi (%)	Enerji sönümleme kapasitesi (J)
1	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	65,95	5,10	Referans	21,36
11	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	120	18,48	0,54	72,0	25,02
16	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	1 Kat Sargılama	15,45	0,31	76,6	25,50
27	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	4 Kat Sargılama	11,23	0,28	83,0	25,62
10	GEONET 3D	120	17,90	0,53	72,9	25,11
22	GEONET 3D	1 Kat Sargılama	18,46	0,54	72,0	25,06
28	GEONET 3D	4 Kat Sargılama	13,67	0,30	79,3	25,51
6	GEOTEKSTİL	120	19,63	0,56	70,2	24,84
23	GEOTEKSTİL	1 Kat Sargılama	28,01	0,78	57,5	24,30
29	GEOTEKSTİL	4 Kat Sargılama	15,48	0,31	76,5	25,34



Şekil 3.26. Geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D elemanlarının kullanım şekillerine göre ivme değerleri



Şekil 3.27. Geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D elemanlarının kullanım şekillerine göre birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı

Bu çalışma bünyesinde Çizelge 3.24'te görülen tüm deneylerden elde edilen deney çıktıları değerlendirildiğinde, Deney 15'te yüzeye daha yakın (60 mm'de) kullanılan geocell ( $h=50$  mm,  $t=1$  mm,  $w=400$  mm) ve geotekstil kombinasyonu, 5,48 g ivme değeri, % 91,7 oranında ivme sönümlenme, 0,21 mm maksimum deplasman ve 25,69 J enerji sönümlenme kapasitesi açısından en başarılı uygulama olmuştur (Şekil 3.28 ve Şekil 3.29).

Tüm laboratuvar deneylerinde birim maliyet başına ivme sönümlenme kapasitesi Şekil 3.30'da verilmiştir. Kullanım şekli dikkate alınmaksızın, deney maliyetlerinde her bir geosentetik koruyucu tabakanın kullanım miktarı göz önüne alınarak, malzemenin ivme sönümlenme performanslarını kıyaslayabilmek için düzenlenmiş olan, "birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" değerlendirildiğinde optimum sonucun geogrid (Deney 4) tarafından sağlandığı, bunu geotekstil (Deney 6) seriminin izlediği görülmektedir.

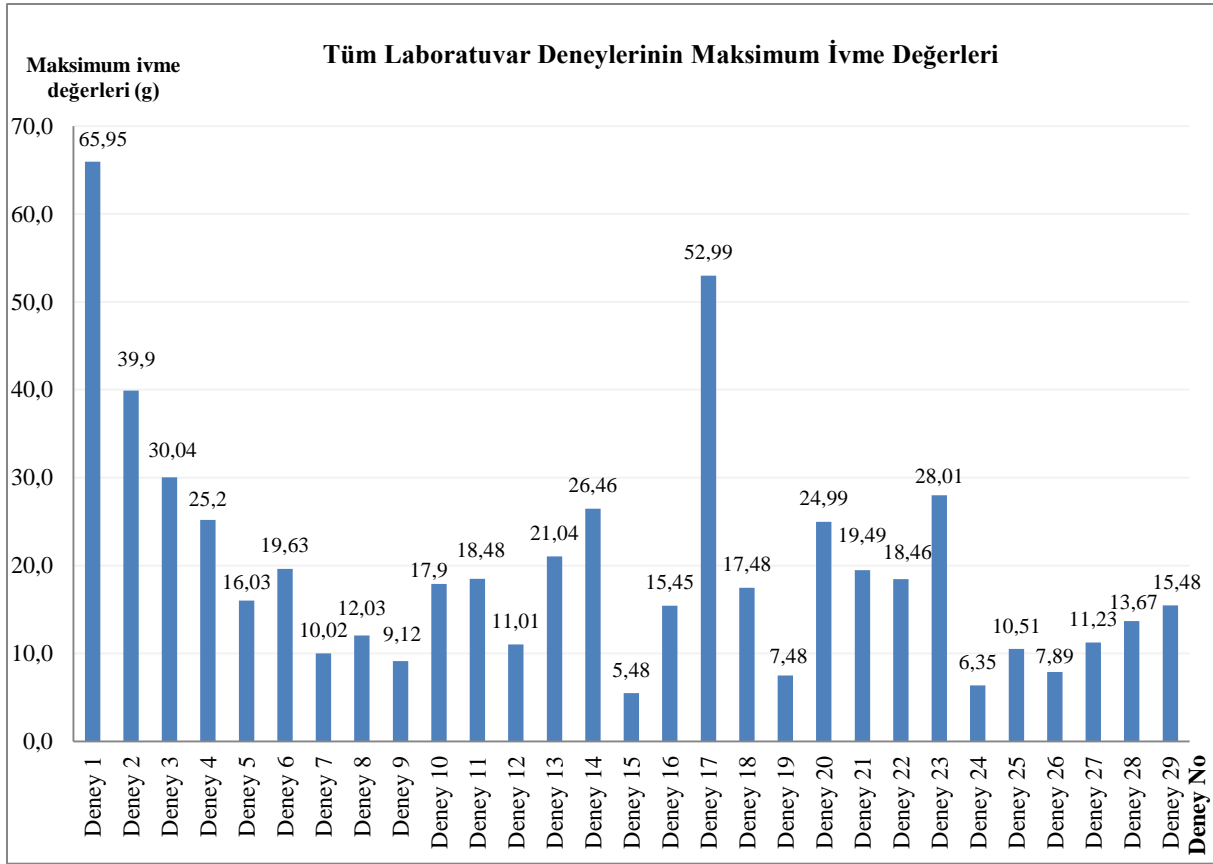
Çizelge 3.24. Laboratuvar deneyleri sonuçları

Deney No	Boru Dış Çapı (mm)	Kullanılan Geosentetik Çeşidi h: yükseklik t: et kalınlığı w: kaynak aralığı	Geosentetik Yaklaşık Derinliği* (mm)	Maksimum İvme (g)	Maksimum Deplasman (mm)	Maksimum Yük (kN)	İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Boru üzerinde hesaplanmış enerji (J)	Enerji sönümlenme kapasitesi** (J)
1	160	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	65,95	5,10	10,06	Referans	4,39210	21,36
2	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm)	120	39,90	2,11	10,68	39,5	2,26020	23,49
3	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	120	30,04	1,01	9,98	54,5	1,95564	23,80
4	160	GEOGRID	120	25,20	0,58	11,78	61,8	1,09220	24,66
5	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEOGRID	120	16,03	0,33	11,49	75,7	0,55078	25,20
6	160	GEOTEKSTİL	120	19,63	0,56	10,93	70,2	0,91170	24,84
7	160	GEOGRİD GEOTEKSTİL	120	10,02	0,27	10,79	84,8	0,11290	25,64
8	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	120	12,03	0,29	11,27	81,8	0,13679	25,61
9	160	GEONET 3D GEOTEKSTİL	120	9,12	0,26	11,45	86,2	0,10490	25,65
10	160	GEONET 3D	120	17,90	0,53	11,10	72,9	0,64100	25,11
11	160	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	120	18,48	0,54	11,54	72,0	0,73120	25,02
12	160	GEONET 2D (ROCKSHIELD) GEOTEKSTİL	120	11,01	0,28	10,94	83,3	0,12880	25,62
13	160	GEOCCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	21,04	0,56	11,26	68,1	0,93890	24,81
14	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	60	26,46	0,59	11,52	59,9	1,18246	24,57
15	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	60	5,48	0,21	11,09	91,7	0,06461	25,69
16	160	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	1 Kat Sargılama	15,45	0,31	11,08	76,6	0,25450	25,50
17	110	Koruyucu Tabakasız Referans Deney	Referans	52,99	2,30	11,95	Referans	3,12450	22,63
18	110	GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm)	90 190	17,48	0,52	11,69	67,0	0,57080	25,18
19	110	GEOCCELL (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) GEOTEKSTİL	90 190	7,48	0,22	11,78	85,9	0,08150	25,67
20	110	GEOCCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	200	24,99	0,57	10,76	52,8	1,00200	24,75
21	110	GEOCCELL (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm)	120	19,49	0,55	10,35	63,2	0,82150	24,93
22	160	GEONET 3D	1 Kat Sargılama	18,46	0,54	10,78	72,0	0,69560	25,06
23	160	GEOTEKSTİL	1 Kat Sargılama	28,01	0,78	10,28	57,5	1,45090	24,30
24	160	GEONET 3D GEOTEKSTİL	60	6,35	0,22	11,41	90,4	0,07230	25,68
25	160	GEONET 3D GEOGRİD	120	10,51	0,28	11,14	84,1	0,12080	25,63
26	160	GEOCCELL (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) GEONET 3D	120	7,89	0,23	11,36	88,0	0,09688	25,65
27	160	GEONET 2D (ROCKSHIELD)	4 Kat Sargılama	11,23	0,28	11,34	83,0	0,13010	25,62
28	160	GEONET 3D	4 Kat Sargılama	13,67	0,30	10,95	79,3	0,23780	25,51
29	160	GEOTEKSTİL	4 Kat Sargılama	15,48	0,31	10,56	76,5	0,40890	25,34

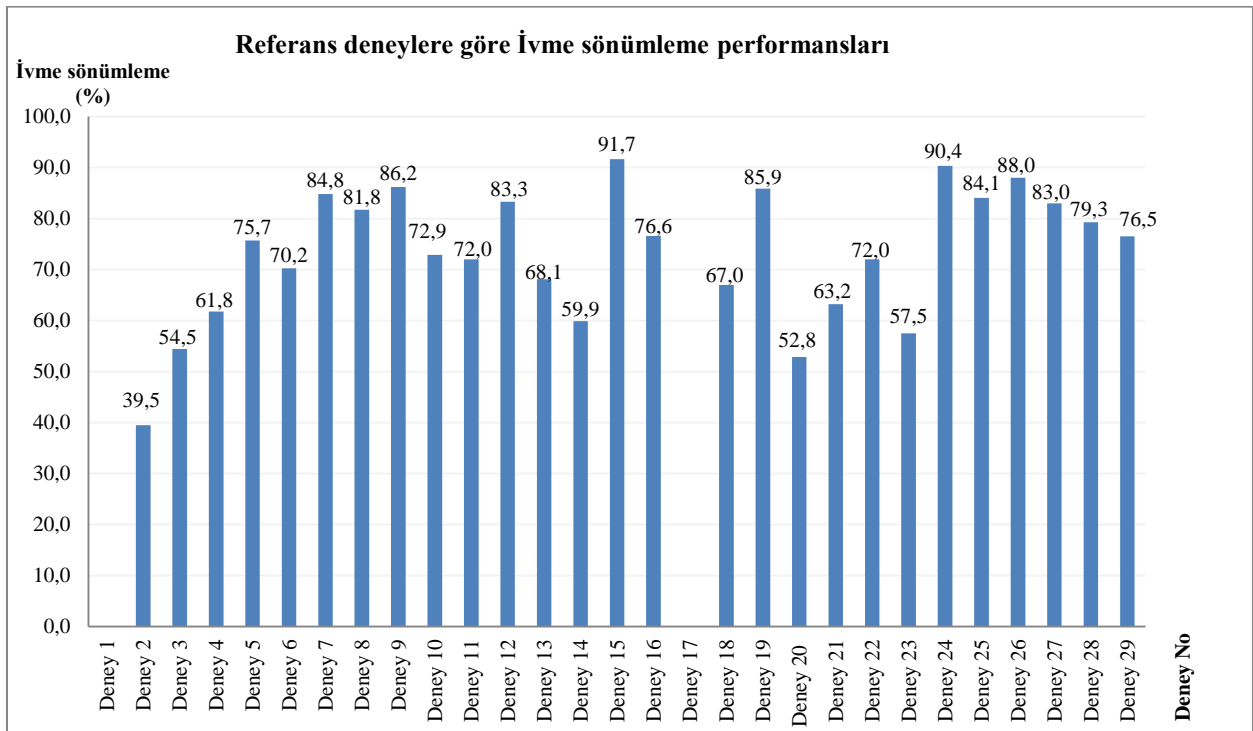
\* Geosentetik serilme derinliği (H), deney tankının üst yüzeyinden geosentetik alt yüzüne olan yaklaşık uzaklıktır.

\*\* Sönümlenmiş enerji, uygulanan enerji (5,25 x 9,81 x 500/1000 = 25,75125 Joule) ile boru üstünde hesaplanan enerjinin farkıdır.

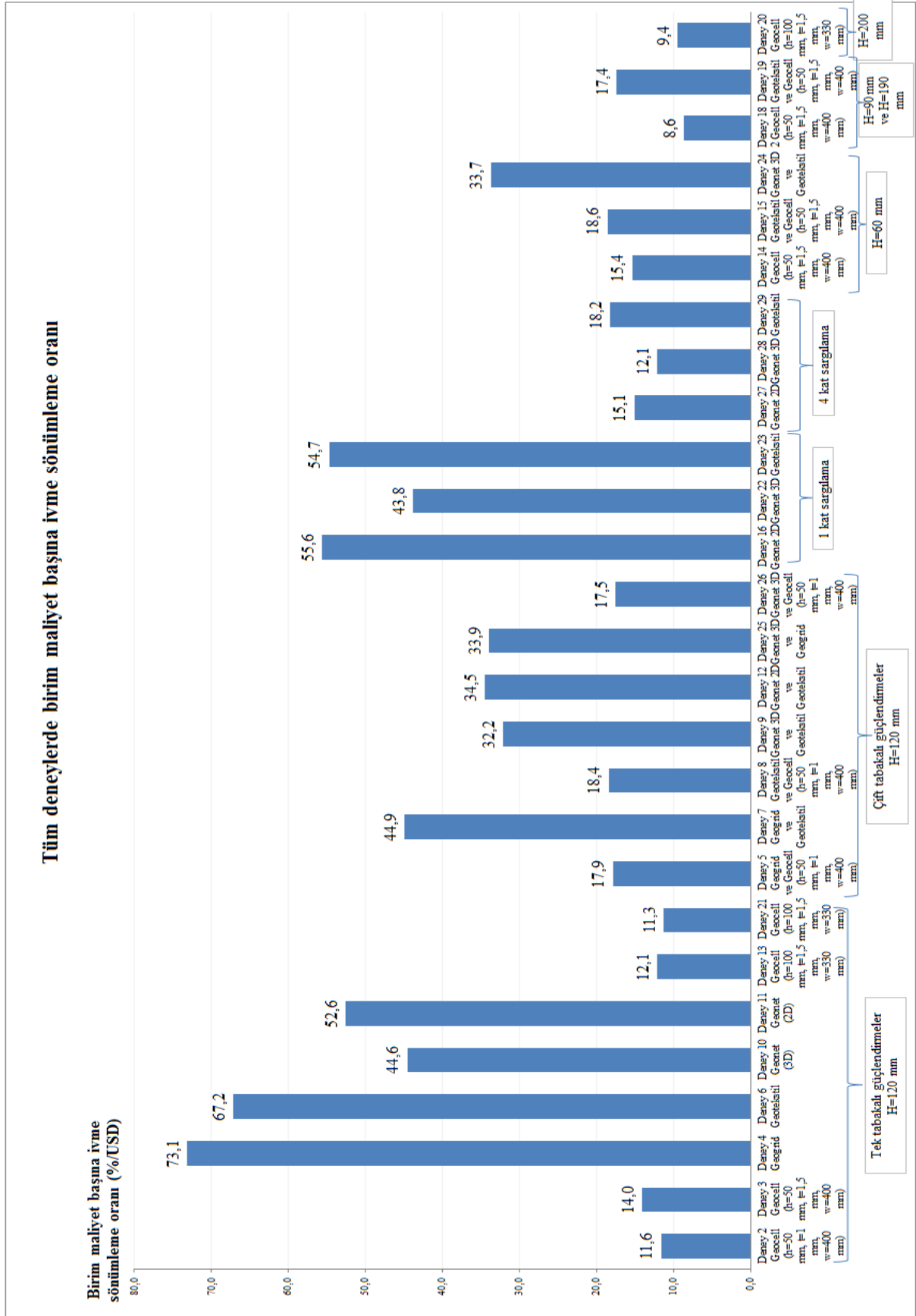




Şekil 3.28. Yapılan tüm deneylerde orta ivmeölçerden elde edilen maksimum ivme değerleri



Şekil 3.29. Yapılan tüm deneylerde maksimum ivme değerlerinin referans deneylere göre düşme oranı

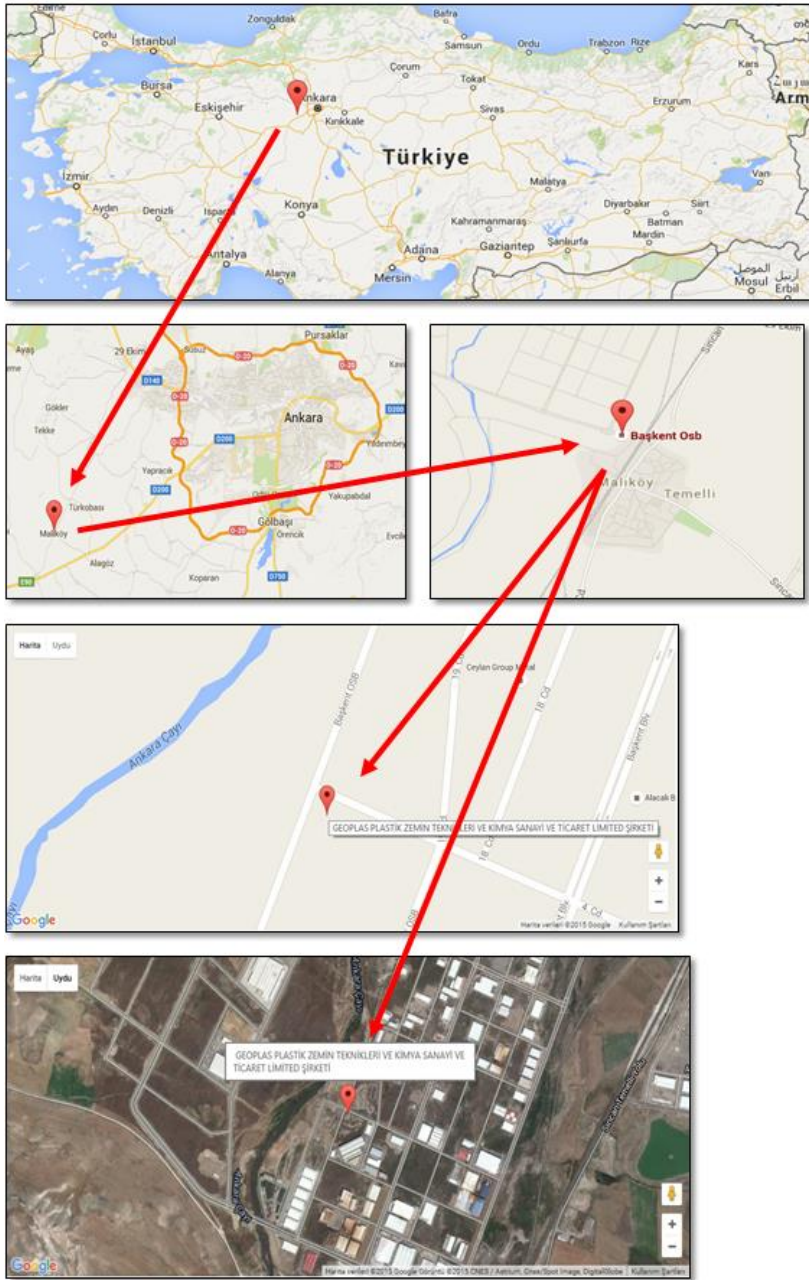


Şekil 3.30. Tüm deneylerde birim maliyet başına ivme sönümlleme oranı

## 4. SAHA ÇALIŞMALARI

### 4.1. Deney Sahası

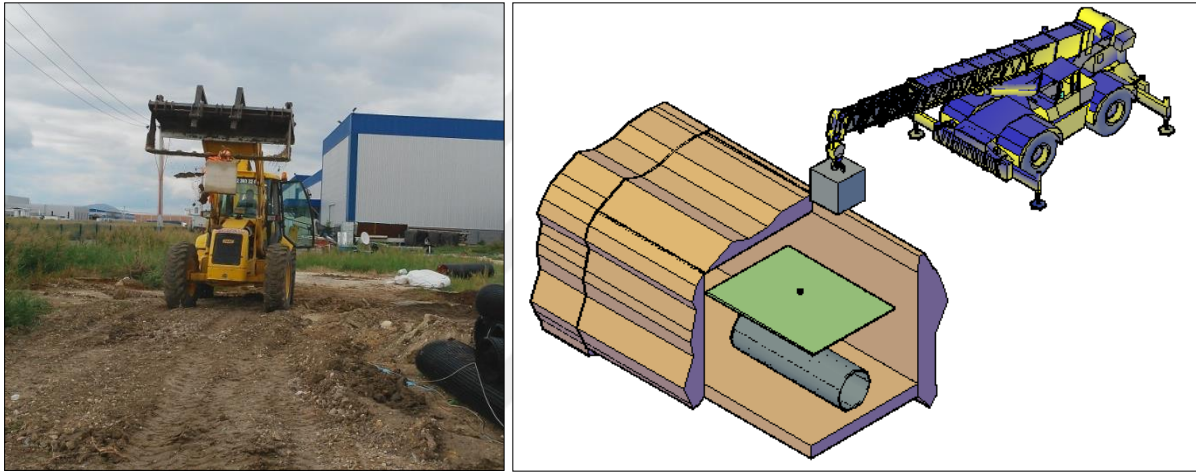
Arazi deneyleri, Geoplas Plastik Zemin Teknikleri ve Kimya San. Tic. Ltd. Şti. firmasının Ankara, Temelli’de bulunan Başkent Organize Sanayi Bölgesi’ndeki fabrika sahasında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.1).



Resim 4.1. Saha deneyleri uygulama noktası

#### 4.2. Kazı Kesiti ve Planı

Kazı çukuru 2000 mm derinlikte, 2000 mm genişlikte ve 4000 mm uzunluktadır. HDPE boru hendek tabanına yerleştirildikten sonra, geri dolgu ve güçlendirme işlemleri tamamlanıp beton blok istenilen yükseklikten zemine düşürülmüştür. Resim 4.2’de arazi çalışmasının şematik görünümü ve çalışmalar esnasında çekilen bir resim mevcut olup, BOTAŞ’ın Teknik Emniyet ve Çevre Yönetmeliği ‘Hendek Ölçüleri ve Geri Dolgu’ çizimlerine uygun olarak hazırlanmış hendeğin kesit, plan ve profil şemaları sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te yer almaktadır.

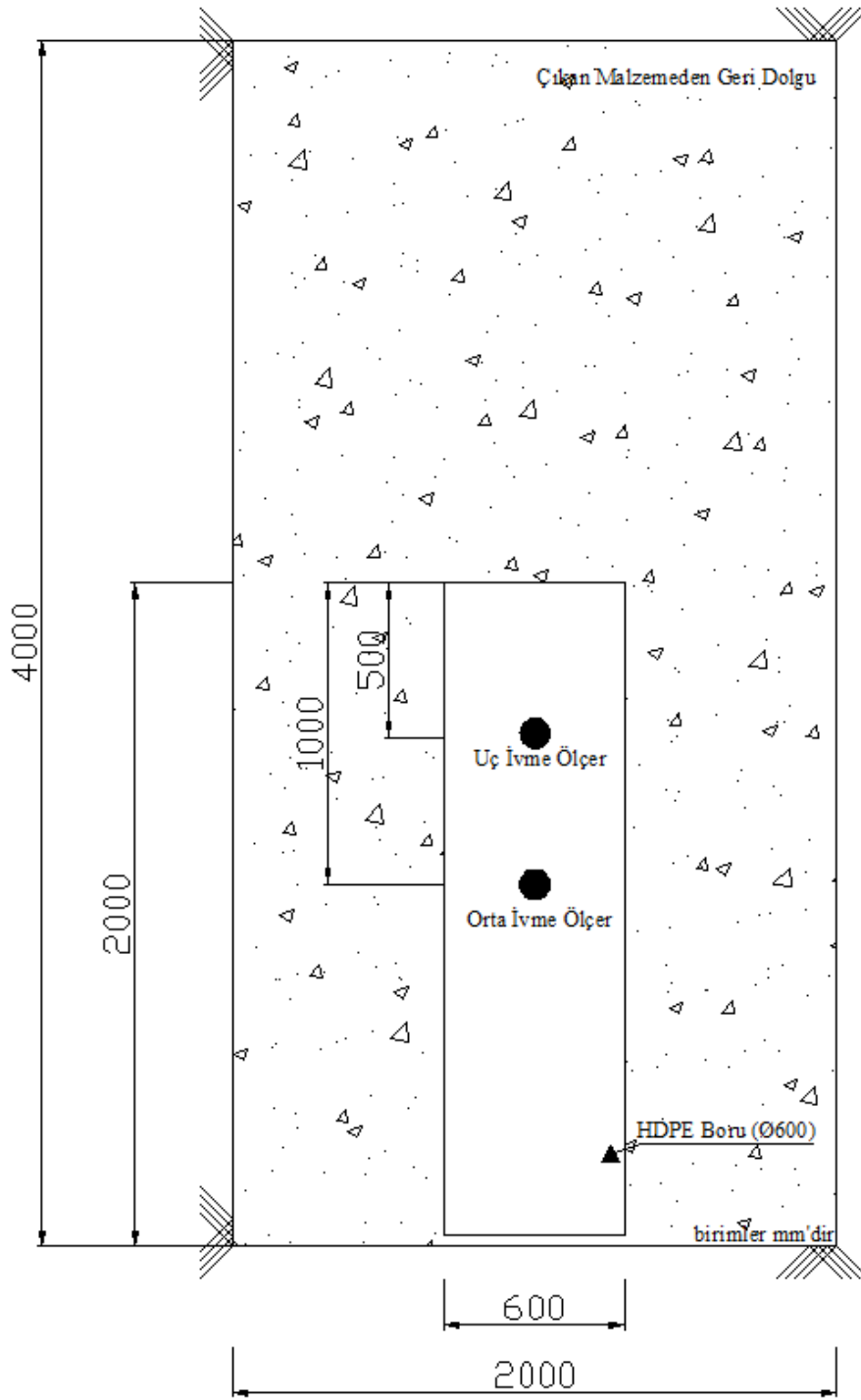


Resim 4.2. Arazi çalışmasına ait resim ve şematik gösterim

BOTAŞ doğalgaz ana iletim hatları tipik kesitlerinin yer aldığı Teknik Emniyet ve Çevre Yönetmeliği Ek:5’e göre düzenlenen kazı çukuruna boru yerleştirilmeden önce 200 mm kum yatak yapılmış, sonrasında ölçüm aletleri monte edilmiş boru simetrik olarak yerleştirilip çevresi, boru üstünden yine 200 mm yukarı kadar ince kumla beslenmiştir. Geri dolgu ile çıkan malzeme zemin üst yüzüne kadar doldurulurken basınçölçerler kalan 1000 mm’lik üst kısmı üç eşit parçaya ayıracak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.1).

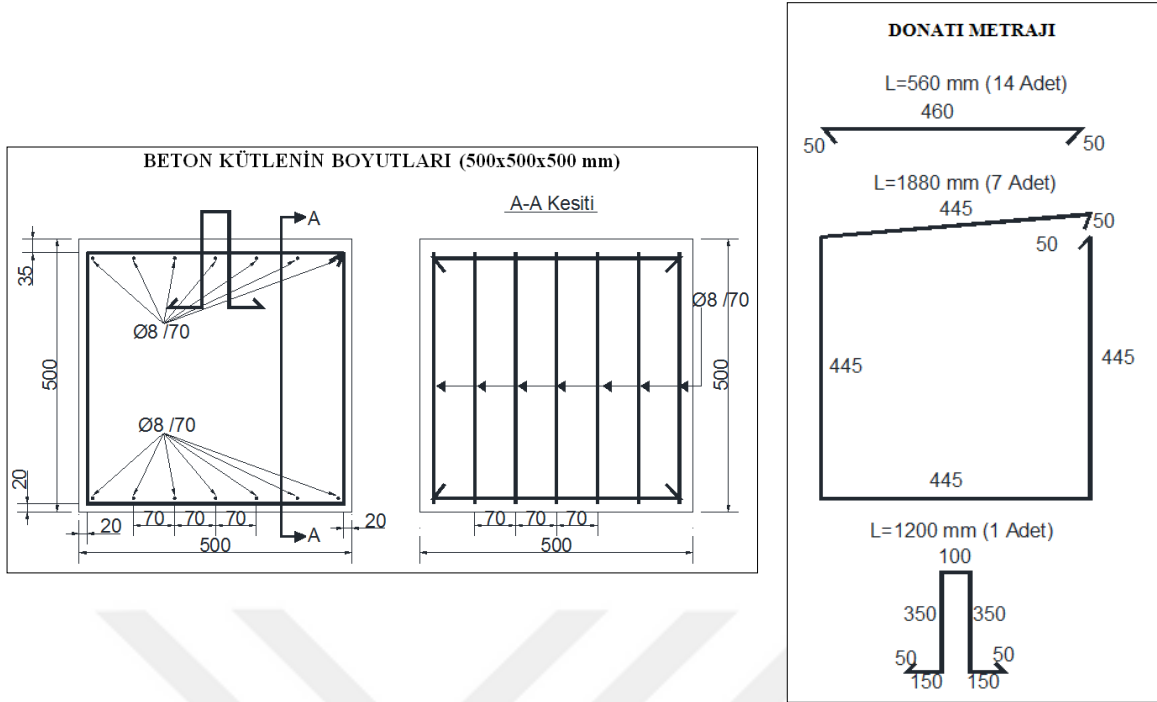
Saha deneylerine ait plan ve en kesitte görülen basınçölçerler, boruya yakın olan alt basınçölçer, zemin yüzüne yakın olan ise üst basınçölçer olarak anılacaktır. 2000 mm uzunluğa sahip borunun 1000 mm’sine orta ivmeölçer, 500 mm’sine uç ivmeölçer isimleri ile anılacak ivmeölçerler bağlanmıştır (Şekil 4.2).





