



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



GERİ DOLGUSU ATIK LASTİK VE
GEOTEKSTİL DONATILI İSTİNAT
DUVARLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK
ANALİZİ

Mehmet İBİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet İBİN tarafından hazırlanan “**Geri Dolgusu Atık Lastik ve Geotekstil Donatılı İstinat Duvarlarının Deneysel ve Nümerik Analizi**” adlı tez çalışması 31/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Danışman

Prof. Dr. Murat OLGUN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz YENGİNAR

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
LEE Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinatörlüğü tarafından 221004010 Nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet İBİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DOLGUSU ATIK LASTİK ve GEOTEKSTİL DONATILI İSTİNAT DUVARLARININ DENEYSEL ve NÜMERİK ANALİZİ

Mehmet İBİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat OLGUN

2024, 104 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Murat OLGUN
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ
Dr. Öğr. Üyesi Yavuz YENGİNAR

Tez çalışmasında geri dolgu malzemesi atık lastik kırıntıları (ALK) ve geotekstil donatıdan oluşan model istinat duvarları için araştırma yürütülmüştür. Deneysel çalışmada geri dolgu malzemesi olarak kil zemin içerisine granüler atık lastik kırıntıları (ALK) %0-10-20-30 miktarında kullanılmıştır. İstinat duvarı arkasında geri dolgu malzemesi olarak ALK'nın %0, 10, 20, 30 miktarları ve %30 ALK+geotekstil donatı için model istinat duvarları üzerinde şerit temel sistemi için düşey yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlar için ilk olarak Harward mini kompaksiyon aleti kullanılarak optimum su muhtevaları sırasıyla %16.2, 15.9, 15.2 ve 14.1 olarak elde edilmiştir. Karışımlar için yapılan kesme kutusu deneylerinde; ALK'nın %0, 10, 20, 30 miktarları için kohezyon değerleri sırasıyla $c=66.88, 27.0, 20.88$ ve 12.74kPa ve içsel sürtünme açısı değerleri sırasıyla $3^\circ, 11.3^\circ, 18.26^\circ$ ve 27.7° olarak elde edilmiştir. Killi zemin içerisindeki ALK yüzdesi arttıkça zemin granüler özellik kazanmakta, kohezyon değerleri azalırken içsel sürtünme açısı değerleri artmaktadır.

Laboratuvar ölçekli model deneylerinde; ölçeklendirme kurallarına göre laboratuvar ortamında betonarme istinat duvarı imal edilmiştir. Laboratuvar ölçekli yapılan yükleme deneylerinde istinat duvarı arkasında geri dolgu malzemesi üzerine yapılan yüklemede istinat duvarının tepe noktasında yaklaşık 5 mm yatay deplasman oluşana kadar yükleme yapılmıştır. %0ALK, %10ALK, %20ALK, %30ALK ve %30ALK + geotekstil donatı karışımları için bu deformasyon değerlerinde uygulanan gerilmeler sırasıyla 25kPa, 35kPa, 40kPa, 40kPa ve 50kPa olmuştur. Deneysel çalışma sonuçlarına göre; kil zemin içerisinde kullanılacak optimum ALK miktarı %20-30 aralığında olmuştur. %20 ALK ilaveli geri dolgu malzemesi durumu için saf kile göre %60 civarında daha iyi taşıma kapasitesi sağlanmıştır. %30 ALK + geotekstil donatı ilaveli geri dolgu malzemesi durumunda sadece %30 ALK ilaveli dolgu malzemeli duruma göre taşıma gücü kapasitesinde %25 artış elde edilmiştir. Geotekstil tabakalar zeminde oluşan çekme gerilmelerini karşılamış ve yatay deformasyonları azaltmıştır.

Tüm karışımlar için model istinat duvarlarında Plaxis 3D programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Plaxis analizleri ile model yükleme deneylerinde elde edilen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Plaxis ile yapılan analizlere göre de geri dolgu malzemesi için en iyi performans %20-30 ALK içeriği için elde edilmiştir. Ölçeklendirme ilkelerine bağlı kalarak model istinat duvarları üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde elde edilen değerlerle Plaxis ile yapılan analizlerde elde edilen yatay deformasyon ve taşıma kapasitesi değerleri birbiri ile örtüşmektedir. Hem laboratuvar deneyleri hem de Plaxis analizlerine göre optimum atık lastik yüzdesi %20-30 aralığında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık lastik kırıntısı, Model İstinat duvarı, Ölçeklendirme ilkeleri, Plaxis 3D, Geotekstil donatı

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF WASTE TIRE AND GEOTEXTILE REINFORCED RETAINING WALLS

Mehmet İBİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Murat OLGUN

2024, 104 Pages

**Jury
Prof. Dr. Murat OLGUN
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ
Asst. Prof. Dr. Yavuz YENGİNAR**

In the thesis study, research was conducted for model retaining walls consisting of backfill material waste tire crumbs (ALK) and geotextile reinforcement. In the experimental study, granular waste tire crumbs (ALK) were used in the clay floor as backfill material in the amount of 0-10-20-30%. Vertical loads were performed for the strip foundation system on model retaining walls for 0, 10, 20, 30% amounts of ALK and 30% ALK+geotextile reinforcement as backfill material behind the retaining wall. For these mixtures, the optimum water contents were obtained by using the Harvard mini compaction tool as 16.2, 15.9, 15.2 and 14.1% respectively. In the cutting box experiments conducted for mixtures, the cohesion values for the 0, 10, 20, 30% amounts of ALK were obtained as $c=66.88$, 27.0, 20.88 and 12.74kPa, respectively, and the internal friction angle values were 30, 11.30, 18.260 and 27.70, respectively. As the ALK percentage in clay soil increases, the soil acquires granular properties, while the cohesion values decrease, the internal friction angle values increase.

In laboratory scale model experiments; reinforced concrete retaining wall was manufactured in laboratory environment according to scaling rules. In laboratory-scale loading experiments, loading was performed on backfill material behind the retaining wall until a horizontal displacement of about 5 mm was formed at the peak of the retaining wall. For 0ALK%, 10ALK%, 20ALK%, 30ALK% and 30ALK%+geotextile reinforcement mixtures, the stresses applied at these deformation values were 25kPa, 35kPa, 40kPa, 40kPa and 50kPa. According to the experimental study results, the optimal amount of ALK to be used in clay floor was in the December of 20-30%. For the backfill material condition with the addition of 20% ALK, a bearing capacity of about 60% is provided better than pure clay. In the case of a backfill material with the addition of 30% ALK + geotextile reinforcement, a 25% increase in the carrying power capacity was achieved compared to the case with a backfill material with only 30% ALK addition. Geotextile layers have met the tensile stresses formed on the ground and reduced horizontal deformations.

Analyses were performed using the Plaxis 3D program on the model retaining walls for all mixtures. Results close to the values obtained in model loading experiments have been obtained with Plaxis analyses. According to the analyses performed with Plaxis, the best performance for backfill material was obtained for 20-30% ALK content. Adhering to the principles of scaling, the values obtained in laboratory experiments performed on model retaining walls and the horizontal deformation and bearing capacity values obtained in analyses performed with Plaxis coincide with each other. According to both laboratory experiments and Plaxis analyses, the optimal percentage of waste tires was obtained in the December of 20-30%.

Keywords: Waste tire crumb, Model retaining wall, Scaling guidelines, PLAXIS 3D, Geotextile reinforcement

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca her konuda yardımını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Murat Olgun'a ve her türlü desteği sağlayan Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı Erkan'a teşekkür ederim. Ayrıca yardımlarından dolayı Geoteknik Anabilim dalındaki diğer hocalarıma da teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen eşim Elif'e, süreç esnasında aramıza katılan biricik kızım Zeyneb Esma'ya, anneme, babama ve kardeşlerime sevgilerimi sunar teşekkür ederim.

Mehmet İBİN
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Tezin Önemi ve Kapsamı	9
3.2. İstinat Duvarları Çeşitleri ve Tahkikleri	11
3.2.1. Taş ve beton istinat duvarları	11
3.2.2. Betonarme istinat duvarları	12
3.2.3. Prefabrik istinat duvarları	14
3.2.4. İstinat duvarlarına etkiyen yükler	14
3.2.5. İstinat duvarlarının dayanım tahkikleri	19
3.3. Geosentetikler	22
3.3.1. Geotekstiller	23
3.3.2. Geogridler	24
3.3.3. Geomembranlar	25
3.3.4. Diğer geosentetikler	25
3.4. Ölçekleme kuralları	27
3.5. Atık Lastik Kırıntılarının Özellikleri ve Temini	28
3.5.1. Kıvam limitleri deneyleri	30
3.5.2. Mini (Harvard) proktor deneyleri	34
3.5.3. Kesme kutusu deneyleri	35
3.5.4. Piknometre deneyi	36
3.6. İstinat Duvarının Boyutlandırılması	36
3.6.1. İstinat duvarının imalatı	40
3.6.2. Beton numuneleri üzerinde Serbest basınç deneyleri	44
3.7. İstinat Duvarları Arkasında Dolgu Malzemesi Üzerinde Yükleme Deneyleri	45
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	53
4.1. Zeminle İlgili Yapılan Deneylerin Sonuçları	53
4.1.1. Proktor deney sonuçları	53
4.1.2. Kesme kutusu deneyleri	56
4.1.4. Dayanma duvarını temsilen alınan Beton numunelerin dayanımı	62
4.2. Yükleme Deneyleri	62
4.2.1. Geri dolgu malzemesi saf kil olan durumda yükleme deneyi	64

4.2.2. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi.....	65
4.2.3. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi.....	67
4.2.4. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi.....	69
4.2.5. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil ve Geotekstil donatıdan oluşan istinat duvarında yükleme deneyi	71
4.3. PLAXIS-3D Analizleri	76
4.3.1. Geri dolgu malzemesi saf kil olan durumda Plaxis 3D analizleri.....	78
17x10 ⁶	78
4.3.2. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri.....	81
4.3.3. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri.....	84
4.3.4. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri.....	87
4.3.5. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda Plaxis 3D analizleri	90
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
5.1 Sonuçlar	95
5.2 Öneriler	97
KAYNAKLAR	98
EKLER	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Alan
b_s	: Sayfa düzlemine dik uzunluk
E_r	: Eğilme rijitliği
B	: Temel genişliği
C	: Kohezyon
E	: Elastisite modülü
H	: Yükseklik
G_s	: Güvenlik katsayısı
I	: Atalet momenti
kPa	: Kilopascal
K_a	: Aktif toprak basıncı katsayısı
K_p	: Pasif toprak basıncı katsayısı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
m	: Metre
mPa	: Megaspascal
N	: Newton
N	: Ölçek faktörü
N_c	: Taşıma gücü eşitliğinde 1. terim için taşıma gücü katsayısı
N_d	: Deplasman ölçek faktörü
N_{Er}	: Eğilme rijitliği için ölçek faktörü
N_{dt}	: Temel kalınlığı için ölçek faktörü
N_E	: Elastisite modülü için ölçek faktörü
N_{f_2}	: Düzlem deformasyon şartlarında kuvvet için ölçek faktörü
N_{f_3}	: Üç boyutlu şartlarda kuvvet için ölçek faktörü
N_g	: Yapay yerçekimi şartlarında oluşturulmuş Santrifüj model
N_G	: Zemin rijitliği için ölçek faktörü
N_{gr}	: Yerçekimi ivmesi için ölçek faktörü
N_I	: Atalet momenti için ölçek momenti
N_k	: Geçirimsizlik için ölçek faktörü
NL	: Uzunluk için ölçek faktörü
N_q	: Taşıma gücü eşitliğinde 2. terim için taşıma gücü katsayısı
N_s	: Gerilme için ölçek faktörü
N_{st}	: Birim deformasyon ölçek faktörü
N_{td}	: Dinamik olaylar için ölçek faktörü
$N_{t_{kons}}$	: Konsolidasyon süresi için ölçek faktörü
NV	: Hız için ölçek faktörü
N_γ	: Taşıma gücü eşitliğinde 3. terim için taşıma gücü katsayısı
N_μ	: Viskozite için ölçek faktörü
N_ρ	: Yoğunluk için ölçek faktörü

N_{pa}	: Akışkan için ölçek faktörü
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
O1	: Orta üst saat okuması
O2	: Orta ortanca saat okuması
O3	: Orta alt saat okuması
S1	: Sol saat okuması
U	: Boşluksuyu basıncı
σ_0	: Sükunetteki yanal toprak basıncı
γ	: Zemin yoğunluğu
ϕ	: Kayma direnci açısı
σ_a	: Aktif durum için yanal basınç
σ_p	: Pasif durum için yanal basınç
δ	: Zemin ile duvar arasındaki sürtünme açısı
ΔZ	: Düşey deformasyon
τ	: Kayma gerilmesi
ρ_s	:Tane Yoğunluğu
ρ_{su}	:Su yoğunluğu

Kısaltmalar

ASTM	: Amerika standart yönetmeliği.
LASDER	: Lastik üreticileri Derneği
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
ÖTL	: Ömrünü tamamlamış lastik
RC	: Referans kolon
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Dünya genelinde merkezi yerleşkelerdeki insan nüfusu yoğunluğu her geçen gün artmaktadır. Aynı zamanda insanların ve canlıların tüketim eşyaları ve ihtiyaçları her geçen gün artmakta, değişiklik göstermektedir. Bu artış ve değişimler birçok problemi beraberinde getirmektedir. Bu problemlerden en önemlilerinden bir tanesi de atık malzeme miktarının aşırı miktarda artmasıdır. Bu malzemelerin istiflenmesi ve geri dönüşümü, doğa ve insan sağlığı için en önemli hususlardandır.

Plastik, cam, kağıt, atık beton ve asfaltlar, ömrünü tamamlamış lastik gibi birçok atık maddeler geri dönüştürülüp tekrar farklı amaç ve yöntemlerle kullanılmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastiklerin (ÖTL) kontrolü ile ilgili ülkemizde 25/11/2006 tarihli ve 26357 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanmış olan bir yönetmelik mevcuttur. Bu mevzuata göre ÖTL kavramı, dış kalınlığı 1,6 mm’nin altına inen kullanılmış lastiklerdir. LASDER’in (Lastik Sanayicileri Derneği) yapmış olduğu araştırmaya göre Türkiye’de her yıl yaklaşık olarak 300.000 ton civarında ÖTL atığı ortaya çıkmaktadır. Bu lastiklerin geri dönüştürülerek farklı sektörlerde, farklı şekillerde kullanılması ülke ekonomisi ve ekolojisi açısından önem arz etmektedir. Ülkemizde çevre kirliliğini önlemek amacıyla 2015 yılından bu yana Sıfır Atık Projesi ile geri dönüşümler hızlandırılmış ve çıkarılan atık yönetmelikleri ile bu atıkların depolama ve dönüşümleri de belirli standartlara bağlanmıştır.

Atık lastik kırıntıları, istinat duvarlarının geri dolgusunda doğal zemin malzemeleriyle karıştırılarak kullanıldığında toprak basıncını azaltmaktadır. Birim hacim ağırlığı zemin malzemelerinden az olduğu için, zemin malzemeleriyle karıştırılarak kullanıldığında geri dolgu malzemesinden kaynaklı yanal basınçları azaltmaktadır. Atık lastik kırıntılarının, mukavemet parametreleri zemin malzemelerinden daha iyi olduğu için kayma dayanımları da daha yüksek olabilmektedir. Ayrıca tane çapının yüksek oluşundan dolayı zeminde geçirimsizliği de sağlayarak zemin suyunun duvar arkasından uzaklaştırılmasında da rol oynamaktadır. Bunlara ek olarak atık lastik kırıntıları bir atık malzemesi olduğundan böyle bir amaçla kullanımı doğa açısından da önem arz etmektedir.

Artan nüfus miktarı, yoğunluğu ve yapılaşma miktarı inşaat açısından doğrudan kullanılabilir inşaat alanlarını da bitirmektedir. Buna paralel olarak problemlili arazilerde de çeşitli iyileştirme ve geliştirme teknikleri her geçen gün ivme kazanmaktadır.

Atık lastik kırıntıları, ÖTL'lerin yenilenmesi amacıyla yüzeylerinin kaplanması, parklar ve çocuk oyun alanları gibi zeminlerde yumuşak yüzey kaplamalarında, çatılarda bitümlü yüzey kaplamalarında kullanıldığı gibi son zamanlarda inşaat sektöründe de dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede hem geri dolgunun ölü yükü azalmakta hem de geçirimsizlik artmaktadır.

Dayanma duvarları, zemindeki ani kot değişimleri karşısında üst kotta kalan zeminden gelen yüklere karşı zemini tutan düşey yapısal elemanlardır. İmalat yöntemine göre birçok çeşidi olsa da temelde aynı prensipte çalışmaktadırlar. İstinat duvarlarının amacı yatayda ve düşeyde gelecek hareketli ve ölü yüklere karşı göçme, kayma ve dönmeyi engellemektir.

Dayanma duvarlarının taş, konsol betonarme, donatılı toprakarme, palplanş perdeler, payandalı betonarme, öngerilmeli gibi birçok çeşitleri vardır. Ülkemizde en yaygın kullanılan duvar tipi ise konsol betonarme istinat duvarlarıdır (Uzuner, 2007). Taş duvarlar eski dönemde daha yaygın kullanılmaktaydı. Ancak, belirli bir yükseklikten sonra imalatı mümkün olmadığı için bu yöntem yavaş yavaş terk edilmektedir (Yıldırım, 2019).

Dayanma duvarları tasarlanırken, arazi şartlarına uygun, ergonomik, güvenli ve ekonomik parametreler göz önüne alınarak duvar tipi seçilmelidir. Dayanma duvarına gelebilecek yükler irdelenmeli ve bu yüklere göre tasarım ve projelendirilmesi yapılmalı, yerinde projeye uygun bir şekilde imal edilmesi gerekmektedir. İstinat duvarlarının proje ve imalatı üst düzey teknik bilgilere dayanmaktadır. Doğru yapılmayan tasarımlar veya tasarımlara bağlı kalmadan yapılan imalat hataları yüzünden ülkemizde her sene özellikle yağışların arttığı mevsimlerde birçok can ve mal kaybına sebep olan göçmeler meydana gelmektedir. İstinat duvarlarında uygulamada en önemli problemlerden birisi yağış sonrası arka dolguda biriken su sonucu oluşan boşluksuyu basıncı artışlarıdır. Bunun en temel sebepleri yeteri kadar barbakan delikleri açılmaması veya geri dolguda kullanılan malzemenin yeteri kadar geçirimsizlik sağlamamasıdır.

Bu tez çalışması kapsamında 2-5 mm çapındaki atık lastik kırıntıları kil zeminle %0-10-20-30 oranlarında karıştırılarak optimum su muhtevasında hazırlanacaktır. Hazırlanan bu karışımlar daha sonra yükleme tankında istinat duvarının geri dolgusunda tabakalar halinde serilip, yüklemeler yapılacak ve bu yükler altında duvardaki deformasyon ve zemindeki boşluk suyu basıncı değişimleri ölçülecektir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak istinat duvarlarında, atık lastiklerin geri dolgu malzemesi olarak performansı test edilecektir. İstinat duvarının tasarımı ise ölçeklendirme kurallarına bağlı

olarak gerçeğe yakın bir modelleme yapılarak duvarın davranışının gerçeğe yakın hali incelenecektir. Aynı zamanda bu ölçeklendirilmiş duvar PLAXIS 3D programında yükler altında yüklenecek ve elde edilen sonuçlar laboratuvar sonuçları ile kıyaslanacaktır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Geri dönüştürülmüş atık lastik kırıntılarının kullanımına dair araştırma ve çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmaların genelinde atık lastik kırıntılarının farklı zeminlerle birlikte çeşitli oranlarda karıştırılması ile zeminlerin geoteknik davranışları üzerindeki etkileri incelenmektedir.

Zemin ile atık lastik kırıntılarının kil veya kumlu zeminler içerisine farklı oranlarda ilavesi ile hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan deneylerde zeminin yoğunluğu, geçirimsizliği, gerilme-deformasyon ilişkileri, kohezyonu, içsel sürtünme açısı ve kıvam limitleri gibi parametreleri araştırılmıştır. Zemin – atık lastik kırıntısı karışımları uygulama alanında dayanma duvarı arka dolgusu, yol alt temeli malzemesi, demiryolu alt temel malzemesi, şev oluşturulması vb. şeklinde kullanılabilmektedir. Bu karışımların kullanılabilirliği Plaxis 2D, Plaxis 3D ve GEO 5 gibi yazılımlar kullanılarak yapılan modellemelerle daha fazla detaylandırılabilir.

Bu tez çalışması ile ilgili literatürde yapılan bazı çalışmalardan aşağıda kısaca bahsedilmektedir;

Erginer ve ark. 2019 yılında yaptığı çalışmada, kötü derecelenmiş kum bir zemin içerisine sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25, %50, %75 oranında atık lastik malzemeleri karıştırmışlardır. İlk olarak bu karışımlar için Standart proktor deneyi yaparak optimum su muhtevası değerlerini bulmuşlardır. Ardından bu karışımlara CBR deneyleri yaparak 2.5 mm ve 5.0 mm penetrasiyona karşılık gelen yük değerlerini elde etmişlerdir. Deneyler sonucunda atık lastik oranı arttıkça optimum su muhtevası değerinin yaklaşık olarak %10-25 civarı artış gösterdiği bulunmuştur. CBR deneyleri sonucunda ise atık lastik katkısının %20 oranına kadar zeminin taşıma oranında artışa neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Keskin (2009), kumlu bir şev zemin üzerinde oluşturulan şerit temel sistemi için taşıma kapasitesi ve şevin stabilitesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Model deney tankı içerisinde donatısız, geogrid donatılı ve atık lastik parçalarıyla karıştırılmış donatılı ve donatısız zeminler kullanılarak oluşturulan şevli zemin üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Donatısız zeminde temelin şev tepesine olan uzaklığı, şev açısı gibi özelliklerinin zemin taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Donatılı deneylerde ise geogrid tabakalarının yerleşim yeri ve boyutuyla ilgili değişikliklerin taşıma kapasitesi ve oturmaya olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca yapılan deneyler PLAXIS 2D programı

kullanılarak bilgisayar ortamında modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada ölçekleme yasaları dikkate alınmamıştır. Ancak Araştırmacı gelecek çalışmalarda ölçeklendirme kurallarının uygulanması gerektiğini önermiştir. Çalışma kapsamında; donatılı deneylerde taşıma kapasitesinin donatısız duruma göre 3.83 kat arttığı ve oturmaların ise %55 değerinde azaldığı gözlemlenmiştir. Atık lastik kum karışımında ise optimum lastik içeriğinin %10-15 arasında olduğu gözlenmiştir. Atık lastiğin bu oranları için kumda içsel sürtünme açısının %100 civarında arttığı belirlenmiştir. Şevlerde atık lastik kullanıldığında dolgu ağırlığının azaldığı, şevin taşıma kapasitesinin arttığı ve oturmanın azaldığı gözlenmiştir. %10 lastik karışımının olduğu durumda %100 kum zemin olan durumu göre oturmalar %88 azalmıştır. Ayrıca %10 lastik karışımı olan durumda şerit temel taşıma kapasitesinin 5.5 kat daha arttığı gözlenmiştir.