Şekil 4.2. Saha deneylerine ait kazı planı





Şekil 4.4. Beton kütle boyutları ve donatı detayı

#### 4.4. PE 100 Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borunun Özellikleri

Tam ölçekli boyutlarda yapılan arazi deneylerinde, dayanıklı ve esnek olması, ayrıca taşıma ve montaj kolaylığı yönünden uygulamada sıkça tercih edilen PE 100 boru kullanılmıştır. Plastik teknolojisinin hızlı gelişimi hammadde üretiminde de önemli gelişmelerin yaşanmasını sağlamıştır. PE 32, 40 ve 63'ten imal borular yüksek basınç gerektirmeyen sistemlerde başarı ile kullanılmıştır. Ancak bu malzemeler teknik özellikleri nedeniyle sadece düşük basınç gerektiren sistemlerde kullanılabilme imkânı bulmuştur. Uzun araştırma ve çalışmalar sonucunda geliştirilen PE 100 ise bugüne kadar geliştirilen yüksek basınca dayanıklı en güçlü PE boru malzemesidir. Aynı iletme basıncında ve çapta PE 100 boruları PE 32, 40, 63 ve 80 borulara göre daha ince et kalınlığına sahiptir. Bu yönden PE 100 borularda daha ince et kalınlığında daha büyük iç çap oluşturmaktadır. Aynı debi miktarları için bir küçük çap kullanımı mümkün olmakla birlikte, hammadde tasarrufu sağlamaktadır (pilsa.wavin.com, 2017).

PE 100 borular, yer altı ve yer üstü içme ve kullanma suyu şebekeleri, petrokimya sanayi ve doğalgaz hatları, kanalizasyon deşarj sistemleri, atık su sistemleri, drenaj projelerinde, deniz deşarj sistemleri, tarımsal sulama sistemleri, katı atık (çöp) drenaj sistemleri, spor sahaları ve



bahçe alanlarının sulanmaları, jeotermal sistemler ve maden işletmeleri, ilaç ve kimya sanayi, çimento sanayi, gıda sektörü, yangın suyu ve soğutma suyu sistemleri, telekomünikasyon kablolama sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (pilsa.wavin.com, 2017).

Deneylerde, 600 mm dış çapa ve 2000 mm uzunluğa sahip, et kalınlığı 20 mm olan HDPE boru kullanılmıştır (Resim 4.3). Bu büyüklükteki bir çap, BOTAŞ projelerindeki uygulama boyutları referans alındığından tercih edilmiştir.



Resim 4.3. 600 mm dış çaplı HDPE boru

Saha deneylerinde kullanılan 600 mm dış çaplı HDPE boruya ait teknik özellikler Bölüm 3'te Çizelge 3.11'de verilmiştir.

#### **4.5. Ölçüm Aletlerinin Özellikleri**

Bu bölümde, Bölüm 3.5'te detaylı biçimde anlatılan ölçüm aletlerine ek olarak, saha deneylerinde kullanılan ekipman ve aletlerden bahsedilmiştir.

##### **4.5.1. Basınçölçer**

Japonya menşeli Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. (TML) firması tarafından üretilmiş olan KDE-2 MPA model tipindeki zemin basınçölçeri 2000 kPa kapasitelidir (Çizelge 4.1). Dinamik zemin basıncını ölçebilen, 50 mm dış çapa sahip, küçük boyutlu ve çift diyagram

yapısına sahip basınçölçerler, yüksek korozyon direncine sahip paslanmaz çelikten yapılmışlardır (Resim 4.4). Zemin gerilmelerini elektriksel olarak ölçen ve mekanik deformasyonlara dönüştüren bu sensörler genellikle test ve araştırma amaçlı kullanılır. Bunun yanı sıra yol, köprü, baraj ve yaygın yapı çeşitlerinin kurulum ve bakımında kullanılırlar (www.tml.jp, 2017).



Resim 4.4. Arazi deneylerinde kullanılan basınçölçer

Çizelge 4.1 Basınçölçere ait teknik özellikler (www.tml.jp, 2017)

Özellik	Birim	Değer
Tip	KDE-2MPA	
Kapasite	kPa	2000
Anma gücü	mV/V	0,5
Doğrusalsızlık bozulması	%	2
Sıcaklık	°C	-20 ile +60
Çap	mm	50

#### 4.5.2. İvmeölçerler, veri toplayıcı ve bağlantı kabloları

Bölüm 3.5.1.3'de deneylerde kullanılan ivmeölçerler hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Saha deneylerinde de 600 mm dış çaplı boruya, 500 mm (uç ivmeölçer) ve 1000 mm (orta ivmeölçer) mesafelerde piezoelektrik ivmeölçerler bağlanmıştır (Resim 4.5).



Resim 4.5. 600 mm dış çaplı boruya monte edilmiş piezoelektrik ivmeölçer

Saha deneylerinde kullanılan veri toplayıcı ile ilgili bilgi Bölüm 3.5.2’de ayrıntılı şekilde verilmiştir (Bkz. Çizelge 3.13).

Ölçüm aygıtlarından alınan ölçme değerlerinin değer kaybına uğramadan deney alanından veri toplayıcısına iletilmesi için kullanılan özel kablolar ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3.5.3’te verilmiştir (Bkz. Resim 3.10 ve Resim 3.11).

#### **4.6. Saha Çalışmalarında Kullanılan Geosentetiklerin Özellikleri**

Arazide yapılan deneyler bünyesinde kullanılan yedi tip geosentetik türüne ait özellikler alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

##### **4.6.1. Geocell**

Bölüm 3.3.3’te de bahsedilen geocellin (Resim 4.6), saha deneyleri için kullanılan versiyonu farklı hücresel yükseklik ve et kalınlığına sahiptir.



Resim 4.6. Arazi çalışmalarında güçlendirme elemanı olarak yerleştirilen geocell

Arazi çalışmalarında kullanılan ve hücre yüksekliği 150 mm olan geocell ile ilgili teknik bilgi Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Geocell teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

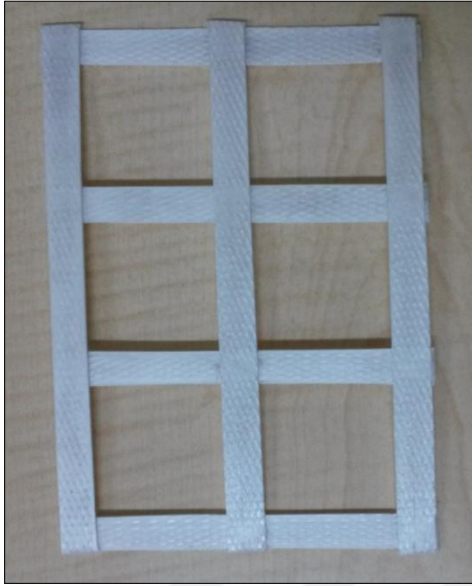
Özellikler	Birim	Değerler	Metot
Hammadde	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE)		
Polimer Yoğunluk	gr/ cm <sup>3</sup>	0,935-0,965	EN ISO 1183-1/A
Karbon Siyahı	%	1-3	ASTM D 1603
Çekme Dayanımı-Delikli	kN/m	7	EN ISO 10319
Kaynak Aralığı	mm	330	
Hücre Uzunluğu x Hücre Genişliği	mm	210x250	
Kalınlık	mm	1,2	EN ISO 9863-1
Hücre Yüksekliği	mm	150	
Oksidasyon indüksiyon süresi	dak	>20	ASTM D 3895
Lineer ısı genleşme	+30°C	≤90	

#### 4.6.2. Geogrid

Polipropilenden imal edilen levhalar gerekli ölçülerde delindikten sonra gerdirilerek açılmaları sağlanan malzemelerdir. Laboratuvar ve saha deneylerinde kullanılan çift eksenli geogridler ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3.3.2’de verilmiştir (Bkz. Çizelge 3.7 ve Resim 3.4).

### 4.6.3. Şerit geogrid

Şerit veya örgülü geogrid olarak tabir edilebilen malzemelerdir (Resim 4.7). Çakışma noktalarında örme veya ısıl kaynak ile birleştirilen yüksek dayanımlı polyster iplik şeritlerden kare açıklıklı olarak teşkil edilen, akabinde genellikle PE, PVC veya bitümle kaplanan (Wasti, 2007: 1-5) şerit geogridlerin teknik özellikleri Çizelge 4.3'te görülmektedir.



Resim 4.7 Şerit geogrid

Çizelge 4.3. Şerit geogrid teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellikler	Birim	Değer	Tolerans	Metot
Birim yüzey ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	240	±%10	EN ISO 9864
Çekme dayanımı İD/İDD*	kN/m	≥30/≥30	±%10	EN ISO 10319
Azami yükteki uzama	%	≤8/≤8	±%10	EN ISO 10319
% 2 Uzamadaki çekme gücü İD/İDD	kN/m	12/12	-	EN ISO 10319
% 5 Uzamadaki çekme gücü İD/İDD	kN/m	24/24	-	EN ISO 10319
Gözenek açıklığı	mm x mm	40x40	±%10	-
Şerit genişliği	mm	10		
Hammadde	Yüksek yoğunluklu polimer			

\*İD: İmalat Doğrultusunda \*İDD: İmalat Doğrultusuna Dik

#### 4.6.4. Geotekstil

Laboratuvar deneylerinde de kullanılan geotekstiller (Resim 4.8), saha deneyleri için farklı yoğunluk ve et kalınlıkları dikkate alınarak darbe testlerine tabi tutulmuştur. Teknik özellikleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.



Resim 4.8. Geotekstil

Çizelge 4.4. Geotekstil teknik özellikler tablosu (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellik	Birim	Değer		Metot
Birim yüzey ağırlığı	gr/m <sup>2</sup>	600	800	TS EN ISO 9864
Et kalınlığı	mm	4,2	5,6	TS EN ISO 9863-1
Çekme dayanımı (long/trans)	kN/m	31/33	39/41	
Kopmadaki uzama (long/trans)	%	50-80		TS EN ISO 10319
Statik delinme dayanımı	N	6000	7000	TS EN ISO 12236
Dinamik delinme dayanımı	mm	2,0	0,5	TS EN ISO 13433
Sıvı geçirgenliği	m/s	0,03	0,02	
Gözenek açıklığı	mm	0,08	0,07	
Sağlamlık	%	70	70	
Hammadde	Polipropilen			

#### 4.6.5. Geogrid kompozit

Polipropilenden imal edilen ekstrude levhalar gerekli ölçülerde delindikten sonra gerdirilerek açılmaları sağlanan malzemelerdir. Özellikleri, Çizelge 4.5'te görülen geotekstil ve geogrid malzemelerinin lamine marifeti ile kompozit yapıya dönüştürülmüş halidir (Resim 4.9).



Resim 4.9. Geogrid kompozit

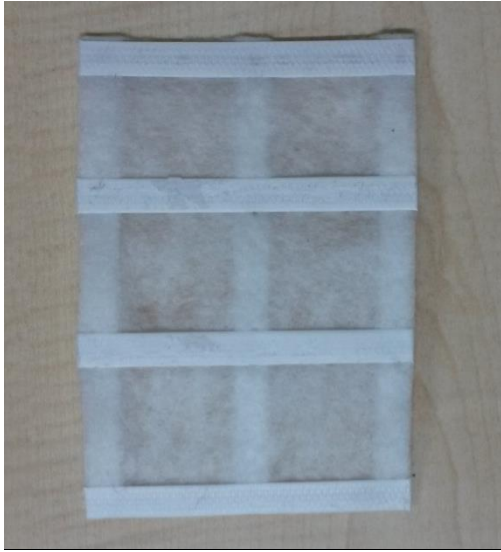
Çizelge 4.5. Geogrid kompozit teknik özellikleri (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellik	Birim	Geogrid Karakteristiği
Hammadde	100% UV dayanımlı polipropilen	
Grid yapısı		Çift eksenli
Açıklık boyutu (İD/İDD)*	mm	40*40
Çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	20/20
%2 uzamadaki çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	7/7
%5 uzamadaki çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	14/14
Karbon siyahı muhtevası	%	20/20
pH direnci		2-13
		Geotekstil Karakteristiği
Hammadde	Polipropilen	
Birim yüzey ağırlık	gr/m <sup>2</sup>	400
Et kalınlığı	mm	2,5
Çekme dayanımı (Long/Trans)	kN/m	21/23
Kopmadaki uzaması (Long/Trans)	%	50-80
Statik delinme dayanımı	N	4000
Dinamik delinme dayanımı	mm	8
Sıvı geçirgenliği	m/s	0,04
Gözenek açıklığı	mm	0,11
Sağlamlık	%	70

\*İD: İmalat Doğrultusunda \*İDD: İmalat Doğrultusuna Dik

#### 4.6.6. Şerit geogrid kompozit

Geotekstil ve şerit geogrid malzemelerinin lamine marifeti ile birlikte kullanılması sonucu elde edilen kompozit yapıdaki geosentetik malzemedir (Resim 4.10). Tüneller, kanallar, temel yapıları, karayolu, demiryolu, havaalanı, donatılı şevler, istinat duvarları, liman yapımı, temel zemin güçlendirilmesi gibi birçok inşaat koşulunda kullanılabilen şerit geogrid kompozite ait teknik özellikler Çizelge 4.6’da verilmiştir ([www.geoplas.com.tr](http://www.geoplas.com.tr), 2017).



Resim 4.10. Şerit geogrid kompozit



Çizelge 4.6. Şerit geogrid kompozit teknik özellikleri (www.geoplas.com.tr, 2017)

Özellik	Birim	Şerit Geogrid Karakteristiği
Hammadde		Yüksek yoğunluklu polimer
Birim yüzey ağırlığı	g/m <sup>2</sup>	240
Açıklık boyutu (İD/İDD)*	mm	40*40
Çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	≥ 30 / ≥ 30
Azami yükteki uzama	%	≤ 8 / ≤ 8
%2 uzamadaki çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	12/12
%5 uzamadaki çekme dayanımı (İD/İDD)	kN/m	24/24
		Geotekstil Karakteristiği
Hammadde		Polipropilen
Birim yüzey ağırlık	g/m <sup>2</sup>	400
Et kalınlığı	mm	2,5
Çekme dayanımı (Long/Trans)	kN/m	21/23
Kopmadaki uzaması (Long/Trans)	%	50-80
Statik delinme dayanımı	N	4000
Dinamik delinme dayanımı	mm	8
Sıvı geçirgenliği	m/s	0,04
Gözenek açıklığı	mm	0,11
Sağlamlık	%	70

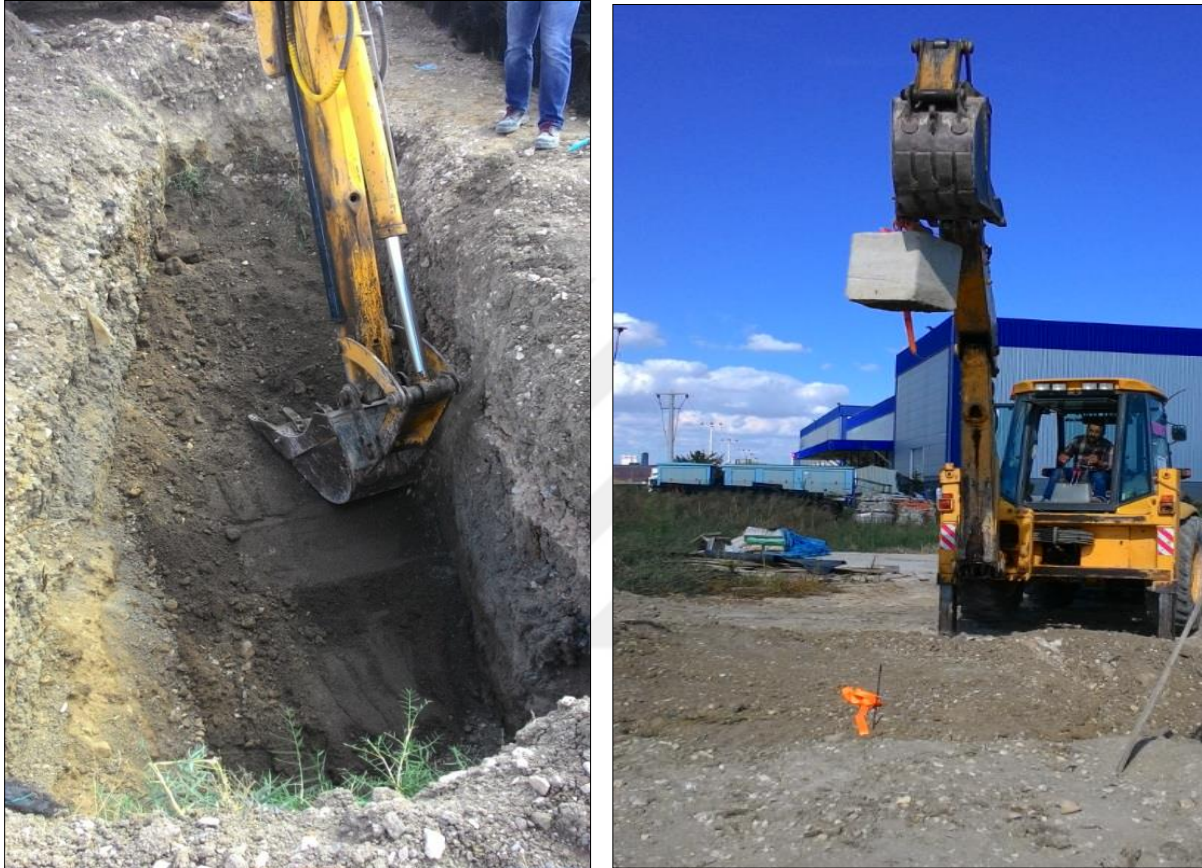
\*İD: İmalat Doğrultusunda \*İDD: İmalat Doğrultusuna Dik

#### 4.7. Saha Deneyleri

İvme ve basınç ölçüm sonuçları, alt basınçölçerden alınan basınç değeri ve orta ivmeölçerden alınan ivme değeri dikkate alınarak kıyaslanacaktır. Orta ivmeölçerden alınan ivme ölçümleri EK-5, basınçölçerlerden alınan basınç ölçümleri EK-6'da yer almaktadır. Anlatımda süreklilik sağlamak adına yalnızca Deney 1 (referans) ve Deney 2 başlıkları altında örnek olarak grafikler sunulmuştur.

### Deney 1: Referans deney

Deney 1, referans deney olarak gerçekleştirilmiştir. Hiçbir güçlendirme elemanı kullanılmamıştır (Resim 4.11). Tüm deneylerde beton kütle 3 m yükseklikten düşürülmüş, 600 mm dış çaplı HDPE boruda meydana gelen değişimler incelenmiştir.

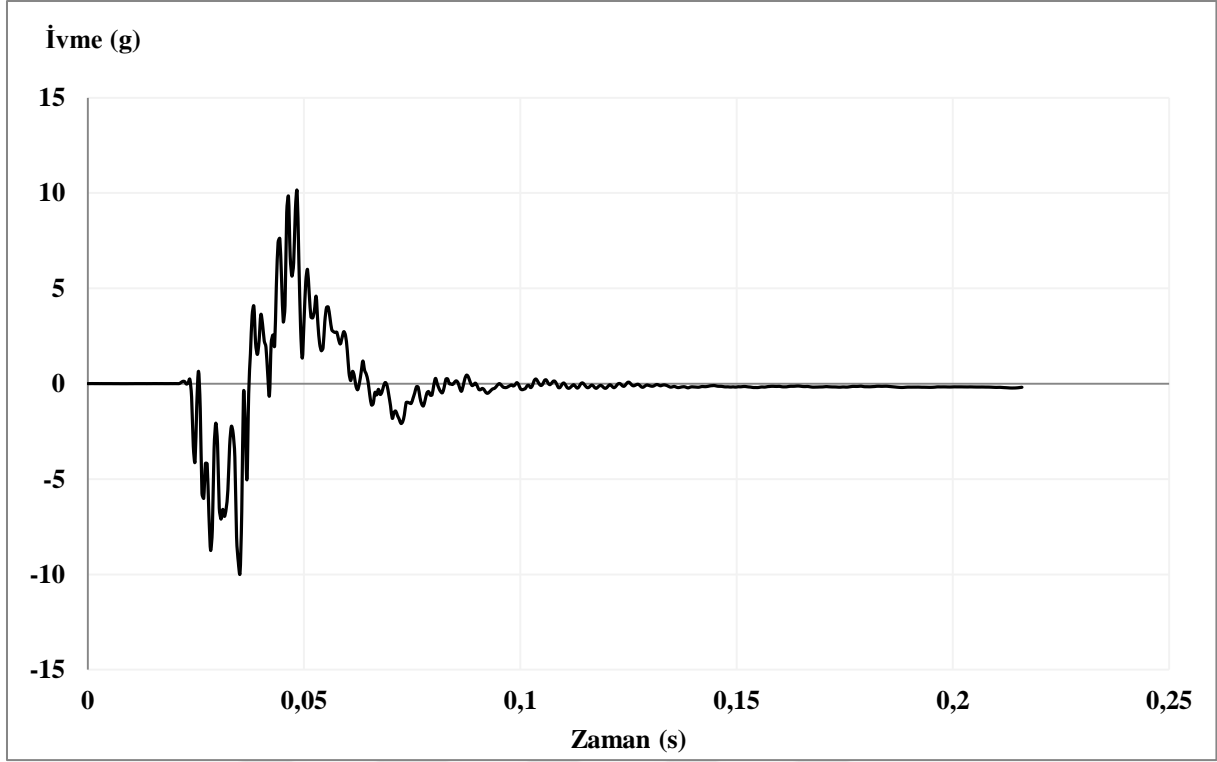


Resim 4.11. Referans deney kazısı

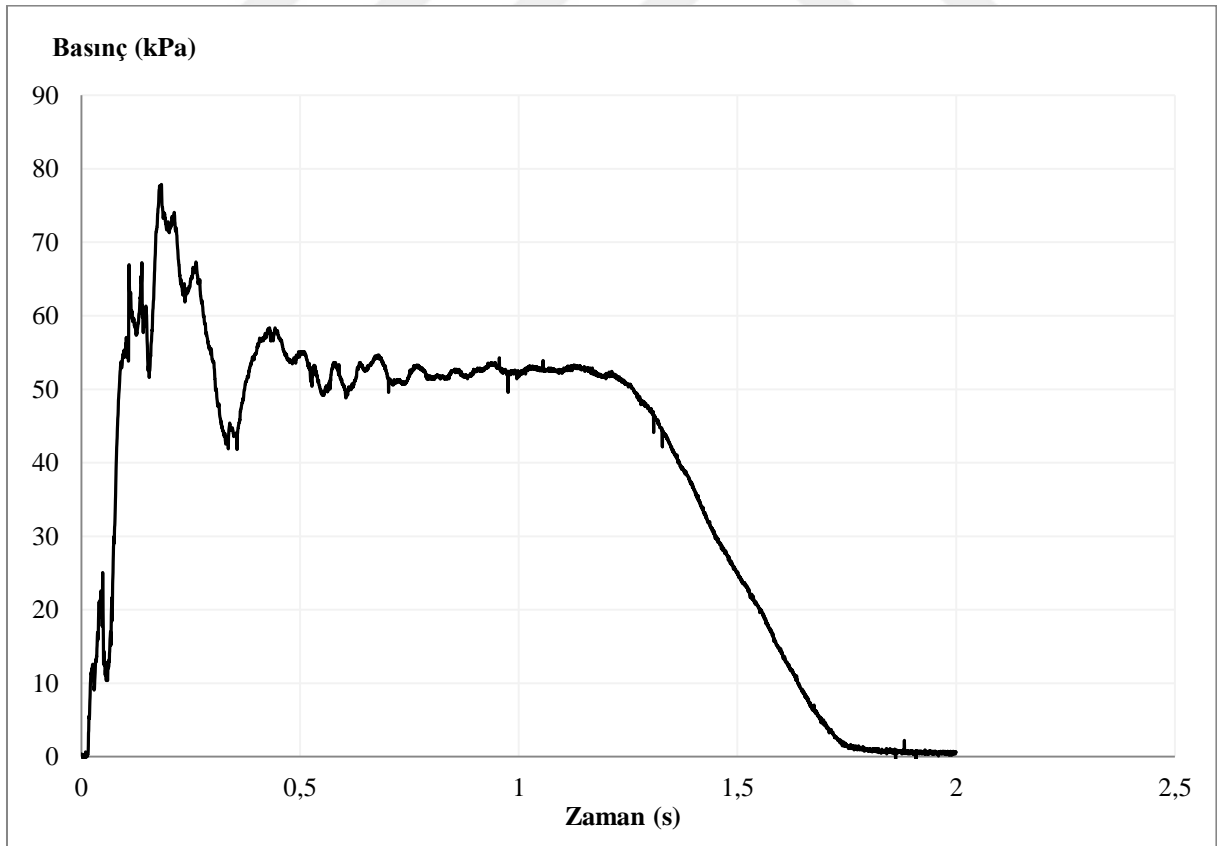
Tüm saha deneyleri sonucunda alınan ölçümler, maksimum değeri verdiği için orta ivmeölçerden ve alt basınçölçerden alınan veriler için değerlendirilecektir. Yapılan diğer deneyler, referans deney sonuçları ile kıyaslanacaktır.

Sahada yapılan referans deney sonucunda, orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değerinin 10,08 g ve alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin 77,87 kPa olduğu görülmüştür.

Deney 1'e ait ivme-zaman, basınç-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



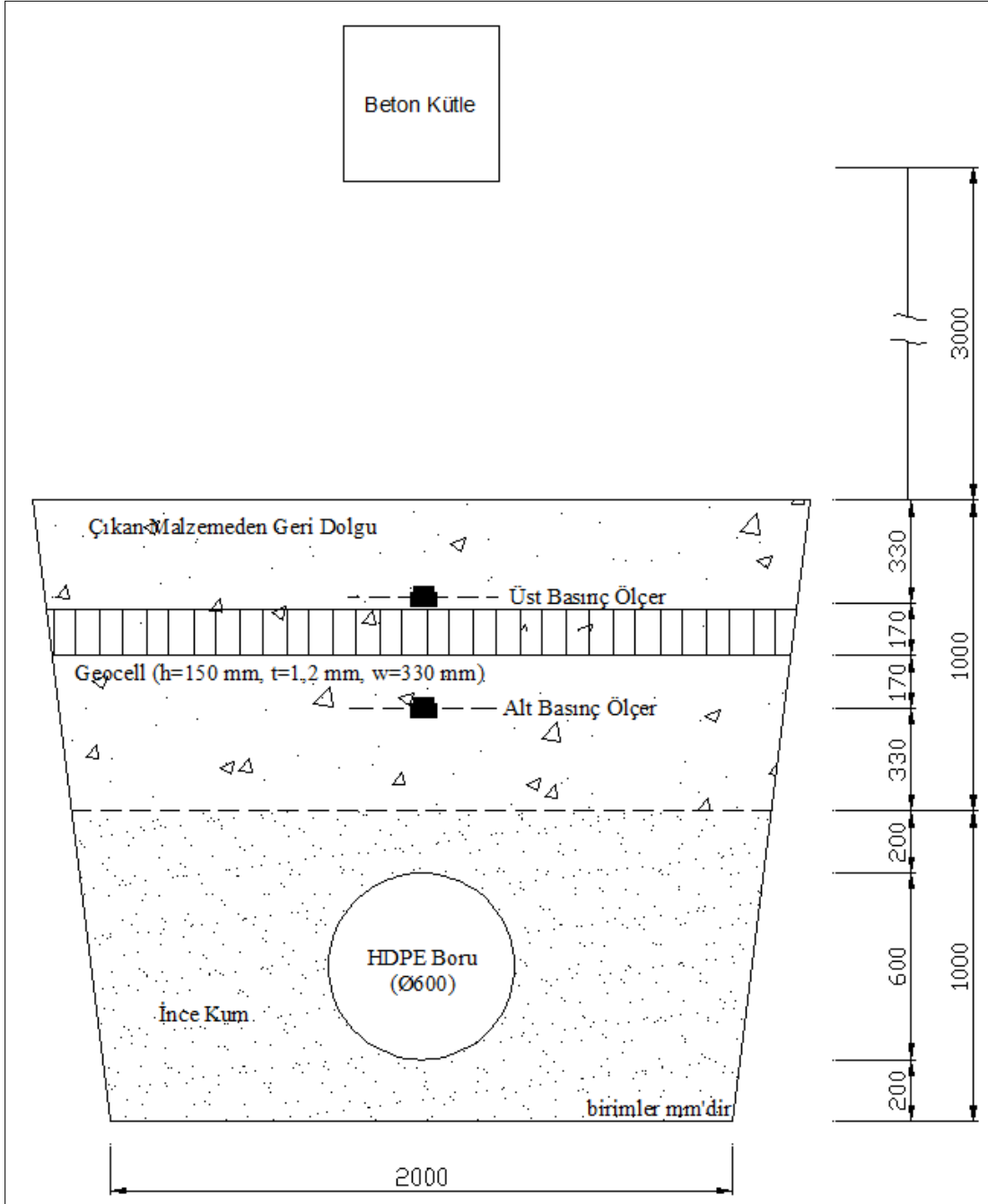
Şekil 4.5. Saha referans deneyi sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği



Şekil 4.6. Saha referans deneyi sonucunda basınçölçerlerden elde edilen basınç-zaman grafiği

Deney 2: Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) güçlendirme elemanı

Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm), kazı üst yüzünden 500 mm derinliğe serilmiştir. Kesit şematığı Şekil 4.7’de gösterilmiş deney uygulaması, Resim 4.12’de görülmektedir.



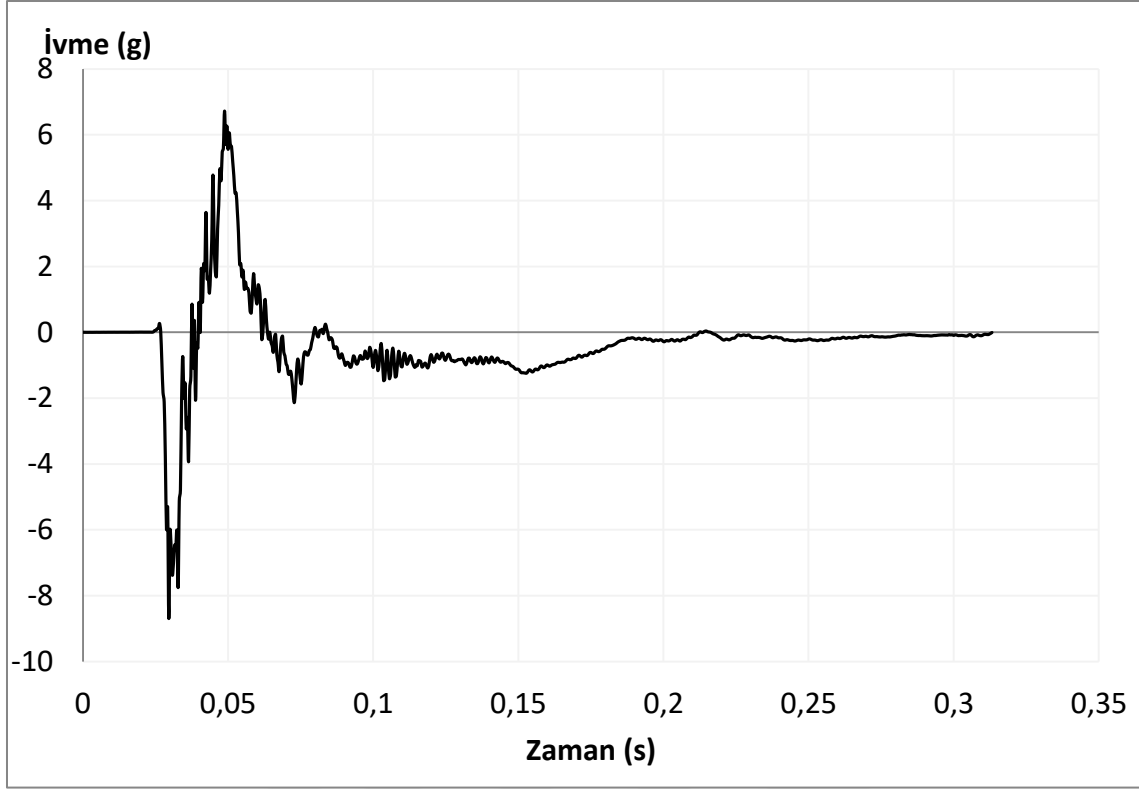
Şekil 4.7. Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit



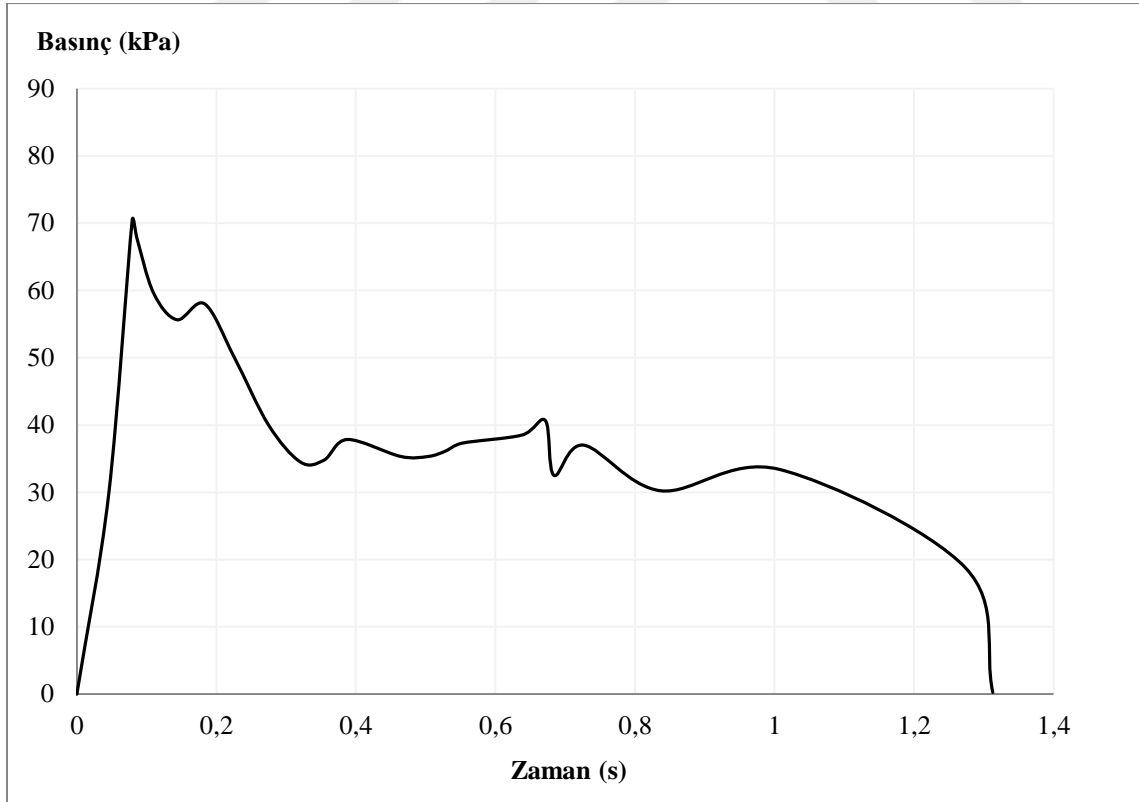
Resim 4.12. Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) uygulanması

Geocell (h=150 mm, t=1,2mm, w=330 mm) (Deney 2)'de yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 6,72 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 33,3 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 70,45 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 9,5 oranında düşüş gözlenmiştir.

Deney 2'ye ait ivme-zaman ve basınç-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



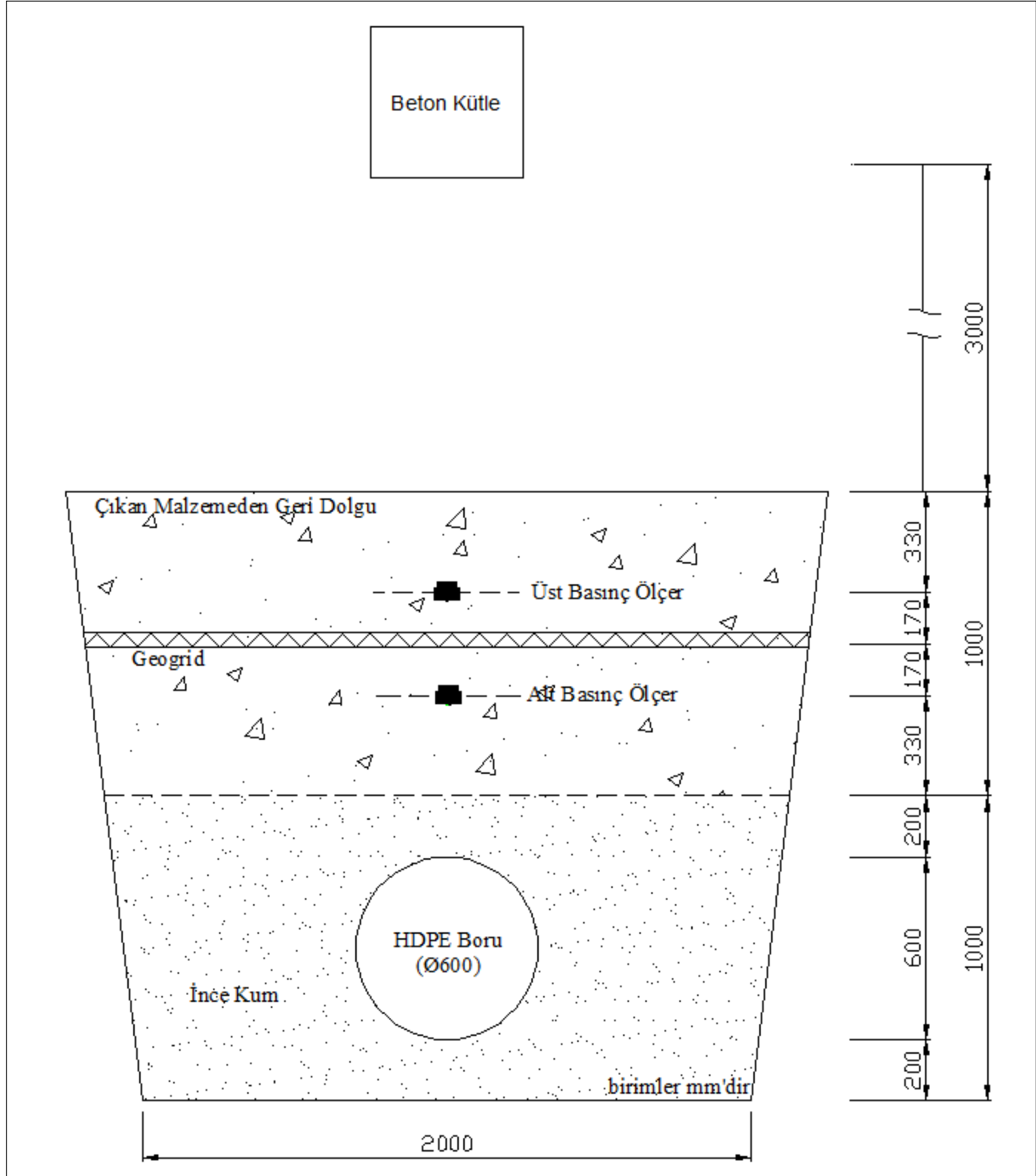
Şekil 4.8. Saha referans deneyi sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafiği



Şekil 4.9. Saha referans deneyi sonucunda alt basınçölçerden elde edilen basınç-zaman grafiği

### Deney 3: Geogrid güçlendirme elemanı

Zemin, ızgara alanı: 40 x 40 mm olan çift eksenli geogrid ile kazı üst yüzünden 500 mm serilme derinliğinde takviye edilmiştir. Kesit şematiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

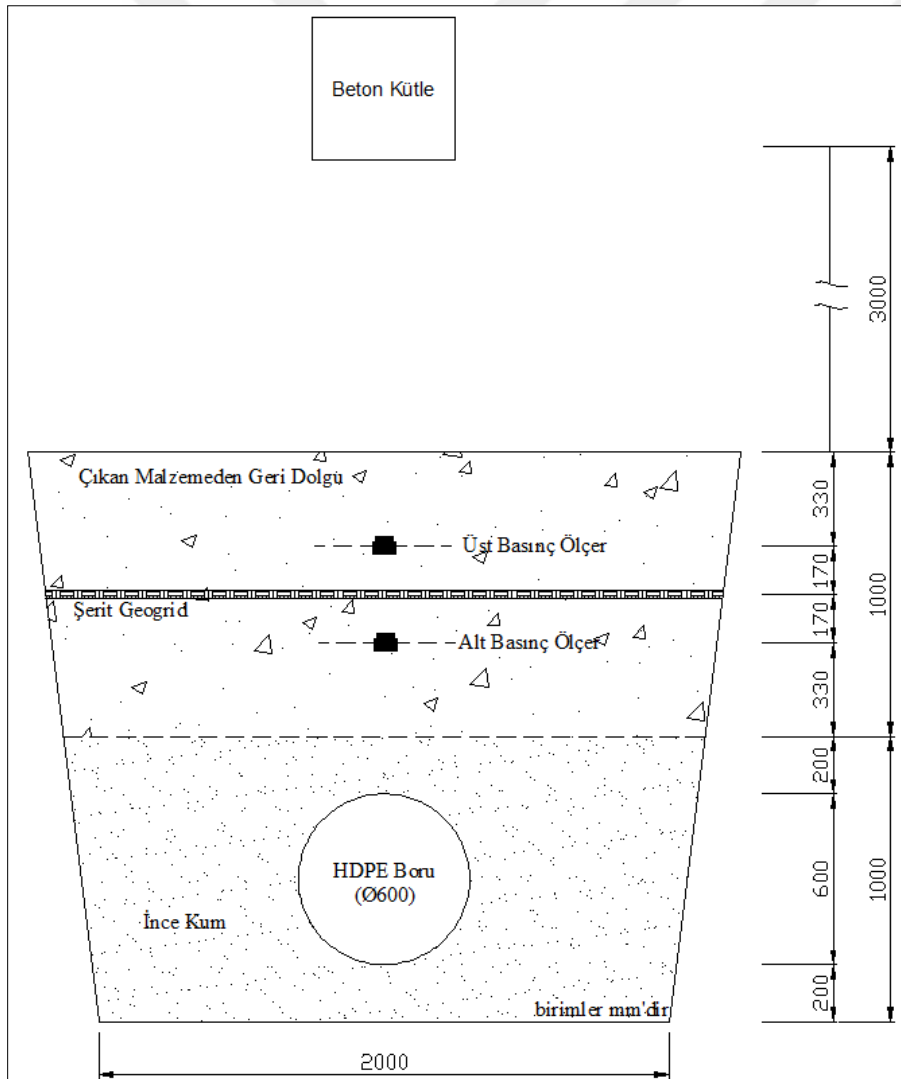


Şekil 4.10. Geogridle güçlendirme yapılmış deneye ait kesit

Geogrid (Deney 3)'de yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 4,03 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 60,0 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 58,78 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 24,5 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 4: Şerit Geogrid güçlendirme elemanı

Zemin, ızgara alanı: 40 x 40 mm ve şerit kalınlığı 10 mm olan şerit geogrid ile takviye edilmiştir. Serilme derinliği kazı üst yüzünden 500 mm'dir. Kesit şematığı Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Şerit geogridle güçlendirme yapılmış deneye ait kesit







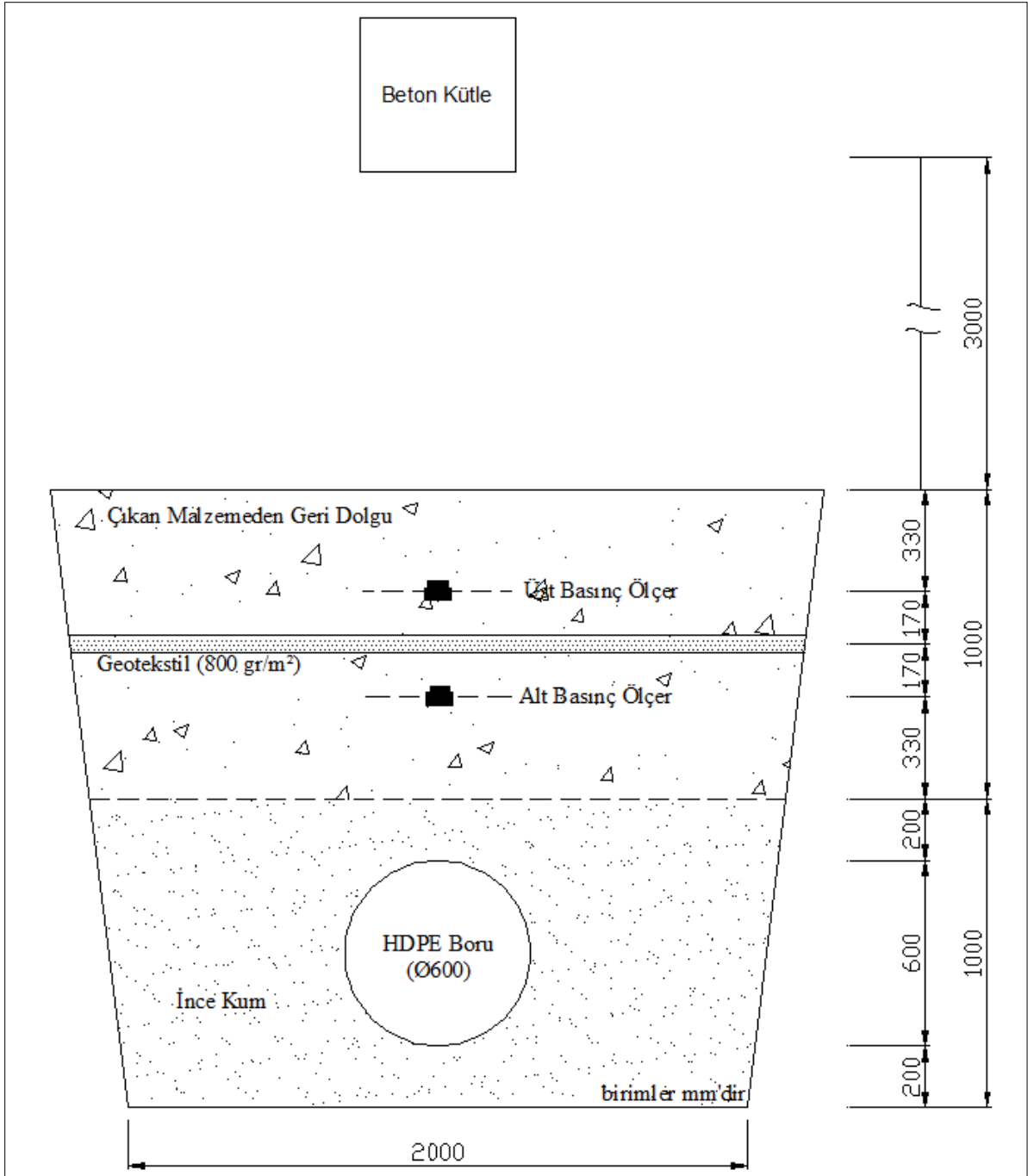
Resim 4.13. Geogrid kompozit uygulanması

Geogrid kompozit (Deney 5)'te yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 2,02 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 79,9 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 45,03 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 42,1 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 6: Geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) güçlendirme elemanı

Zemin, geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) ile takviye edilmiştir. Geotekstil et kalınlığı 5,6 mm olup serilme derinliği kazı üst yüzünden 500 mm'dir. Kesit şematığı Şekil 4.13'de gösterilmiştir.

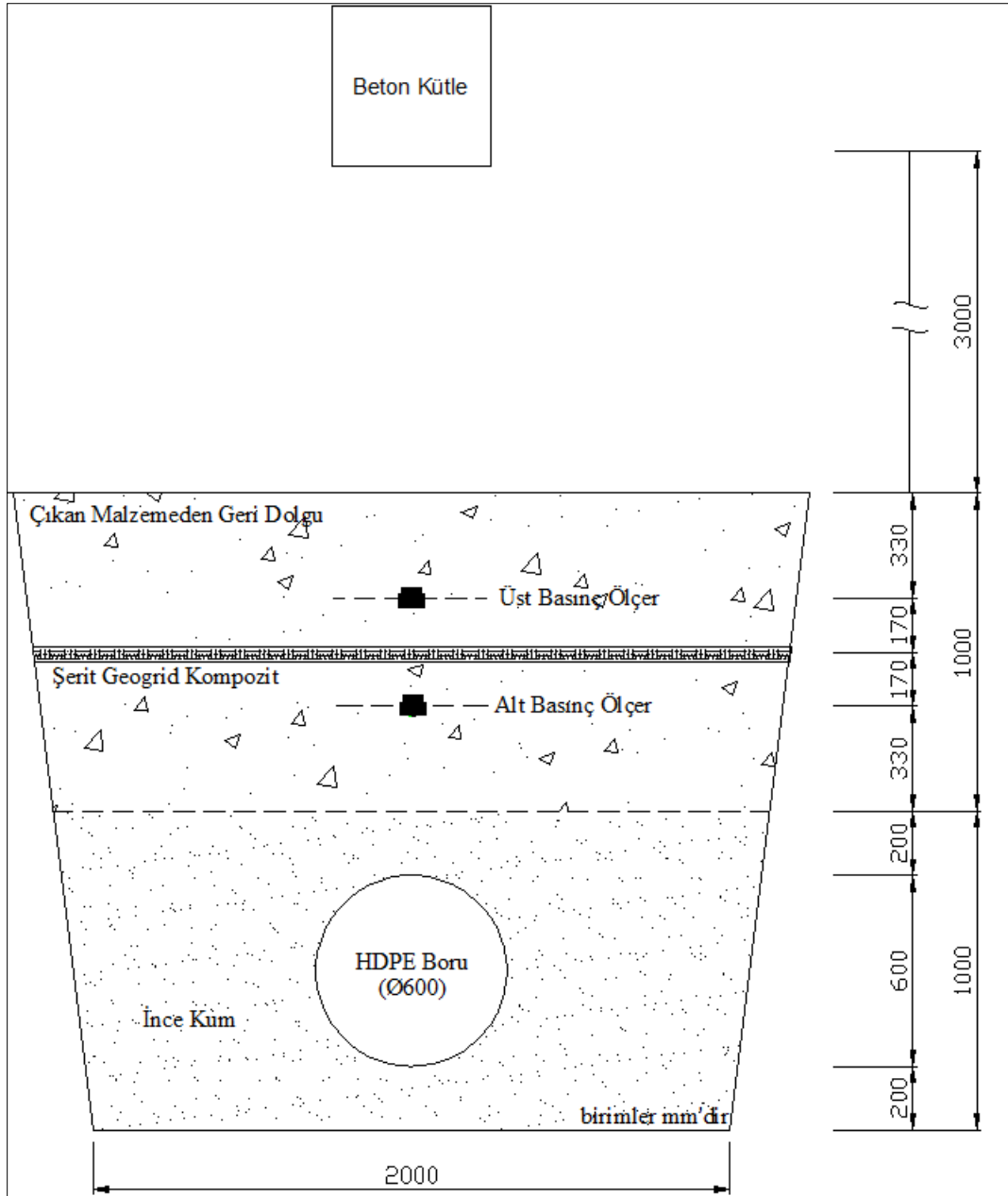
Geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) (Deney 6)'te yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 1,68 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 83,3 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 41,56 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 46,6 oranında düşüş gözlenmiştir.



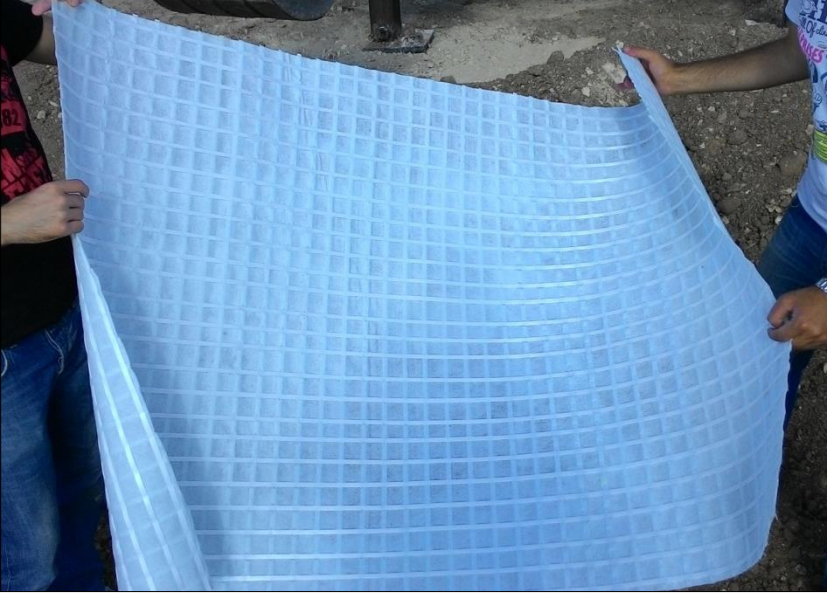
Şekil 4.13. Geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit

### Deney 7: Şerit Geogrid Kompozit güçlendirme elemanı

Zemin, şerit geogrid kompozit ile güçlendirilmiştir. Şerit geogrid gözenek açıklık boyutu 40 x 40 mm, şerit kalınlığı 10 mm ve geotekstil (400 gr/m<sup>2</sup>) et kalınlığı 2,5 mm olan kompozit yapı kazı üst yüzünden 500 mm derinliğe serilmiştir. Kesit şematığı Şekil 4.14'da gösterilmiş şerit geogrid kompozit uygulaması Resim 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Şerit geogrid kompozit ile güçlendirme yapılmış deneye ait kesit



Resim 4.14. Şerit geogrid kompozit uygulaması

Şerit geogrid kompozit (Deney 7)'de yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 4,58 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 54,5 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 59,78 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 23,2 oranında düşüş gözlenmiştir.

#### Deney 8: Geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) güçlendirme elemanı

Zemin, geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) ile takviye edilmiştir. Geotekstil et kalınlığı: 4,2 mm ve serilme derinliği kazı üst yüzünden 500 mm'dir. Kesit şematiği Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

Geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) (Deney 8)'de yapılan ölçümler sonucunda orta ivmeölçerden alınan maksimum ivme değeri 1,83 g olmuştur. Referans deneye göre orta ivmeölçerden alınan ivme değerinde % 81,8 oranında düşüş gözlenmiştir. Alt basınçölçerden alınan maksimum basınç değerinin, 44,59 kPa olduğu görülmüştür. Referans deneye göre alt basınçölçerden alınan basınç değerinde % 42,7 oranında düşüş gözlenmiştir.



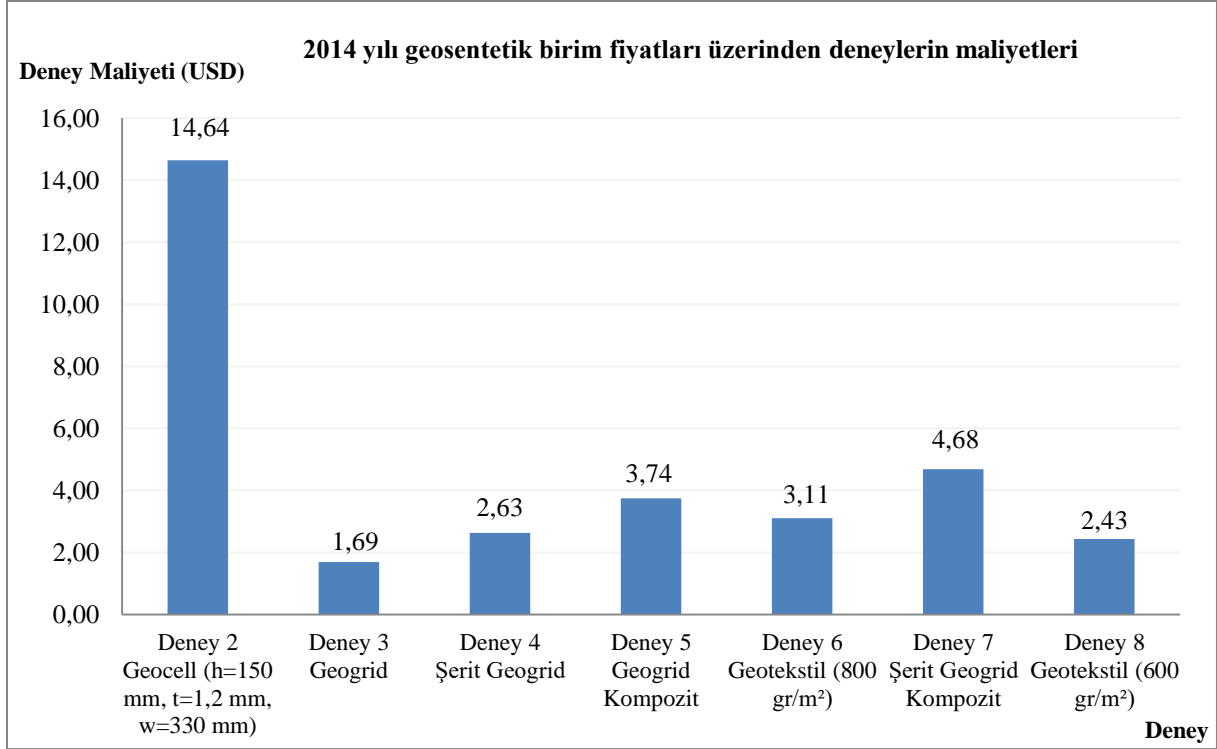
#### 4.8. Saha Deneylerinin Maliyet Analizi

Saha deneylerinin uygulandıkları 2014 yılı birim fiyatları üzerinden üretici firma tarafından sağlanan gider kalemleri ve toplam maliyet tutarları Çizelge 4.7’de görülmektedir. Tüm deneylerin yalnızca kullanılan geosentetik malzeme boyutları üzerinden maliyetleri belirtilmiştir. Sonuçların daha kıyaslanabilir olması bakımından maliyetler Şekil 4.16’da görselleştirilmiştir.