Karaman ve Ecemiş (2017) yaptıkları çalışmada, çapları 2.5-5 mm ve 5-10 mm aralığında olan atık lastik kırıntılarını hacimce %10, 20, 30 oranında kum zeminle karıştırmışlardır. Bu karışımları kullanarak tek eksenli sarsma tablası deneyleri yapmış ve karışımların sıvılaşma potansiyellerini incelemişlerdir. Çalışmada büyük boyutlu laminar kutu ve tek yönlü dinamik sarsma tablası kullanılmıştır. Bu karışımlara elektrik analizi deneyleri yapılarak karışımların dane çapı grafikleri elde edilmiştir. Çalışmada 2 Hz frekanslı 20 saniye süreli sarsma etkisi uygulanmıştır. Karışımlara 0.2g ve 0.3g ivmeli yüklemeler yapılmıştır. Bu deneylerde 0.3g ivme değerindeki sarsmada sıvılaşma durumunun daha önce ortaya çıktığı gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda atık lastik oranının artmasıyla sıvılaşma potansiyelinin azaldığı gözlenmiştir. 5-10 mm çapındaki lastik kırıntılarının sıvılaşma potansiyelini daha çok azalttığı gözlenmiştir. Sıvılaşmaya karşı en iyi sonuç; %20-30 oranındaki atık lastik oranı için 5-10 mm aralığındaki çaplarda elde edilmiştir.

Umu ve Okur (2020) yapmış oldukları çalışmada, bir demiryolu yol altyapısında alt temel dolgu malzemesi olarak temiz kumun içerisine çubuk, toz ve amorf olarak atık lastik parçalarını %5, 10, 15 oranında karıştırarak kullanmışlardır. Bu karışımlar üzerinde rezonant kolon (RC) deneyi yapmışlardır. Çalışmaların sonucunda 100 kPa efektif basınç altında %0.001 birim kayma deformasyon seviyesinde; %5 oranında toz lastik kullanılarak hazırlanan karışımın kayma modülünün, temiz kum kullanılarak hazırlanan numunenin kayma modülüne göre %26, %0.01 birim kayma deformasyon seviyesinde %18, %0.1 birim kayma deformasyon seviyesinde ise %35 civarı daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tan, Zhou ve Ding (2021) tarafından yapılan çalışmada, kumlu bir zemin dolgusunda geocell donatı takviyeleri ile istinat duvarına sarsma tablası deneyleri uygulanmıştır. Geocell olarak beton kanvas geocell kullanmıştır. Geocellin olduğu durumlarda dolgu yüzeyindeki kırılmalar azalmış, düşey deformasyonlar azalmıştır. 0.7g ivme ile gerçekleştirilen sarsıntı altında duvardaki yanal deformasyonlar geogrid donatılı zeminde %43, geocell donatılı zeminde ise %72 oranında azalmıştır. Düşey yer değiştirmeler ise %50 oranında azalmıştır. Kullanılan donatıların arka dolgunun sismik performansını da iyileştirdiği gözlenmiştir.

Davarcı, Örnek ve Türedi'nin (2014) yapmış olduğu çalışmada, geogrid donatılı gevşek kum zemin üzerine oturan çok kenarlı yüzeysel temellerin taşıma gücü araştırılmıştır. Bu amaçla H, T, + ve kare kesitli temellerin altına geogrid takviyeli zemin yerleştirilmiş ve yük hücreleriyle yüklemeler yapılarak temellerin göçme mekanizmaları incelenmiş, yük deformasyon grafikleri çizilmiştir. Sırasıyla +, H, T ve kare temeller için göçme yükleri 0.546 kN, 0.576 kN, 0.611 kN ve 0.603 kN olarak ölçülmüştür. Ardından zeminlere tek sıra, iki sıra ve daha fazla belirli aralıklarla geogrid donatılar yerleştirilmiş ve göçme yükleri ölçülmüştür. İlk donatı derinliği $u=0.33L$ olduğu durumda temelin en yüksek taşıma gücüne sahip olduğu belirlenmiştir. İki donatılı durumda ise $u=0.33L$ olduğu durum en iyi performansı vermiştir. Tek donatıya göre temel taşıma kapasitesi 2 kat artmıştır. Donatı sayısının 4 olduğu durumda ise temel taşıma kapasitesi 3 kat artış göstermiştir.

Can (2017) yılında yaptığı çalışmada, 8m, 12m ve 16m'lik geosentetik donatılı istinat duvarı Plaxis programında modellemiştir. Her duvar için $L=0.5H$, $0.7H$ ve $0.9H$ donatı uzunluğu kullanılarak farklı geosentetik malzemelerle 216 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Programlardan yatay ve düşey deformasyon değerlerine bakılmıştır. Duvar yüksekliğinin 8 m olduğu durumda geogrid uzunluğu $L=0.5H$ 'dan $0.7H$ 'a çıkarıldığında yanal deformasyon ve güvenlik katsayısında artış gözlenirken $0.9H$ 'a çıkarıldığında bu artış gözlenmemiştir. Minimum geogrid uzunluğunun $0.55H$ olması gerektiği saptanmıştır. Optimum geogrid uzunluğunun ise $0.55H-0.7H$ arasında olduğu gözlenmiştir. Çalışma sonucunda minimum geogrid uzunluğunun zeminin içsel sürtünme açısı ve elastisite modülünden bağımsız olmadığı gözlemlenmiştir.

Kahyaoğlu ve Şahin (2017) tarafından yapılan çalışmada, geri dolgusu kumlu geogrid donatılı 3 m yüksekliğindeki bir istinat duvarı laboratuvar ortamında modellenmiştir. Bu model duvara yatay yük verilerek oluşan deformasyonlar yatay deformasyon ölçerler ve strain gaugeler ile ölçülmüştür. Yükleme sonucunda duvardaki

maksimum yatay deplasman 3. Donatı tabaka seviyesinde duvar yüksekliğinin %1.5'i oranında oluşmuştur. Geogrid donatıda maksimum gerilmenin $H/3$ yükseklikte duvardan $0.3H$ uzaklıkta olduğu ve bu noktadan sonra ise azaldığı gözlenmiştir. Sürşarj yükleme durumunun ise duvara gelen zemin ağırlığından 4 kat fazla gerilme oluşturduğu ölçülmüştür. 3. Donatıda maksimum gerilme 6 kN/m olarak ölçülmüştür. Duvarda 20 kPa yük altında maksimum deformasyon 70 mm olarak ölçülmüştür. 3. Donatı tabakasında ise 80 mm civarı deplasman ölçülmüştür. Yükleme 24 saatte 2 kPa 'lık artışlar yapılarak toplamda 20 kPa 'a çıkana kadar devam edilmiştir.

Arefnia, Dehghanbanadaki ve Kassim (2021) tarafından yapılan çalışmada, kaolin kili ile toz halindeki $5-8 \text{ mm}$ çaplı atık lastik kırıntıları ağırlıkça %0, 20, 40 ve 60 oranında karıştırılmıştır. Bu karışımların yoğunluğu, optimum su muhtevası, içsel sürtünme açısı gibi karakteristik özellikleri deneylerle belirlenmiştir. Ardından bu karışımlar laboratuvar ortamında model istinat duvarında geri dolgu malzemesi olarak kullanılmış, duvarlara yüklemeler yapılarak deformasyonlar ölçülmüştür. Araştırmacılar, %60 oranında atık lastik kırıntısının bulunduğu karışımın en iyi esnekliği sağladığını gözlemlemişlerdir. Saf kaolin dolgulu duvar 1.5 mm deformasyona 100 kPa altında ulaşırken, %20 atık lastik karışımı ($1-4 \text{ mm}$ granüler) duvarın 1.5 mm deformasyon yapması için 250 kPa yükleme yapılması gerekmiştir. $5-8 \text{ mm}$ granüler atık lastik kırıntılı dolguda ise bu yük 300 kPa civarına yaklaşmıştır. En fazla gerilmeyle en düşük deformasyonun sağlandığı değer %20 karışım oranı olarak gözlemlenmiştir. Toz atık lastik kullanılarak oluşturulan dolguların deformasyon değerleri saf kaolin kullanılarak oluşturulan dolgudaki değerlere yakın çıkmıştır.

Keskin ve Laman (2012) yılında yaptığı çalışmada, kumlu zemine $10-25 \text{ mm}$ uzunluğunda $2-4 \text{ mm}$ genişliğinde şerit lastik parçacıkları hacimce %0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 olarak %65 rölatif sıklıkta karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan bu karışım numunelerine kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneylerde saf kumun içsel sürtünme açısı 42.4° gelirken bu değer %15 atık lastik karışımına kadar artarak maksimum 46.6° olmuş ve ardından azalarak %50 atık lastik karışımı için minimum 29.0° olmuştur. Yani optimum karışım oranı %10-20 arasında elde edilmiştir. Kohezyon değeri ise lastik oranına paralel olarak %30 değerine kadar artış göstermiştir. Saf kumda 4.8 kN/m^2 olan kohezyon değeri %30 atık lastik karışımı için 13.3 kN/m^2 değerine ulaşmıştır. Daha sonra ise artan atık lastik miktarları için azalarak 5.5 kN/m^2 değerine kadar düşmüştür.

Reddy ve Krishna (2019) tarafından yapılan çalışmada, 600 mm uzunluğundaki istinat duvarı arkasında geri dolgu malzemesi olarak saf kum ve %10, 20, 30, 40, 50

oranında atık lastik kırıntısı karıştırılarak oluşturulan malzemeler kullanılmıştır. İstinat duvarı ve geri dolgu malzemeleri sarsma tablasında 0.1g 0.2g 0.3g ivmeleriyle sarsılmıştır. Araştırmacılar, sarsma esnasında duvardaki yatay deformasyonları duvarın üç noktasına yerleştirdikleri LVDT cihazlarıyla ölçmüşlerdir. %100 kumlu zeminde 0.3g ivmede maksimum deformasyonu 4.32 mm olarak ölçülmüştür. Sırasıyla %10, 20, 30, 40, 50 karışım oranlarında 3.41 mm, 2.63 mm, 1.49 mm, 2.31 mm, 3.09 mm yatay deformasyonlar ölçülmüştür. Minimum yatay deformasyonun elde edilmesi için optimum karışım oranı %20-30 aralığında elde edilmiştir.

Özaydın (2010) yaptığı çalışmada, geri dolgusunda geotekstil donatılı kum zeminlerin bulunduğu istinat duvarlarını laboratuvar ortamında modellemiştir. 40 cm yükseklik 53.5 cm genişlik 5 cm kalınlıktaki konsol istinat duvarı ahşaptan imal edilmiştir. Geri dolguya 10x10 cm ebatında kare temel ile merkezi yükleme yapılmıştır. Yükleme 8 mm yanal deformasyon değerine kadar farklı adet, mesafe ve aralıklarla geotekstil donatının serilmesiyle tekrarlanmıştır. Donatısız kum zemin 2,07 kN yük altında 8 mm deformasyona ulaşmıştır. 2 donatılı zeminde 4 kN, 4 donatılı zeminde 12 kN, 6 donatılı zeminde ise 17 kN yük altında 8 mm deformasyona ulaşılmıştır. Optimum iki donatı arası mesafe ise $h=0.4B$ olarak saptanmıştır. Optimum donatı genişliği ise $b=4B$ olarak ölçülmüştür. Optimum donatı boyu $L=2.8 B$ olarak ölçülmüştür.

Sawwaf (2007) yapmış olduğu çalışmada, yumuşak killi alt dolgu üzerine kumlu bir şev dolgusu yapmış ve bu şevin üzerine yerleştirdiği şerit temelin donatılı ve donatısız zeminlerde taşıma kapasitesini model deneylerle araştırmıştır. Deney tankı 100x50x50 cm ebatlarında bir tank olarak tasarlanmıştır. Kum için rölatif sıkılık %80 olarak seçilmiş ve kum tank içerisine yağmurlama yöntemiyle yerleştirilmiştir. Şerit temel 49.8 cm uzunluğunda 7.5 cm genişliğinde ve 2 cm kalınlığında çelik plaka olarak seçilmiştir. Donatı olarak ise 45 kN/m çekme dayanımlı tek yönlü HDPE tipli geogrid donatı seçilmiştir. Donatı aralık ve adetleri değiştirilerek yapılan deneylerde kum tabaka yüksekliğinin 3.0 B olduğu durumda taşıma kapasitesi maksimum değere ulaşmıştır. Optimum ilk donatı tabakası derinliği 0.6B, donatılar arası optimum mesafe $h=0.5B$, optimum donatı uzunluğu ise $L=5.0B$ olarak elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda istinat duvarlarının temel özellikleri ve tahkikleri, istinat duvarlarının ölçekleme kuralları, tez çalışması kapsamında kullanılan kil, atık lastik gibi malzemeler hakkında bilgiler ile model deney düzeneği kullanılarak yapılan yükleme deneylerine yer verilmiştir.

3.1. Tezin Önemi ve Kapsamı

Dünya genelinde artan atık miktarı büyük bir problem arz etmektedir. Özellikle gelişmiş ülkeler bu atıklarını geri dönüştürmekte veya daha az gelişmiş ülkelerin bu malzemeleri geri dönüştürmesi veya yok etmesi amacıyla o ülkelere ihraç etmektedirler. Ülkemizde de atık malzemelerin geri dönüşümü üzerinde çalışılmakta ve bu kapsamda kanunlar yönetmelikler çıkarılıp teşvikler verilmektedir. Ancak özellikle atık lastiklerin kullanımı ile ilgili belirli bir yönetmelik veya standart bulunmamaktadır. Günümüze kadar atık lastiklerin inşaat sektöründe kullanımı ile ilgili yeterli bilimsel çalışmanın yapılmadığı da görülmektedir. Ülkemizde 25 Kasım 2006 yılında 26357 sayılı ÖTL yönetmeliği yayınlanmıştır. LASDER'in yayınladığı verilere göre, 2007-2017 yılları arasında ülkemizde toplamda 720 bin ton ÖTL toplanmıştır. Avrupa Birliği ülkelerinde ise bu sayı 2008 yılı için 3.2 milyon tona ulaşmaktadır. Her geçen gün artan araç ve insan sayısı göze alındığında bu miktarın yıllar boyunca katlanarak artacağı aşıkardır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Dünya genelinde artan atık lastikler ve Kuveyt'te bir atık lastik yangını (www.teyit.org).

Bu tez çalışması kapsamında; 2-5 mm çapındaki atık lastik kırıntıları kil zeminle %0-10-20-30 oranlarında karıştırılarak optimum su muhtevasında hazırlanacaktır. Hazırlanan bu karışımlar daha sonra yükleme tankında istinat duvarının geri dolgusunda tabakalar halinde serilip, geotekstil donatı ile desteklenerek yüklemeler yapılacak ve bu yükler altında duvardaki deformasyon ve zemindeki boşluk suyu basıncı değişimleri ölçülecektir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak istinat duvarlarında, geri dolgu malzemesi olarak atık lastiklerin kullanımı araştırılacaktır. İstinat duvarının tasarımında ölçeklendirme kurallarına bağlı kalınacak ve gerçeğe yakın bir model istinat duvarı üretiləcəktir. Böylece gerçeğe uygun ve yakın bir duvar üzerinde yüklemeler gerçekleştirilecektir. Aynı zamanda bu ölçeklendirilmiş duvar Plaxis 2D programında yükler altında yüklenecek ve elde edilen sonuçlar laboratuvar sonuçları ile kıyaslanacaktır. Özetle bu tezin aşamaları şu şekilde olacaktır:

a) Zemin karakteristik deneyleri;

- Elek analizi
- Atterberg kıvam limitleri
- Tane yoğunluğu deneyleri
- Kesme kutusu deneyi
- Serbest basınç deneyi
- Geçirimlilik deneyi
- Modifiye proctor deneyi

b) Yükleme deneyleri;

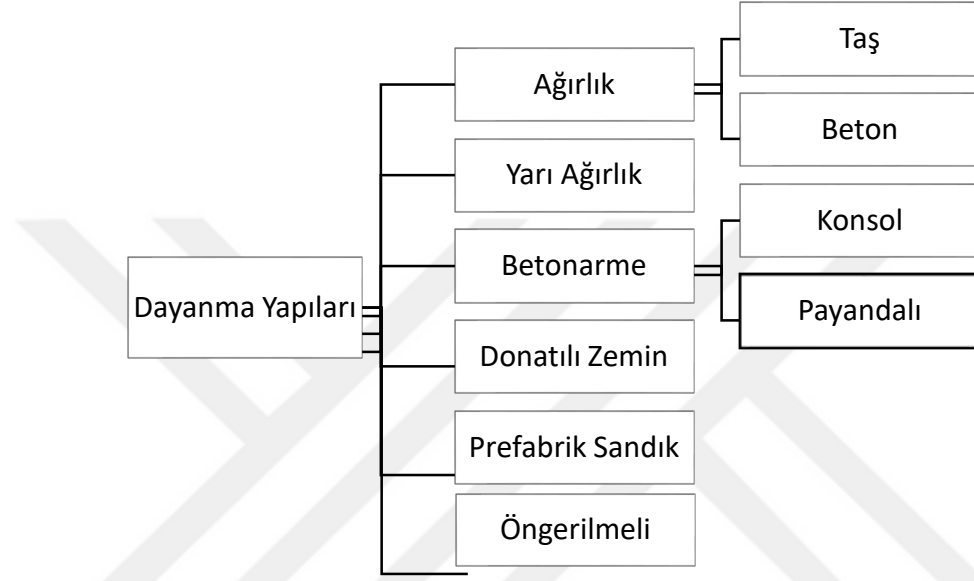
- Farklı karışım oranlarındaki zeminler istinat duvarlarının arka dolgusuna ölçeklendirilmiş tank içerisine yerleştirilecek ve ölçeklendirilmiş yüklemeler yapılacak ardından yük-deformasyon ilişkisi çıkarılacak, yükleme altında düşey deformasyon değerleri okunacak ve zemindeki boşluksuyu basıncı değişimi ölçülecektir.

c) Nümerik analiz;

- Ölçeklendirilmiş boyutlardaki istinat duvarı Plaxis 2D programında çizilecektir. Belirlenen yük ve zemin parametreleri programa girilerek analiz yapılacak ve elde edilen sonuçlar laboratuvar deneyleri ile kıyaslanacaktır.

3.2. İstinat Duvarları Çeşitleri ve Tahkikleri

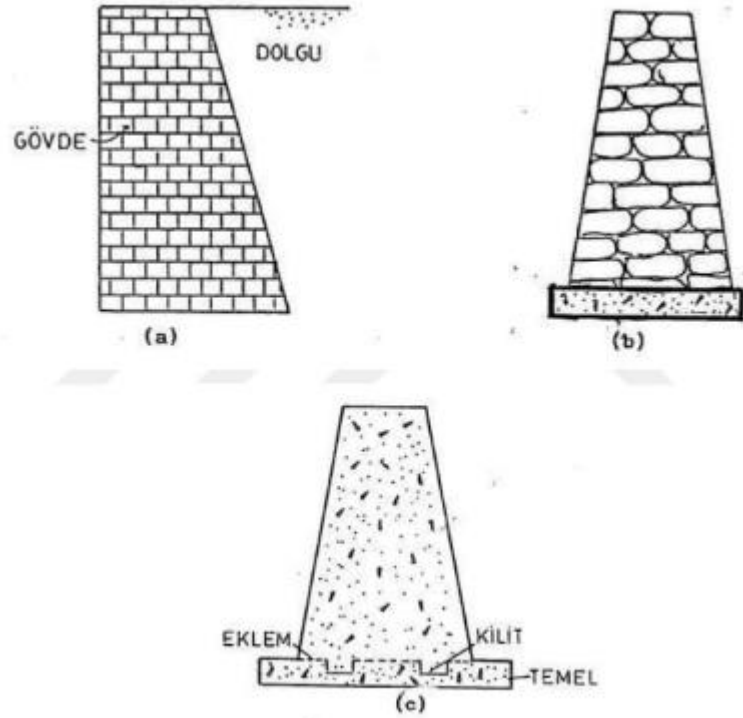
İstinat duvarları, iki farklı kottaki zeminin yanal toprak itkisini güvenle karşılayan, zeminin kaymasını önleyen yapısal elemanlara verilen isimdir. Amaca ve yere göre birçok farklı yöntemle imal edilebilmektedir (Şekil 3.2). Ülkemizde istinat duvarları tasarlanıp uygulanırken TSE 7994 numaralı yönetmelik referans alınmaktadır.



Şekil. 3.2. Yaygın uygulanan istinat duvarı tipleri (Uzuner, 2007).

3.2.1. Taş ve beton istinat duvarları

Ağırlık (masif) istinat duvarları olarak adlandırılan bu duvarlar, taşların arasına çimento veya kireç harcı uygulanarak yapılan istinat duvarları veya demir kullanılmadan sadece betondan elde edilen duvar tipleridir (Şekil 3.3) (Leblebici, 2021). Bu duvarlar oluşan aktif ve pasif zemin basınçlarını, ağırlıklarıyla karşılamaktadır (Epsiseli, 1996). Taşların ve betonun çekme dayanımı düşüktür. Bu sebeple genelde 4-5 m'yi aşan durumlarda ekonomik ve güvenilir olmayacağından genelde tercih edilmez.



Şekil 3.3 Ağırılık istinat duvarları (TS7994).

3.2.2. Betonarme istinat duvarları

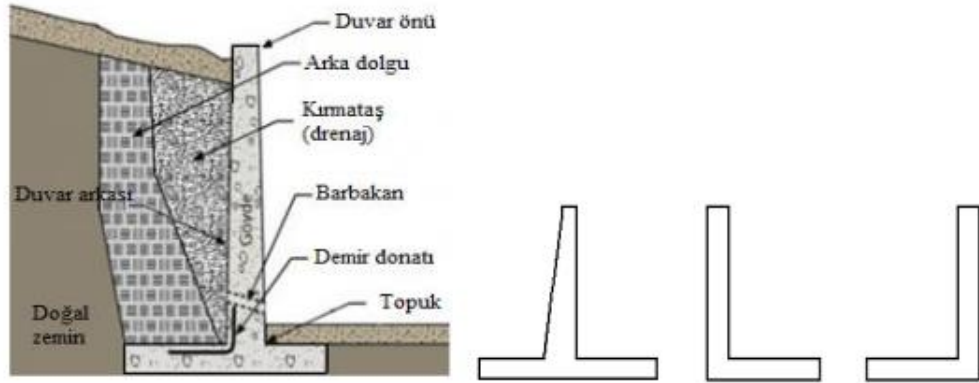
Beton ve demir donatının beraber kullanıldığı istinat duvarlarıdır. Daha yüksek ve daha ekonomik çözümler sağladığı için en yaygın kullanılan istinat duvarı tipidir. Ankrajlarla birlikte de kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan tipleri ise konsol ve payandalı betonarme duvarlardır.

Genel olarak yükseklikleri 7-8 m civarında olsa da daha yüksek istinat duvarları da tasarlanıp uygulanabilmektedir. Duvarlarda arka kısımda oluşacak su basıncını önlemek amacıyla barbakan denilen tahliye borularıyla duvar gövdesinden düşeydeki su ön kısma uzaklaştırılır.