En düşük maliyetli güçlendirme yapısı geogrid olmuştur. Onu, yoğunluğu az olan geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) ve şerit geogrid izlemiştir. Geocell maliyetinin ise diğer tüm geosentetiklerden oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7. 2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları

2014 yılı birim fiyatları üzerinden gider kalemleri ve toplam tutarları (USD)					
İşin Tanımı	Malzeme Bedelleri	İşçilik Bedelleri	Nakliye Bedelleri	Genel Giderler ve Müteahhit Kârı (%25)	Toplam Tutarı
Geotekstil (600 gr/m <sup>2</sup> ) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,64	0,2	0,1	0,49	2,43
Geotekstil (800 gr/m <sup>2</sup> ) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	2,19	0,2	0,1	0,62	3,11
Geogrid serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,05	0,2	0,1	0,34	1,69
Geogrid kompozit serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	2,69	0,2	0,1	0,75	3,74
Şerit geogrid serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	1,80	0,2	0,1	0,53	2,63
Şerit geogrid kompozit serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	3,44	0,2	0,1	0,94	4,68
Geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) serilmesi işinin m <sup>2</sup> bedeli:	8,11	3,5	0,1	2,93	14,64



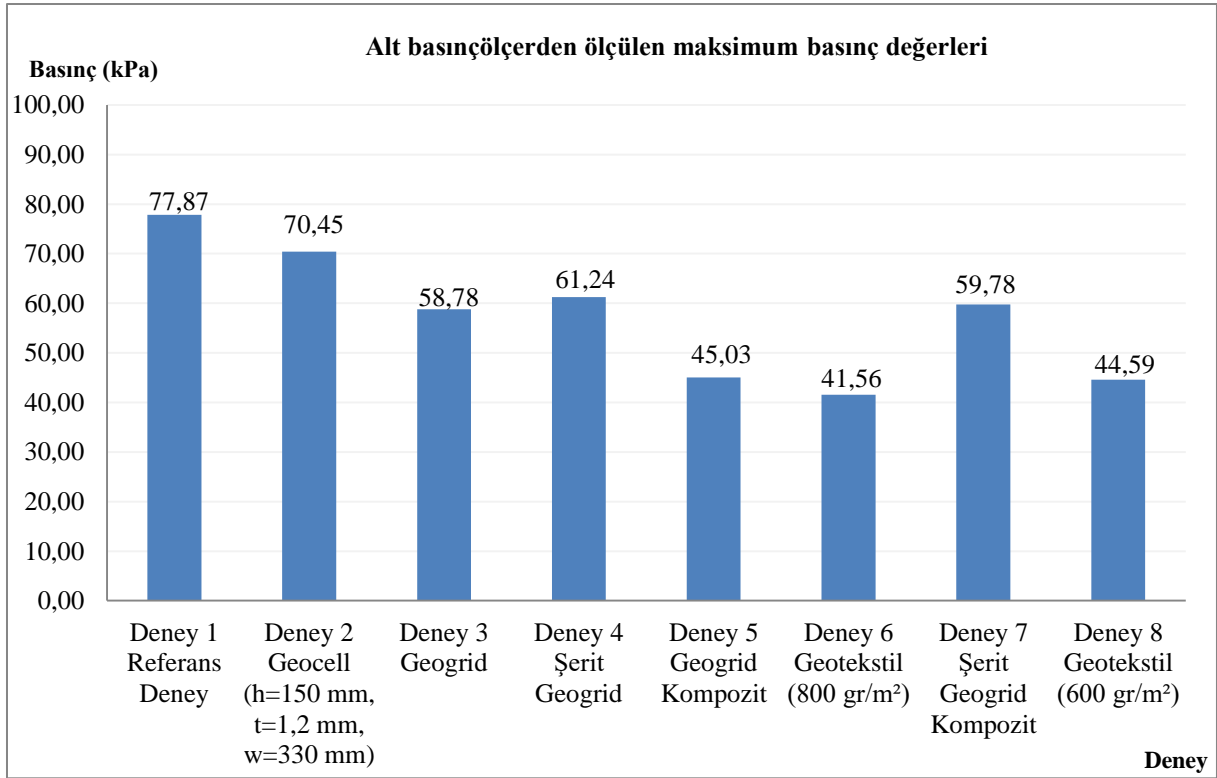
Şekil 4.16. 2014 yılı geosentetik birim fiyatları üzerinden deneylerin maliyetleri

#### 4.9. Saha Çalışmalarının Sonuçlarına ait Değerlendirmeler

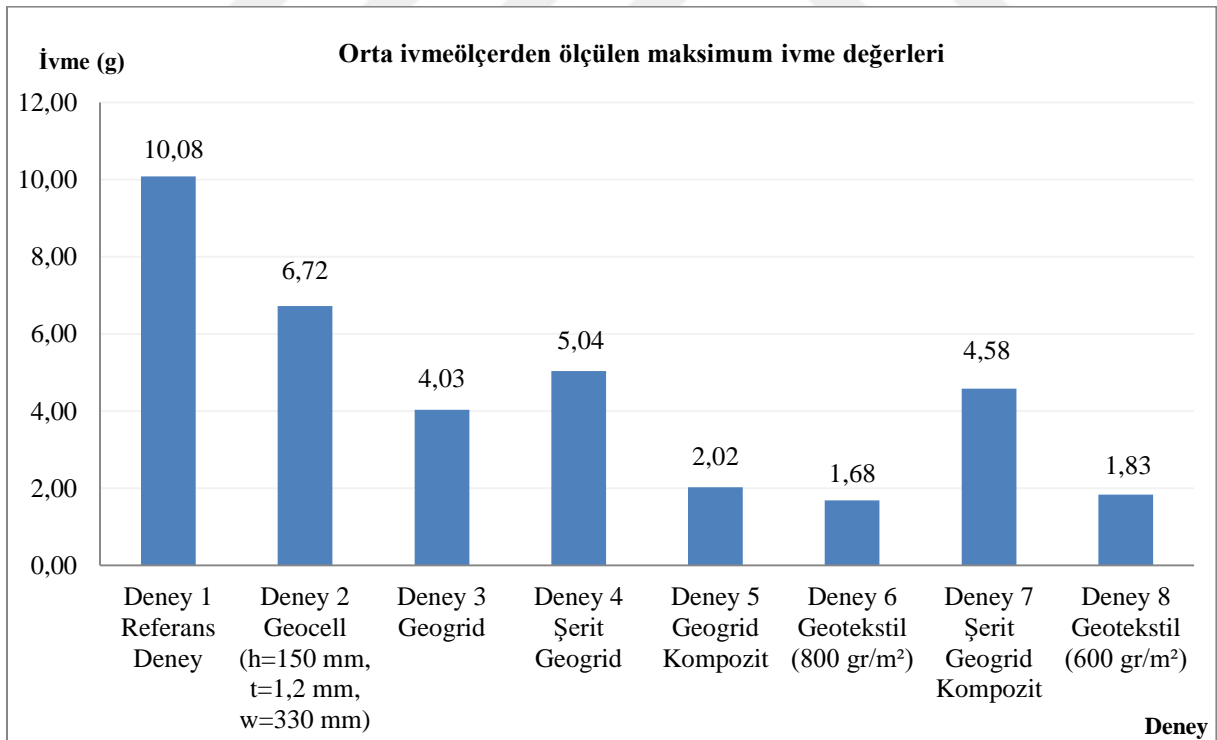
Bu bölümde, tam ölçekli saha deneyleri yardımıyla geosentetikler ile güçlendirilen zeminlerin darbe yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Geosentetiklerin serilme derinliği, zemin türü, ölçüm aletleri, boru özellikleri, beton kütle ve düşme yüksekliği deneyler boyunca değişiklik göstermemiştir. Saha çalışmasında kullanılan geosentetikler; geocell, geogrid, geotekstil, şerit geogrid, geogrid kompozit ve şerit geogrid kompozit olmuştur. Dış çapı 600 mm olan HDPE boru kullanılmıştır.

Referans deney ve kazı üst yüzünden 500 mm serilme derinliğine sahip geosentetik koruyucu tabaka serimi ile gerçekleştirilen saha deneylerinden elde edilen sonuçların (Çizelge 4.8) karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.





Şekil 4.17. Saha deneyleri sonucu ölçülen basınç değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.18. Saha deneyleri sonucu ölçülen ivme değerleri

Geogrid (Deney 3) kullanımının, referans deneye ve geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) (Deney 2)'ye göre ivme ve basınç sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. İvme sönümlenme kapasitesi % 60,0 olan geogrid güçlendirme tabakasının basınç sönümlenme kapasitesi % 24,5 olmuştur.

Geogridin geotekstil ile lamine edildiği, geogrid kompozit (Deney 5) sonucunda ölçülen değerler, geogridin yalnız kullanıldığı duruma göre, lamineli yapısının çok daha verimli çalıştığını göstermiştir. Yani geogrid (Deney 3), geogrid kompozit (Deney 5) yapısında kullanıldığında, ivme sönümlenme kapasitesi % 60,0'tan %19,9 iyileşme ile % 79,9'a çıkmıştır. Benzer şekilde, basınç sönümlenme kapasitesi % 24,5'ten % 17,6 iyileşme ile % 42,1'e yükseltmiştir.

Şerit geogrid (Deney 4) kullanımının, referans deneye ve geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) (Deney 2)'ye göre ivme ve basınç sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. İvme sönümlenme kapasitesi % 50,0 iken basınç sönümlenme kapasitesi % 21,3 olmuştur. Bu sonuçlara göre geogrid (Deney 3) ile güçlendirme yapılmasına göre daha düşük bir performans gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Şerit geogrid kompozit (Deney 7) ivme ve basınç sönümlenme kapasiteleri sırasıyla % 54,5, % 23,2 olarak hesaplanmıştır. Şerit geogrid (Deney 4)'e göre bir miktar yüksek değerler elde edilmiştir. Buna göre geotekstil ile lamine edilen şerit geogridin, ivme ve basınç sönümlenme kapasitesinde sırasıyla % 4,5, % 1,9 iyileşme sağlanmıştır. Şerit geogrid için geotekstil ile kompozit yapı oluşturmanın performansta geogrid kompozit kadar etkili olmadığı söylenebilir. Ayrıca şerit geogrid kompozit güçlendirme elemanı, geogrid kompozit ile güçlendirmeye göre daha zayıf kalmıştır.

Geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) (Deney 8)'de orta ivmeölçerden elde edilen ivme değeri 1,83 g; alt basınçölçerden elde edilen basınç değeri ise 44,59 kPa olmuştur. Et kalınlığı ve yoğunluğu daha fazla olan geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) (Deney 6) ile karşılaştırıldığında geotekstil elemanının, yoğunluğu arttıkça, basınç ve ivme sönümlenme yeteneğinin de arttığı anlaşılmaktadır.

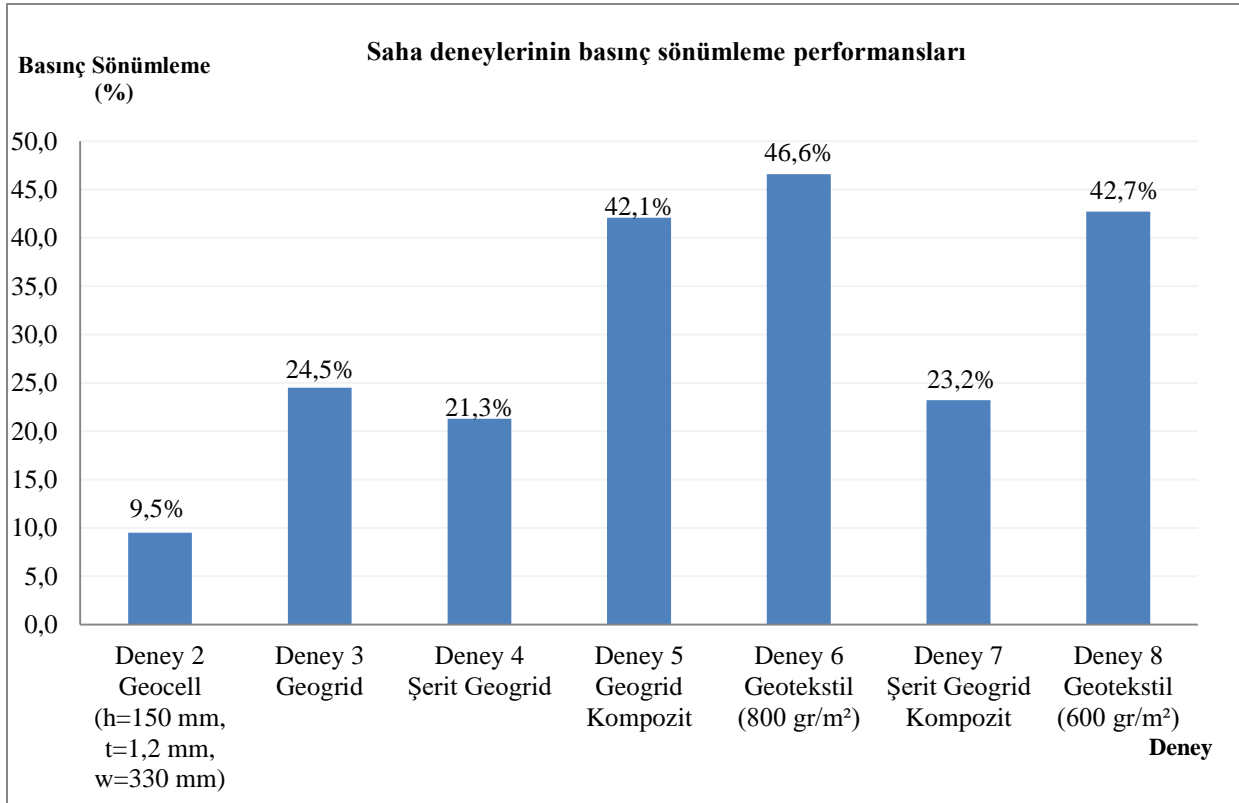
Tüm bu bilgileri göz önüne alarak, deneylerde basınç ve ivme sönümlenmesinde en iyi performans gösteren güçlendirme elemanının geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) olduğu görülmektedir.

Geotekstil koruyucu tabaka performanslarından sonra, en iyi sonucu geogrid kompozit vermiştir (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).

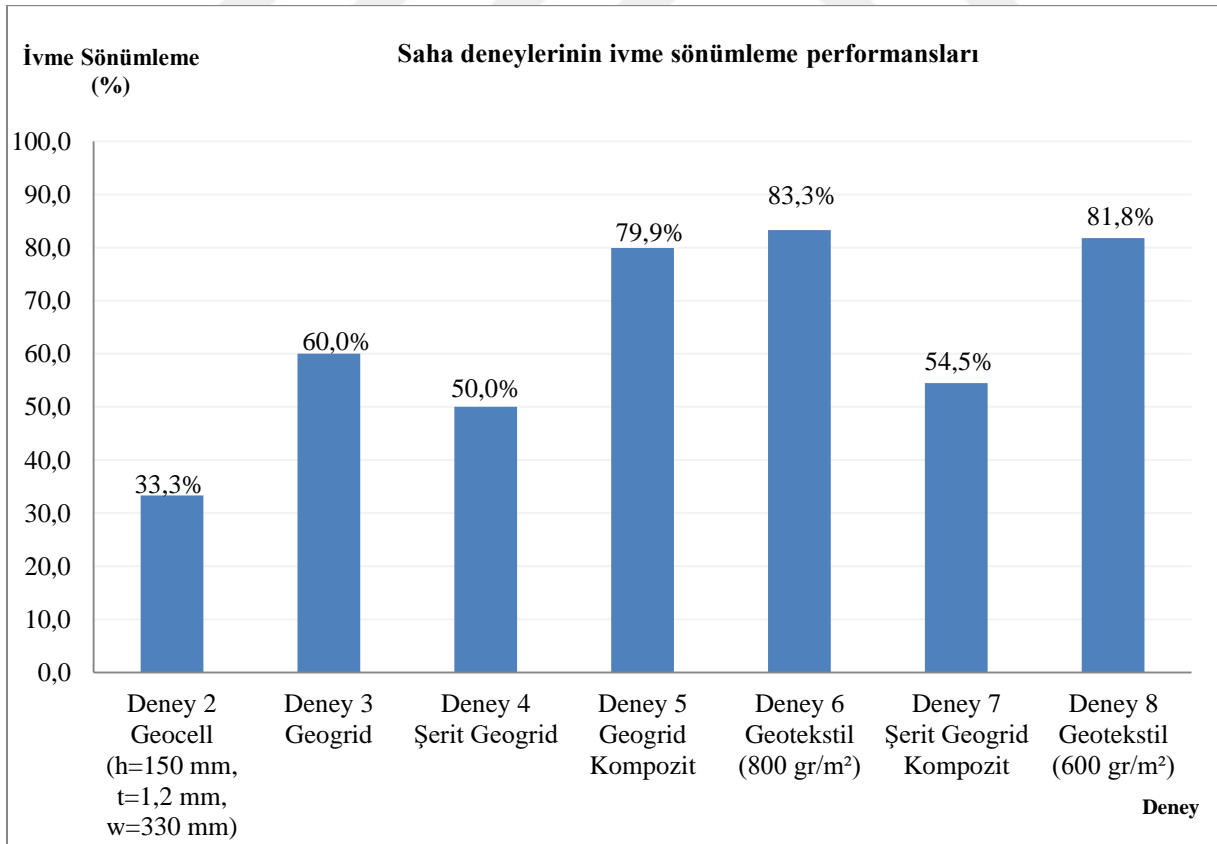
İvme ve basınç sönümlenme oranları dikkate alındığında en düşük performans geocellin (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) olmuştur.

Çizelge 4.8. Saha deneylerine ait sonuçlar

Deney	Geosentetik Çeşidi	İvme (g)		Basınç (kPa)		İvme sönümlenme kapasitesi (%)	Basınç sönümlenme kapasitesi (%)	Toplam Maliyet (USD)
		Orta ivmeölçer	Uç ivmeölçer	Alt basınçölçer	Üst basınçölçer			
1	REFERANS DENEY	10,08	6,03	77,87	37,56	Ref.	Ref.	Ref.
2	GEOCELL (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm)	6,72	3,51	70,45	36,78	33,3	9,5	14,64
3	GEOGRİD	4,03	2,23	58,78	35,45	60,0	24,5	1,69
4	ŞERİT GEOGRİD	5,04	2,71	61,24	34,98	50,0	21,3	2,63
5	GEOGRİD KOMPOZİT	2,02	1,27	45,03	36,45	79,9	42,1	3,74
6	GEOTEKSTİL (800 gr/m <sup>2</sup> )	1,68	0,94	41,56	36,96	83,3	46,6	3,11
7	ŞERİT GEOGRİD KOMPOZİT	4,58	2,53	59,78	37,14	54,5	23,2	2,63
8	GEOTEKSTİL (600 gr/m <sup>2</sup> )	1,83	1,09	44,59	36,85	81,8	42,7	2,43

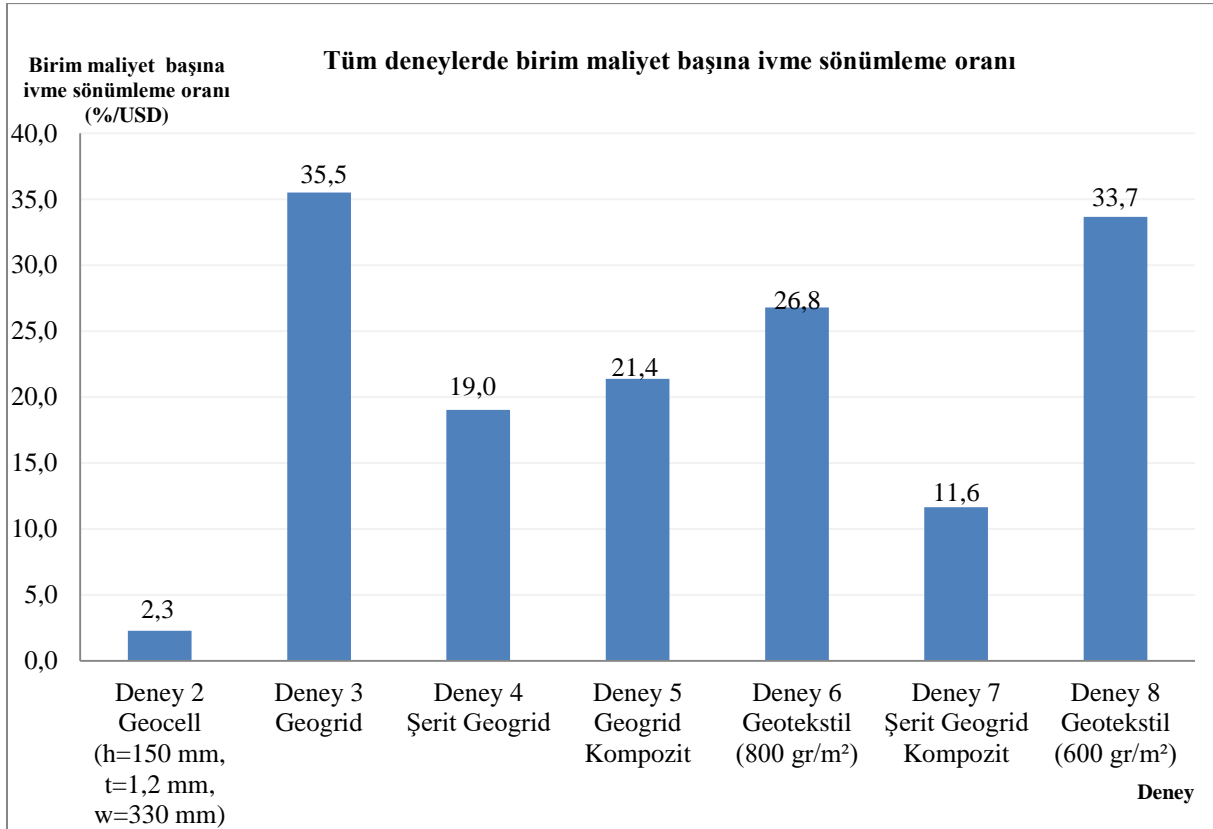


Şekil 4.19. Saha deneylerinin basınç sönümlenme performansları



Şekil 4.20. Saha deneylerinin ivme sönümlenme performansları

Deneylerden elde edilen ivme ölçümlerinin, referans deneye kıyasla ivme değerinde sağladığı iyileştirmeyi gösteren ivme sönümlenme kapasiteleri (%) ve kullanılan geosentetiklerin deney maliyetleri (USD) hesaplanmıştır. Bu iki deney verisinin oranı birim maliyet başına elde edilen verimi verecektir. Hesaplanan sonuçlar Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı (%/USD) değerlendirildiğinde optimum sonucu geogrid (Deney 3) uygulaması sağlamıştır. Geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) (Deney 8) ise ikinci sırada yer almaktadır.



Şekil 4.21. Saha deneylerinde birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı

#### 4.10. Laboratuvar ve Saha Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

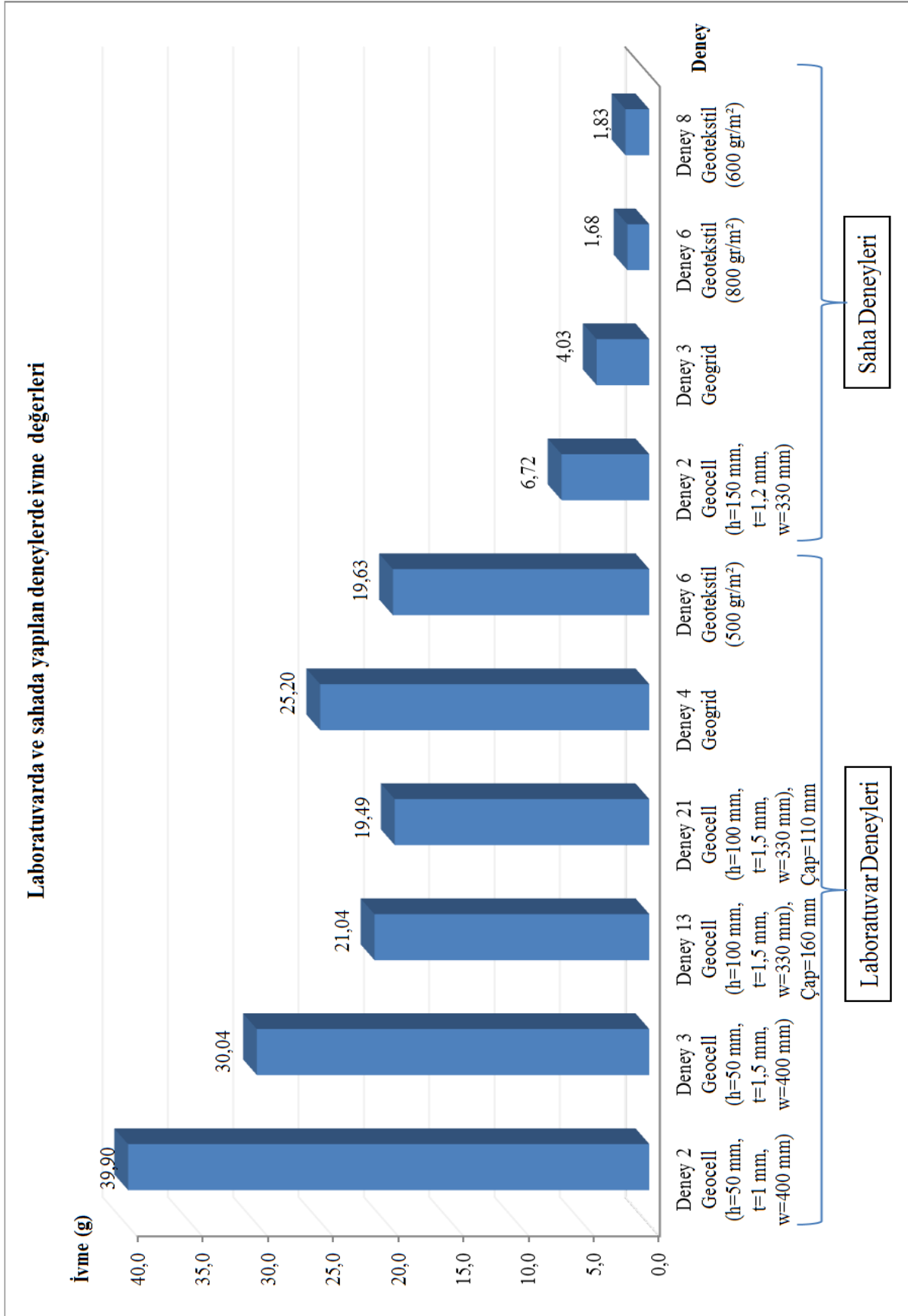
Laboratuvar ve saha deneyleri için benzer biçimde kullanılan koruyucu tabakaların performansları göz önünde bulundurulmuştur. Saha deneylerinde geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) olmak üzere bir; laboratuvar deneylerinde geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm); geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) olmak üzere üç farklı geocell kullanılmıştır. Her iki uygulamada aynı geogrid koruyucu yapı kullanılmıştır. Laboratuvarda geotekstil (500 gr/m<sup>2</sup>); sahada ise geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) ve geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) kullanılmıştır.

Laboratuvarda ve sahada kullanılan bu benzer malzemelerin ivme değerleri ve ivme sönümlenme kapasiteleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmiştir. İvmeölçer ile koruyucu tabaka arasındaki mesafe saha deneylerinde 700 mm, laboratuvar deneylerinde 70 mm, farklı boru kullanılan 21 nolu deneyde ise 120 mm'dir. Bu mesafeler ivme sönümlenme oranlarını etkilediği için değerlendirmeler boru üzerinden alınan ivme sonuçları da dikkate alınarak yapılmıştır.

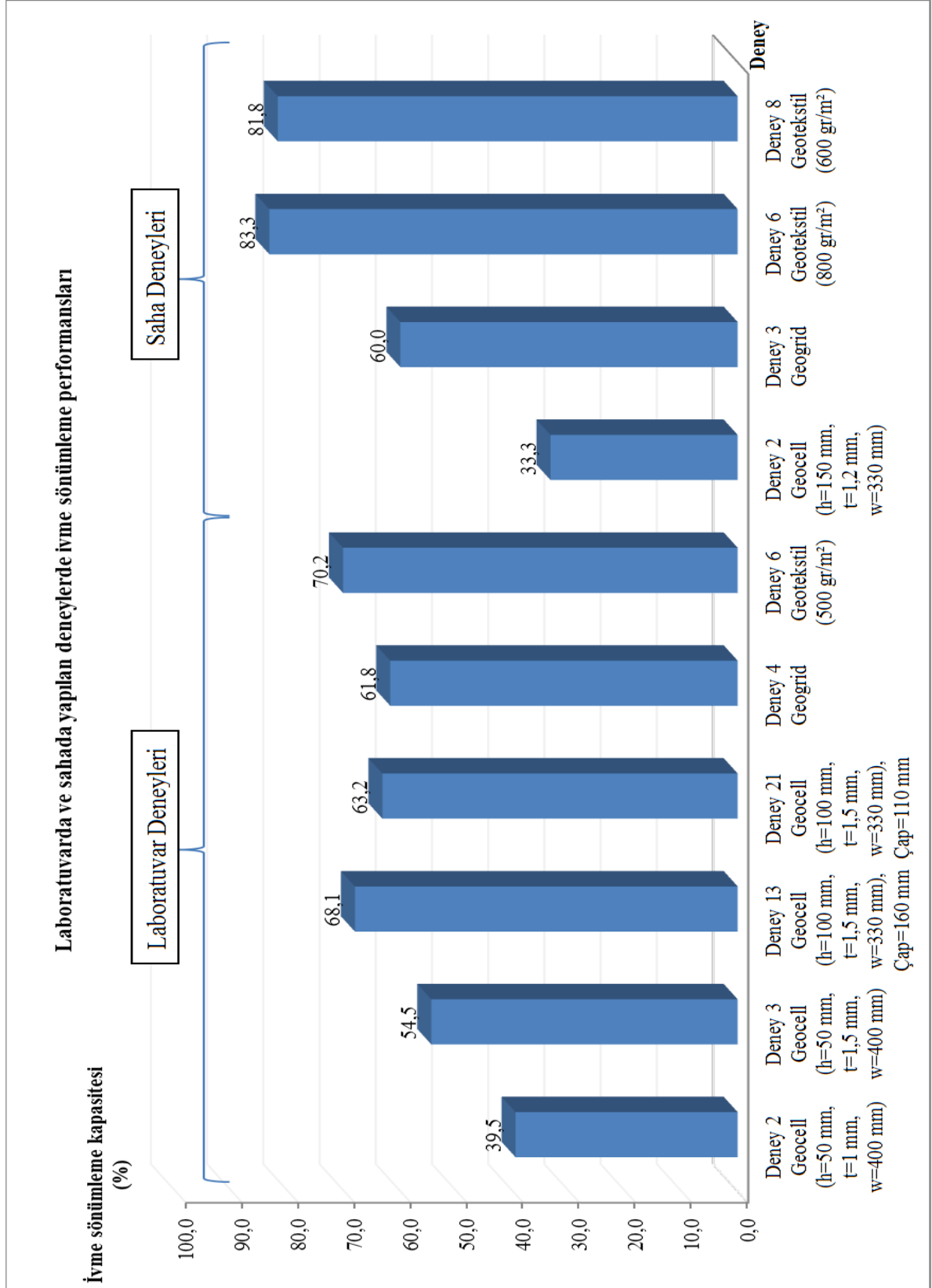
Yapılan laboratuvar ve saha deneylerinde, ortak kullanılan geosentetiklerin sonuçları değerlendirildiğinde geotekstil koruyucu tabakasının performansı diğer deneylere göre daha iyi olmuştur. Performansı, yoğunluğu ile birlikte artış göstermektedir. Geocell koruyucu elemanın ölçülen ivme değeri yüksek olduğu için, düşük performans sergilediği anlaşılmaktadır.

Geocell koruyucu elemanı performans bakımından en düşük başarıyı sergilemişken, geotekstil elemanın performansı geocell ve geogride göre daha yüksek olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum hem laboratuvar hem de saha çalışmalarında desteklenmiştir. Malzemelerin gösterdikleri bu benzer performans sıralaması, güçlendirme malzemesinin özelliklerinin, çevre etkenlerinden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Saha deneylerinden elde edilen ivme değerindeki düşüşün, birim maliyet başına ne kadar fayda sağladığını görebilmek için, "birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" değerlendirildiğinde en verimli uygulamanın geogrid kullanılması ile sağlandığı görülmektedir (Bkz. Şekil 4.21). Bu sonuç tüm laboratuvar deneyleri için "birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" değerlendirildiğinde elde edilen sonuçla aynı çıkmıştır (Bkz. Şekil 3.29). Böylelikle maliyet ve fayda düşünöldüğünde geogrid güçlendirme elemanının verimli bir zemin güçlendirme elemanı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.22. Laboratuvarda ve sahada kullanılan geosentetiklerin ivme değerleri



Şekil 4.23. Laboratuvar ve sahada kullanılan geosentetiklerin ivme sönümlenme performansları



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, çeşitli kombinasyonlarda geosentetikler ile güçlendirilen zemine gömülü boruların darbe yüklemesi altındaki davranışları incelenmiştir. Uygulanan darbe yükü sonucunda boruya aktarılan ivmenin ölçümü yapılmıştır. İvme değerlerinin yanı sıra, maksimum deplasman, maksimum yük, geosentetik tabakanın enerji ve basınç sönümlenme yetenekleri, maliyetler de dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ve arazide deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneyleerde, geosentetiklerin çeşitleri, kullanım şekilleri, serilme derinlikleri ve boru çapları değişken olarak seçilerek, darbe yüklerinin, geosentetikler vasıtası ile korunan gömülü boruya etkilerinin ortaya çıkartılması öngörülmüştür. Çalışmada kullanılan geosentetikler, çeşitli yükseklik ve et kalınlıklarında geoceller, geogrid, geogrid kompozit, geotekstil, geonet 2D, geonet 3D, şerit geogrid, şerit geogrid kompozitlerdir. Geosentetik serilme derinliği, deney tankının üst yüzeyinden geosentetiğin alt yüzüne olan yaklaşık uzaklıktır.

Laboratuvar ortamında uygulanan deneyleerde, 110 mm ve 160 mm dış çaplı, 1000 mm uzunluğunda HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) borular, değişken derinliklerde tek tabaka geosentetik serimi, çift tabaka geosentetik serimi ve bu geosentetiklerin boru üzerine bir kat ve dört kat sargılaması yapılarak darbe etkileri altında test edilmiştir. Kullanılan güçlendirme elemanları, geocell, geogrid, geotekstil, geonet 2D ve geonet 3D'dir. 400 mm yüksekliğindeki deney tankı, 500 mm genişliğinde ve 1000 mm uzunluğundadır. 500 mm yükseklikten düşürülen 5,25 kg kütleli çekiç tarafından sisteme uygulanan enerji 25,7512 Joule'dür. Boru altına temel tabakası olarak 50 mm yüksekliğinde % 40 rölatif sıklıkta içsel sürtünme açısı 32° olan iyi derecelendirilmiş deney kumu yerleştirilmiştir. Tüm deneyleerde boru altındaki temel tabakası kalınlığı sabittir. HDPE boru deney tankının tam ortasına iki yandan da eşit mesafe kalacak şekilde yerleştirilmiştir. İki adet referans deney, on adet tek kat geosentetik koruyucu tabaka serimi, on bir adet çift kat geosentetik koruyucu tabaka kombinasyonu serimi, altı adet boru etrafına sargılama ile geosentetik koruyucu tabaka uygulamak üzere toplamda 29 adet laboratuvar deneyi yapılmıştır.

Laboratuvar çalışmalarında, 160 mm dış çaplı boru dikkate alınarak, 120 mm derinliğe serilen tek tabaka geosentetik kullanımı ile gerçekleştirilen deneylerde % 72,9 ivme sönümlenmesi; 0,53 mm maksimum deplasman ve 25,11 Joule enerji sönümlenme verileri ile en başarılı uygulama geonet 3D kullanımı ile olmuştur. Sadece tek tabakalı geosentetik serimi deneylerinde kullanılan geosentetik miktarları dikkate alınarak 2014 birim fiyatı üzerinden hesaplanmış deney maliyetlerinin kıyaslanması sonucunda, en maliyetli deney, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) malzemesi kullanılan deneydir. Enerji sönümlenme ve ivme sönümlenme açısından en başarılı uygulama olan geonet 3D ise ekonomik açıdan dördüncü sırada yer almıştır.

Maliyeti yükselten geocell koruyucu tabakasının kullanıldığı deneyler ile en düşük maliyetli geogrid kullanılan deney sonuçları karşılaştırıldığında, ivme sönümlenme kapasitesinin geogrid malzemesi kullanımı ile daha yüksek çıktığı görülmektedir. Maliyet ve fayda ilişkisini daha iyi görebilmek için “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” hesaplanmıştır. Bu yönden değerlendirildiğinde, tek tabakalı serimlerde optimum uygulamanın geogrid kullanılması ile sağlandığı görülmüştür.

Güçlendirme elemanları ile tank üst yüzünden 120 mm derinlikte çift tabakalı güçlendirme yapıldığında, % 88,0 ivme sönümlenme kapasitesi ile geonet 3D ve geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) kombinasyonu en başarılı performansı sergilemiştir. Geogridin, geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ile birlikte kullanıldığı deneyin ivme değeri ise en yüksek çıkarak, en az ivme sönümleyen sistem olmuştur. 2014 yılı birim fiyatları dikkate alındığında geonet 3D ve geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) kombinasyonu en maliyetli; geogrid ve geotekstil kombinasyonu ise en ekonomik güçlendirmeyi sağlamıştır. Çift tabaka serim deneylerinde ivme sönümlenme performansının, birim maliyet başına ne kadar fayda sağladığını görebilmek için; “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum uygulamanın geogrid ve geotekstil kombinasyonu kullanılması ile sağlandığı görülmüştür.

Tek ve çift tabaka güçlendirme elemanları, 120 mm derinliğe serilerek uygulanan deneylerde, “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum sonucu tek tabaka serilen geogrid uygulamasının sağladığı görülmüştür.

Tank üst yüzünden 120 mm derinliğe geotekstil ve geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) birlikte serilerek yapılan deney, güçlendirme elemanları 60 mm derinliğe serilerek tekrarlanmıştır. Boru üzerinde meydana gelen ivme ve deplasman değerlerinin, koruyucu tabaka yüzeye yaklaştıkça azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde geonet 3D ve geotekstil güçlendirme elemanları her iki derinliğe birlikte serilerek darbe yükleme deneyleri gerçekleştirildiğinde, serilme derinliği azaldıkça boru üzerindeki ivme değerinin düştüğü, enerji sönümlenme kapasitesinin arttığı ve buna bağlı olarak koruma performansının arttığı sonucu yine doğrulanmaktadır.

160 mm çaplı boru, geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) tabakası 120 mm ve 60 mm derinliklere serilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, 110 mm çaplı boru, geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) tabakası 200 mm ve 120 mm derinliklere serilerek darbe yüklemesi altında test edilmişlerdir. Amaç, tüm deney sabitleri aynı kalmak üzere, geocell serilme derinliği değiştirildiğinde, performanslarını karşılaştırabilmektir. Geosentetik serilme derinliği azaldıkça ivme ve deplasmanın azaldığı, koruma performansının arttığı sonucu tekrar elde edilmiştir. Geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) aynı zamanda boru çapı değiştirilerek teste tabi tutulmuş, böylece boru ile geocell tabakası arasındaki uzaklığın etkisi incelenmiştir. Diğer faktörler sabit kalmak koşulu ile boru çapı değiştirildiğinde, boru üst yüzünde bulunan ivmeölçer ile koruyucu yapı arasındaki mesafe arttığı için enerji sönümlenme kapasitesinin de arttığı görülmüştür.

İki adet geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) tabakasından biri H=90 mm, diğeri H=190 mm derinliğe serildiklerinde ivme sönümlenme kapasitesi % 67,0 olmuştur. H=90 mm'deki geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) serilme derinliği aynı kalmak üzere ve H=190 mm'ye geotekstil serilerek tekrarlanan deney için ivme sönümlenme kapasitesi % 85,9 olarak hesaplanmıştır. "Birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" ve enerji sönümlenme kapasiteleri dikkate alındığında, geotekstil ve geocell elemanlarının birlikte kullanıldığı güçlendirme yapısı, iki geocell tabakasının kullanıldığı yapıdan daha başarılı performans sergilemiştir.

Deney şartları aynı tutulmak koşulu ile geocell et kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkartılarak yapılan deneyler, boru üzerinde ölçülen ivme ve deplasman değerinin düştüğünü yani koruma performansının arttığını göstermiştir.

Geonet 2D'nin boru çevresine tek kat ve dört kat sargılanması ile yapılan deneyler karşılaştırıldığında tek kat sargılama ile yapılan deneyde, boru üzerinde ölçülen ivme değerinde referans deneye göre düşüş % 76,6 iken, dört kat sargılama ile yapılan deneyde bu düşüş % 83,0 olmuştur. Geotekstil ve geonet 3D sargılamalarında da, sargılama sayısını artırmak ivme değerindeki düşüşü oldukça artırmışken, enerji sönümlenme kapasitelerinde bir iyileşme olmakla birlikte çok büyük farklar oluşmamıştır. Buna ek olarak geotekstil dört kat sarılsa da, boru kalkanı adı ile anılan geonet 2D (rockshield) için tek kat sargılama ile elde edilen ivme değerine ancak yaklaşabilmiştir. Sargılama sayısını artırmanın beklenildiği üzere maliyeti artıracığı düşünülürse, 2014 yılı birim fiyatları için geotekstil daha ekonomik olmasına rağmen, geonet 2D ve geonet 3D'ye göre daha düşük performans sergilemiştir. Yalnızca sargılama yapılmış deneylerden elde edilen ivme değerindeki düşüşün, birim maliyet başına ne kadar fayda sağladığını görebilmek için "birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" değerlendirildiğinde optimum uygulamanın geonet 2D kullanılarak sargılama yapılması ile sağlandığı görülmüştür.

Sargılama tekniği ile kullanılan geosentetiklerin tek tabaka serilerek gösterdikleri performanslar birlikte değerlendirildiğinde, en düşük deplasman ve en yüksek ivme sönümlenme kapasitesi açısından geonet 2D (rockshield) kullanılarak dört kat sargılama yapılması en başarılı uygulama olmuştur. Buna göre, geonet 2D (rockshield) için sargılama tekniği uygulamadaki kullanımıyla uyumlu bir sonuç vermiş ve tabaka şeklinde serilmesinden çok daha iyi performans sergilemiştir. Geotekstilin tek kat sargılanması sonucu en kötü performans elde edilmişken bunu geotekstilin tek tabaka serilmesi izlemektedir. Deney performansına karşın sonuçlar maliyetle birlikte düşünüldüğünde, geonet 2D, geonet 3D ve geotekstil malzemelerinin sargılama ve tek tabaka serim deneylerinde "birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı" bakımından optimum sonucu tek tabaka serilen geotekstil uygulamasının sağladığı görülmüştür.

Tüm laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm) ve geotekstil elemanlarının birlikte yüzeye daha yakın (60 mm'de) uygulanması; 5,48 g ivme değeri; % 91,7 oranındaki ivme sönümlenme; 0,21 mm maksimum deplasman ve 25,69 J enerji sönümlenme kapasitesi açısından en başarılı uygulama olmuştur.

Tüm laboratuvar deneylerinde birim maliyet başına, koruyucu tabakanın ivme sönümlenme kapasitesi, “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” olarak değerlendirildiğinde, optimum uygulamanın 120 mm derinliğe geogrid serilmesi ile sağlandığı görülmüştür.

Sahada yapılan tam ölçekli deneylerde, 600 mm dış çaplı 2000 mm uzunluğundaki HDPE boru, kazı üst yüzünden 500 mm tek tabaka geosentetik serimi ve kompozit yapıyla geosentetik serimi yapılarak darbe etkileri altında test edilmiştir. Kazı çukuru 2000 mm derinlikte, 2000 mm genişlikte ve 4000 mm uzunluktadır. 500 mm kenar uzunluğuna sahip olan küp şeklindeki betonarme kütle, 3000 mm yükseklikten düşürülerek darbe yükleme testleri yapılmıştır. Bir adet referans deney, yedi adet tek tabaka geosentetik koruyucu eleman serimi uygulamak üzere toplamda 8 adet saha deneyi yapılmıştır. Boru üzerindeki ivmeölçerlerden ve zemine yerleştirilen basınçölçerlerden zamana bağlı darbe etkisi altında veriler alınmıştır.

Saha deneylerinden elde edilen sonuçlara göre geogrid kullanılan deney performansının, referans deneye ve geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) kullanılan deneye göre daha iyi olduğu görülmüştür. İvme sönümlenme kapasitesi % 60,0 olan geogrid güçlendirme tabakasının basınç sönümlenme kapasitesi % 24,5 olmuştur.

Geogrid elemanının geotekstil elemanı ile lamine edildiği durumda elde edilen geogrid kompozit güçlendirme elemanı kullanılan deney sonucunda %79,9 ivme, % 42,1 basınç sönümlenme değeri hesaplanmıştır. Bu sonuç geogridin yalnız kullanıldığı duruma göre, lamineli yapısının çok daha verimli çalıştığını göstermiştir.

Şerit geogrid kullanımının, referans deneye ve geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) kullanılan deneye göre ivme ve basınç sönümlenme kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. İvme sönümlenme kapasitesi % 50,0 iken basınç sönümlenme kapasitesi % 21,3 olmuştur. Bu sonuçlara göre geogrid ile güçlendirme yapılmasına göre daha düşük bir performans gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Şerit geogrid kompozit ivme ve basınç sönümlenme kapasiteleri sırasıyla % 54,5, % 23,2 olarak hesaplanmıştır. Şerit geogrid deneysel çalışmasına göre bir miktar yüksek değerler elde edilmiştir. Buna göre geotekstil ile lamine edilen şerit geogridin, ivme ve basınç sönümlenme kapasitesinde sırasıyla % 4,5, % 1,9 iyileşme sağlanmıştır. Şerit geogrid için

geotekstil ile kompozit yapı oluşturmanın performansta geogrid kompozit kadar etkili olmadığı söylenebilir. Ayrıca şerit geogrid kompozit güçlendirme elemanı, geogrid kompozit ile güçlendirmeye göre daha zayıf kalmıştır.

600 gr/m<sup>2</sup> yoğunluğa sahip geotekstil, et kalınlığı daha fazla olan 800 gr/m<sup>2</sup> yoğunluklu geotekstilin kullanıldığı deney ile karşılaştırıldığında, geotekstil elemanının et kalınlığı ve yoğunluğu arttıkça, basınç ve ivme sönümlenme yeteneğinin de arttığı anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak saha deneylerinde basınç ve ivme sönümlenmesinde en iyi performans gösteren güçlendirme elemanının geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) olduğu görülmüştür. Geotekstil koruyucu tabaka performanslarından sonra en iyi sonucu geogrid kompozit vermiştir. Yine ivme ve basınç sönümlenme oranları dikkate alındığında en düşük performans geocellin (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) olmuştur. En düşük maliyetli güçlendirme yapısı geogrid olmuştur. Onu, sırasıyla yoğunluğu az olan geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) ve şerit geogrid izlemiştir. Geocell maliyetinin ise diğer tüm geosentetiklerden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Saha deneylerinden elde edilen ivme değerindeki düşüşün, birim maliyet başına ne kadar fayda sağladığını görebilmek için, “birim maliyet başına ivme sönümlenme oranı” değerlendirildiğinde optimum sonucu geogrid uygulaması sağlamıştır. Bu sonuç, laboratuvar deneyleri için elde edilen sonuçla aynı çıkmıştır. Böylelikle maliyet ve fayda düşünüldüğünde, geogrid güçlendirme elemanının verimli bir zemin güçlendirme elemanı olduğu söylenebilir.

Laboratuvar ve saha deneyleri için benzer biçimde kullanılan koruyucu tabakalar geocell, geogrid ve geotekstil olmuştur. Saha deneylerinde geocell (h=150 mm, t=1,2 mm, w=330 mm) olmak üzere bir; laboratuvar deneylerinde geocell (h=50 mm, t=1 mm, w=400 mm); geocell (h=50 mm, t=1,5 mm, w=400 mm) ve geocell (h=100 mm, t=1,5 mm, w=330 mm) olmak üzere üç farklı geocell kullanılmıştır. Her iki uygulamada aynı geogrid koruyucu yapı kullanılmıştır. Laboratuvarda geotekstil (500 gr/m<sup>2</sup>); sahada ise geotekstil (600 gr/m<sup>2</sup>) ve geotekstil (800 gr/m<sup>2</sup>) kullanılmıştır.

Yapılan laboratuvar ve saha deneylerinde, ortak kullanılan geosentetiklerin sonuçları değerlendirildiğinde geotekstil koruyucu tabakasının performansı diğer deneylere göre daha iyi olmuştur. Performansı yoğunluğu ile birlikte artış göstermektedir. Geocell koruyucu elemanın ölçülen ivme değeri yüksek olduğu için, düşük performans sergilediği anlaşılmaktadır.

Geocell koruyucu elemanı performans bakımından en düşük başarıyı sergilemişken, geotekstil elemanın performansı geocell ve geogride göre daha yüksek olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum hem laboratuvar hem de saha çalışmalarında desteklenmiştir. Malzemelerin gösterdikleri bu benzer performans sıralaması, güçlendirme malzemesinin özelliklerinin, çevre etkenlerinden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Sonuçların boru tasarım sektöründe de kullanılabileceği düşünülerek bundan sonraki çalışmalar sıklık oranı, boru et kalınlığı, farklı gömülme derinlikleri gibi değişkenler üzerinde geliştirilebilir.

Deneysel çalışmalar son derece yararlı olmakla birlikte, testlerin gerçekleştirilmesinin maddi ve süresel kısıtları nedeniyle anlamlı ve genellenebilecek sonuçların ortaya çıkartılabilmesi için sayısal yöntemlerle desteklenmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla bir sonlu elemanlar programı ile benzer deney modellerinin yapılması, özellikle deneylerin sahaya inmeden sonuçlarına ulaşılabilmesi adına faydalı olacaktır.

Hangi geosentetik ürünün, ne tip koşullarda, ne kadar miktarının, ne sebeple kullanıldığı konusunda uygulamada bir fikir oluşması bakımından sonuçların literatüre ve piyasa kullanımına faydalı olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, ihtiyaç duyulduğunda başvurulabilmesi amacıyla kamu ve özel sektörde yer alan hesap ve uygulama basamağındaki tüm kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.





## KAYNAKLAR

- Anıl, O., Erdem, R.T., ve Kantar, E. (2015). Improving the impact behavior of pipes using geofilm layer for protection, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, (132-133), 52-64.
- Babagiray, G., Akbaş, S. O., ve Anıl, O. (2016, September). *Investigation of Impact Behaviour of HDPE Pipes with Geocell Protective Layer*, 6th European Geosynthetics Congress (EuroGeo6), Slovenya, 762-773.
- Corey, R., Han, J., Khatri, D.K., and Parsons, R.L. (2014). Laboratory Study on Geosynthetic Protection of Buried Steel-Reinforced HDPE Pipes from Static Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140.
- Dash, S. K., Krishnaswamy, N. R., and Rajagopal, K. (2001). Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 235–256.
- Dong, Y., Han, J., Hong, X. B. (2010). *Bearing capacities of geogrid reinforced sand bases under static loading*, Geo Shanghai International Conference, 275-281.
- Floss, R., Brau, G. (2004). *Design Fundamentals for Geosynthetic Soil Technique*, Proceedings of 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics, Seoul, Korea, 85-103.
- Gürbüz, A., Mertol, H.C. (2012). Interaction between assembled 3D honeycomb cells produced from high density polyethylene and a cohesionless soil, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 828–836.
- Hegde, A., Kadabinakatti, S., and Sitharam, T.G. (2014). Protection of Buried Pipelines Using a Combination of Geocell and Geogrid Reinforcement: Experimental Studies, *Ground Improvement and Geosynthetics*, 238.
- İnternet: Geosentetik malzemeler üretici firması. (2017). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.geoplas.com.tr%2Furunler.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 30 Ocak 2017.
- İnternet: HDPE boru özellikleri teknik kataloğu. (2017). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.firat.com%2Fcmsfiles%2Fcertificates%2F9897%2Fpe-100-teknik-katalogu.pdf&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 30 Ocak 2017.
- İnternet: HDPE boru özellikleri teknik kataloğu. (2017). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fpilsa.wavin.com%2Fweb%2Fdokumanlar.htm&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 30 Ocak 2017.
- İnternet: Basınçölçer üretici firması teknik bilgileri. (2017). URL: [http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tml.jp%2Ffe%2Fproduct%2Ftransducers%2Fcivil\\_eng%2Fsoil\\_pressure%2Fkde\\_kdf.html&date=2017-02-11](http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tml.jp%2Ffe%2Fproduct%2Ftransducers%2Fcivil_eng%2Fsoil_pressure%2Fkde_kdf.html&date=2017-02-11), Son Erişim Tarihi: 30 Ocak 2017.

- Kantar, E. (2009). *Experimental investigation of impact behaviour of reinforced concrete beam strengthened with CFRP*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-48.
- Koerner, R.M. (1990). *Designing with Geosynthetics*, Third Edition, USA: Prentice Hall, 32-35.
- Laman, M., Yıldız, A. (2003). Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand, *Geosynthetics International*, 10 (5), 142–152.
- Madhavi Latha, G. (2009). Somwanshi, A. Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 281–294.
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Khalaj, O. (2008). Laboratory tests of small-diameter HDPE pipes buried in reinforced sand under repeated-load, *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 145–163.
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Dawson, A.R. (2010). Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement, *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 72–84.
- Moghaddas Tafreshi, S.N., Dawson, A.R. (2012). A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 55-68.
- Moghaddas Tafreshi, S. N., Khalaj, O., and Dawson, A. R. (2013). Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation, *Geosynthetics International*, 20 (3), 143–161.
- Palmeira, E. M., Andrade, H. K. P. A. (2010) Protection of buried pipes against accidental damage using geosynthetics, *Geosynthetics International*, 17 (4), 228–241.
- Sitharam, T.G., Hegde, A. (2013). Design and construction of geocell foundation to support the embankment on settled red mud, *Geotextiles and Geomembranes*, Technical note, 41, 55-63.
- Tavakoli Mehrjardi, Gh., Moghaddas Tafreshi, S.N., and Dawson, A.R. (2012). Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes, *Geotextiles and Geomembranes*, 34, 116-130.
- Tavakoli Mehrjardi, Gh., Moghaddas Tafreshi, S. N., and Dawson, A. R. (2013). Pipe response in a geocell-reinforced trench and compaction considerations, *Geosynthetics International*, 20 (2), 105–118.
- Tupa, N., Palmeira, E. M. (2007). Geosynthetic reinforcement for the reduction of the effects of explosions of internally pressurised buried pipes, *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 109–127.

- Wasti, Y. (2007). *Geosentetikler Teori ve Uygulama*, Ankara, Geosentetikler Ders Notları, 1-5.
- Yılmaz, I., Yıldırım, M., ve Keskin, İ. (2014). *Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri ve Çözümlü Problemler*. (İkinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 1, 23-25.
- Zhou, H., Wen, X. (2008). Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 231–238.