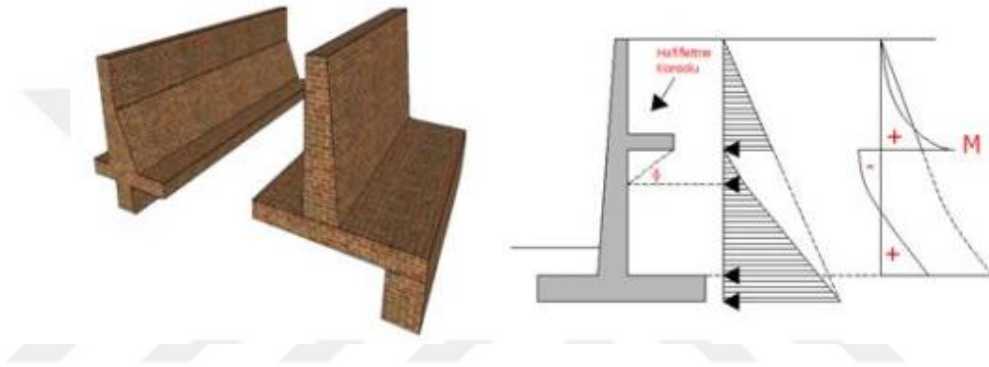
3.2.2.1. Konsol istinat duvarları

İçerisindeki beton basınç etkilerine, donatılar ise çekme etkilerine karşı dayanım sağlamaktadır. Ekonomik olan en fazla yükseklik 7.5 m'dir (TS-7994). Ancak özel durumlarda 20m'ye kadar uygulamalar yapılmaktadır. Uzunluk arttıkça narinlik etkisi artacağından ekonomik olmaktan uzaklaşmaktadır. Yüksekliğin 7-8 m'yi aştığı durumlarda hafifletme konsolları yapılarak duvar gövdesine etkiyecek yükler

azaltılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılacak duvar tipi de betonarme konsol istinat duvarıdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.12 Betonarme konsol istinat duvarı (www.movea.com.tr)

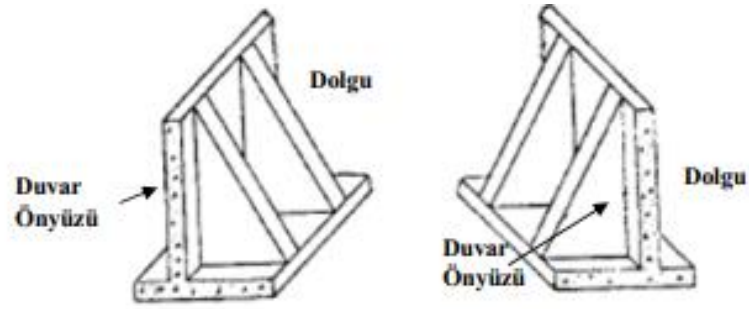


Şekil 3.4. Konsol istinat duvarları (Yıldırım, 2019).

3.2.2.2. Payandalı istinat duvarları

Artan yükseklik ve buna bağlı olarak artan düşey veya yatay yükler konsol duvarların yapımını güvenli ve ekonomik olmaktan çıkarır. Bu durumlarda payandalı istinat duvarlarına başvurulur. Gövde ve temel elemanları konsol duvar tipindeki gibidir. İlave olarak arka kısmına gövde ve temel arasında bir bağlantı olarak üçgen kama şeklinde betonarme destek elemanları yapılmaktadır. Bu sayede istinat duvarları daha rijit olmaktadır ve daha fazla eğilme momentine karşı koymaktadır. Bu kama şeklindeki üçgen elemanlara ise payanda adı verilmektedir. Yüksekliğin 8m'yi aştığı durumlarda payandaya başvurulur. Önde bir engel bulunmuyorsa payandalar ters biçimde öne de uygulanabilir. Ancak buradaki payandalar basınç etkilerine çalışmaktadır. Düşey toprak kuvvetleri ise topuk noktasına etkidiği için duvar rijitliğini çok artırmazlar (Şekil3.5).

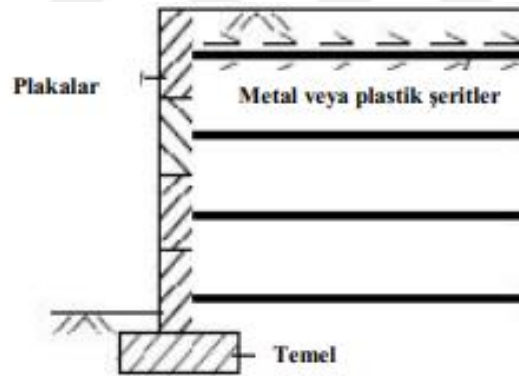
Payandalı istinat duvarlarında payanda aralıkları $H/3$ - $H/2$ arasında değişmektedir (Bilgin, 2006).



Şekil 3.5. Payandalı istinat duvarları (Yıldırım, 2019).

3.2.3. Prefabrik istinat duvarları

Saha dışında önceden hazırlanarak yerinde montajıyla inşa edilen istinat duvarlarıdır. İnşası hızlı, ekonomik, daha az işçilik gerektiren duvar arkasında kazı gerektirmeyen ve drenajı sağlaması yönünden kullanışlıdır. Duvar yüzeyi oluşturulduktan sonra arka dolgu oluşturulur (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Prefabrik istinat duvarları (Uzun, 2006).

Bunlara ek olarak gabyon (kafes), sandık, çelik kafes, kazıklı perde gibi birçok istinat duvarı elde etme yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler yukarıda verilen yöntemlere nazaran daha az kullanılmaktadır.

3.2.4. İstinat duvarlarına etkiyen yükler

- İstinat duvarlarına, duvarın ağırlığı yatay ve düşey olarak etkimektedir. Duvar ağırlığı ile zemin sürtünme katsayısı çarpılarak meydana gelen yatay kuvvet de duvara gelen yatay kuvvetlere karşı koymaktadır.

- Duvar arkasındaki zeminlerden dolayı duvara bir yatay yük gelmektedir. Bu yüklerin hesabı için en çok kullanılan iki yöntem: Coulomb kama ve Rankine teorileridir.

- Duvarın ön kısmında yer alan topraktan gelen bir pasif toprak basıncı mevcuttur. Duvar, arkadan gelen yüklerin etkisiyle öne doğru hareket etme eğilimindedir. Zeminin duvara etkidiği bu yüke ise pasif toprak basıncı adı verilir. Uygulamada gerek güvenli alanda kalmak için gerekse bu etki zamanla yiteceğinden genelde hesaba alınmaz.

- İstinat duvarlarında en önemli problemlerden birisi de duvar arkasında biriken boşluksuyu basıncıdır. Hesaplamalarda bu etki hesaplanmalıdır.

- Bu etkilerin dışında, deprem etkisi, dolgu üzerindeki dinamik yükler (yol, tren yolu), dolgu üzerindeki sürşarj yükleri, kil dolgudan dolayı oluşabilecek şişme basıncı etkisi gibi yükler de hesaba katılarak doğru tasarım yapılması gerekmektedir.

3.2.4.1. Yanal zemin basınçlarının hesaplanmasında Rankine teorisi

Bu teoriler birkaç kabule dayanarak ortaya atılan teorilerdir. Rankine teorisi zeminin plastik dengeye ulaştığı andaki gerilmeleri hesaba katar. Bu teoriye göre zeminlerin sükunet hali ve plastik denge hali vardır.

a- Sükunet durumu: Zeminde herhangi deformasyonun olmadığı zamanda istinat duvarlarına etkiyen yanal basınç durumudur. Bu durumdaki yatay toprak basıncı:

$$\sigma_0 = K_0 \gamma z \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. K_0 değeri:

$$K_0 = (1 - \sin\phi) \quad (3.2)$$

Aşırı konsolide killerde:

$$K_0 = (1 - \sin\phi)(OCR^{\sin\phi}) \quad (3.3)$$

Burada:

K_0 : Sükunetteki toprak basıncı katsayısı,

ϕ : Zeminin kayma direnci açısı,

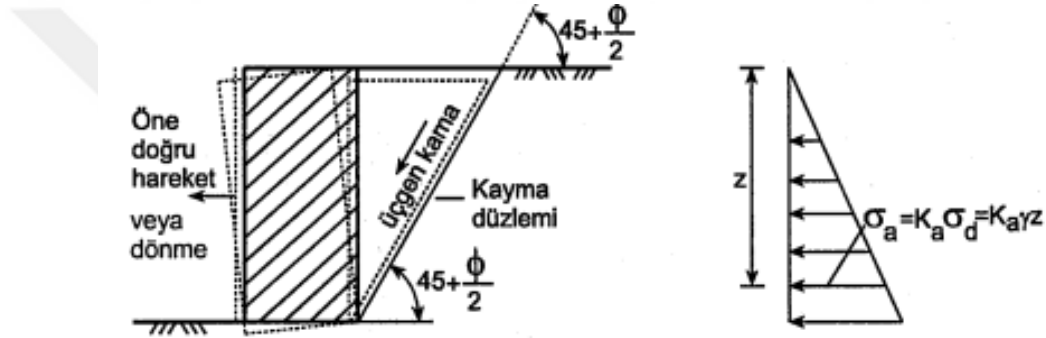
OCR: Aşırı konsolidasyon oranıdır.

b- Plastik denge durumu:

Yarım sonsuz düzlemde zeminin yanal deformasyona uğratılması gerekir. Kohezyonsuz zeminler için aktif ve pasif duruma göre aşağıdaki şekilde açıklanmıştır (Uzuner, 2007);

- Aktif durum

Zemine yanal genleşme için yük uygulanırsa duvara etkiyen yanal basınca aktif basınç adı verilir. Rankine teorisine göre duvar ile zemin arasında bir sürtünme yoktur. Yani duvarın arka yüzeyi pürüzsüz kabul edilir. Esasında bir miktar sürtünme vardır. Ancak bu kabul hızlı ve gerçeğe yakın değerler verdiği için günümüzde hala kullanılmaktadır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Rankine teorisi için aktif basınç dağılımı (Uzuner,2006).

Aktif durumda duvara etkiyen yatay gerilme değeri yüzeye doğru doğrusal olarak azalırken düşey gerilme sabittir. Bu sebeple oluşan kırılma düzlemi yatayla $45+\phi/2$ gibi bir açı yapmaktadır. Duvar arkasında oluşan aktif yanal zemin basıncı şu şekilde hesaplanır;

$$\sigma_a = K_a \gamma_n z \quad (3.4)$$

$$K_a = \tan^2 [45-\phi/2] \quad (3.5)$$

Burada:

K_a : Aktif zemin basıncı katsayısı

σ_a : Aktif durum için yanal zemin basıncı

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p \quad (3.10)$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (3.11)$$

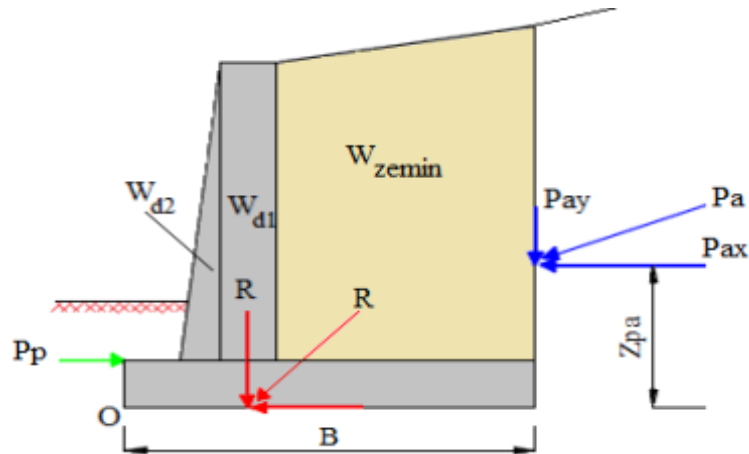
şeklinde hesaplanır. Bunların dışında Culmann yöntemi gibi birkaç farklı hesaplama metodları da vardır (Şekil 3.10.).

3.2.5. İstinat duvarlarının dayanım tahkikleri

İstinat duvarları, devrilmeye, kaymaya, toptan göçmeye, oturmaya karşı belirli bir güvenlik katsayısının üzerinde kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu tahkikler yapılarak duvarın projelendirilmesi yapılmalıdır.

3.2.5.1. Devrilme tahkiki

İstinat duvarına etkiyen yükler tek tek hesaplanır. Bu yüklerin bir kısmı devrilmeye karşı koyarken bir kısmı devirici kuvvetlerdir. Ardından duvarın sol alt köşe noktasına (topuk noktası) göre bu yüklerin momenti alınır. Bu moment değerlerinin toplamı oranlanarak güvenlik katsayısı hesaplanır. Deprem etkisi olmayan durumlar için güvenlik katsayısı en az 1.5 olması gerekir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Devirici ve karşı koyan kuvvetler.

$$G_s = \frac{\sum M_o, (karşı)}{\sum M_o, (deviren)} \quad (3.12)$$

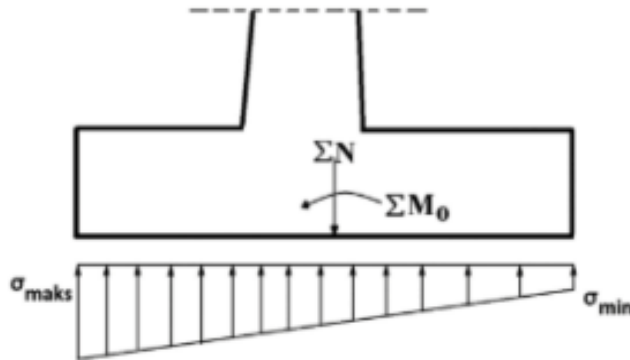
3.2.5.2. Kayma tahkiki

Duvar arkasındaki zemin ile yukarıdan etkiyen sürşarj kuvveti duvarı kaymaya zorlarken, duvarın kütlesi ile zemin arasındaki sürtünme ve ön kısımdaki pasif zemin kayma kuvvetine karşı direnç gösterir. Duvarın kaymasına karşı koyan kuvvetlerin, duvarı kaydıran kuvvetlere oranlanmasıyla kayma tahkiki için güvenlik katsayısı hesaplanır. Deprem etkisinin olmadığı durumlarda güvenlik katsayısının en az 1.5 olması gerekir. Yeterli kayma dayanımının olmadığı durumlarda temele dış eklenebilir (Özbey, 2003).

$$G_s = \frac{\sum F}{\sum F(kaydırd)} \quad (3.13)$$

3.2.5.3. Taşıma gücü tahkiki

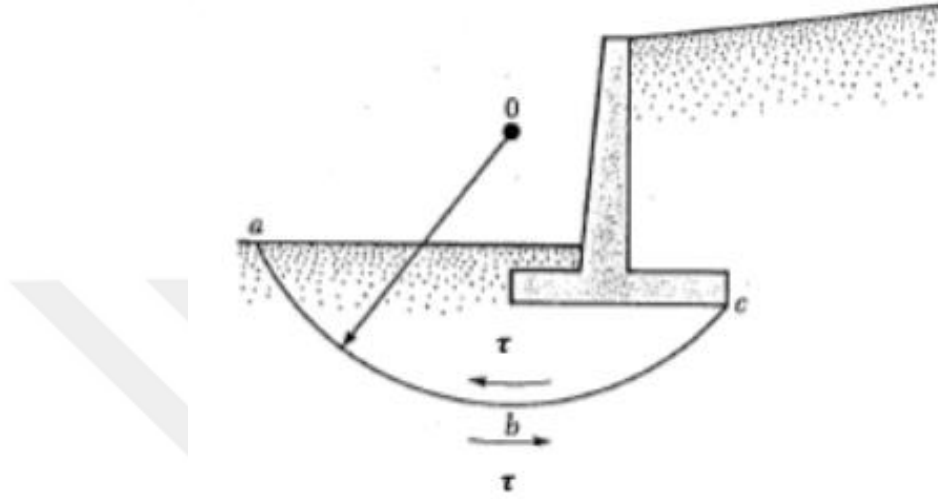
Duvar tabanındaki zemin, tabandan gelen eksantrik yükü güvenli bir şekilde taşıması gerekir. Tabana gelen normal kuvvetlerin toplamı ve duvar merkezindeki momentlerin toplamı sonucu elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerleri hesaplanarak zeminin güvenle taşıyacağı yükten az olması sağlanır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Taşıma gücü hesaplaması (Tuğrul, 2019)

3.2.5.4. Toptan göçme tahkiki

İstinat duvarının bulunduğu yerde bir kayma meydana gelmemelidir. Bu kaymaya karşı duvar belli bir güvenlik katsayısında tasarlanmalıdır. Bu amaçla şevin stabilitesi hesaplanır ve buna uygun önlemler alınır (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Duvar ve şevin kayması (Tuğrul, 2019).

3.2.5.5. Oturma ve diğer tahkikler

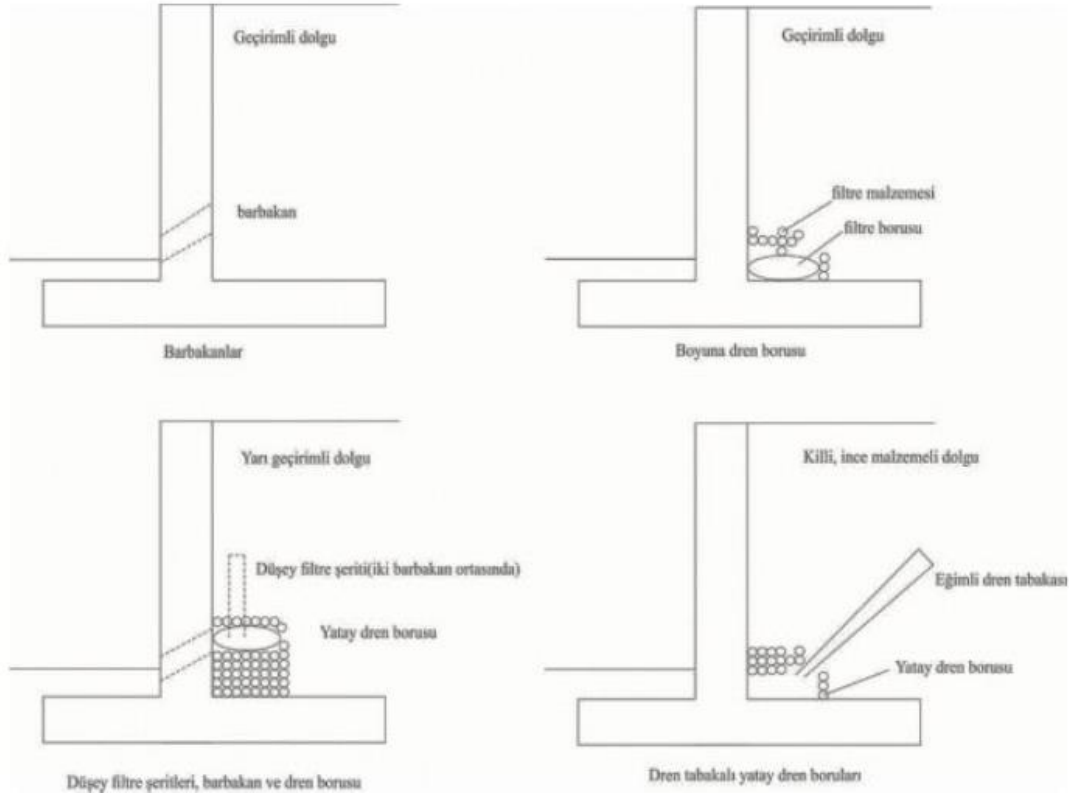
İstinat duvarlarının temelindeki zemin oturmaya uğrar. Ancak bu oturmalar izin verilebilir seviyede olmalıdır. Killerde bu oturma değeri 130 mm kohezyonsuz zeminlerde ise 80 mm olarak önerilir (Çolak, 2007).

Ağırlık dayanma duvarlarında, duvarın kesmeye karşı güvenliği de kritiktir. Özellikle temel-gövde birleşim bölgesinde bu durumun incelenmesi gereklidir. Ayrıca bu duvarların arka yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşabilir ve bu gerilmeler sonucunda kesme çatlakları meydana gelebilir. Bu durumunda da irdelenmesi gerekmektedir.

İstinat duvarlarının depremden gelen yanal yükler de göz önüne alarak gerekli güvenlik katsayılarına göre tasarlanması gerekir. Betonarme istinat duvarlarında betonarme kuralları göz önüne alınarak duvar boyutlandırılması yapılır (Uzuner, 2007).

İstinat duvarlarının en önemli sorunlarından birisi de zemin arkasında oluşan boşluksuyu basıncı artışlarıdır. Özellikle yağışlı dönemlerde ani gelen su duvar

arkasından tahliye edilmezse duvar üzerinde aşırı boşluksuyu basıncı oluşturarak duvarın göçmesine sebep olur. Bu suyun uzaklaştırılması için zeminde 10-20 cm çapında yatay ve düşeyde 1-2 m aralıklarla barbakan delikleri dediğimiz delikler açılır. Bu deliklerin önüne de tıkanmasını önlemek amacıyla filtreler yapılır. Ayrıca dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminin belli geçirimlilik özelliklerinin olması gerekmektedir (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. İstinat duvarında drenaj sistemleri (McCarthy, 2007).

3.3. Geosentetikler

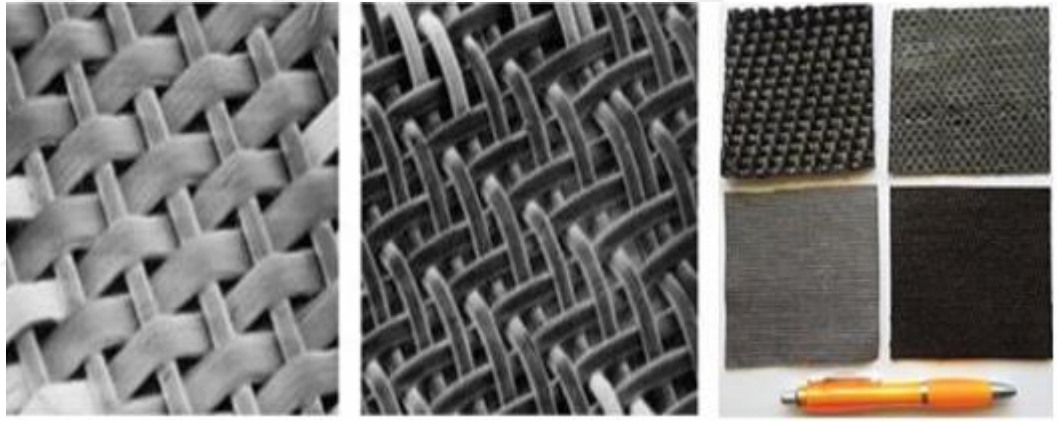
Zeminlerde çekme gerilmelerinin karşılanması amacıyla kullanılan donatılara verilen isimdir. Bu malzemelerin neredeyse tamamı polimer esastır. Geosentetikler 1970'li yıllarda inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Avrupa'da bu malzemelerin standardı prEN ISO 10138'dir. Ülkemizde ise TS EN ISO 10318-1 bu malzemeler için kullanılan yönetmeliktir.

İlk kez 1926 yılında Carolina yolunda ağır pamuk dokumalı kumaş yol temeli üzerine serilmek suretiyle kullanılmıştır (Livaoğlu, 2016). Zeminde kullanımının en önemli faydası zeminde oluşan çekme gerilmelerini karşılamaktır. Bunun dışında geçirimsiz örtü sağlamak, zemin taşıma gücü kapasitesini arttırmak, drenaj, sevlerin stabilitesi gibi önemli faydaları da vardır.

En yaygın kullanılan çeşitleri geotekstilller, geogridler, geohücreler, geoşeritler, geofoamlar, geomembranlar gibi malzemelerdir. Bu tez çalışması kapsamında zemin tabakaları arasında geotekstil donatı kullanılacaktır.

3.3.1. Geotekstilller

Polyester, polipropilen elyaf malzemeleri ile farklı dokuma metodlarıyla imal edilir. Genel kullanım amacı zemin taşıma gücü kapasitesini arttırmaktır. En yaygın türü örgüsüz geotekstil olarak bilinen elyafların özel iğnelerle dolandırıldığı mekanik bağlanan veya keçe tipi olanlardır. Örgülü geotekstilller ise birbirini dik kesen ipliklerin örtülmesiyle lifli polipropilenden imal edilen malzemelerdir (Şekil 3.15). Çizelge 3.1’de geotekstil donatıların sağlaması gereken özellikler verilmiştir.



Şekil.3.15 Geotekstil çeşitleri (Shukla, 2016)

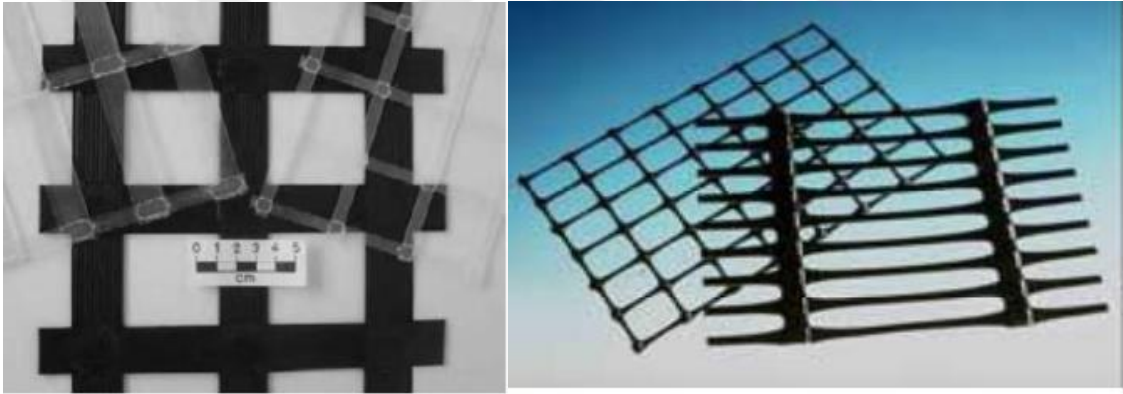
Çizelge 3.1. Geotekstil donatının sağlaması gereken özellikleri (Güler, 2006)

Özellik	Değer
Üretim yönü	Örgülü
Min birim alan ağırlığı	190 g/m ²
Min çekme kuvveti	40 kN/m
Örgü yönünde %5 deformasyon altında min çekme kuvveti	18 kN/m
Max çekme kuvveti altında çözgü ve örgü yönünde max deformasyon	%22
CBR statik delme deneyi	4 kN
Dinamik delme deneyinde max delme çapı	12 mm
Min permeabilite	1x10 ⁻³ m/s
Max karakteristik açıklık büyüklüğü	250 mikron
500 saat sonunda çekme mukavemetinin %2si cinsinden minimum Ultra-Viole dayanımı	%80
Mikrobiyolojik degradasyon sonucunda çekme mukavemetinin % cinsinden min çekme dayanımı	%80

3.3.2. Geogridler

Polimer hammaddeden imal edilen geogridler (geoızgaralar), yatayda ve düşeyde belirli aralıklarla düzenli bir ızgara sistemine sahip sert malzemelerdir. Temelde üç farklı üretim metodu vardır. Bu metotlara göre üretilen geogridler; plakalar delinerek ısıtılıp çekilen ekstrüde geogridler, polyester ipliklerin belirli mukavemette örtülmesiyle üretilen geogridler ve lazer ya da ısıtıl işlem yardımıyla yapıştırılan geogridler (Livaoğlu, 2016).

Geogridlerin; istinat duvarlarının geri dolgusunda oluşan çekme gerilmelerinin karşılanması, zeminin taşıma gücünün artırılması ve zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, asfalt ve beton donatısı olarak kullanılması gibi birçok kullanım alanı mevcuttur (Şekil 3.16, Çizelge 3.2.).



Şekil.3.16 a) Kaynaklı birleştirilen geogrid (Sungur,2015), b) Tek ve çift yönlü geogrid (Can, 2017)

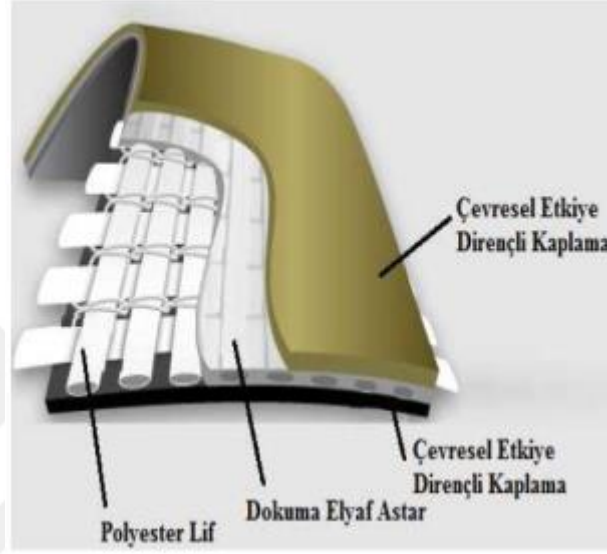
Çizelge 3.2. Geogrid donatının sağlaması gereken özellikleri (Güler, 2006)

Özellik	Değer
Her iki yönde min çekme dayanımı	40 kN/m
Her iki yönde min kopma uzaması	%10
Atmosfer şartlarında degradasyon sonucunda çekme dayanımının % cinsinden min çekme dayanımı	%85
Asit ve Alkali ortamlarda çekme dayanımının % cinsinden min çekme dayanımı	%99
Mikrobiyolojik degradasyon sonucu çekme dayanımının % cinsinden min çekme dayanımı	%95
Hidroliz sonucu çekme dayanımının % cinsinden min çekme dayanımı	%99

3.3.3. Geomembranlar

Sıvı yalıtımı ve yüzeylerin korunması amacıyla petrol kökenli polivinil klorür gibi çeşitli polimerlerden üretilen ince, esnek tabakalar şeklinde uygulaması olan malzemelerdir (Şekil 3.17).

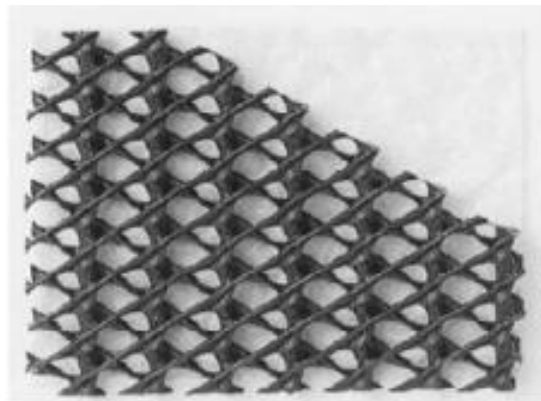
Zehirli atık toplama yerleri, tıbbi atık depoları, havuzlar, sıvı tankları, binalar, sanat yapıları, gölet ve kanal gibi birçok yerde kullanım alanı bulmaktadır (Can,2017).



Şekil 3.17. Geomembran örtü tabakaları (Erbil, 2009)

3.3.4. Diğer geosentetikler

Geonetler, polietilen hammaddeye sahip olup paralel kanalları ile yüksek akış potansiyeli sayesinde ayırma ve drenaj amacıyla kullanılır (Livaoğlu, 2016). Şekil 3.18’de geonete örnek verilmiştir.



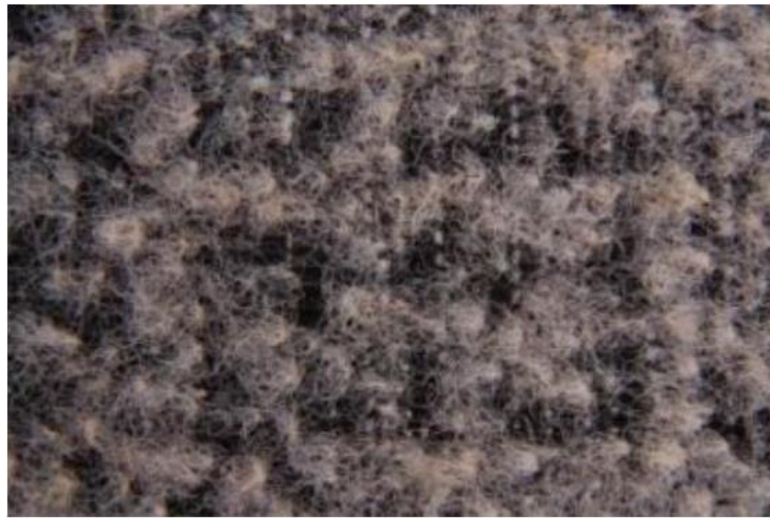
Şekil 3.18. Geonet (Livaoğlu, 2016)

Geohücreler ise geogrid, geotekstil veya geomembrandan üretilen petek tipli açılan ve içerisine kum kaya veya beton gibi malzemelerle doldurulmasıyla zeminlerde kullanılan geosentetik çeşididir. Genel kullanım amacı ise erozyonla mücadele veya yüzey stabilitesi sağlamaktır (John, 1987) (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Çakıl doldurulmuş geohücre (www.inşaatmühendisligi.gen.tr)

Geosentetik kil kaplamalar, yüksek sızdırmazlık sağlayan kompozit geosentetiklerdir (Şekil 3.20.). Alt ve üst kısmında birbirine iğnelenmiş örgüsüz geotekstil ile geomembranın birleştirilerek arasına bentonit kili doldurulmasıyla elde edilir. Yüksek sızdırmazlık isteyen işlemlerde kullanılarak sıvı yalıtımı görevi üstlenir (Özaydın,2010).



Şekil 3.20. Geosentetik kil örtü (www.inşaatmühendisligi.gen.tr)

3.4. Ölçekleme kuralları

Gerçek uygulama koşullarını laboratuvar ortamında modellemek için sadece belirli sabit bir oranda duvar boyutlarının küçültülmesi gerçekçi olmamaktadır. Gerçekte bir deneyde boyut, zaman, sıcaklık, uzunluk, hacim vb. birçok koşul aynı anda denetlenmelidir. Bu koşulların tamamını sabit bir oranda küçülterek yapılan ölçeklendirme işlemleri ile hazırlanan deney düzenkeleri gerçekten uzak sonuçlar vermektedir. Gerçek uygulama koşullarını birebir şekilde uygulamak ise hem zaman açısından hem ekonomik açıdan külfetli olacaktır. Bu yüzden gerçek ortamdaki bir deneyi daha küçük boyutlarda modellerken uyulacak bir takım ölçeklendirme kuralları mevcuttur. Bu kurallarla gerçek deneyle birebir aynı sonuçlara ulaşılsa da yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Bu ölçeklendirme kuralları uygulanırken birtakım varsayım ve kabuller yapılmaktadır. Fiziksel modeller oluşturulurken bazı kriterlere dikkat edilmesi gereklidir.

- Fiziksel modelleme oluşturulurken, gerçek deneyi doğru bir şekilde temsil edecek şekilde benzer malzemeler seçilmelidir. Deneyde kullanılacak malzemelerin yoğunluk, dayanım parametreleri gibi özellikleri gerçeği doğru şekilde yansıtacak şekilde belirlenmelidir.

- Deneyde kullanılacak yapının boyutlarının gerçek yapıya göre belirli ölçeklendirme yöntemleriyle seçilmesi gerekmektedir. Bu oldukça karmaşık ve zor bir işlemdir. Çünkü yapının birçok yönden değişkenleri mevcuttur. Boyut, malzeme özellikleri, dayanım özellikleri gibi birçok farklı özellik aynı anda düşünülmelidir. Bu bağlamda yapı-zemin etkileşimleri göz önüne alınarak boyut analizinin yapılması gerekmektedir.

- Fiziksel modelde kullanılacak deformasyon, yük, zaman, boşluksuyu basıncı ölçer gibi aletler küçük ölçeklere uygun olarak seçilmelidir (Toka, 2021).

Ölçeklendirme yapılırken, bir sabit oran kabul edilerek yola çıkılmaktadır. Ardından ölçeklendirilecek diğer faktörler bu sabit orandan yola çıkılarak hesaplanmaktadır. Örnek bir ölçeklendirme faktörleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Burada başlangıç adımı olarak uzunluk faktörü $N_L=1/N$ olarak alınmıştır. Yani N oranında uzunluk küçültülmüş veya büyütülmüştür. Bu faktörün yerçekimi ortamında gerçekleştiği kabul edilmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Geoteknik mühendisliğinde fiziksel modellemede kullanılabilecek ölçek faktörleri (Toka, 2021).

Özellik	1g modelleme
Uzunluk (N_L)	$1/N$
Yoğunluk (N_p)	1
İvme (N_{gr})	1
Gerilme (N_s)	$1/N$
Rijitlik (N_G)	$1/N^\alpha$
Kuvvet (N_{f3})	$1/N^3$
Düzlem deformasyonda kuvvet (N_{f2})	$1/N^2$
Birim deformasyon (N_{st})	$1/N^{1-\alpha}$
Deplasman (N_d)	$1/N^{2-\alpha}$
Viskozite (N_μ)	1
Akışkan yoğunluğu (N_{pa})	1
Geçirimsizlik katsayısı (N_k)	1
Hidrolik eğim (N_i)	1
Konsolidasyonda zaman (N_{tkons})	$1/N^{2-\alpha}$
Dinamik olaylarda zaman (N_{dt})	$1/N^{1-\alpha/2}$

Burada α bir katsayı olup killi için 1 kumlar için 0.5 alınmaktadır. Tez çalışması kapsamında ölçeklendirme kurallarına göre yapılan hesaplamalar alt bölümlerde detaylı şekilde anlatılmaktadır;

3.5. Atık Lastik Kırıntılarının Özellikleri ve Temini

Çalışma kapsamında kullanılacak olan granüler ALK malzemeler Konya ili Selçuklu ilçesi 5. Organize Sanayi bölgesinde faaliyet gösteren Selçuk Kauçuk firmasından temin edilmiştir. Firma bünyesinde bulundurduğu teçhizatlar sayesinde ÖTL'leri piyasadan toplayarak çeşitli formatlara dönüştürerek ekonomiye geri kazandırmaktadır. Lastiklerin içerisindeki çelik tel ayrıştırıldıktan sonra eritilip tekrar soğutulup bloklar haline getirilerek istenilen çap ve boyutlarda malzemeler üretilmektedir (Şekil 3.21. Şekil 3.22 Şekil 3.23).

Tez çalışması kapsamında firmadan 1.00-3.50 mm çaplı atık lastik kırıntıları temin edilmiştir. Daha sonra geoteknik laboratuvarına getirilen bu malzemeler 2.00 mm çaplı elekten elenerek elekten geçen kısımlar alınmıştır. Bu numuneler kil zeminlerle ağırlıkça %10, 20, 30 oranında karıştırılmıştır. Bu karışımların karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla plastik limit, likit limit deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.21 ÖTL atıklar



Şekil 3.22 ÖTL atıkların parçalanarak kazanlara gönderilmesi



Şekil 3.23 Granüler atık lastikler

Literatür çalışmalarında ALK ile ilgili elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Farklı çalışmalardan elde edilen atık lastik özellikleri (Keskin, 2009).

Çalışma ismi	c (kPa)	ϕ	γ (kN/m ³)
Humprey ve Sanford(1993)	8.6	25	7.01
Tatlısöz ve ark. (1998)	0	30	5.9
Edinciler ve ark (2004)	3.1	22	5.1

Çalışma kapsamında kullanılan kil zemin ise Konya Teknik Üniversitesi Organize Sanayi Bölgesi Kampüsündeki araziden temin edilerek Geoteknik laboratuvarına getirilmiştir. Kile ait karakteristik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır.

3.5.1. Kıvam limitleri deneyleri

Kohezyonlu zeminlerin kıvam (Atterberg) limitlerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerle zeminin likit limit, rötre limiti ve plastik limit değerleri belirlenerek bu limit değerlerinde zeminin hangi kıvamda olduğu belirlenmektedir.

Plastik limit, zemine su ilave edilmesiyle zemin kopmadan şekil alabileceği değere verilen isimdir. Plastik limitin belirlenmesi amacıyla ASTM D 4318-98 standardına uygun olacak şekilde zemine farklı su muhtevaları ilave edilerek, zemin pürüzsüz cam yüzeyde avuç içinde 3 mm inceliğe kadar açılır. Kopma ve çatlamaların olduğu değer plastik limittir. Yapılan deney sonucuna göre killi zeminin plastik limit değeri yaklaşık olarak $w_p = 22\%$ elde edilmiştir.

Rötre limiti, zeminin suya tam doygun olduğu minimum su muhtevasıdır. Zemin su kaybetmeye devam etse de artık hacminde bir değişim meydana gelmemektedir. Likit limit değeri, zeminin kendi ağırlığıyla akmaya başladığı en düşük su muhtevasıdır. Laboratuvar ortamında zemin numunelerine Casagrande ve koni penetrasyon deneyleri yapılarak likit limit değerleri hesaplanmaktadır (Şekil 3.24).



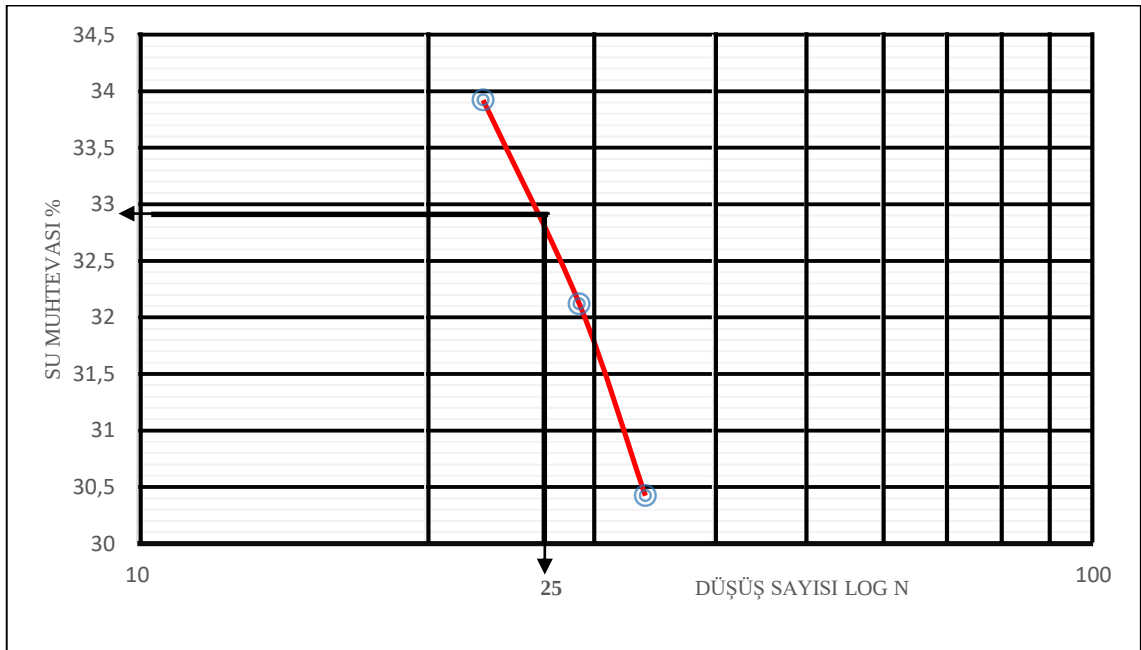
Şekil 3.24. Plastik limit deneyi

3.5.1.1. Casagrande likit limit deneyi

40 nolu elekten geçen 500 gram zemin üzerine farklı miktarda su eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Ardından bu numuneler Casagrande aletine yerleştirilmiş, orta kısmına özel bıçak yardımıyla yarık açılmıştır. Pirinç kaptaki yarıktaki meydana gelen kapanma 13mm olduğu zaman deney tamamlanmış ve yapılan vuruş sayısı not edilmiştir. Grafik üzerinde vuruş sayısı su muhtevası noktaları çizilerek 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası belirlenmiştir. Bu değer zeminin likit limit değerini vermiştir (Şekil 3.25. ve Şekil 3.26.).



Şekil 3.25. Casagrande likit limit deneyi



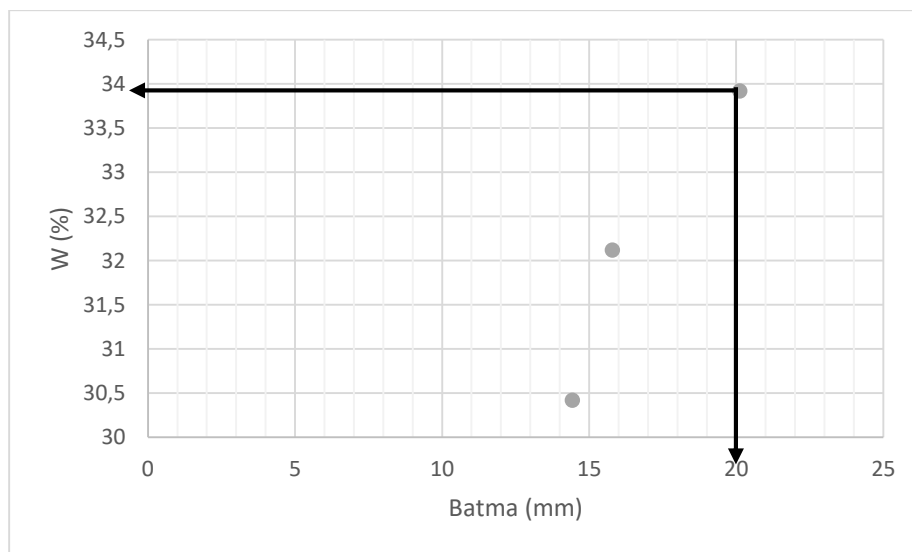
Şekil 3.26. Saf kil için Casagrande yöntemi ile likit limit deneyi

3.5.1.1. Düşen koni penetrasyon deneyi

40 nolu elekten geçen 500 gram zemin üzerine, zemin uygun kıvama gelinceye kadar su ilave edilmiştir. Hazırlanan zeminler penetrasyon kabına yerleştirilmiştir. Ardından 80 gram ağırlığındaki konik uç serbest bırakılarak zemine batırılmıştır. 5 saniye bekledikten sonra batma miktarı kaydedilmiştir. Ardından batma miktarı-su muhtevası grafiği çizilmiştir. Deney sonucunda 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Bu deney yöntemine göre kil zeminin likit limit değeri $w_L = 34$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3.27 ve Şekil 3.28.).