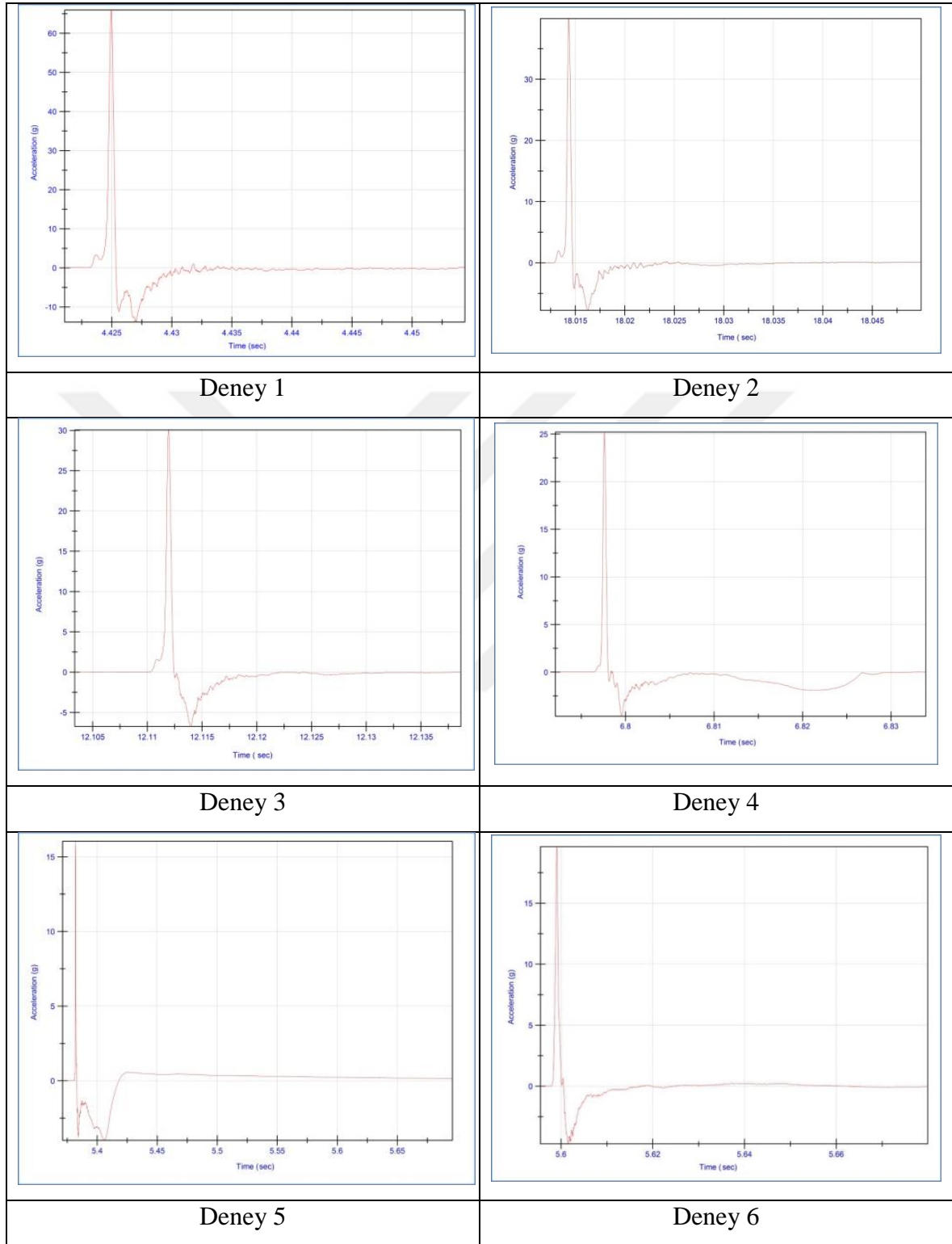






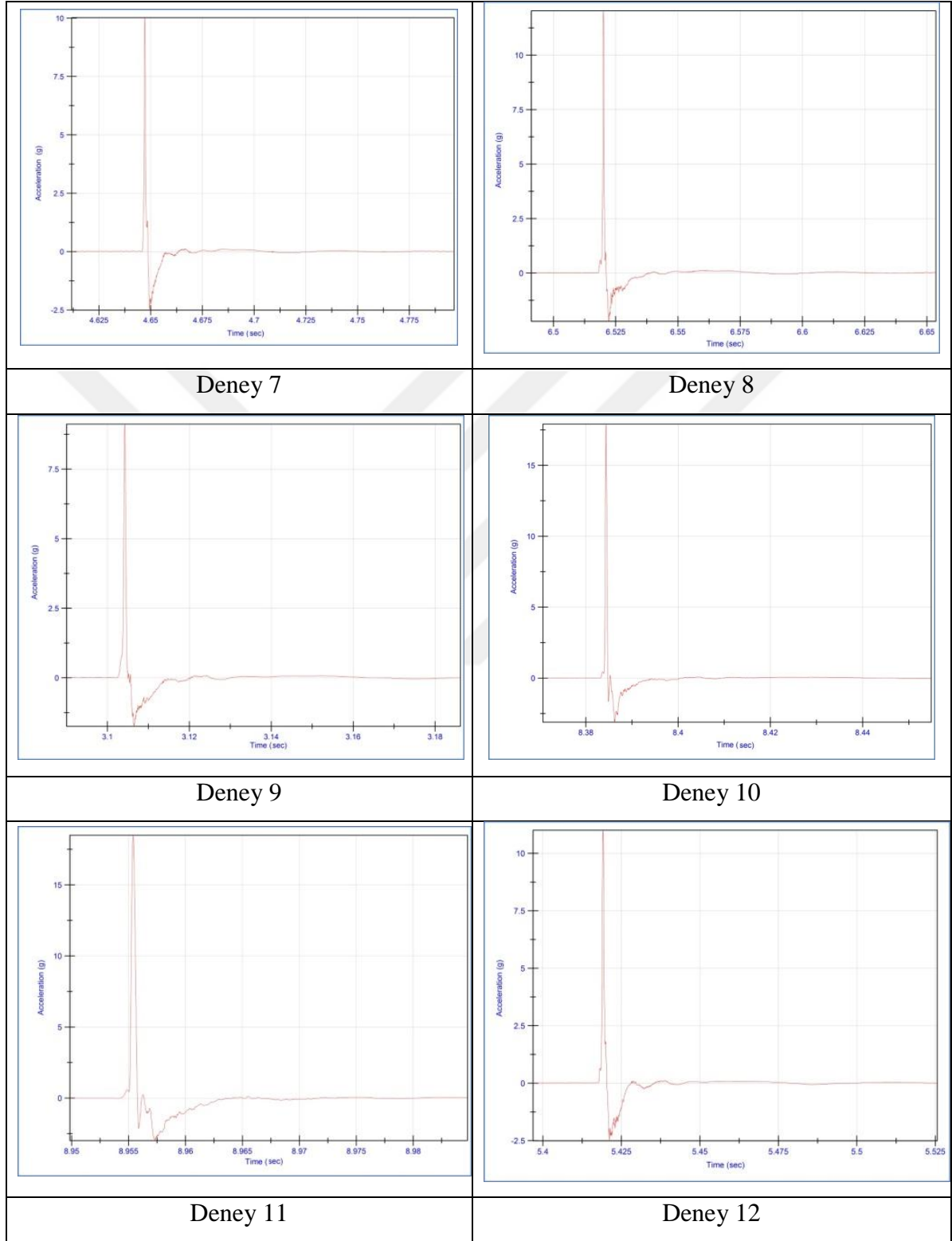
**EKLER**

## EK-1. Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



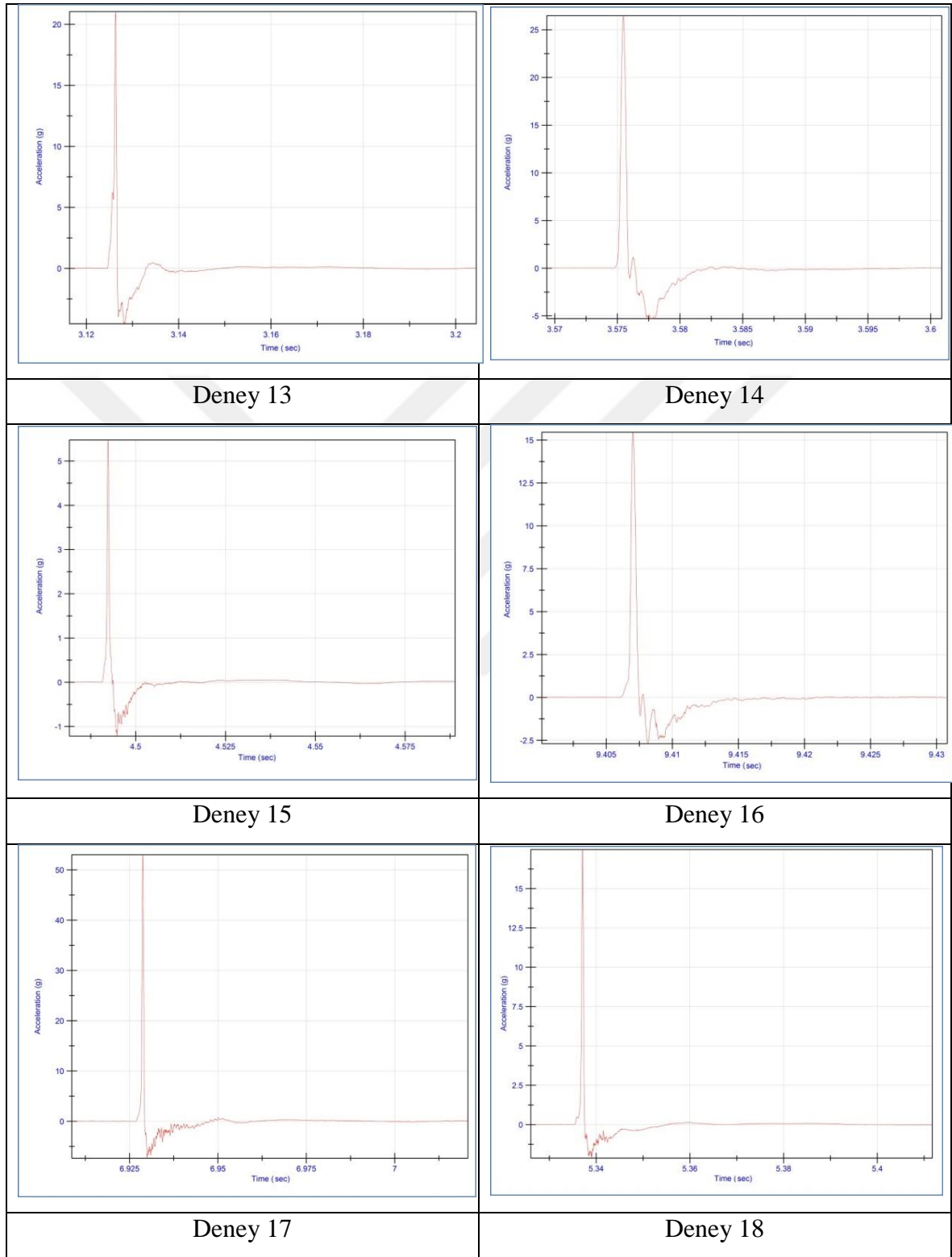
Şekil 1.1. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 1-2-3-4-5-6)

EK-1.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 1.2. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 7-8-9-10-11-12)

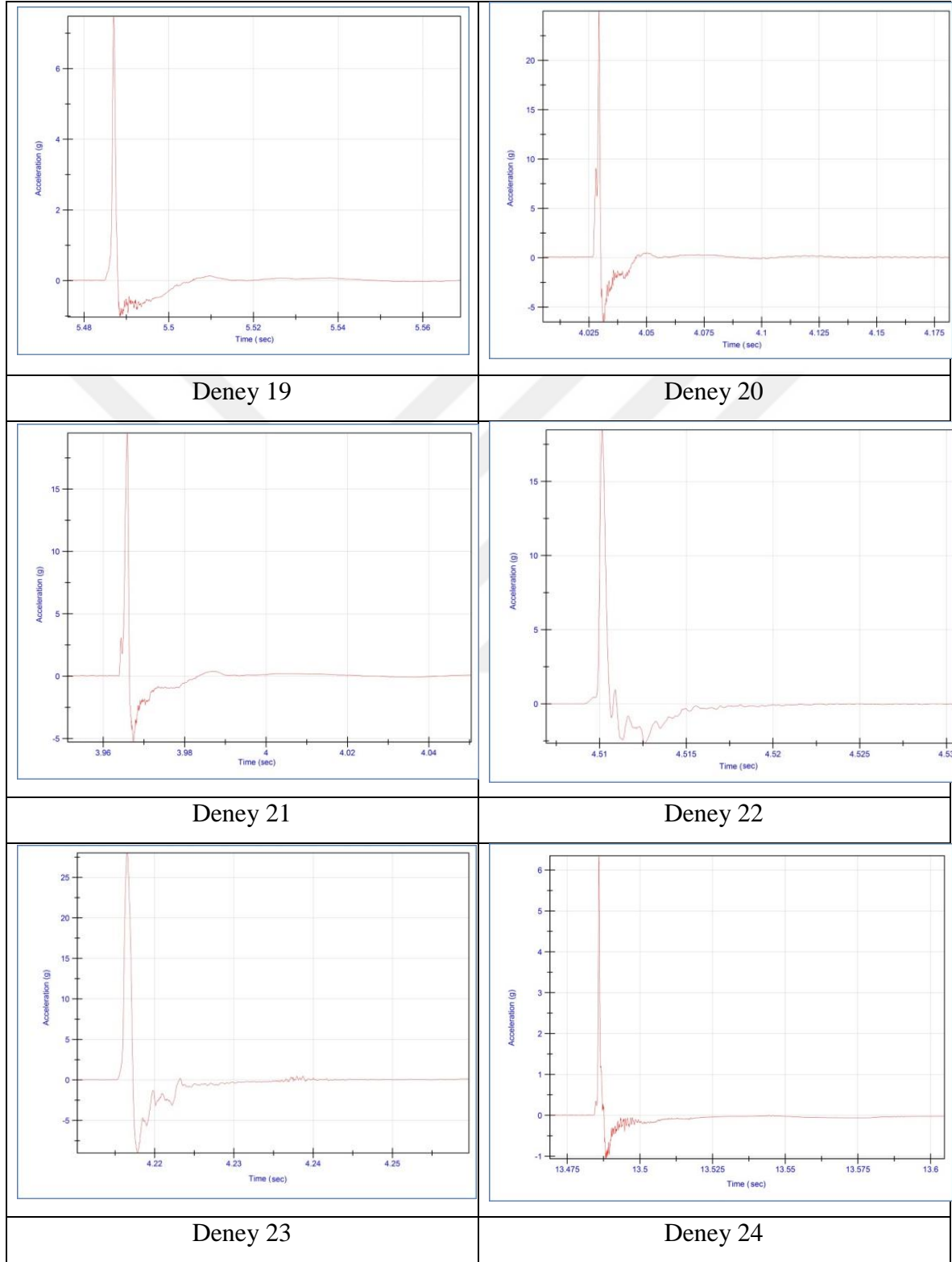
EK-1.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 1.3. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 13-14-15-16-17-18)

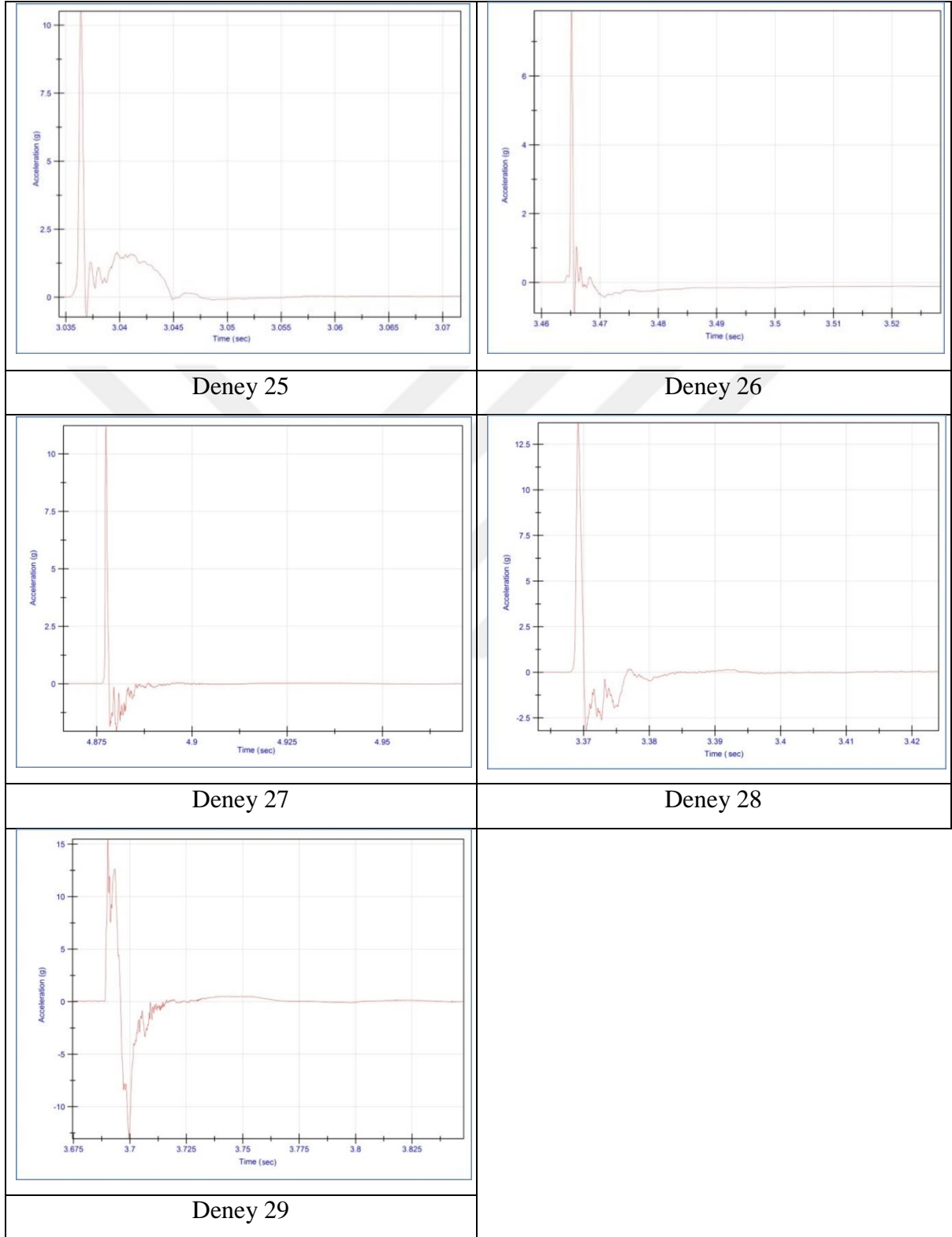


EK-1.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



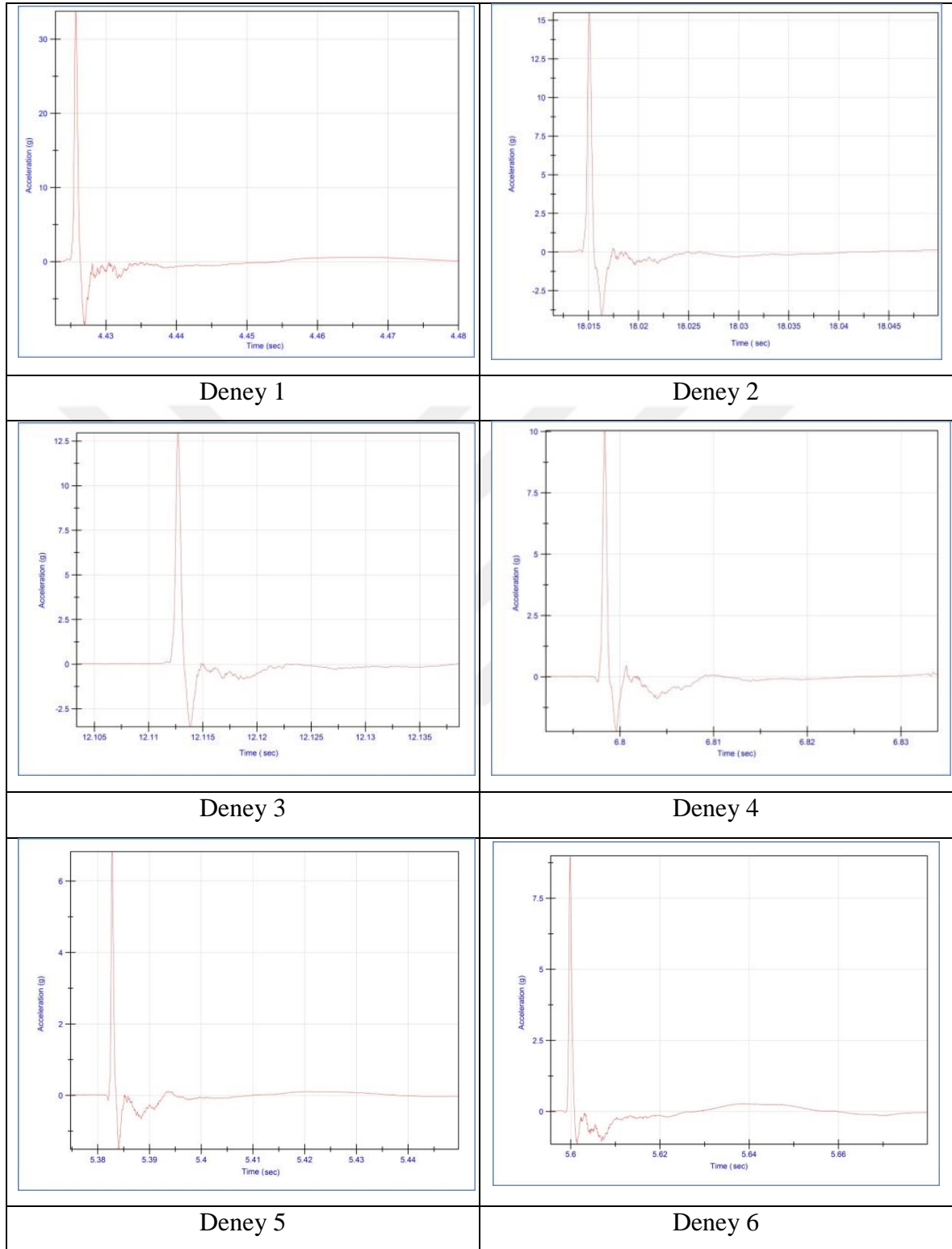
Şekil 1.4. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 19-20-21-22-23-24)

EK-1.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



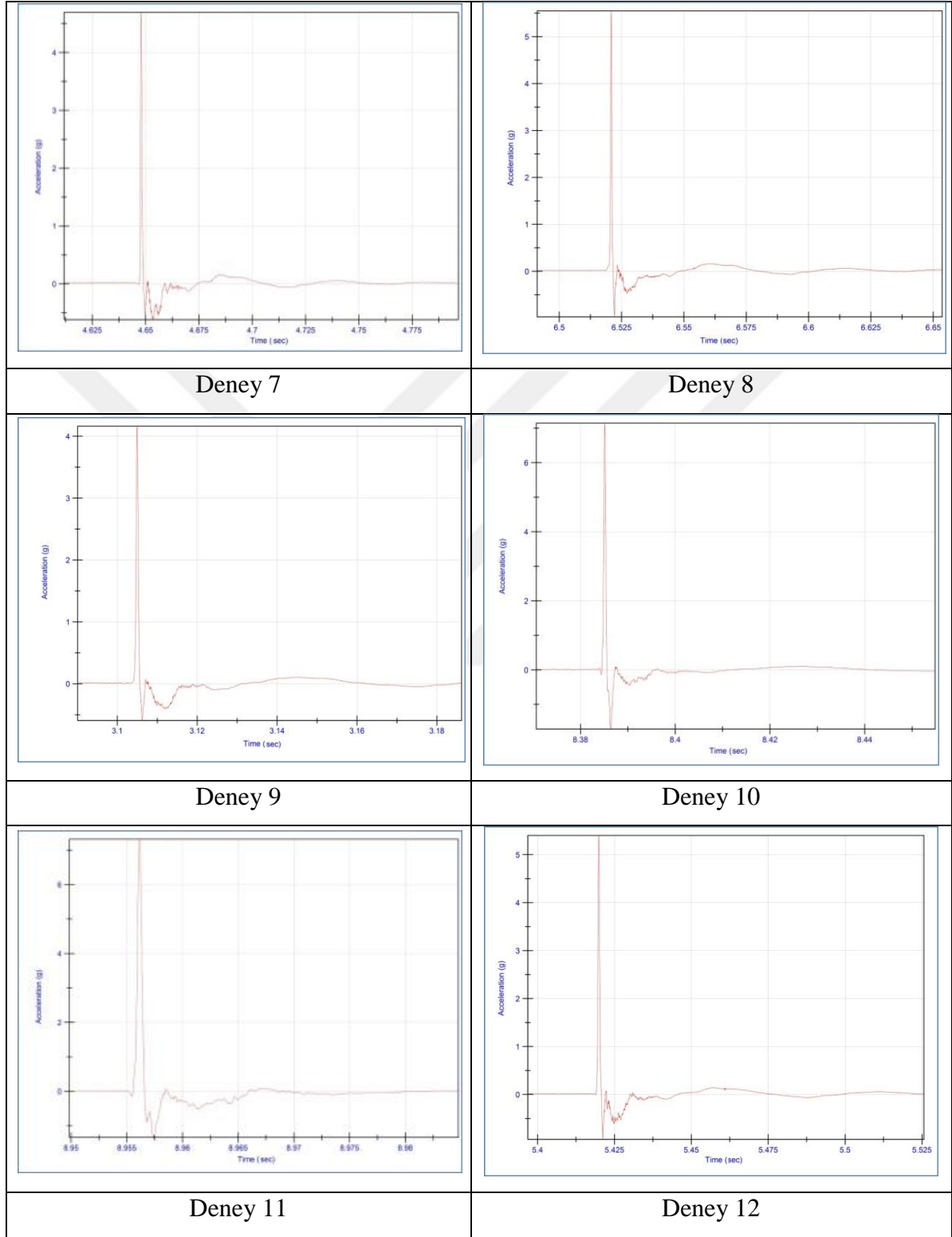
Şekil 1.5. İvme-zaman grafikleri (Deneysel 25-26-27-28-29)

## EK-2. Laboratuvar testleri sonucunda uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



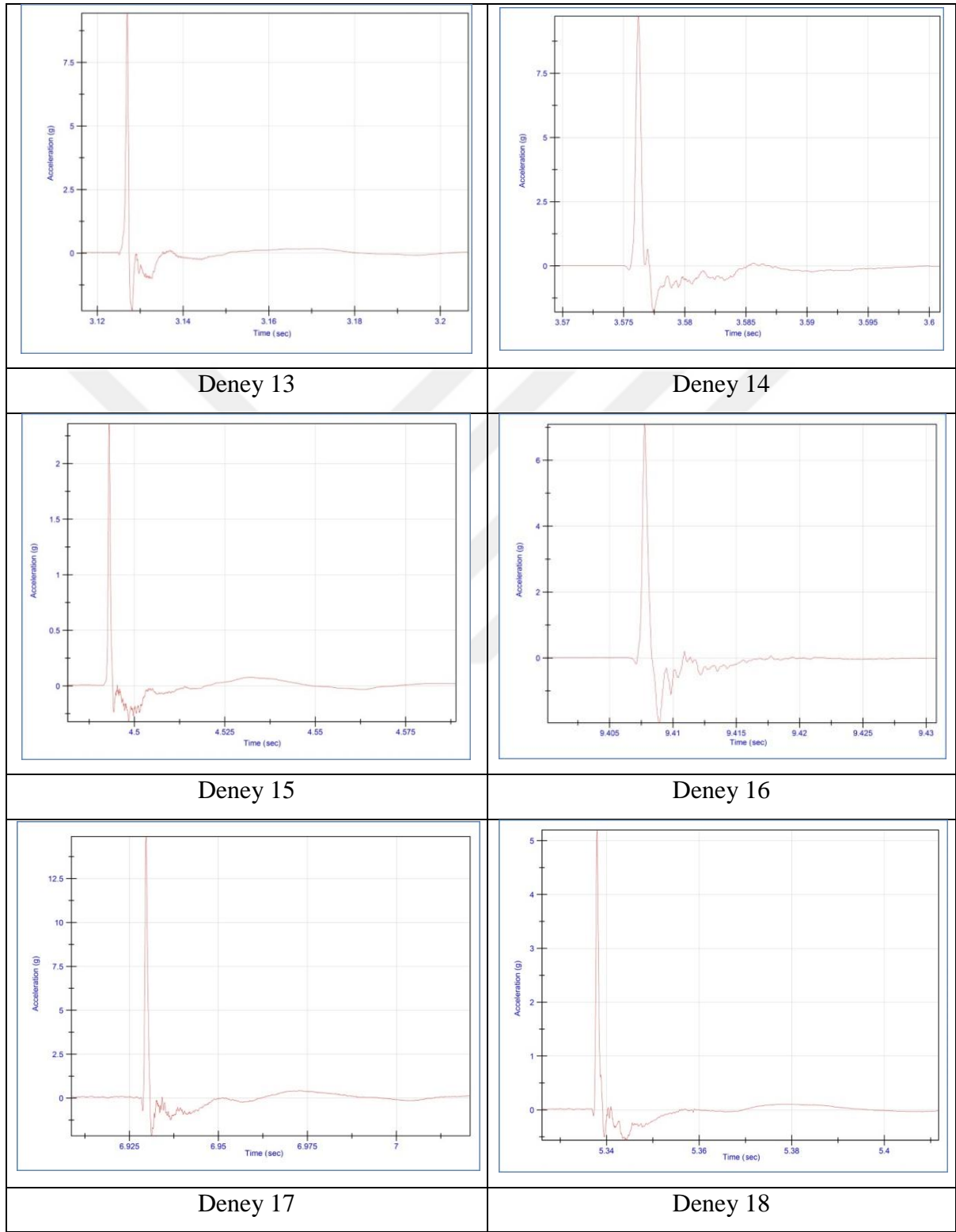
Şekil 2.1. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 1-2-3-4-5-6)

EK-2.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



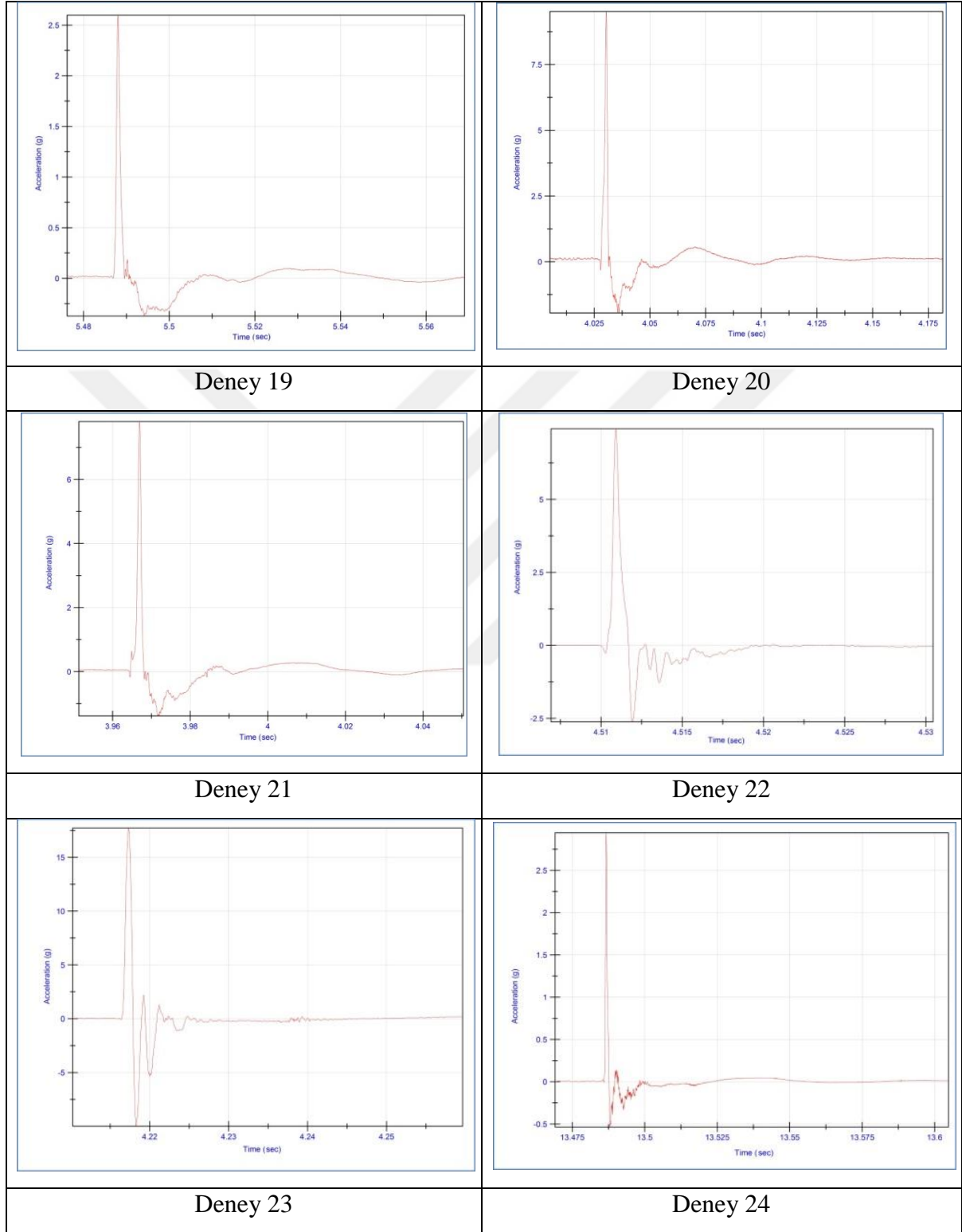
Şekil 2.2. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 7-8-9-10-11-12)