Şekil 3.27. Düşen Koni penetrasyon deneyi



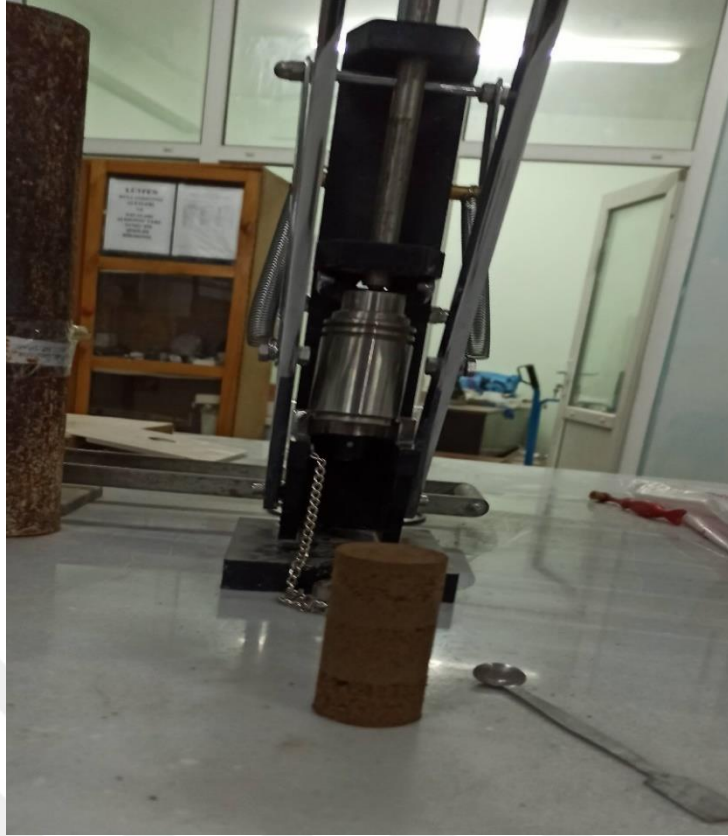
Şekil 3.28. Saf kil için düşen koni penetrasyon deney yöntemi ile likit limit deneyi

3.5.2. Mini (Harvard) proktor deneyleri

Farklı karışım oranlarında optimum su muhtevasının ve maksimum birim hacim ağırlığın hesaplanması amacıyla proktor deneyleri yapılmıştır. Bu proktor deneyleri Harvard (mini) kompaksiyon aleti ile yapılmıştır. Bu deney aletinin numune tüpü çapı 33mm yüksekliği ise 71,5 mm'dir. Kuru numunelerin içerisine sırasıyla %16 - 20 oranında su ilave edilmiştir. Numune tüplerindeki zeminler kriko yardımı ile çıkarılmıştır. Ardından bu numuneler yaş haliyle tartılmış ve etüve koyularak kurutulmuştur. Kurutulan numuneler tekrar tartılarak not edilmiştir. Tartımların sonucundan kap darası çıkarılarak kuru zemin ve su kütleleri elde edilmiştir. Su muhtevasına göre kuru birim hacim ağırlık grafikleri çizilmiştir. Birim hacim ağırlık su muhtevasına paralel olarak artarken, düşüş gösterdiği noktada deney sonlanmıştır. Grafikte maksimum kuru birim hacim ağırlığa karşılık gelen su muhtevası optimum su muhtevası olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler grafiklere aktararak her karışım oranı için optimum su muhtevaları hesaplanmıştır (Şekil 3.29 ve Şekil 3.30).



Şekil 3.29. Harvard mini proktor deneyi



Şekil 3.30. Mini proktor kalıbından numunenin çıkarılması

3.5.3. Kesme kutusu deneyleri

Kesme kutusu deneyi hem kohezyonlu zeminlerde hem kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilmektedir. Deneyde belirlenen sabit düşey yük altında zemin numunesinin kesilmesi sağlanır. Verilen düşey yük altında oluşan kesme kuvveti numunenin kesildiği yüzey alanına bölünerek kayma gerilmesi hesaplanır. Ardından kayma gerilmesi birim deformasyon grafiği çizilir.

Deneylerde 60x60mm kesitli 20 mm yükseklikli kare kesitli ringler kullanılmıştır. Hazırlanan farklı karışım oranındaki numuneler kesme plakaları arasına yerleştirilmiş, ardından plakaların alt ve üstüne poroz taşlar yerleştirilmiştir. Sırasıyla 10, 20 ve 40 N düşey yük uygulanmış ve numuneler 1mm/dk'lık bir yatay hızla kesilmiştir. Aşağıda verilen eşitliklerle normal gerilme ve kayma gerilmeleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \quad (3.14)$$

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{max}}{A} \quad (3.15)$$

3.5.4. Piknometre deneyi

TS EN 1097-6'ya göre, belirli miktardaki kuru zemin piknometre tüpüne eklenerek tüple birlikte tartılır. Ardından piknometre tüpü tek başına tartılarak tüpün kütlesi belirlenir. Tüp su ile doldurulur ve hava çıkışı kesilene kadar karıştırılır. Karışım tekrar tartılarak not edilir. Aşağıdaki bağıntıdan yola çıkılarak tane yoğunluğu hesaplanır. Bu çalışma kapsamında kil zeminin tane yoğunluğu 2.66 olarak hesaplanmıştır.

$$\rho_s = \frac{M_2 - M_1}{[(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)]} \times \rho_{su} \quad (3.16)$$

M_1 : Piknometre kütlesi (gr)

M_2 : Piknometre + kuru zemin kütlesi (gr)

M_3 : Piknometre + su kütlesi (gr)

M_4 : Piknometre + malzeme + su kütlesi (gr)

ρ_s : Tane yoğunluğu (g/cm^3)

ρ_{su} : Su yoğunluğu (g/cm^3)

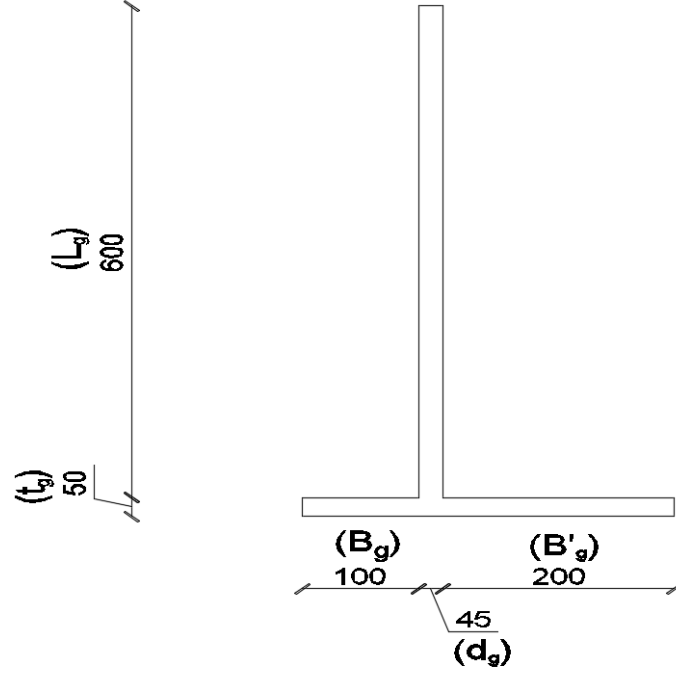
3.6. İstinat Duvarının Boyutlandırılması

Uygulamada ki gerçek boyutları Şekil 3.31'de verilen istinat duvarı, birinci bölümde de bahsedilen ölçeklendirme kurallarına uygun olarak gerekli kabuller ve hesaplamalar yapılarak laboratuvar ortamında mevcut bulunan Şekil 3.32'de verilen tank düzeneğine (Demiröz, 2008) uygun olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

Ölçeklendirmede başlangıç adımı olarak gövde yüksekliği (L_m) 60 cm olarak seçilmiştir. O halde ölçek faktörü:

$$N = \frac{60}{600} = \frac{1}{10} \quad (3.17)$$

olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.31. Gerçek istinat duvarı boyutları



Şekil 3.32. Laboratuvarda yükleme deneylerinin yapıldığı tank düzeneği (Demiröz, 2008)

Bu sabit kabulden sonra istinat duvarının gövdesi için kalınlık hesabında duvarın eğilme rijitliği (E_r) üzerinden gidilmiştir. Duvarın sayfa düzlemine dik uzunluğu ise b_s olarak alınmıştır. Ancak burada birim uzunluk gerçekte ve modelde aynı olduğu için göz ardı edilebilir.

$$E_r = \frac{EI}{b_s} \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Uzunluk ölçek faktörü 1g modelleme için $N_L=1/N$ olarak seçilmiştir. G için ölçek faktörü $N_G = 1/N^\alpha$ olur. H^3 ifadesinin ölçek faktörü ise $1/N^3$ olarak yazılabilmektedir. N_E duvarın elastisite modülü, N_I atalet momenti için ölçek faktörünü göstermektedir. Gerçek istinat duvarının kalınlığı d_g , elastisite modülü E_g olarak isimlendirilmektedir. Model duvarın kalınlığı d_m , elastisite modülü ise E_m olarak adlandırılmaktadır.

Son durumda istinat duvarının deformasyon özelliğinin gerçekçi şekilde küçültülmesi için boyutsuz bir değişken elde edilmesi gerekmektedir. Bu değişken Φ olarak verilmektedir.

$$\Phi = \frac{E \times I / b_s}{G \times H^2} \quad (3.19)$$

$$\Phi \times G \times H^3 = E \times I \times b_s \quad (3.20)$$

$$1/N^\alpha \times 1/N^3 = N_E \times N_I \quad \Rightarrow \quad 1/N^{\alpha+3} = N_E \times N_I \quad (3.21)$$

bağıntısı elde edilir. Burada α değeri killer için 1 alınırken kumlar için 0.5 alınmaktadır. Laboratuvar ortamında imal edilen betonun kırılmaları sonucunda beton sınıfı yaklaşık olarak C16 betona yakın çıkmıştır.. Bu beton sınıfının elastisite modülü (E) değeri ise yaklaşık 27 GPa olarak alınmıştır. Ancak laboratuvar ortamında oluşturulup beton basınç dayanımı elde edilecek betonun değeri muhtemelen 27 GPa değerine ulaşamayacağından, serbest basınç deneyinde elde edilen E değeri hem model hem de gerçek duvar için aynı kabul edilecek ve bu şekilde Plaxis programına veri girişi yapılacaktır.

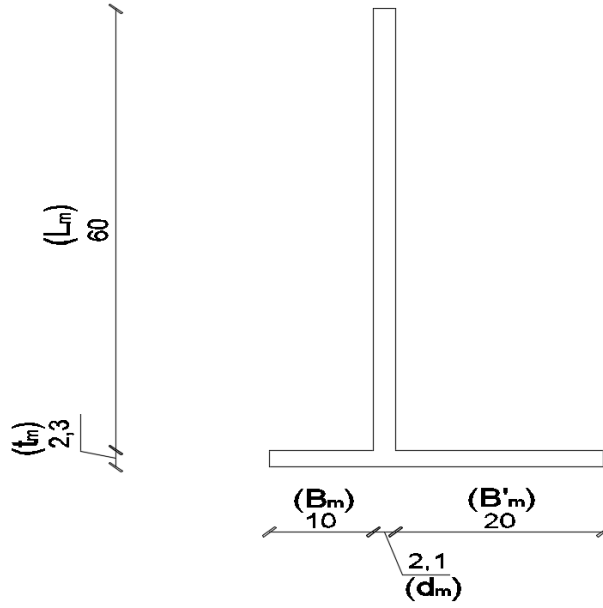
Yukarıdaki bağıntılardan yola çıkarak duvarın kalınlığı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\frac{\frac{1}{12} \times E_m \times t_m^3}{\frac{1}{12} \times E_g \times t_g^3} = \frac{1}{10} = 0,0001 \quad (3.22)$$

Bu eşitlikte E değerleri eşit ve 27 GPa, gerçek duvar kalınlığı (d_g) değeri ise 0.45 m olarak alınmıştır. Denklem çözüldüğünde model duvar kalınlığı (d_m) 2,09 cm olmuştur. Aynı şekilde temel kısmında da ön pabuç (B) =10 cm ve arka pabuç (B') =20 cm alınarak

başlangıç kabulü ile $N=1/10$ şeklinde hesaplamalar yapılmıştır. Gerçekte temel kalınlığı (t_g) 0.5 m olduğundan denklemde yerine koyulduğunda model temel kalınlığı 2.32 cm olmaktadır. Model duvarın ölçüleri Şekil 3.33'te verilmiştir.

Ayrıca donatılar için de ölçeklendirme ilkelerine göre hesaplamalar yapılmış bu hesaplamalara göre yaklaşık değer olarak 2.00 mm kalınlığında tel 3 cm aralıklarla punto makinesi ile puntolanarak gövde ve temelde kullanılmıştır (Şekil 3.34).



Şekil 3.33. Model istinat duvarı



Şekil 3.34. Puntolanmış donatı kafesi

3.6.1. İstinat duvarının imalatı

Duvar imalatında ilk aşama olarak hesaplanan ölçülere uygun boyutlarda, dökülecek betonu taşıyacak şekilde duvarın ahşap kalıbı çakılmıştır. Ardından beton istinat duvarının kalıp içerisinden problemsiz çıkarılabilmesi için kalıp yağlanmıştır. Kalıbın yağlanmasından sonra teraziye alınarak içerisine gövde ve temel donatısı eklenmiştir. Şekil 3.35'te yağlanıp içerisine donatı kafesinin yerleştirildiği duvar gösterilmiştir.

Eş zamanlı olarak dökülen beton numunelerinin dayanımını belirleyebilmek amacıyla 5x5x5cm ebatlı küp beton kalıpları da oluşturulmuştur. Bu küp numuneler daha sonra Serbest basınç dayanımı deneylerine tabii tutularak betonun elastisite modülü değerleri ölçülmüştür.



Şekil 3.35. Yağlanmış ve donatısı yerleştirilmiş duvar kalıbı



Şekil 3.36. Çimento ve agrega karışımı



Şekil 3.37. Beton dökümü ve kalıba yerleştirilmesi

Beton döküm işi tamamlandıktan birkaç gün sonra kalıplar açılmıştır. Daha sonra kür havuzuna yerleştirilen numuneler yaklaşık 28 gün küre bırakılarak betonun yeterli mukavemeti sağlaması beklenmiştir (Şekil 3.39 ve Şekil 3.40).



Şekil 3.38. Beton yüzeyinin düzleştirilmesi



Şekil 3.3.9 Duvarın su içerisinde küre bırakılması



Şekil 3.40. Kürden çıkarılan duvar ve numuneler



Şekil 3.41. Beton duvar ölçülerinin kontrolü

Duvarın imalatı tamamlandıktan sonra aynı yöntemle 2 adet daha duvar yedek olarak hazırlanmıştır. Kür süresinin ardından istinat duvarları deneylere hazır hale gelmiştir (Şekil 3.41).

3.6.2. Beton numuneleri üzerinde Serbest basınç deneyleri

İstinat duvarlarının beton dökümü esnasında her dökümden 3'er adet beton küp numuneler (5x5x5) alınmıştır. Bu numuneler laboratuvar ortamında sabit yük altında kırılarak veri toplayıcı cihazdan gerilme deformasyon verileri alınmıştır. Farklı numuneler üzerinde kırılmalar yapılarak betona ait gerilme deformasyon değerlerinden hareketle betonun elastisite modülü (E) belirlenmiştir. Elde edilen veriler Plaxis ile yapılan analizlerde girdi olarak kullanılmıştır (Şekil 3.42 ve Şekil 3.43).



Şekil 3.42. Beton numunelerin kırılması



Şekil 3.43. Serbest basınç deneylerinde verilerin elde edilmesi

3.7. İstinat Duvarları Arkasında Dolgu Malzemesi Üzerinde Yükleme Deneyleri

İstinat duvarı arkasındaki geri dolgu malzemesi üzerinde yükleme uygulanmadan önce duvar temel altının rijit olması amacıyla granüler kum malzeme çok sıkı formda olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Bu sayede istinat duvarı altındaki temel bir mesnet gibi davranarak, farklı yüklemelerde sonuçlar üzerinde etkili olmamıştır. Bu amaçla duvar altında kalan 20 cm'lik dolgu 3 tabaka halinde optimum su muhtevasında (% 3) sıkıştırılmıştır (Şekil 3.44).

İstinat duvarı terazili bir şekilde çok sıkı kum temel üzerine oturtulmuştur. Burada tank ile duvar arasında yaklaşık 4 mm civarı bir boşluk bırakılmıştır. Sağ ve soldan kalan boşluklara kenarına koruyucu bant çekilerek bu kısımlara zemin taneciklerinin girmesi engellenmiştir. Şayet zemin taneleri duvar ile temel arasına sıkışırsa bir mesnet görevi görecektir ve duvarın öne doğru hareketini engelleyecektir. Bu da deformasyonların yanlış çıkmasına sebep olacaktır (Şekil 3.45).

Duvarın yerleştirilmesinin ardından dolgu işlemine başlamadan önce ölçüm cihazlarının kurumu ve kalibresi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Load-Cell bilgisayara bağlanarak yükleme esnasında oluşan yüklerin aktarımı sağlanmıştır. Yükleme sistemi olarak Geoteknik laboratuvarındaki hidrolik press aleti kullanılmıştır. Bu alet farklı ivmelerde istenilen hızda sabit yükleme yapmaktadır. Deney esnasında aletin en düşük hız ayarı yapılarak en düşük hızda yükleme yapılmıştır (Şekil 3.46).



Şekil 3.44. İstinat duvarının tabanına granüler kumun yerleştirilip sıkıştırılması



Şekil 3.45. İstinat duvarının granüler kum üzerine oturtulması



Şekil 3.46. Hidrolik press ve load cell yükleme düzeneği

Yatayda ve düşeyde deformasyon ölçümleri için laboratuvardaki dijital ve analog deformasyon ölçerler ile potansiyometrik cetveller kullanılmıştır (Şekil 3.47). Bu amaçla toplamda 1 adet yatay, 4 adet düşey deformasyon ölçer tanka sabitlenerek sıfırlanmış ve yüklemelerin her anında deformasyon ölçümleri gerçekleştirilerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca yüklemeler esnasında oluşan ilave boşluk suyu basıncı değerlerinin belirlenebilmesi amacıyla tankın tabanına boşluksuyu basıncı ölçer de yerleştirilmiştir. Bu sayede duvar tabanındaki boşluksuyu basıncı değişimi de yüklemenin her anında kayıt altına alınmıştır. Boşluksuyu basıncı ölçer porozlu taşın içerisine yerleştirilmiş bir strain gauge sistemidir. Burada deney esnasında boşluk suyu basıncı ölçerin üzerinde bulunan poroz taş gözeneklerinin tıkanmasını önlemek amacıyla boşluksuyu basıncı ölçer filtre kağıtları ile sarılmıştır (Şekil 3.48).

Deneyler öncesinde bütün ölçüm cihazlarının kalibresi kontrol edilmiştir. Yükleme sistemlerinin düzgün çalışıp-çalışmadığı kontrol edilmiştir. Ayrıca duvarın ve tabandaki malzemenin terazisi kontrol edilmiştir. Bu kontroller yükleme sisteminde ölçümlerdeki en ufak ölçüm hatalarını önlemek amacıyla hassas bir şekilde yapılmıştır.

Sistemlerin hazırlanmasının ardından geri dolgu malzemesinde kullanılacak malzemelerin hazırlanması ve dolgu aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.47. Potansiyometrik cetvel ile düşey deformasyon ölçüm düzeneği



Şekil 3.48. Boşluksuyu basıncı ölçer aletin yerleştirilmesi

Tank içerisinde yükleme yapılacak kil geri dolgu malzemesinin yerleştirilmesi amacıyla yaklaşık 250kg kuru kil malzeme daha önce belirlenmiş olan optimum su muhtevasında olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 3.49). Kilin hazırlanmasında; su ile kilin homojen bir şekilde karışması için büyük bir tepsi kullanılmıştır. Tepsi içerisindeki kuru kil üzerine yağmurlama sistemi ile su ilave edilerek, yeterince homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırma ve çığneme işlemine devam edilmiştir. Yeterince homojenlik sağlandıktan sonra saf kil zemin ve kil/atık lastik karışımından oluşan zemin tabakalar halinde yükleme yapılmak üzere deney tankı içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.50 ve Şekil 3.51).

Zeminlerin tankın içerisine yerleştirilmesi 5 tabaka halinde 10cm kalınlığında sıkıştırılma şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Kil zemin tankın içerisine yerleştirilirken her yerleştirme esnasında ahşap tokmakla sıkıştırma işlemi yapılmış ve boşluklu yapının oluşmamasına özen gösterilmiştir. Bu boşluklar giderilmediği takdirde yükleme esnasında boşlukların dolması ile yüklemelerden dolayı oluşan kuvvetler duvara tam olarak aktarılamayacaktır. Ayrıca en alttaki ilk 5 cm dolgunun üzerine boşluksuyu basıncı ölçer yerleştirilmiştir. Bu basıncı ölçer hassas şekilde gözenekleri tıkanmayacak şekilde filtre kağıdı ile birlikte yerleştirilmiştir. Yükleme esnasında boşluksuyu basıncı değişimi devamlı olarak bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.49. Kuru Saf kil zeminin tepsi içerisine yerleştirilmesi



Şekil 3.50 Saf kil zeminin tepsi içerisinde su ile homojen şekilde karıştırılması işlemi



Şekil 3.51. Kil + atık lastik karışımlarının tepsi içerisinde su ile homojen şekilde karıştırılması işlemi



Şekil 3.52. Kil / kil + atık lastik karışımlarının tabakalar halinde tanka içerisine yerleştirilmesi

İstenilen yüksekliğe kadar geri dolgu malzemesinin kademe kademe yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra en üst yüzey bir raspa aleti ile düzlenmiş ve yükleme esnasında yük plakasının terazisi sağlanmıştır. Bu düzleme işlemi sayesinde ilave eksantrik yük oluşturulmamıştır (Şekil 3.52).

Düzlenmiş olan zemin yüzeyi üzerine yük plakası yerleştirilmiştir. Ardından yatay deplasmanların ölçümü için toplamda 4 adet deplasman ölçer duvarın ön yüzeyine en alttan itibaren sırasıyla 5cm (S1, O1), 30cm (O2) ve 57cm (O3) yüksekliklere yerleştirilmiştir. Bu deplasman ölçüm cihazları 0.01 mm hassasiyetlidir. Ölçüm aletleri sıfırlanmıştır. Uygulanan yük miktarının değişimine göre deplasman ölçüm sonuçları kayıt altına alınarak tablolara işlenmiştir. Düşeyde oluşan deplasmanın ölçümü için potansiyometrik cetvel ve deplasman ölçer saat beraber kullanılmıştır. Yükleme esnasında yük, zaman, düşey deplasman, yatay deplasman ve boşluksuyu basıncı değişimleri kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.53). Tüm yükleme deneylerinde yaklaşık olarak 5 mm düşey deplasman değerine gelindiği zaman deneylere son verilmiştir. Bu sınır değeri belirlenirken; ön deneylerde imal edilen istinat duvarları üzerinde yapılan deneylerde istinat duvarının temel gövde birleşim yerinde beton elemanın kırılmasına neden olmayacak seviye dikkate alınmıştır. Yükleme işlemi tamamlandıktan sonra tank

içerisindeki geri dolgu malzemeleri çıkarılmıştır. Duvar yeniden teraziye alınmıştır. Boşaltılan kil zemin ise atık lastik malzemelerin ilave edilmesi için tepsiye taşınmış ve bir sonraki deney için yeniden karışım numuneleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.53 Yükleme tankı üzerinde yükleme sistemi ve deplasman ölçerlerin kurulumu

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu kısımda Materyal ve Yöntem bölümünde açıklanan deneylerin sonuçları, yorumları, grafikleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmıştır ve yorumlanmıştır.

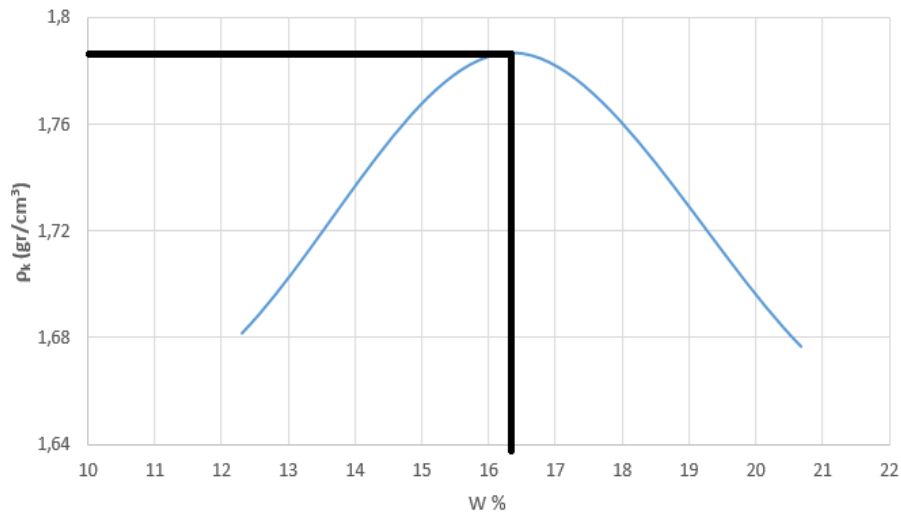
4.1. Zeminle İlgili Yapılan Deneylerin Sonuçları

4.1.1. Proktor deney sonuçları

3. bölümde bilgileri verilen Harward mini proktor deneyi her karışım için ayrı ayrı yapılmıştır. Burada deney için kullanılan tüpün darası 504,6 gr tartılmış ve hacmi 61,15 cm³ olarak hesaplanmıştır. Harward mini proktor deney aleti ile yapılan deney sonuçlarına göre optimum su muhtevası grafikleri çizilmiştir. Atık lastik miktarı arttıkça optimum su muhtevası azalmıştır. Aşağıda deneylerde elde edilen sonuçlara ait bilgiler verilmiştir;

4.1.1.1. Saf kil

Geri dolgu malzemesinin saf kil olması durumunda sırasıyla; %14-16-18 su muhtevası değerleri için proktor deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.1'den, optimum su muhtevası yaklaşık %16,2 ve maksimum kuru yoğunluğu 1,79 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.1) .



Şekil 4.1. Saf kil için proktor deney grafiği

Çizelge 4.1. Saf kil için Harward mini proktor deney sonuçları

w (%)	ρ_n (g/cm ³)	Kap+yaş (gr)	Kap+kuru (gr)	Kuru (gr)	w (%)	ρ_k (g/cm ³)
14	1,888	202,58	172	162,57	12,302	1,681
16	2,079	184,52	159,92	150,27	16,37	1,786
18	2,023	197,42	165,23	155,66	20,679	1,676

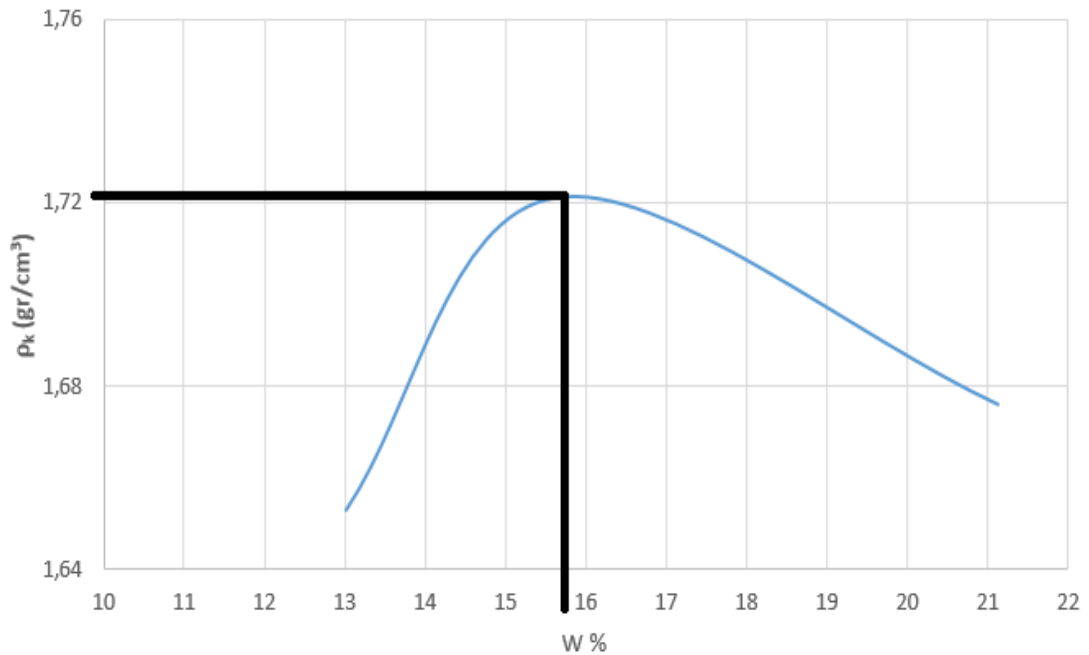
4.1.1.2. %10 ALK + %90 kil karışımı

%10 ALK katkılı durum için sırasıyla %14-16-18 su muhtevasında Harward mini proktor deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.2’den optimum su muhtevası yaklaşık %15,9 ve maksimum kuru yoğunluk değeri 1.72 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

Saf kile göre zemin ALK’lar sayesinde daha granüler hale gelmiştir. Zeminin davranışı granüler yapılı zeminlere benzemeye başlamıştır. Kumlarda optimum su muhtevası 3-5 gibi düşük değerler çıkmaktadır. Artan ALK’lar ile zemin daha granüler özellikler sergilemektedir.

Çizelge 4.2. %10 ALK + %90 kil için Harward mini proktor deney sonuçları

W (%)	ρ_n (g/cm ³)	Kap+yaş (gr)	Kap+kuru (gr)	Kuru (gr)	w (%)	ρ_k (g/cm ³)
14	1,868	183,88	163,78	154,41	13,02	1,653
16	1,989	182,08	158,38	148,93	15,621	1,721
18	1,963	185,45	160,38	150,47	21,127	1,676

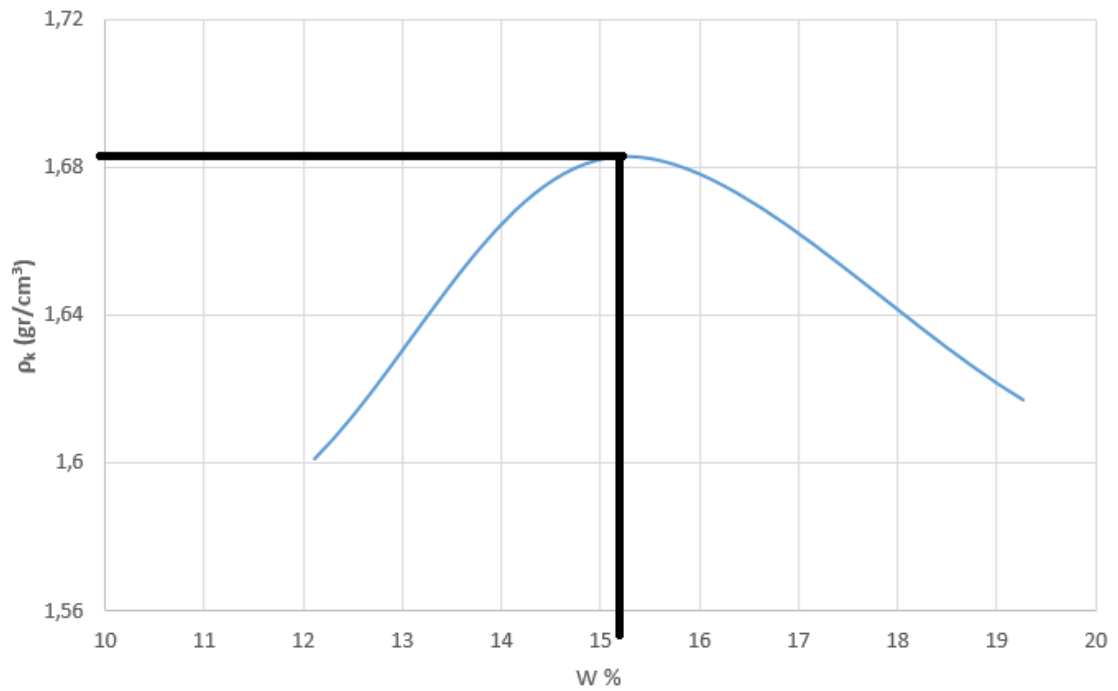
**Şekil 4.2.** %10 ALK katkılı durum için proktor deney grafiği

4.1.1.3. %20 ALK + %80 kil karışımı

%20 ALK katkılı durum için sırasıyla %14-16-18 su muhtevasında Harvard mini proktor deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.3'ten optimum su muhtevası %15,1 ve maksimum kuru yoğunluk değeri 1.685 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. %20 ALK + %80 kil için Harvard mini proktor deney sonuçları

W (%)	ρ_n (g/cm ³)	Kap+yaş (gr)	Kap+kuru (gr)	Kuru (gr)	W (%)	ρ_k (g/cm ³)
14	1,795	58,815	53,17	46,58	12,12	1,601
16	1,938	78,735	69,23	62,66	15,17	1,683
18	1,928	96,898	85,89	57,13	19,27	1,617



Şekil 4.3. %20 ALK katkılı durum için proktor deney grafiği

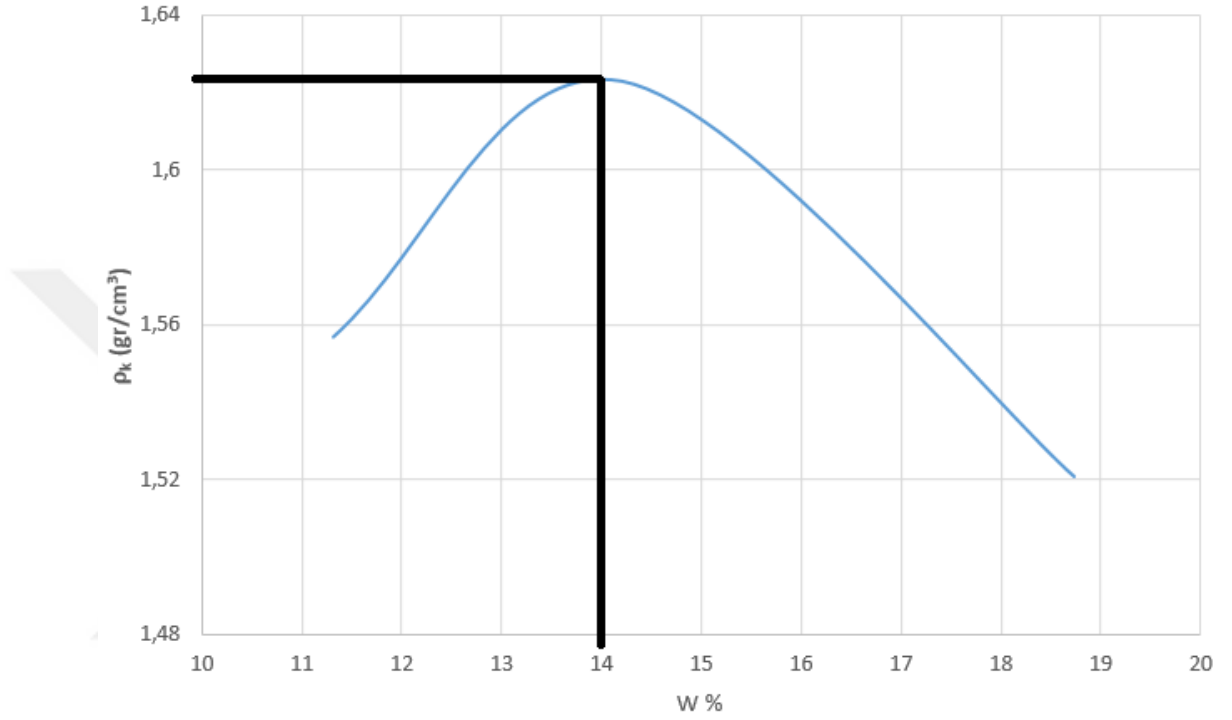
4.1.1.4. %30 ALK + %70 kil karışımı

%30 ALK katkılı durum için sırasıyla %14-16-18 su muhtevasında Harvard mini proktor deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.4'ten optimum su muhtevası %14 ve maksimum kuru yoğunluk değeri 1.62 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.4).

Granüler zemine en yakın form bu karışımda elde edilmiştir. Bunun sebebi zeminde artan ALK'lardır. Dane çapının büyümesi sonucunda zeminde optimum su muhtevası azalmaktadır.

Çizelge 4.4. %30 ALK + %70 kil için Harward mini proktor deney sonuçları

W (%)	ρ_n (g/cm ³)	Kap+yaş (gr)	Kap+kuru (gr)	Kuru (gr)	W (%)	ρ_k (g/cm ³)
14	1,733	86,917	80,61	55,75	11,314	1,557
16	1,853	91,396	83,4	56,3	14,204	1,623
18	1,805	64,694	58,43	33,45	18,729	1,521

**Şekil 4.4.** %30 ALK katkılı durum için proktor deney grafiği

4.1.2. Kesme kutusu deneyleri

Laboratuvar ortamında farklı karışımlar için 10 ve 20 N düşey yükler altında 60x60 mm kare kalıptaki zeminlere kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler esnasında oluşan düşey ve yatay yer değiştirmeler kaydedilmiştir. Deneylerde elde edilen veriler kullanılarak zeminlere ait kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.5'te kesme kutusu deneyi düzeneği gösterilmiştir. Deney sonucunda kesilen numune örneklerinden bir tanesi Şekil 4.6 'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Kesme kutusu deney düzeneği



Şekil 4.6. Kesme kutusu deney sonucunda kesilmiş olan bir zemin numunesi örneği

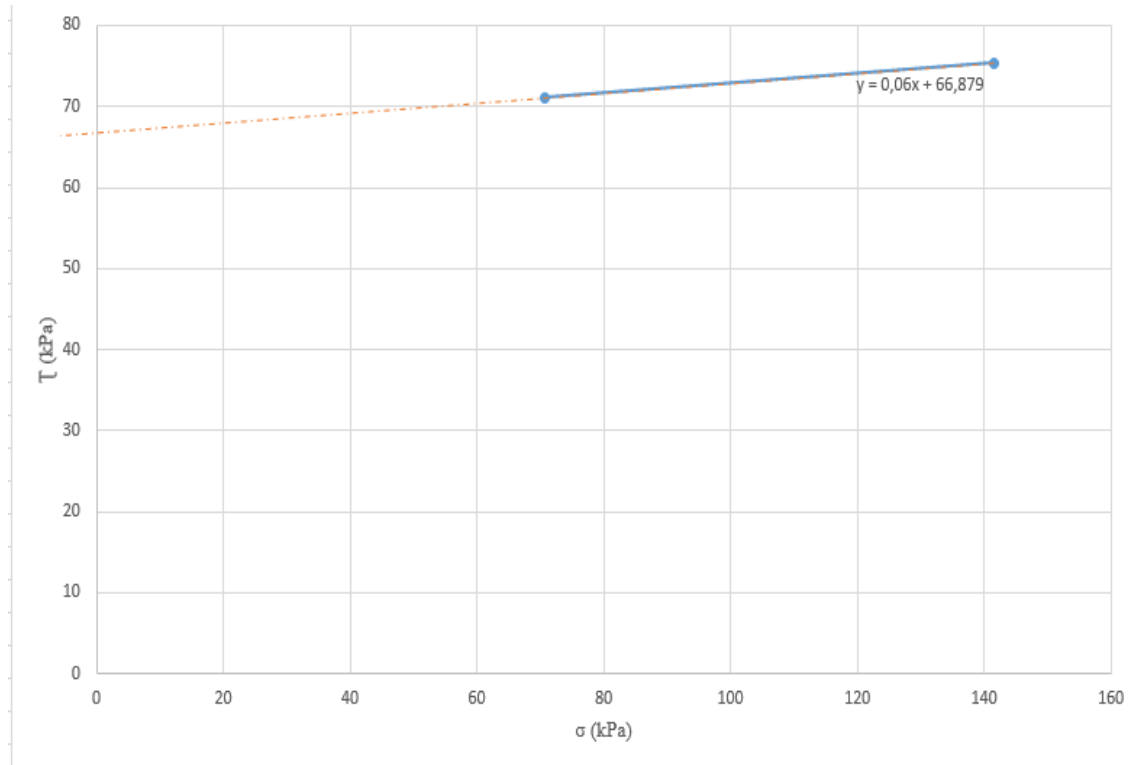
4.1.2.1. Saf kil için kesme kutusu deney sonuçları

2kg ve 4 kg düşey yük etkisi altında iki deney yapılarak kesme kuvvetleri kayıt altına alınmıştır. Zemin numunesinde net bir kırılma görülmemiştir. Ancak deformasyon artarken kesme kuvvetinin sabit kaldığı nokta kırılma noktası olarak alınmıştır. Bu sonuçlara göre kohezyon değeri x değerine 0 verilerek 66,88 kPa ve içsel sürtünme açısı ise aşağıdaki denklem 4.1'den 3° elde edilmiştir (Çizelge 4.5, Şekil 4.7).

$$\arctan\left(\frac{75,37-71,12}{141,54-70,771}\right) = 3^\circ \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5. Saf kil için kesme kutusu deney sonuçları

P = 2 kg		P = 4 kg	
ΔL (mm)	T max(N)	ΔL (mm)	T max(N)
5	201	5	213
σ_1 (kPa)	$\tau_{\max 1}$ (kPa)	σ_2 (kPa)	$\tau_{\max 2}$ (kPa)
70,771	71,12	141,54	75,37
c (kPa)		ϕ (°)	
66,88		3	



Şekil 4.7. Saf kil için kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi

4.1.2.2. %10 ALK - %90 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

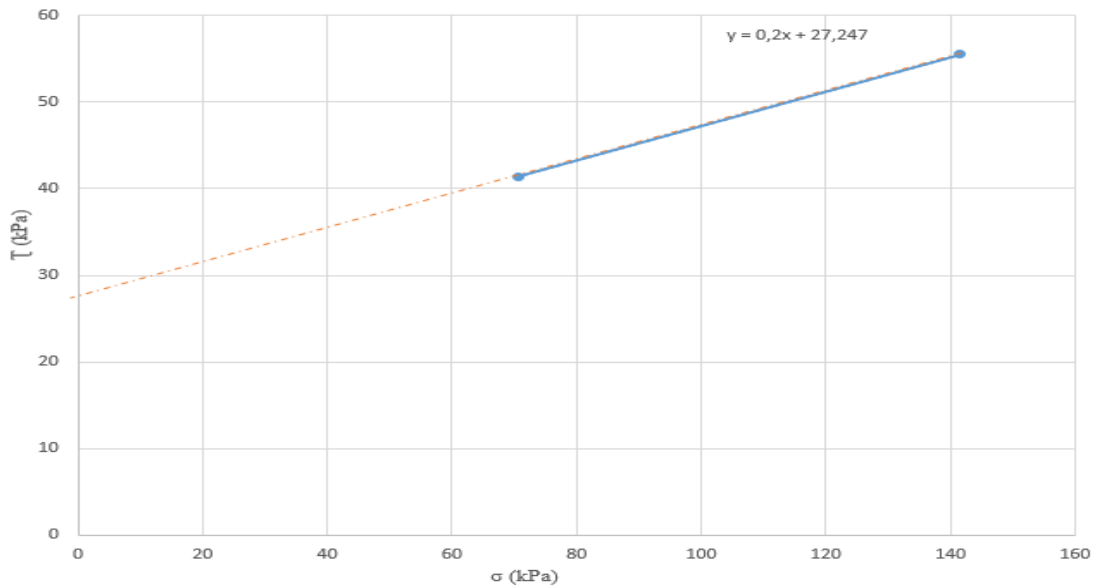
2kg ve 4 kg düşey yüklerin etkisi altında iki deney yapılarak belirli aralıklarla kesme kuvvetleri kayıt altına alınmıştır. Zemin numunesinde net bir kırılma görülmemiştir. Ancak deformasyon artarken kesme kuvvetinin sabit kaldığı nokta kırılma noktası olarak alınmıştır. Bu sonuçlara göre kohezyon değeri denklemde x yerine 0 verilerek 27 kPa elde edilmiştir. İçsel sürtünme açısı ise denklem 4.2'den $\phi = 11,3^\circ$ elde edilmiştir (Çizelge 4.6, Şekil 4.8).

Burada saf kile eklenen granüler atık lastik kırıntıları zeminin davranışını değiştirmiştir. Zemin granüler özellik kazanmaya başlamış, kumlu bir zemin davranışına doğru evrilmeye başlamıştır. Zeminde kohezyon azalmıştır. İçsel sürtünme açısı ise artmaya başlamıştır. Bu amaçlanan hedefe uygun bir gözlemdir.

$$\arctan\left(\frac{55,55-41,40}{141,54-70,771}\right) = 11,3^\circ \quad (4.2)$$

Çizelge 4.6. %10 ALK+%90 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

P = 2 kg		P = 4 kg	
ΔL (mm)	T max(N)	ΔL (mm)	T max(N)
5,8	117	7	157
σ_1	Tmax 1	σ_2	Tmax 2
70,771	41,40	141,54	55,55
C (kPa)		ϕ (o)	
27		11,3	



Şekil 4.8. %10 ALK +%90 kil karışımı için kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi .

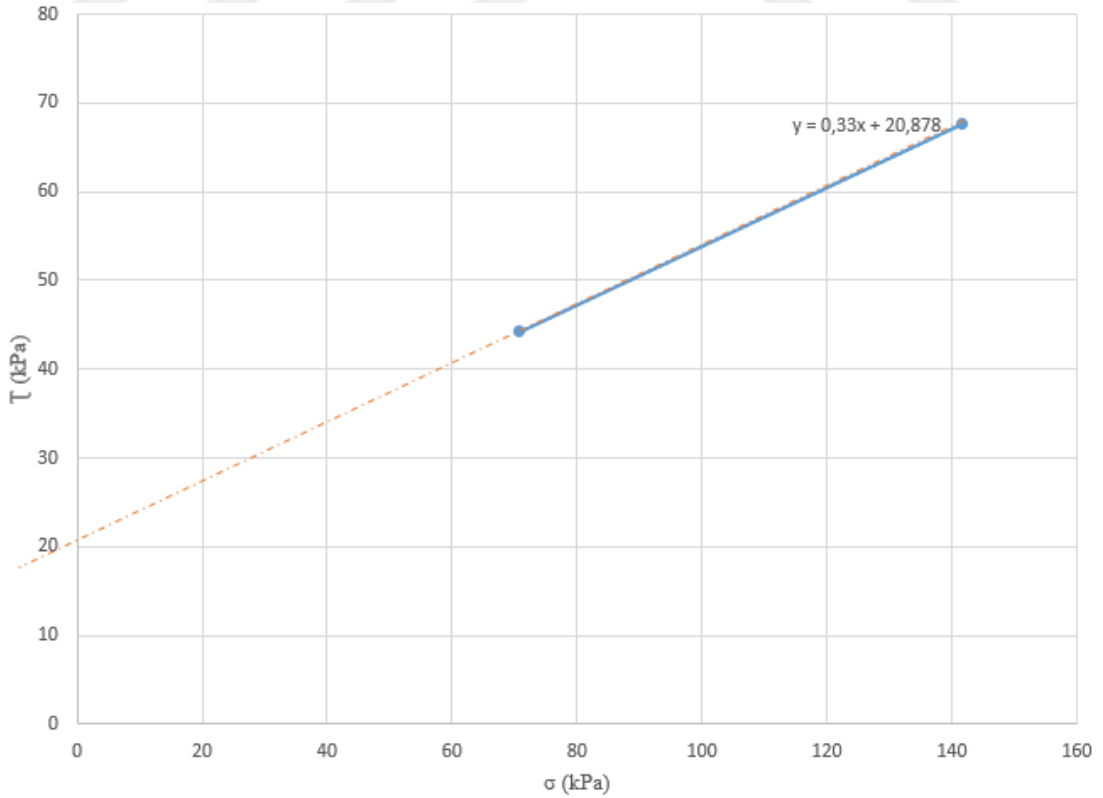
4.1.2.3. %20 ALK - %80 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

2kg ve 4 kg düşey yükler altında zeminler kesilmiştir. Granüler malzeme oranı arttığı için zeminin içsel sürtünme açısında artış gözlenmiştir. Zemin daha fazla kumlu karma zemin gibi davranış göstermektedir. Deney sonucuna göre denklemde x yerine 0 yazılarak $c=20,88\text{kPa}$ elde edilmiştir. İçsel sürtünme açısı ise denklem 4.3'den $\phi=18,26^\circ$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.9 ve Çizelge 4.7.).

$$\arctan\left(\frac{67,59-44,23}{141,54-70,771}\right) = 18,26^\circ \quad (4.3)$$

Çizelge 4.7. %20 ALK+%80 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

P = 2 kg		P = 4 kg	
ΔL (mm)	T max(N)	ΔL (mm)	T max(N)
6,2	125	7	191
σ_1	Tmax 1	σ_2	Tmax 2
70,771	44,23	141,54	67,59
C (kPa)		ϕ (o)	
20,88		18,26	



Şekil 4.9. %20 ALK +%80 kil karışımı için kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi

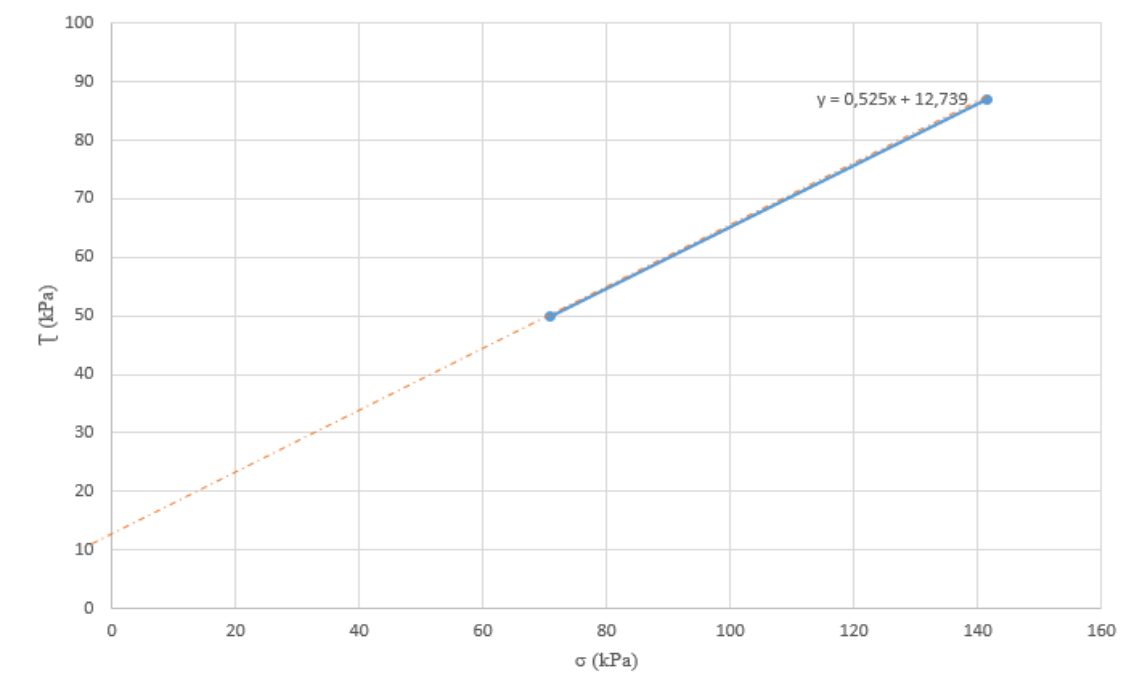
4.1.2.4. %30 ALK - %70 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

2kg ve 4 kg düşey yüklerin etkisi altında zeminler kesilmiştir. Granüler malzeme oranı arttığı için zeminin içsel sürtünme açısında artış gözlenmiştir. Zemin daha fazla granüler özellik sergilemiştir. Deney sonucuna göre denklemde x yerine 0 verilerek $c=12,74\text{kPa}$ ve denklem 4.4'ten $\phi=27,7^\circ$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.10 ve Çizelge 4.8.). En yüksek granüler parçacık bu karışımda olduğundan dolayı maksimum içsel sürtünme açısı da bu karışım için elde edilmiştir. Kohezyon değeri ise artan lastik kırpıntısı miktarı ile birlikte azalmaktadır.

$$\arctan\left(\frac{87,04-49,89}{141,54-70,771}\right) = 27,7^\circ \quad (4.4)$$

Çizelge 4.8. %30 ALK%70 kil karışımı için kesme kutusu deney sonuçları

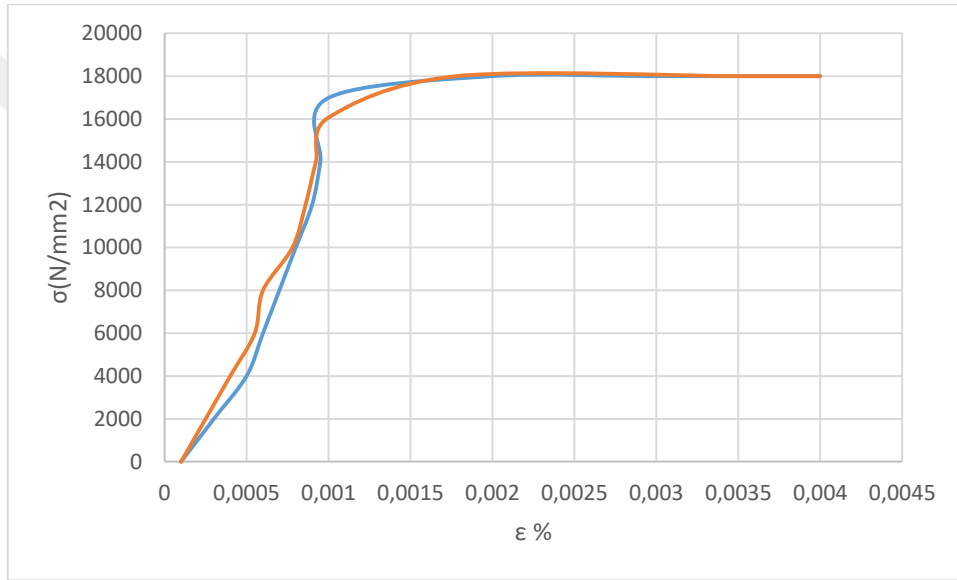
P = 2 kg		P = 4 kg	
ΔL (mm)	T max(N)	ΔL (mm)	T max(N)
6,2	141	7,8	246
σ_1	Tmax 1	σ_2	Tmax 2
70,771	49,89	141,54	87,04
C (kPa)		ϕ (o)	
12,74		27,70	



Şekil 4.10. %30 ALK - %70 kil karışımı için kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi.

4.1.4. Dayanma duvarını temsilen alınan Beton numunelerin dayanımı

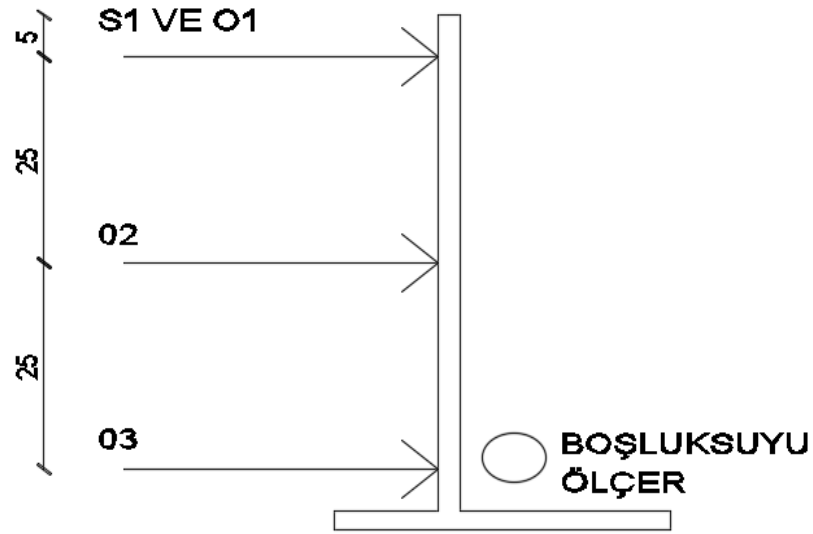
Dayanma duvarının imal edildiği betonları temsile eden küp numuneler 3. Bölümde anlatıldığı şekilde laboratuvar ortamında Serbest basınç deneyine tabii tutulmuşlardır. Beton numuneler ortalama 42,47 kN yük altında kırılmışlardır. Numunenin alanı $0,05 \times 0,05 = 0,0025 \text{ m}^2$ olarak alınmıştır. Yüklemeler sonucunda her numuneden elde edilen ortalama veriler hesaplanarak betona ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.11.'de gösterilmiştir. Buradan hareketle betonun elastisite modülü yaklaşık olarak 17000 mPa olarak belirlenmiştir. Bu da $1,7 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ yapmaktadır.



Şekil 4.11 Beton numunelere ait gerilme-deformasyon ilişkileri.

4.2. Yükleme Deneyleri

Bu kısımda yükleme deneylerinden elde edilen yük, deformasyon ve boşluksuyu basıncı değişimleri verilmiştir. Yatay deplasmanların ölçülmesi için duvar önyüzüne yerleştirilen deformasyon saatleri sol köşede 1 adet ortada ise 3 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Saatlerin kısaltması olarak sol köşedeki değer S1, ortadaki saatler ise yukarıdan aşağıya olacak şekilde sırasıyla O1, O2, O3 olarak verilmiştir (Şekil 4.12). Boşluksuyu basıncı ölçüm değerleri ise U ile gösterilecektir. İstinat duvarının arkasındaki temel sisteminin yüklenmesi sonucunda duvar arkasında oluşan düşey deformasyon değerleri ise ΔZ olarak verilmiştir.



Şekil 4.12. Deformasyon ölçerlerin ve boşluksuyu basıncı ölçerin istinat duvarları üzerinde yerleştirilmesi

Load-Cell sisteminde yük değeri N olarak okunmaktadır. Bu değerleri kPa cinsinden vermek amacıyla kPa değerlerine karşılık gelen yük değeri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Burada yükleme levhasının alanı 290cm^2 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.10. Load-Cell'den okunan Yük değerleri - Gerilme ilişkisi

Gerilme (kPa)	Yük(N)
5	145,05
10	290,1
15	435,15
20	580,2
25	725,25
30	870,3
35	1015,35
40	1160,4
45	1305,45
50	1450,5
55	1595,5
60	1740,6
65	1885,65
70	2030,7
75	2175,7
80	2320,8
85	2465,8
90	2610
95	2755,9
100	2901

4.2.1. Geri dolgu malzemesi saf kil olan durumda yükleme deneyi

Başlangıç deneyi olarak geri dolgu malzemesi içerisinde yalnızca kil zemin bulunan, herhangi bir atık lastik kırıntısı olmayan durumda istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13.).

Yükleme deneyinde, yönetmelik gereği istinat duvarlarının maksimum deformasyon değeri %1 olacağından 5,5 mm'ye kadar deplasmana izin verilmiştir. Bu amaçla yaklaşık 5.0 mm deformasyona ulaşana kadar yükleme yapılmış ve ardından yükleme işlemine son verilmiştir. 25 kPa gerilme değerinde sınır deformasyon değerine ulaşılmıştır. Deneyde elde edilen gerilme-deplasman-boşluksuyu basıncı değişimi değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Yüklemeler esnasında; beklenildiği şekilde en fazla deplasman (5.1mm) istinat duvarının en üst kısmındaki deformasyon saatinde ölçülmüştür (O1).



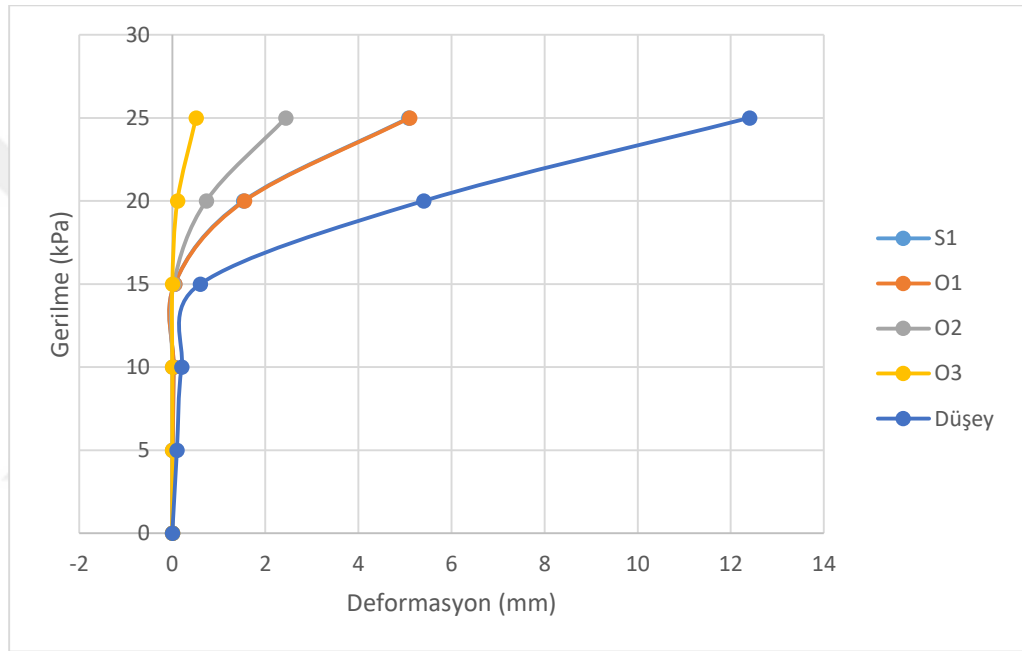
Şekil 4.13. Geri dolgu malzemesi %100 kil olan durumda yükleme deneyi

Laboratuvar ölçeğinde yapılan yükleme deneylerinde uygulanan gerilme değerleri arazide uygulanan gerçek gerilme değerlerinin ölçeklendirilmesi ile elde edilmiştir. Gerilmenin ölçekleme faktörü değeri 1/N'dir. Yani; istinat duvarının arkasındaki geri

dolgu malzemesi üzerine uygulanan 20 kPa'lık gerilme değeri arazide 200 kPa'lık bir gerilme değerini temsil etmektedir (Çizelge 4.11 ve Şekil 4.14).

Çizelge 4. 11. Geri dolgu malzemesi %100 kil olan durumda istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi

Kuvvet(N)	Gerilme (kPa)	S1(mm)	O1(mm)	O2(mm)	O3 (mm)	U(kPa)	ΔZ (mm)
145,05	5	0,01	0,01	0	0	0	0,1
290,1	10	0,12	0,15	0,05	0,03	0	0,2
435,15	15	0,52	0,55	0,38	0,05	0	0,6
580,2	20	1,53	1,55	0,73	0,11	0,12	5,4
725,25	25	5,08	5,1	2,44	0,51	0,35	12,4



Şekil 4.14 Geri dolgu malzemesi %100 kil olan istinat duvarında yükleme deneyine ait gerilme-deformasyon ilişkisi

4.2.2. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi

Geri dolgu malzemesi içerisinde %10 miktarında atık lastik kırıntısı bulunan yaklaşık 200kg kil zemin optimum su muhtevasında hazırlanarak 4 ayrı kısma ayrılarak tabakalar halinde tankın içerisine yerleştirilmiştir. Burada da boşluksuyu basıncı ölçer ilk 5 cm derinlikte kalacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.15).

Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil zemin olan istinat duvarında yüklemeye yaklaşık 5mm yatay deformasyona ulaşıncaya devam edilmiştir. Bu

durumda aynı yatay deformasyona (5 mm) ulaşıldığında uygulanan gerilme miktarı saf kil için uygulanan gerilme değerinden fazla olmuştur. Yani zeminin taşıma kapasitesi artmıştır.

Yüklemeye deneyine ait gerilme, yatay ve düşey deformasyon, boşluksuyu basıncı değişimi Çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca gerilme-deplasman/deformasyon eğrileri Şekil 4.'te verilmiştir. Sol ve orta kısım en üst deformasyon saatleri okumaları yaklaşık aynı değer olduğundan grafik üzerinde çakışmaktadır. Yüklemeye deneyinde maksimum yatay deplasman değeri 5,07 mm, düşey deformasyon değeri ise 14.3 mm olmuştur (Çizelge 4.12).

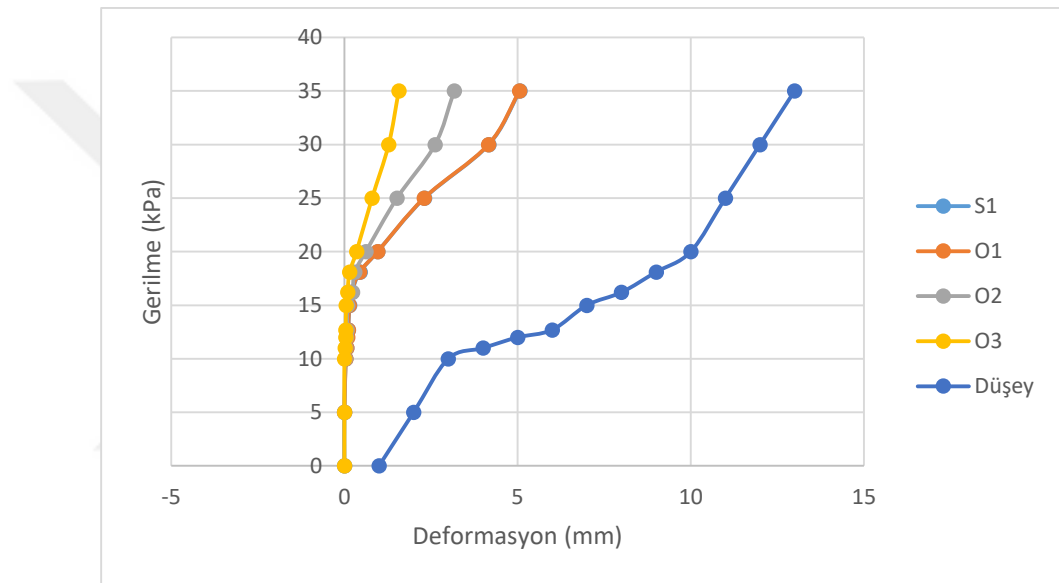


Şekil 4.15 Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil zemin olan istinat duvarında yükleme

Zeminin yaklaşık 5mm yatay deplasmanı için gereken yük 25 kPa'dan yaklaşık 35 kPa'a yükselmiştir. Zeminin taşıma gücü kapasitesi yaklaşık olarak %40 artmıştır. Ayrıca bu değere karşılık gelen düşey deformasyon değeri de yaklaşık olarak aynıdır. Arefnia (2021) tarafından yapılan çalışmada; %20 atık lastik kırıntısı ilave edilmiş zeminin taşıma gücü kapasitesi yaklaşık %60 civarında artmıştır. Tez çalışmasında taşıma gücü kapasitesinde elde edilen %40 artış Arefnia (2021) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermiştir.

Çizelge 4.12 Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan durumda istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi

Kuvvet(N)	Gerilme (kPa)	S1 (mm)	O1 (mm)	O2(mm)	O3 (mm)	U(kPa)	ΔZ (mm)
145,05	5	0,00	0,00	0	0	0	0,1
290,1	10	0,04	0,04	0,02	0	0,03	0,2
320	11	0,07	0,07	0,04	0,02	0,03	0,4
345	12	0,08	0,09	0,06	0,04	0,06	0,5
370	12,7	0,11	0,11	0,08	0,04	0,06	0,7
435,15	15	0,15	0,14	0,09	0,05	0,09	0,9
470	16,2	0,21	0,20	0,23	0,09	0,12	1,2
525	18,1	0,45	0,44	0,3	0,15	0,27	3,2
580,2	20	0,96	0,96	0,62	0,35	0,38	5,3
725,25	25	2,31	2,30	1,52	0,8	0,44	8
870,3	30	4,17	4,16	2,62	1,28	0,65	12,2
1015,35	35	5,07	5,06	3,17	1,57	0,81	14,3



Şekil 4.16. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan istinat duvarında yükleme deneyine ait gerilme- deformasyon ilişkisi

4.2.3. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi

Geri dolgu malzemesi içerisinde %20 miktarında atık lastik kırıntısı bulunan yaklaşık 200kg kil zemin optimum su muhtevasında hazırlanarak 4 ayrı kısma ayrılarak tabakalar halinde tankın içerisine yerleştirilmiştir. Bu yükleme deneyi için hazırlanan geri dolgu malzemesi içinde boşluksuyu basıncı ölçer ilk 5 cm derinlikte kalacak şekilde yerleştirilmiştir.