EK-2.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



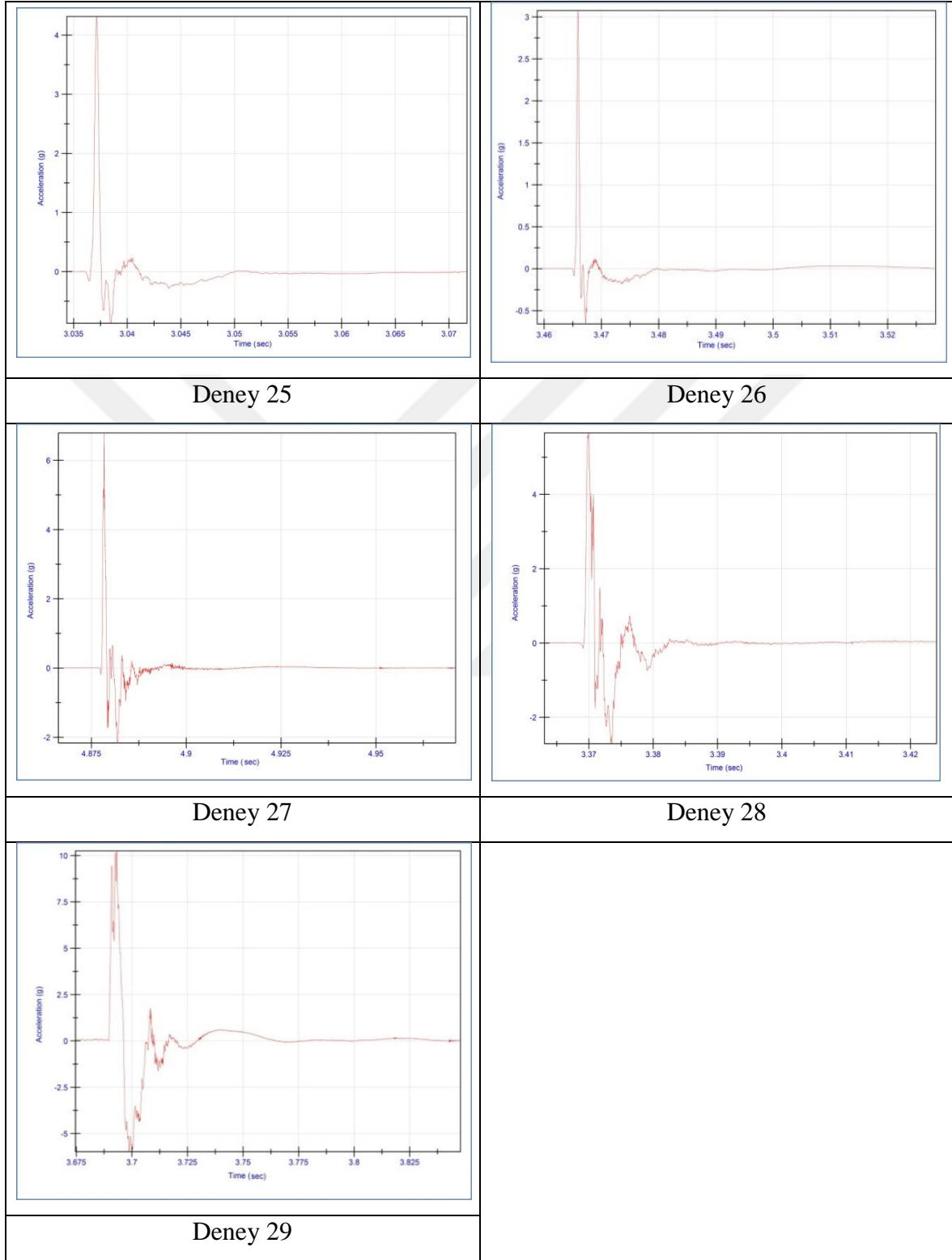
Şekil 2.3. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 13-14-15-16-17-18)

EK-2.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



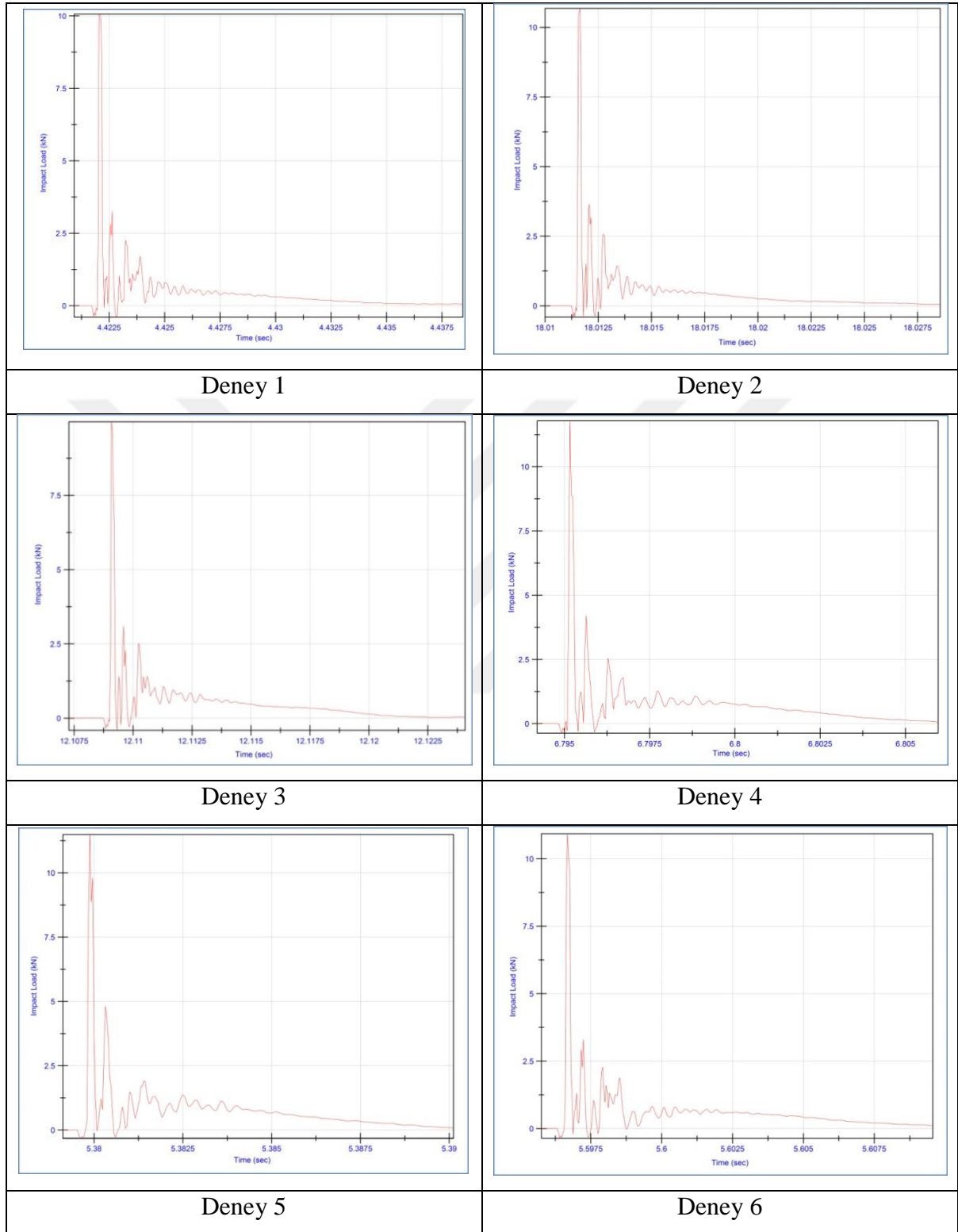
Şekil 2.4. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 19-20-21-22-23-24)

EK-2.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda uç ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 2.5. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 25-26-27-28-29)

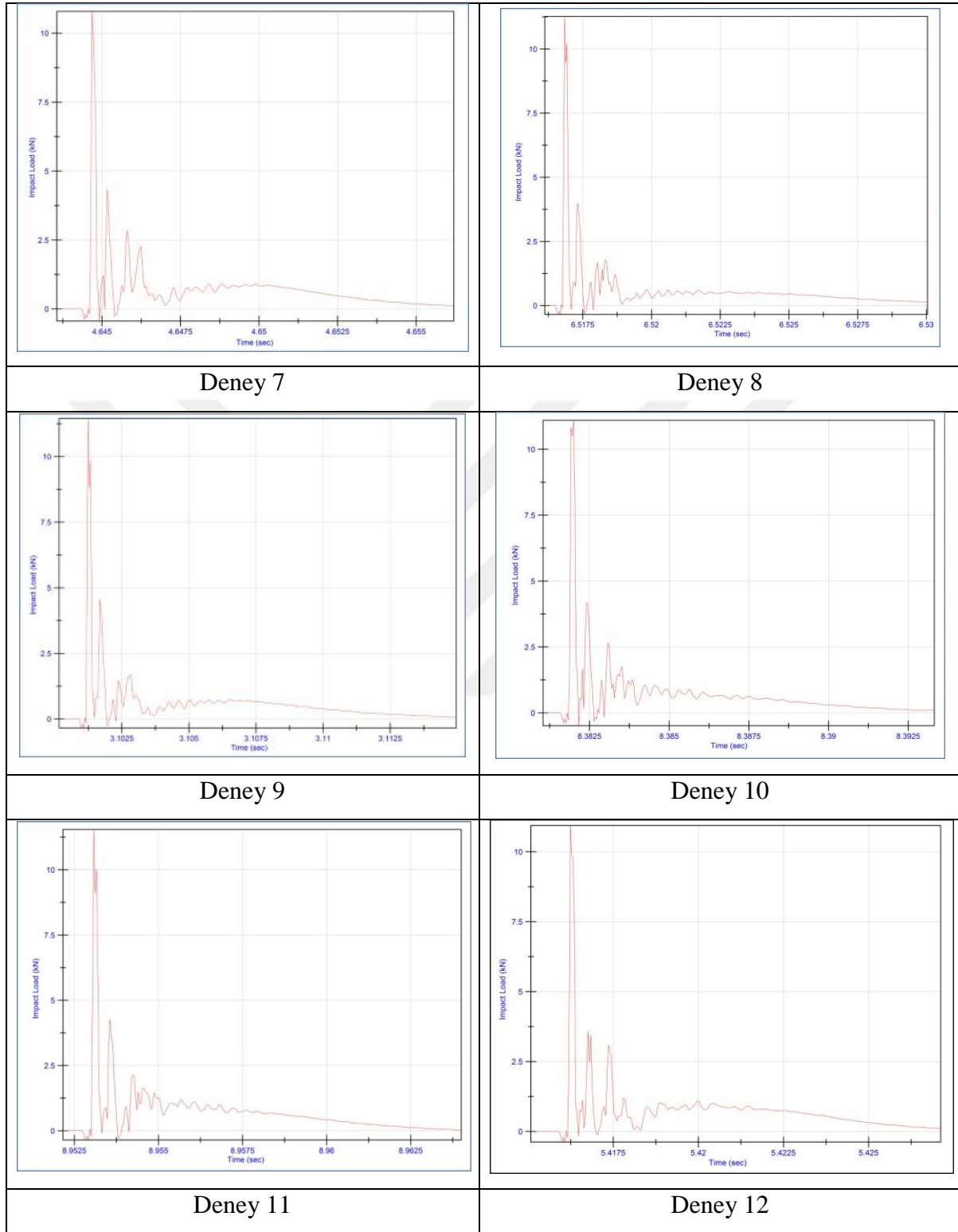
### EK-3. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri



Şekil 3.1. Yük-zaman grafikleri (Deneyler 1-2-3-4-5-6)

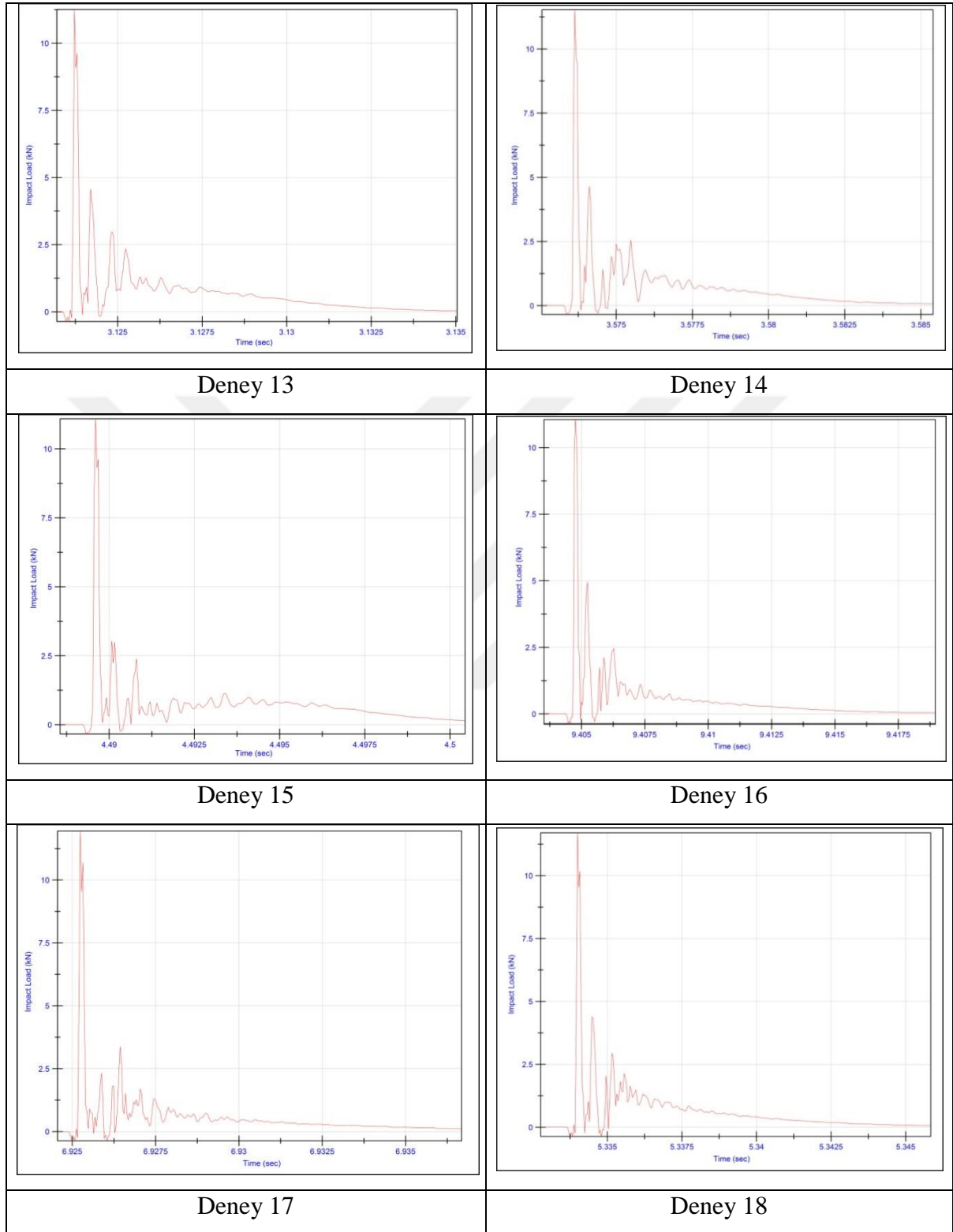


## EK-3.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri



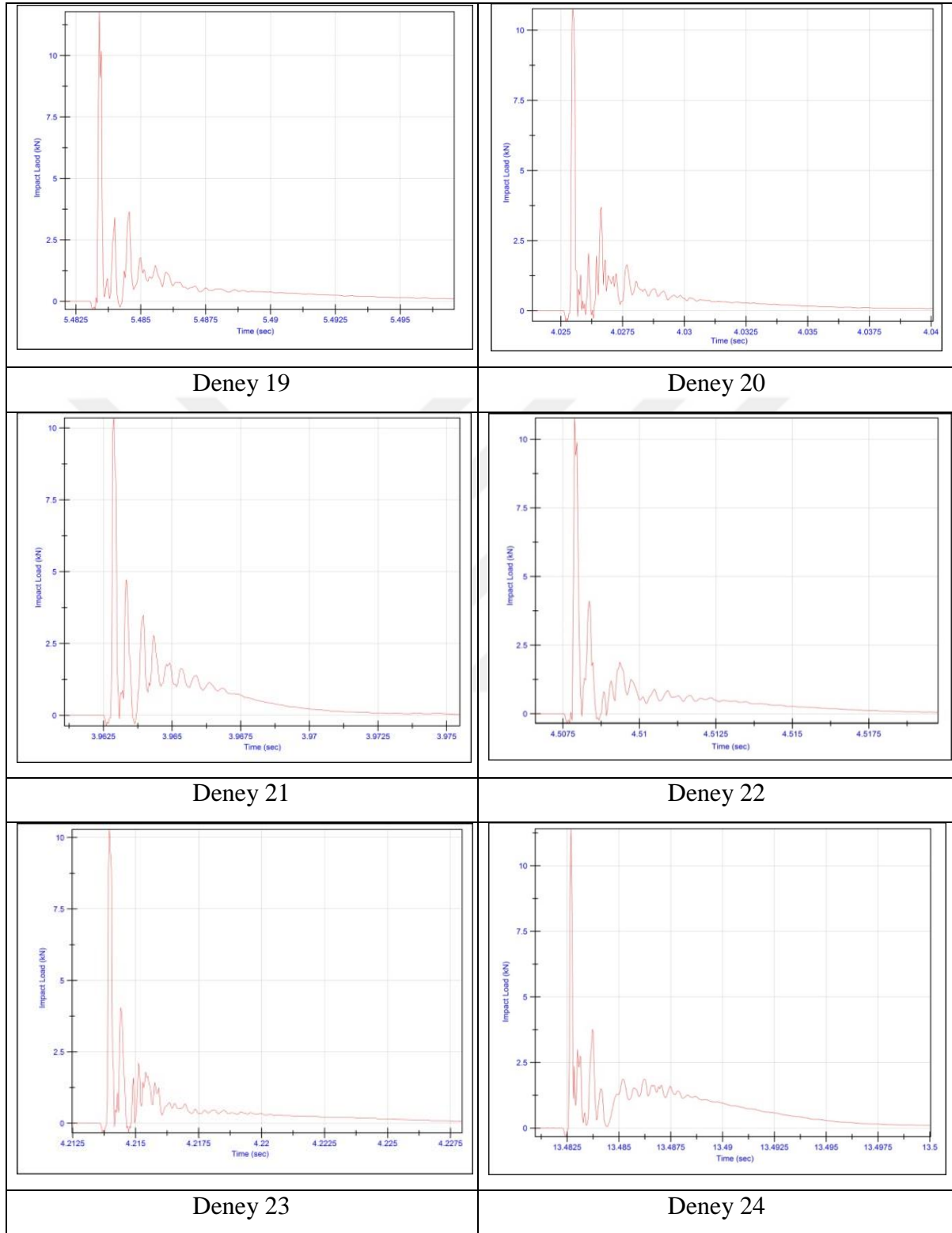
Şekil 3.2. Yük-zaman grafikleri (Deneyler 7-8-9-10-11-12)

EK-3.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri



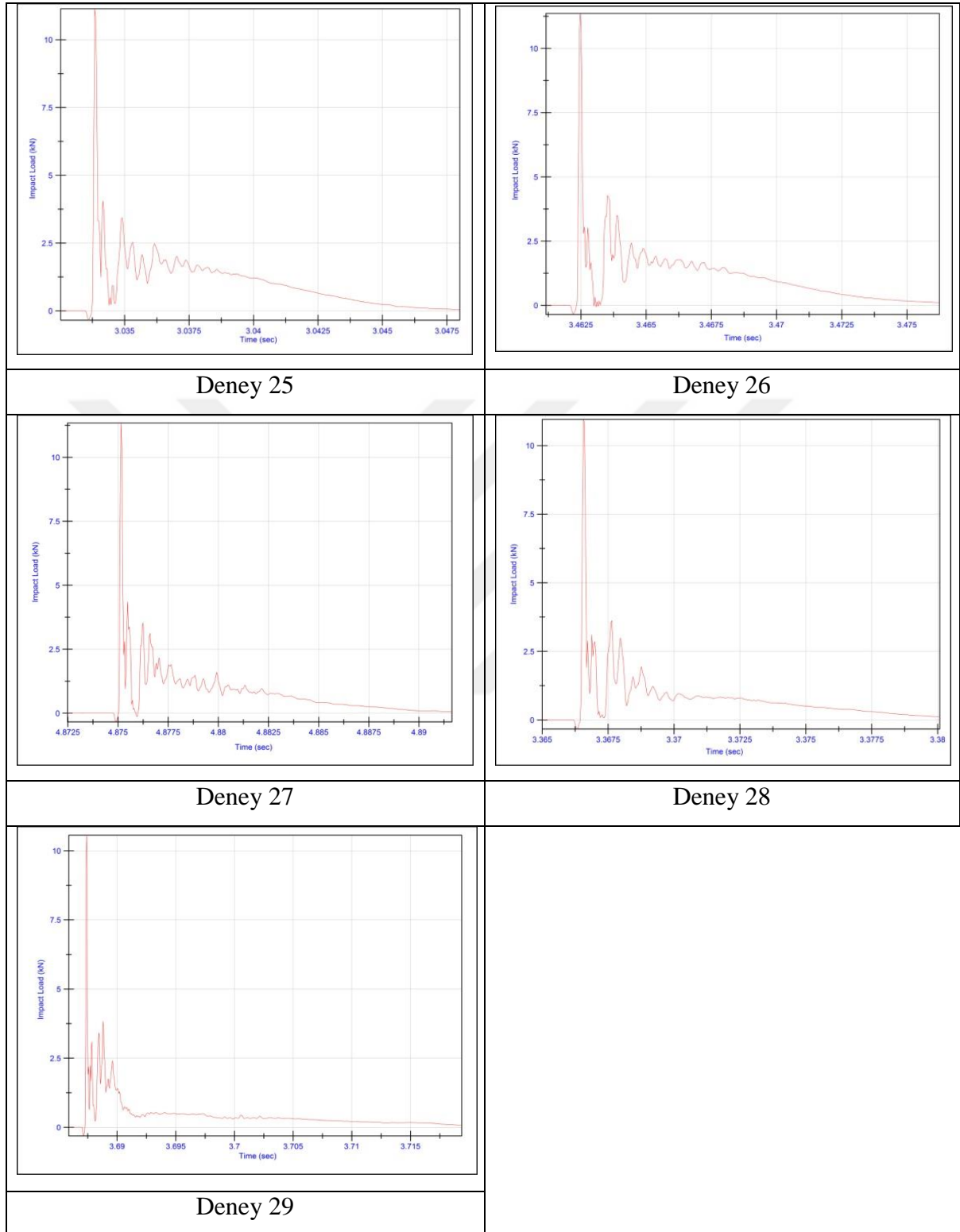
Şekil 3.3. Yük-zaman grafikleri (Deneyler 13-14-15-16-17-18)

## EK-3.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri



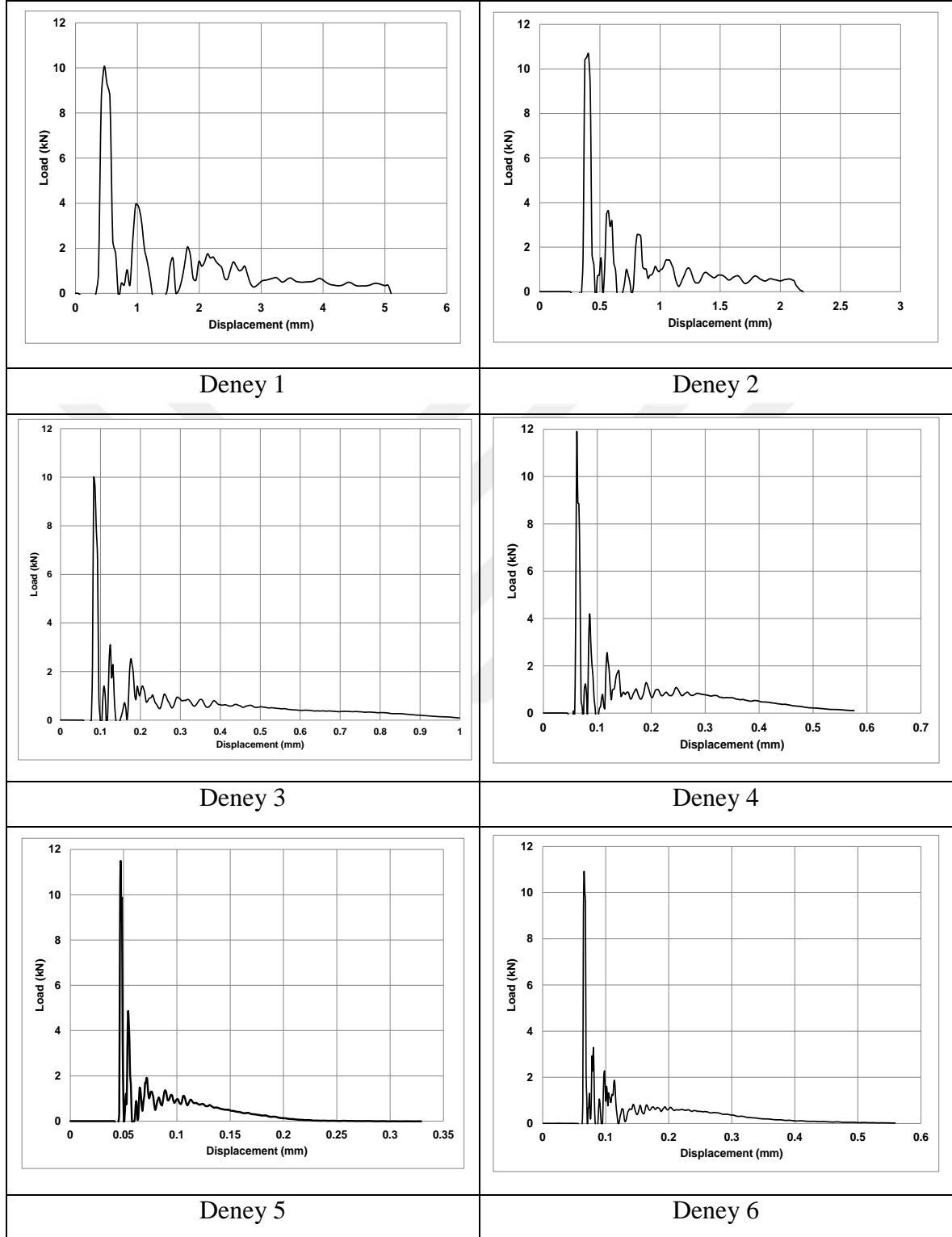
Şekil 3.4. Yük-zaman grafikleri (Deneyler 19-20-21-22-23-24)

EK-3.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-zaman grafikleri



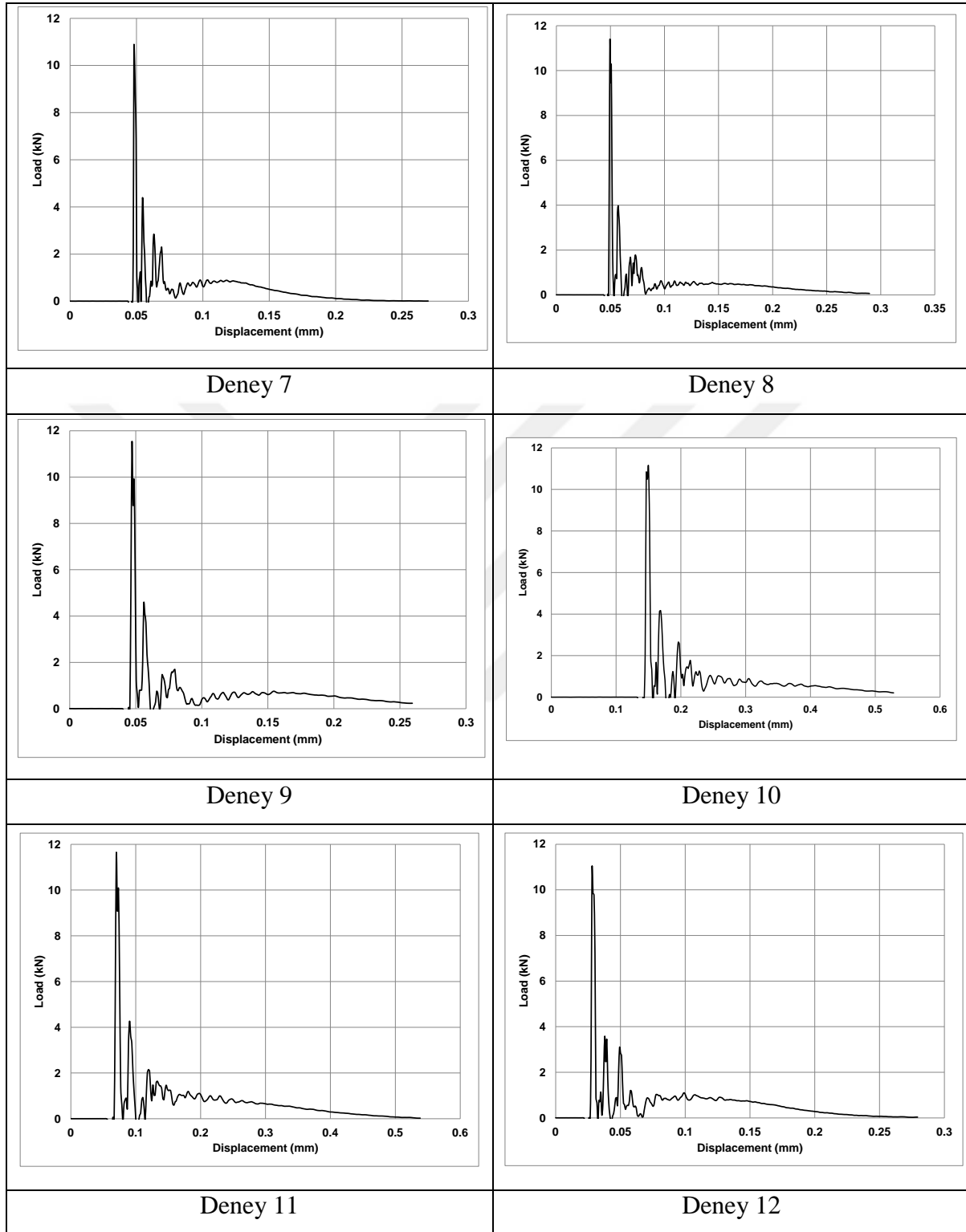
Şekil 3.5. Yük-zaman grafikleri (Deneyler 25-26-27-28-29)

## EK-4. Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri



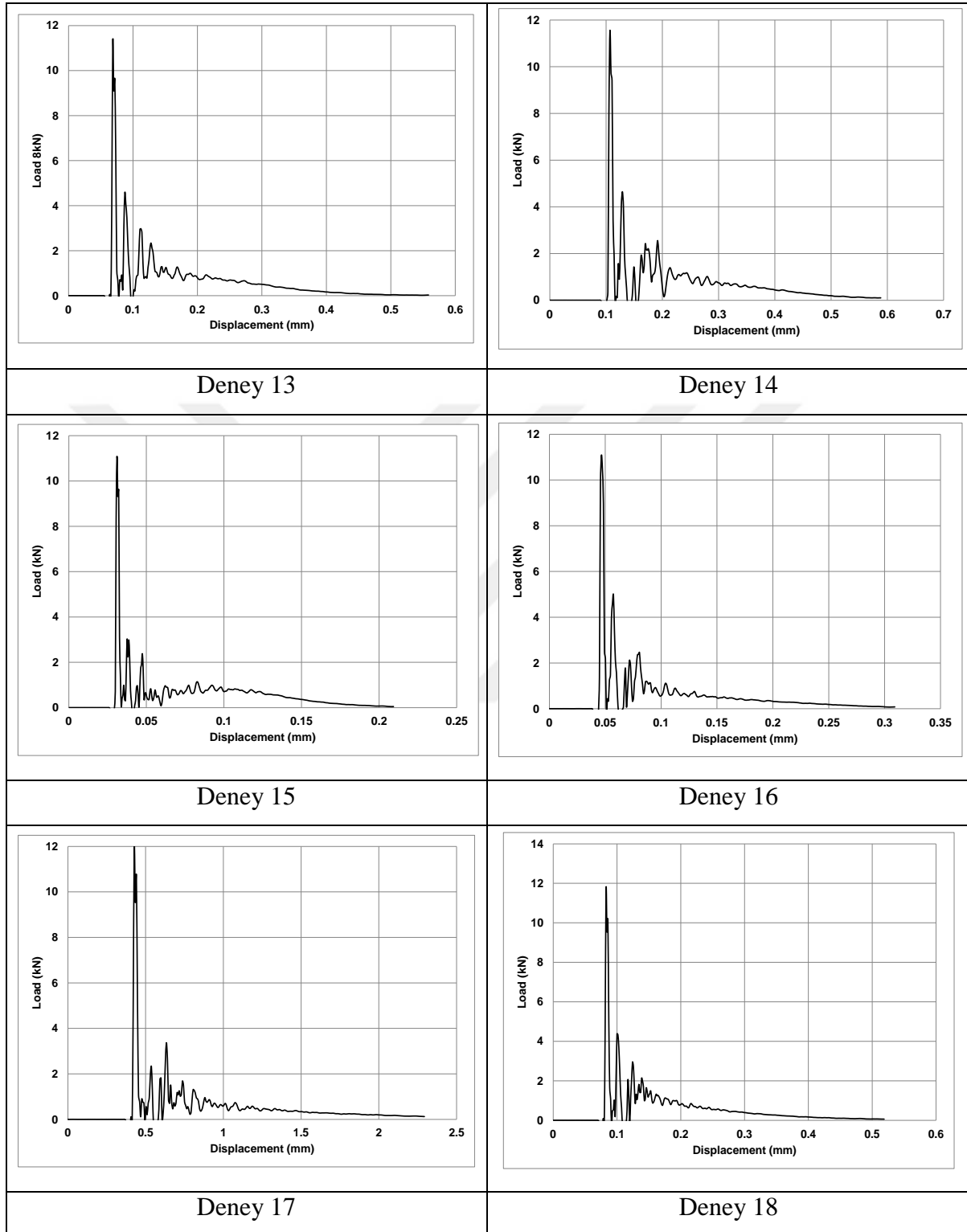
Şekil 4.1. Yük-deplasman grafikleri (Deneysel 1-2-3-4-5-6)

## EK-4.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri



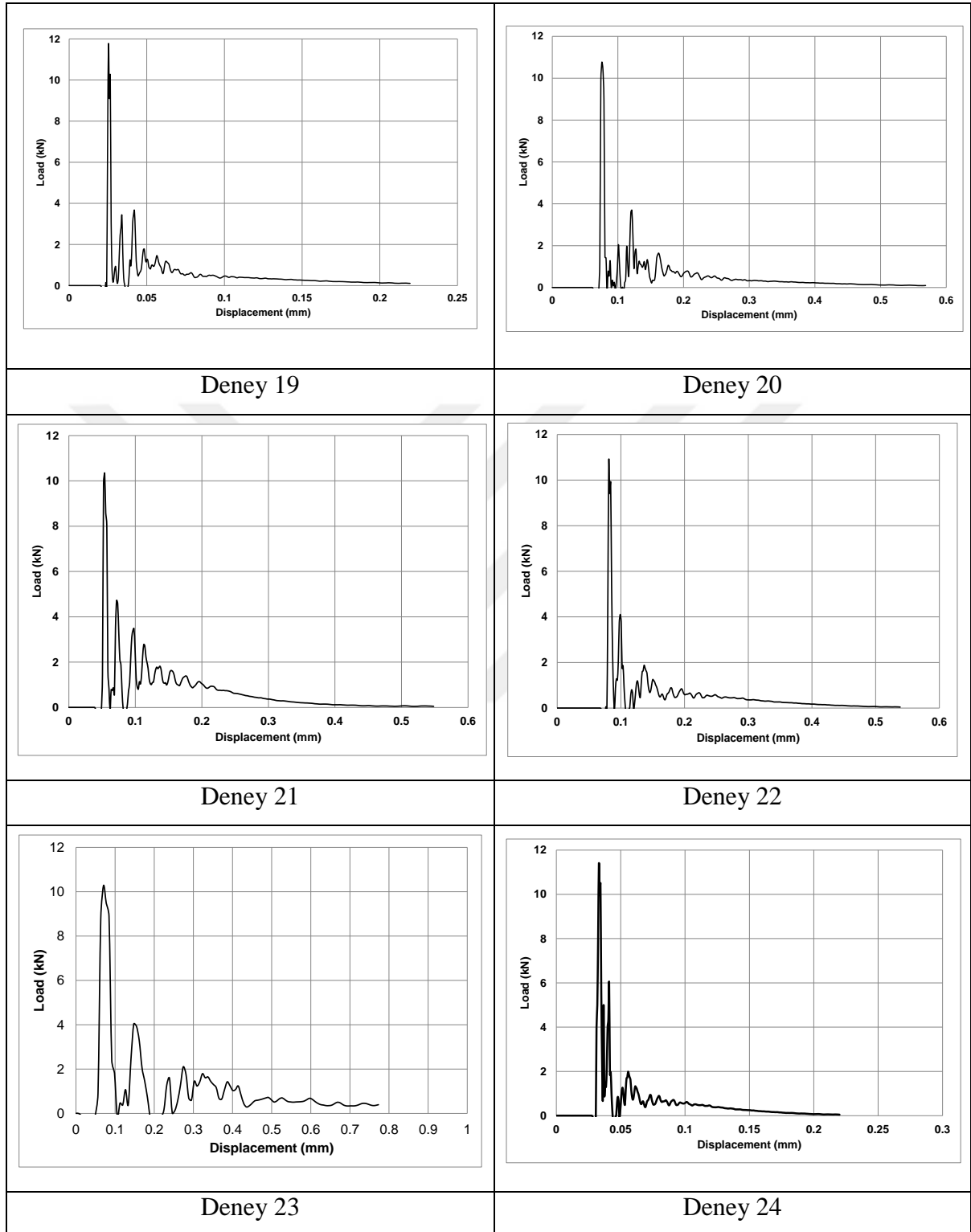
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafikleri (Deneyler 7-8-9-10-11-12)

## EK-4.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.3. Yük-deplasman grafikleri (Deneyler 13-14-15-16-17-18)

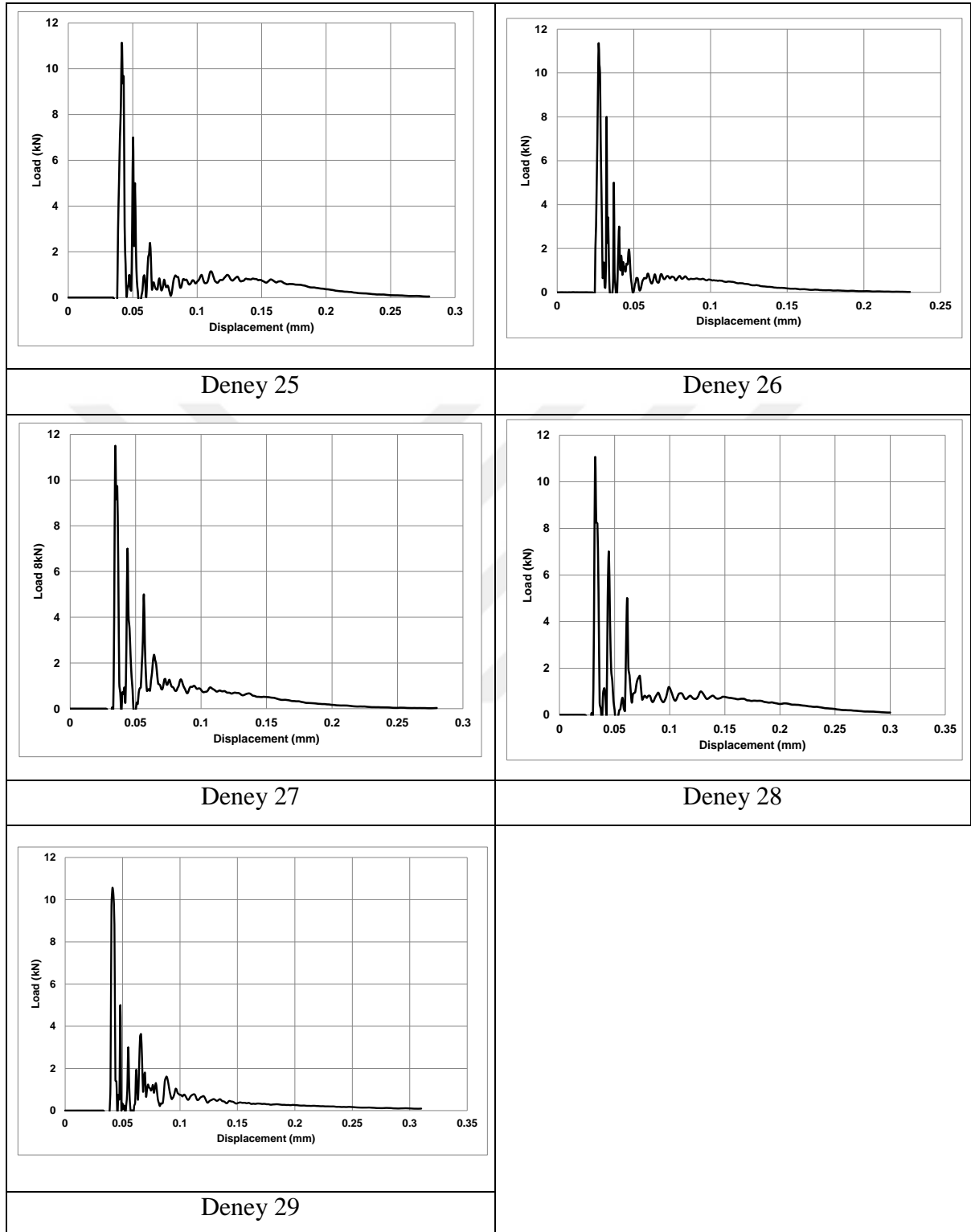
## EK-4.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.4. Yük-deplasman grafikleri (Deneysel 19-20-21-22-23-24)

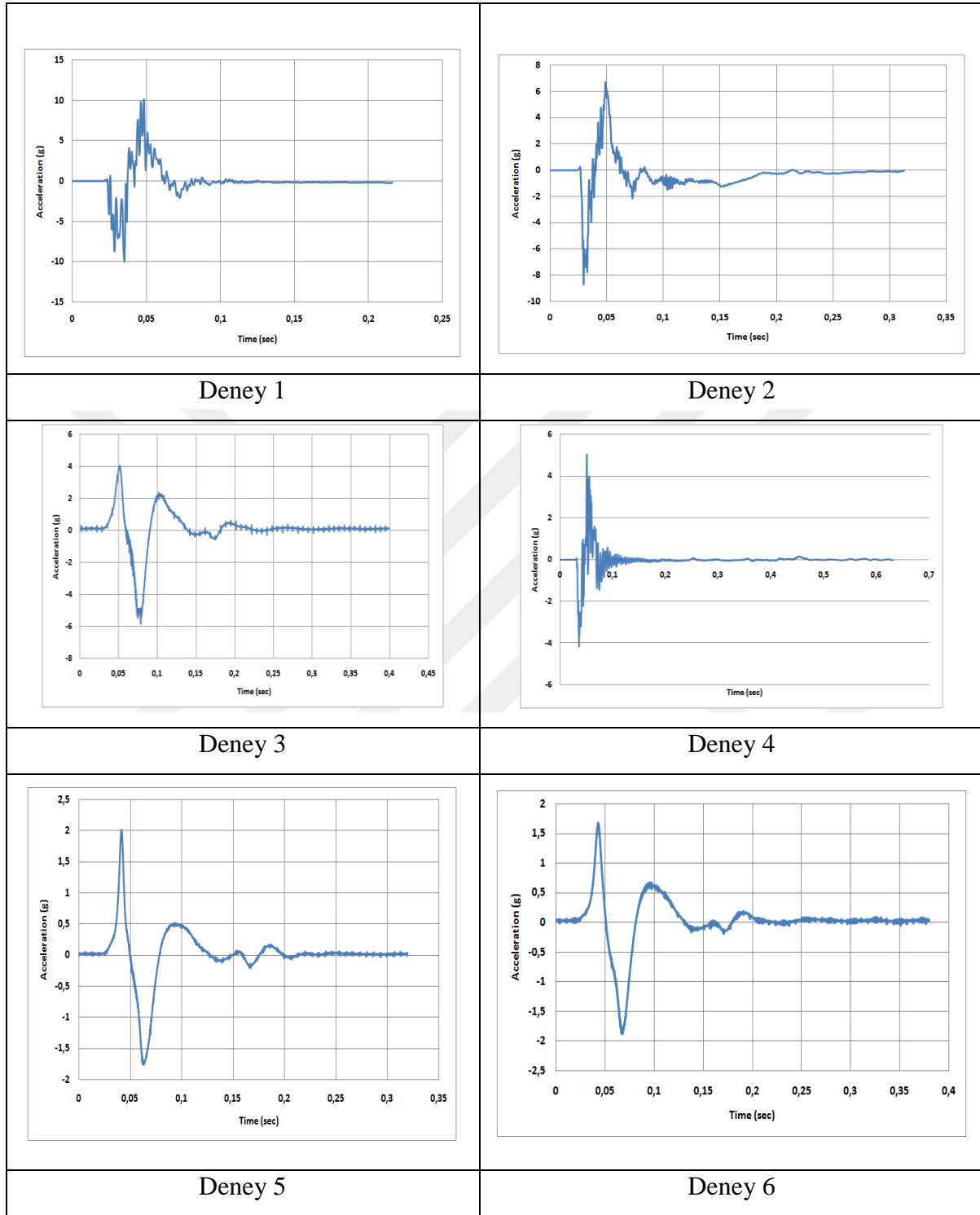


## EK-4.(devam) Laboratuvar testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri



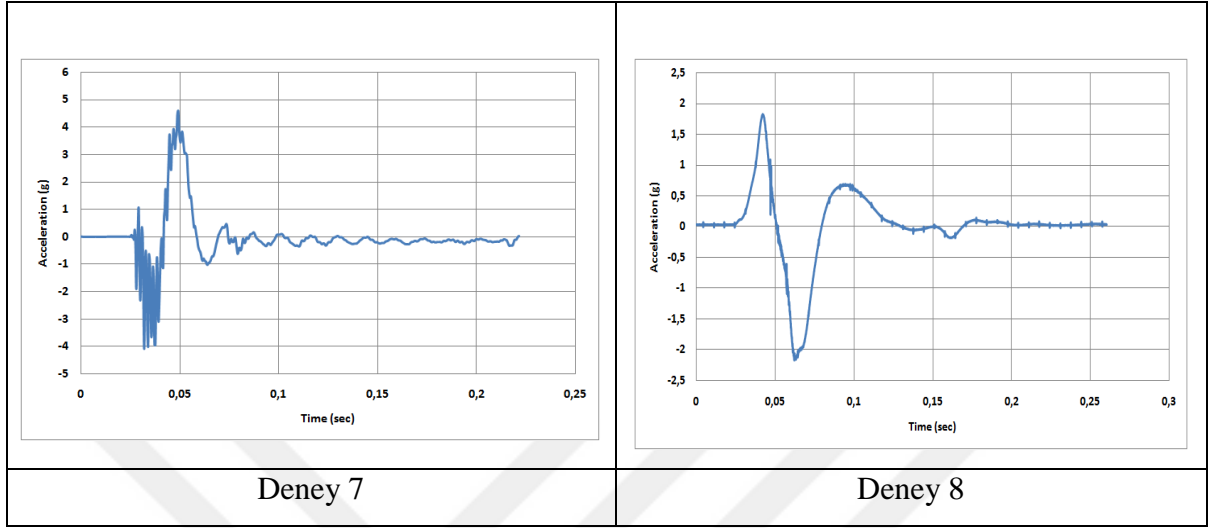
Şekil 4.5. Yük-deplasman grafikleri (Deneyler 25-26-27-28-29)

EK-5. Saha testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



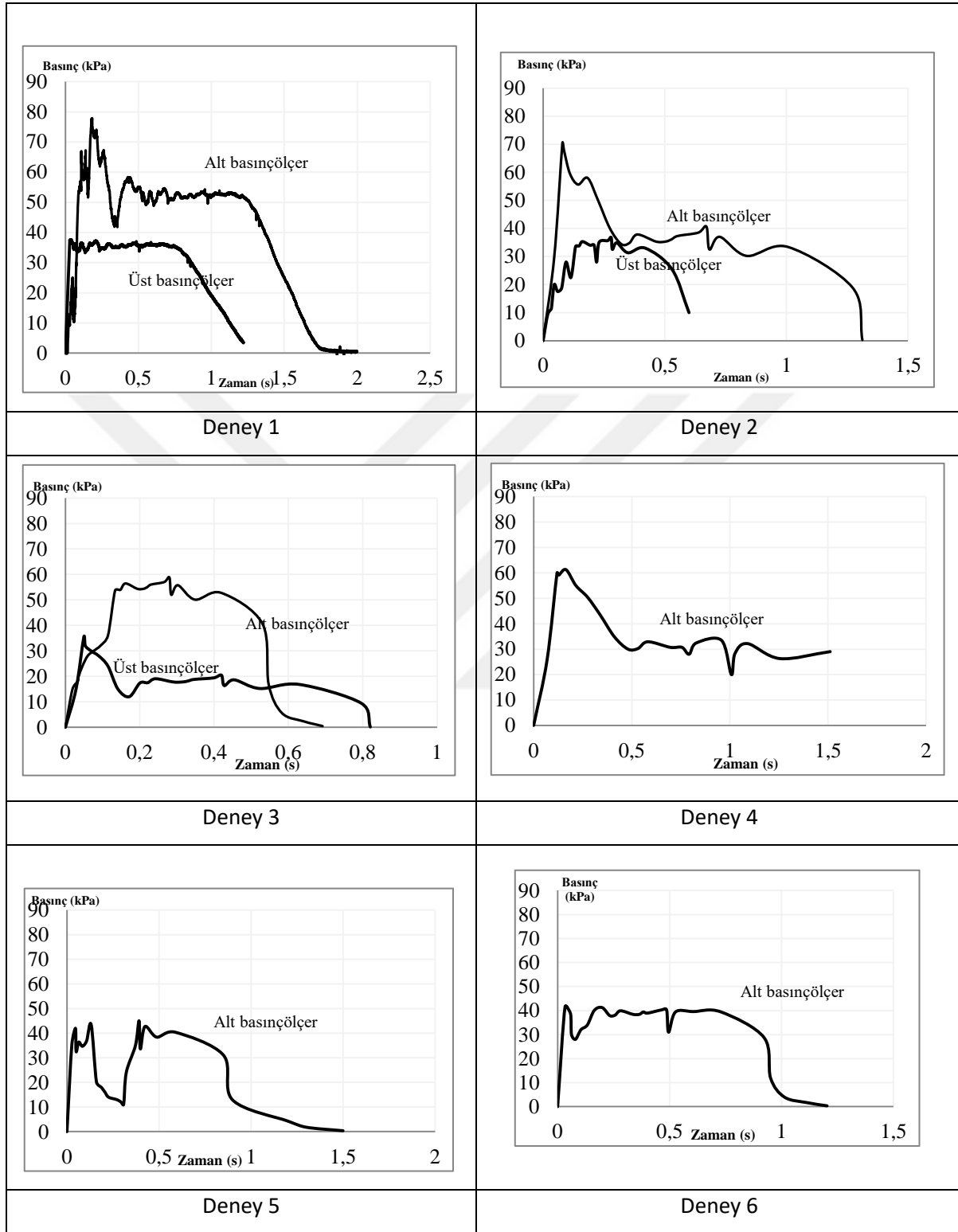
Şekil 5.1. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 1-2-3-4-5-6)

EK-5. (devam) Saha testleri sonucunda orta ivmeölçerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



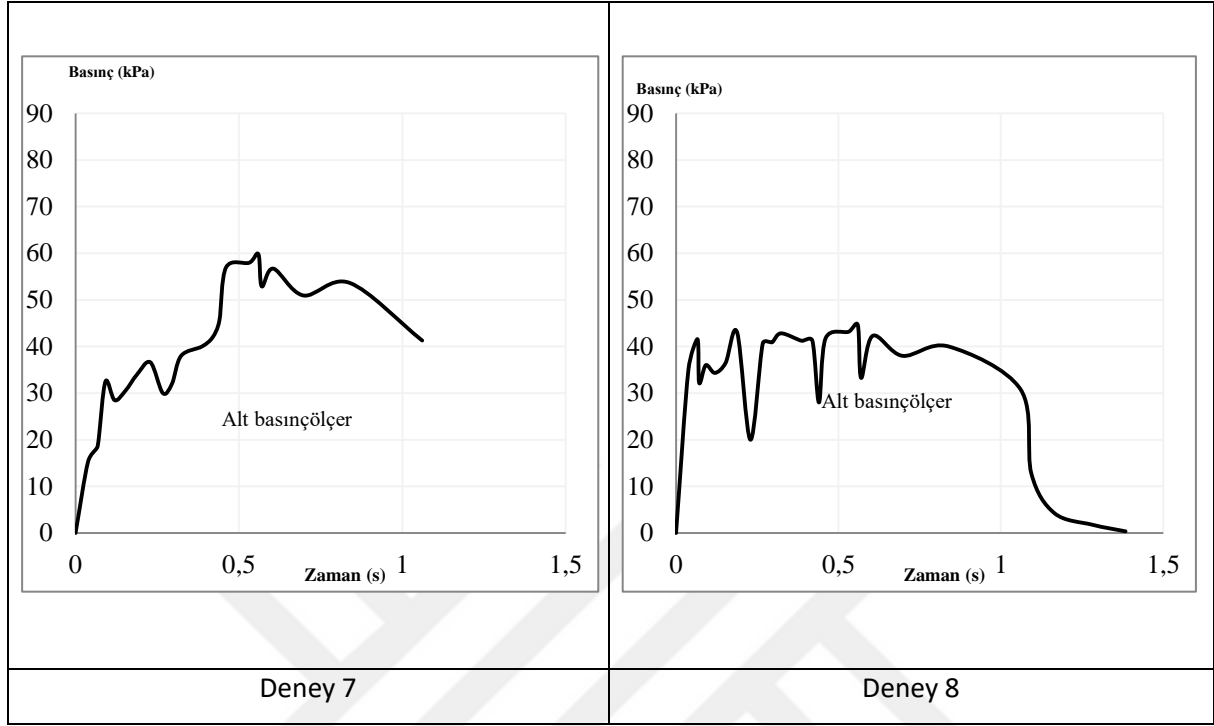
Şekil 5.2. İvme-zaman grafikleri (Deneyler 7-8)

EK-6. Saha testleri sonucunda basınçölçerlerden elde edilen basınç-zaman grafikleri



Şekil 6.1. Basınç-zaman grafikleri (Deneyler 1-2-3-4-5-6)

Ek-6.(devam) Saha testleri sonucunda basınçölçerlerden elde edilen basınç-zaman grafikleri



Şekil 6.2. Basınç-zaman grafikleri (Deneyler 7-8)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BABAGİRAY, Güneş  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 30.04.1984, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 582 32 39  
 Faks : 0 (312) 230 84 34  
 e-mail : gunesaydin@gazi.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2017
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2007
Lise	Süleyman Demirel Anadolu Lisesi	2002

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2009	Merge Enerji İnşaat	İnşaat Mühendisi
2009-Devam	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Babagiray, G., Akbaş, S. O., Anıl, O. (2013). Sığ rijit tabaka mevcudiyetinin kohezyonsuz zeminler üzerindeki yüzeysel temellerin taşıma kapasitesine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, (1), 187-198.

Babagiray, G., Akbaş, S. O. (Baskıda). Sığ rijit tabaka üzerinde yer alan kohezyonsuz zeminlerdeki yüzeysel temellerin taşıma gücü hakkında sayısal modelleme esaslı parametrik bir çalışma, *İMO teknik dergi*.

Babagiray, G., Akbaş, S. O. (2011). *Temeller İçin Taşıma Gücü Belirleme Yöntemlerinin Kesinlik ve Güvenilirliğinin İncelenmesi*, 4. Geoteknik Sempozyumu, Adana, Çukurova Üniversitesi, 271-282.

Babagiray, G., Akbaş, S. O., Anıl, O. (2016). *Investigation of Impact Behaviour of HDPE Pipes with Geocell Protective Layer*, 6th European Geosynthetics Congress (EuroGeo6), Slovenya, 762-773.

### **Ödüller**

Gazi Üniversitesi, Uluslar Arası Yayın Teşvik Ödülü, 2013.

International Geosynthetics Society (IGS), Student Award, 2016.

### **Programlar**

Autocad, Office, Midas- GTS, Plaxis 2D, Plaxis 3D, Ansys-Workbench

### **Sertifikalar**

Z-GIS Centre for Geoinformatics, Water Scarcity Winter School, Austria, Salzburg University, 2010.

Geoteknik ve Tünel Modelleme ve Analiz Programı (MIDAS- GTS) Eğitimi, İMO ve ODTÜ, 2011.

Türkiyede Kalite Altyapısının Güçlendirilmesi Projesi (Strengthening The Quality Infrastructure in Turkey Project), ISO 17025, Validasyon, İç Kalite Kontrolü ve Ölçüm Belirsizliği Üzerine Eğitim, Avrupa Birliği, Gazi Üniversitesi, 2012.

1.Uluslararası Geosentetikler Kongresi, KGM, ODTÜ, Geoplas, ASO ve Petkim, Ankara, 2012.



*GAZİ GELECEKTİR..*