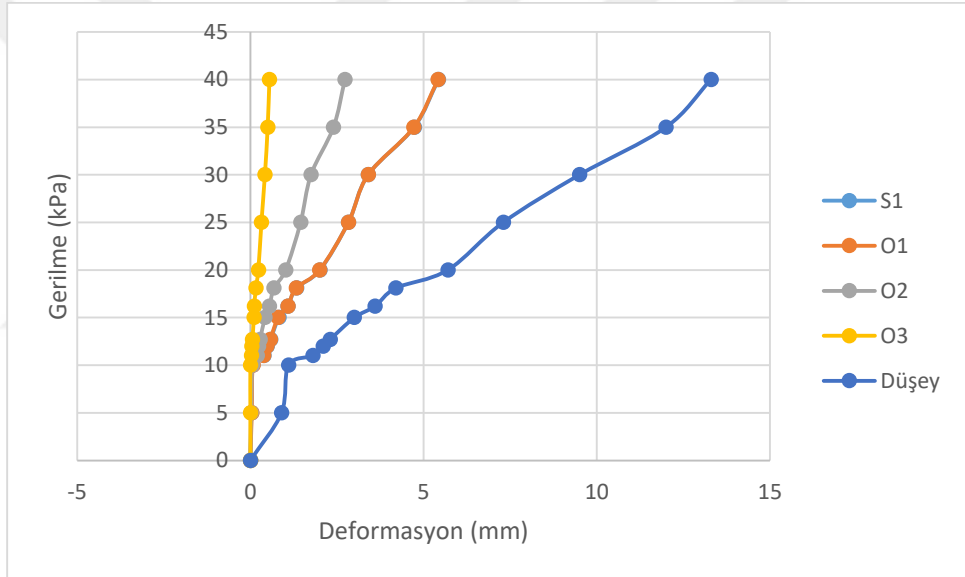
Şekil 4.17. Geri dolgusu %20 atık lastik kırıntısından oluşan durumda yükleme sonrası düşey deformasyon ve yatay deformasyon

Yükleme deneyinde 5.43 mm deplasmana ulaşıldığında yüklemeye son verilmiştir. Yüklemeye deneylerinde elde edilen gerilme-deplasman/deformasyon eğrileri Şekil 4.17.'de gösterilmiştir. Yüklemeye sonucuna göre maksimum yatay deformasyon değeri 5,43 mm olduğunda 40 kPa gerilme değerine ve 5.0mm olduğunda ise 36.25kPa değerine ulaşılmıştır. Yüklemeye deneyinde aynı deformasyon değerinde ulaşılan gerilme değeri (36.25kPa) referans deneyde (geri dolgunun saf kil olduğu durum) ulaşılan gerilme değerine (25kPa) göre %45 civarında artmıştır. Yine benzer şekilde içerisinde %10 atık lastik katkılı durumda ulaşılan gerilme artışı yüzdesine göre (%40) %20 atık lastik katkılı durumda daha yüksek gerilme artışı yüzdesine (%45) ulaşılmıştır. Yatay deplasmanın 5.0mm olduğu durumda düşey deformasyon değeri 12.5 mm olarak elde edilmiştir. Düşey deformasyon değerleri referans deney için elde edilen değerlere yakın değerlerde bulunmuştur (Çizelge 4.13).

Yukarıda da belirtildiği gibi Arefnia (2021) tarafından yapılan çalışmada; %20 atık lastik kırıntısı ilave edilmiş zeminin taşıma gücü kapasitesi yaklaşık %60 civarında artmıştır. Mevcut tez çalışmasında ise taşıma kapasitesinde %45 civarında artış olmuştur. Bu durum her iki çalışma arasında bir uyumluluğun olduğunu göstermektedir (Şekil 4.18).

Çizelge 4.13. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan durumda istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi

Kuvvet(N)	Gerilme (kPa)	S1 (mm)	O1 (mm)	O2(mm)	O3 (mm)	U(kPa)	ΔZ (mm)
145,05	5	0,03	0,04	0,02	0	0,03	0,9
290,1	10	0,07	0,08	0,06	0	0,06	1,1
320	11	0,39	0,38	0,2	0,03	0,09	1,8
345	12	0,48	0,47	0,23	0,04	0,09	2,1
370	12,7	0,58	0,57	0,28	0,06	0,12	2,3
435,15	15	0,82	0,8	0,42	0,1	0,18	3
470	16,2	1,08	1,08	0,55	0,11	0,18	3,6
525	18,1	1,33	1,32	0,68	0,16	0,21	4,2
580,2	20	2,01	2	1,02	0,23	0,24	5,7
725,25	25	2,83	2,83	1,45	0,32	0,3	7,3
870,3	30	3,4	3,4	1,75	0,42	0,39	9,5
1015,35	35	4,73	4,72	2,4	0,5	0,45	12
1160,4	40	5,43	5,42	2,73	0,55	0,51	13,3



Şekil 4.18. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan istinat duvarında yükleme deneyine ait gerilme-deplasman/deformasyon ilişkisi

4.2.4. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan istinat duvarında yükleme deneyi

Geri dolgu malzemesi içerisinde %30 miktarında atık lastik kırıntısı bulunan yaklaşık 200kg kil zemin optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Hazırlanan homojen karışım 4 tabaka halinde tankın içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Boşluksuyu basıncı ölçer en alt tabaka içine ilk 5 cm derinlikte kalacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.19).



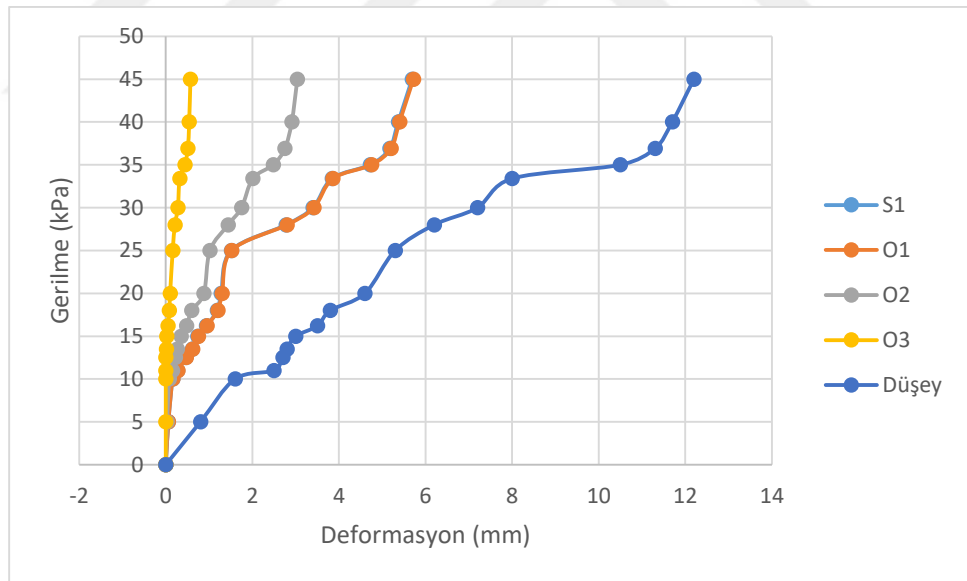
Şekil 4.19. Geri dolgusu %30 atık lastik kırıntısından oluşan durumda yükleme deneyi

Geri dolgusu %30 atık lastik kırıntısından oluşan istinat duvarında arkasında yapılan yükleme deneyinde yatay deplasman değeri 5.72mm değerine ulaşıncaya kadar yüklemeye devam edilmiştir (Çizelge 4, Şekil 4). Bu deplasman değeri için 45 kPa gerilme değerine ulaşılmıştır. Arefnia (2021) tarafından yapılan çalışmada da yaklaşık olarak bu değere ulaşılmıştır. Araştırmacı; çalışmasında %20-40 arasındaki bir miktarda atık lastik ilavesi ile karışımın taşıma kapasitesinde saf kile göre yaklaşık %250-300 arasında bir artış olmuştur. Araştırmacı daha fazla oranlarda atık lastik kullanımı ile taşıma kapasitesinin azalacağını belirtmiştir. 5.0mm yatay deplasman için uygulanan gerilme değeri $\approx 36\text{kPa}$ olmuştur. Bu değer %20 atık lastik ilave edilen durumda ulaşılan gerilme değerine yakın bir değerdir. Referans deneyde (geri dolgunun saf kil olduğu durum) ulaşılan gerilme değerine (25kPa) göre %44 civarında artış olmuştur. 36kPa gerilme seviyesinde oluşan düşey deformasyon değeri ise $\approx 11.2\text{mm}$ civarındadır. Bu durumda düşey deformasyon miktarının diğer karışımlar ve saf kil için elde edilen değerlere göre daha düşük düzeyde kaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.20). %30 atık lastik kırıntısı ilavesinde düşey deformasyon yönünden daha iyi performans sergilenmiştir (Çizelge 4.14). Literatürdeki çalışmaların genelinde optimum atık lastik oranı %20-30 arası belirlenmiştir. Daha fazla atık lastik kullanıldığında zeminin elastikiyet özelliği artacağından özellikle düşey deplasman değerlerinde aşırı artış olabileceği tahmin edilmektedir. Reddy (2021) tarafından yapılan çalışmada atık lastik ilaveli kum zeminlere sarsma tablasında dinamik yük uygulamıştır. Çalışma sonucuna göre optimum atık lastik

oranı %20-30 arasında elde edilmiştir. %40 oranında atık lastik kullanıldığında ise %30 atık lastik kullanılan duruma göre deformasyonların arttığı belirtilmiştir.

Çizelge 4.14. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan durumda istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi

Kuvvet(N)	Gerilme (kPa)	S1 (mm)	O1 (mm)	O2(mm)	O3 (mm)	U(kPa)	ΔZ (mm)
145,05	5	0,06	0,06	0,03	0	0,03	0,8
290,1	10	0,16	0,16	0,08	0	0,06	1,6
320	11	0,27	0,28	0,15	0	0,09	2,5
365	12,5	0,46	0,47	0,22	0	0,09	2,7
390	13,5	0,61	0,62	0,26	0,01	0,12	2,8
435	15	0,74	0,75	0,35	0,02	0,12	3
470	16,2	0,94	0,95	0,48	0,05	0,12	3,5
520	18	1,19	1,2	0,6	0,08	0,15	3,8
580	20	1,28	1,3	0,88	0,1	0,15	4,6
725	25	1,51	1,52	1,02	0,16	0,18	5,3
820	28	2,78	2,8	1,44	0,21	0,24	6,2
870	30	3,4	3,42	1,75	0,28	0,24	7,2
970	33,4	3,84	3,86	2,01	0,32	0,27	8
1015	35	4,72	4,75	2,48	0,44	0,27	10,5
1070	36,9	5,17	5,2	2,75	0,51	0,3	11,3
1160,4	40	5,37	5,40	2,91	0,54	0,33	11,7
1305	45	5,69	5,72	3,04	0,57	0,33	12,2



Şekil 4.20. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan istinat duvarında yükleme deneyine ait gerilme- deformasyon ilişkisi

4.2.5. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil ve Geotekstil donatıdan oluşan istinat duvarında yükleme deneyi

Tank içerisinde gerçekleştirilen son yükleme deneyi için geri dolgu malzemesinde %30 miktarında atık lastik kırıntısı bulunan kil zemin içerisinde tabakalar halinde

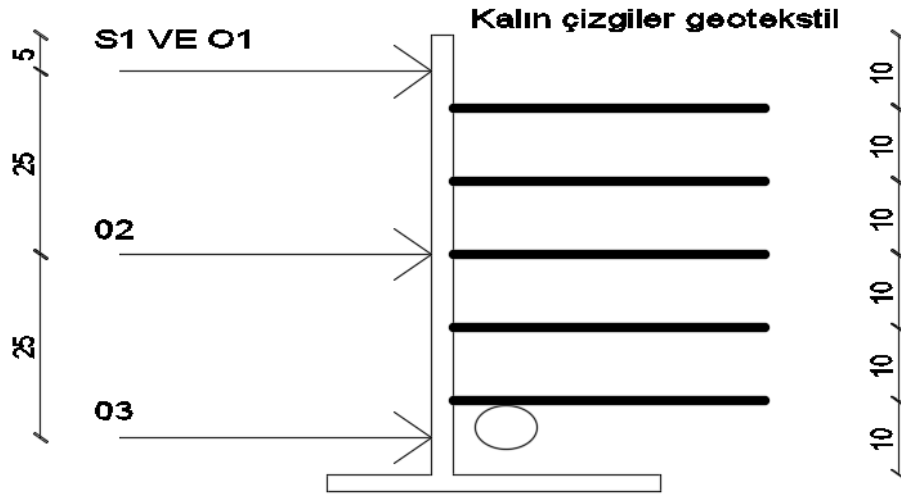
geotekstil donatı ilavesi gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme deneyindeki amaç; atık lastik ve geotekstil donatının birlikte kullanıldığı durumda geotekstil donatının duvarın yatay deformasyon miktarının azaltılmasına ve duvar arkası zeminin taşıma kapasitesine katkısını belirlemektir. %30 atık lastik karışıklı zemin tabakalar halinde yerleştirilirken her 10 cm aralıkta olacak şekilde 5 sıra geotekstil donatı serilmiştir. Özener (2001)'in yapmış olduğu çalışma dikkate alınarak donatı boyu $B=0.9L$ tercih edilmiştir. Burada B temel genişliği L ise donatı uzunluğunu temsil etmektedir. Geotekstil donatı yerleştirilirken ilk 10 cm dolgu tabakası sıkıştırıldıktan sonra geotekstil donatı serilmiş ardından bohçalama yöntemi ile üst dolgular ve diğer geotekstiller tabakalar oluşturulmuştur (Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23).



Şekil 4.21. İlk geotekstil tabakanın serilmesi



Şekil 4.22. Tabakalar şeklinde bohçalama yapılarak geotekstil donatının serilmesi



Şekil 4.23. Geotekstil tabakaları yerleşimi kesit görünüşü

Yüklemeye işlemine 6.3mm yatay deplasmana ulaşana kadar devam edilmiştir. Donatısız şekilde oluşturulan diğer yüklemeye koşullarına göre aynı yatay deplasman

seviyelerinde daha yüksek gerilmeler taşınabilmiştir. Burada geotekstil donatılar dolgunun oluşturduğu yatay zemin yüklerini, çekme kuvveti olarak üzerine almaktadır. Bu yükleme deneyi sonrasında başka yükleme yapılmayacağı için duvardaki tüm deformasyon ölçüm cihazları sökülerek duvarın taşıma kapasitesi zorlanmıştır. Bunun sonucunda, duvarın hem gövde-temel birleşim yerinde kopma gerçekleşmiş hem de toptan göçme hareketi göstermiştir (Şekil 4.24, Şekil 4.25).



Şekil 4.24. Duvarın göçmeye zorlanması



Şekil 4.25. Duvarın aşırı yükleme sonrası kırılmış hali.

Atık lastik kırıntısı kullanılarak yapılan literatürdeki diğer çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak atık lastik miktarının zemin içerisindeki

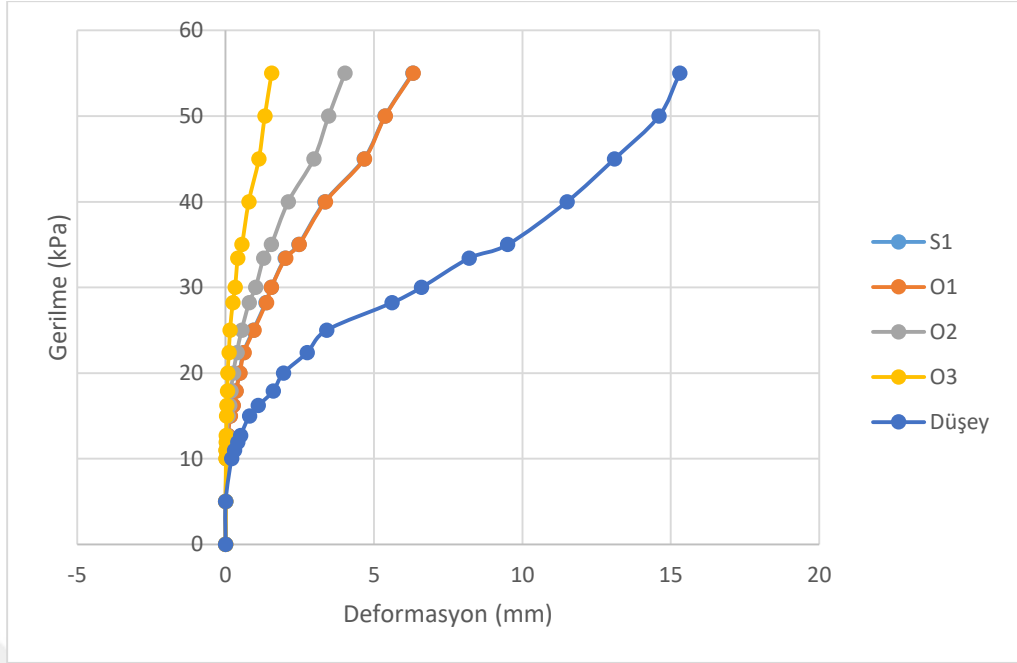
oranının %30'u geçen miktarlarında atık lastiğin deformasyonlar üzerine yaptığı katkı sonlanmıştır. Bu sebepten dolayı tez çalışması kapsamında istinat duvarı geri dolgu malzemesi olarak atık lastiğin %40 miktarda kullanılması yerine %30 atık lastik + geotekstil donatı kullanımı tercih edilmiştir.

Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere geotekstiller zeminin yatay yüklerini çekme kuvveti olarak üzerine almakta ve karşılamaktadır. Geotekstiller yatay deplasmana karşı fayda sağlamakla beraber, istinat duvarı arkasında uygulanan düşey gerilmeler altında düşey deformasyonların da azalması yönünde önemli katkılar sağlamaktadırlar. 5 mm deformasyona yaklaşık 48kPa gerilme seviyesinde ulaşılmıştır. Bu durumda aynı deformasyon seviyesinde %30 ATK'lı duruma göre taşıma kapasitesi yaklaşık %33 artmıştır. Referans deneye göre ise yaklaşık %192 civarında bir iyileşme gözlenmiştir (Çizelge 4.15, Şekil 4.26.). Yani geotekstil donatılar atık lastiklerle birlikte kullanıldığında aynı deformasyonlar dikkate alındığında zeminin taşıma kapasitesinde önemli bir iyileşme sağlamaktadırlar.

Davarcı tarafından yapılan (2019) çalışmada optimum donatı arası mesafe $h/L=0.33$ şeklinde belirtilmiş olup, donatılar arasındaki mesafe $29 \times 0.33 = 10$ cm olarak seçilmiştir. Yine Özaydın (2013) tarafından yapılan bir başka çalışmada duvar arkasındaki optimum donatı sayısı 5 olarak dikkate alınmış olup, tarafımızdan yapılan çalışmada da bu sayı referans olarak alınmıştır.

Çizelge 4.15. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil ve Geotekstil donatıdan oluşan istinat duvarı üzerinde yükleme deneyi

Kuvvet(N)	Gerilme (kPa)	S1 (mm)	O1 (mm)	O2(mm)	O3 (mm)	U(kPa)	ΔZ (mm)
145,05	5	0,01	0	0	0	0	0
290,1	10	0,03	0,03	0,02	0,01	0	0,2
320	11	0,05	0,05	0,02	0,01	0,03	0,3
345	11,9	0,06	0,06	0,03	0,02	0,03	0,4
370	12,7	0,07	0,08	0,04	0,02	0,06	0,5
435	15	0,15	0,16	0,08	0,03	0,06	0,8
470	16,2	0,24	0,25	0,13	0,04	0,09	1,1
520	17,9	0,34	0,35	0,18	0,06	0,09	1,6
580	20	0,47	0,48	0,26	0,07	0,12	1,95
650	22,4	0,6	0,62	0,38	0,11	0,15	2,75
725	25	0,93	0,95	0,54	0,15	0,15	3,4
820	28,2	1,35	1,37	0,79	0,24	0,15	5,6
870	30	1,54	1,54	1,01	0,32	0,18	6,6
970	33,4	2,00	2,02	1,28	0,41	0,21	8,2
1015	35	2,46	2,48	1,54	0,55	0,24	9,5
1160	40	3,34	3,36	2,11	0,78	0,3	11,5
1306	45	4,66	4,68	2,97	1,12	0,33	13,1
1456	50	5,37	5,38	3,47	1,32	0,36	14,6
1595	55	6,3	6,32	4,02	1,55	0,42	15,3



Şekil 4.26. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil ve Geotekstil donatıdan oluşan istinat duvarında yükleme deneyine ait gerilme-deplasman/deformasyon ilişkisi

4.3. PLAXIS-3D Analizleri

Laboratuvar deneyleri ve yükleme deneyleri tamamlandıktan sonra çıkan sonuçları kontrol etmek amacıyla bilgisayar ortamında modellemeler Plaxis 3D programında her karışım için ayrı ayrı yapılmış, analizleri yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır.

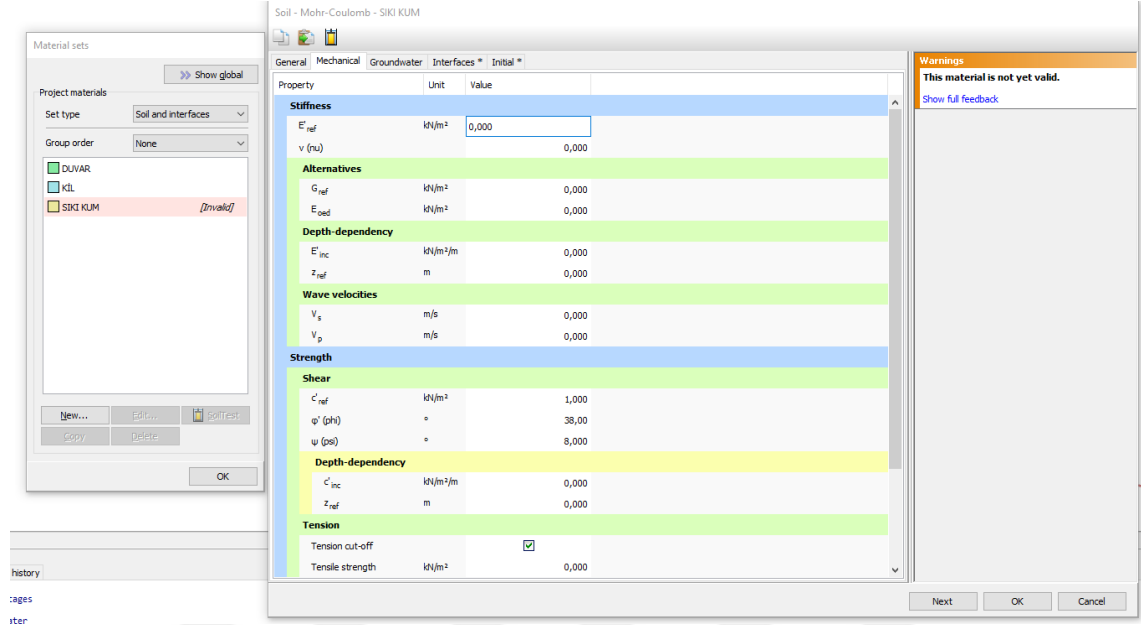
Program için gereken zemin parametrelerini bulmak amacıyla her karışım için ayrı ayrı deneyler uygulanmıştır. Bu amaçla Bölüm 4.1.'de anlatıldığı gibi kesme kutusu deneyi, permeabilite deneyi, Harward mini proktor deneyleri yapılarak zeminlere ait elastisite modülleri, permeabilite katsayıları, doğal birim hacim ağırlıkları, tane birim hacim ağırlıkları, karışımların optimum su muhtevaları, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri bulunmuştur. Ayrıca betonarme duvarın Elastisite modülü değerini belirlemek için beton numuneler üzerinde Serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

Analiz ve yükleme kısmında tank içerisindeki alt temel dolgusu olarak sıkı kum kullanılmıştır. Bu kumun ϕ değeri yaklaşık 38° olup, tüm yükleme deneylerinde kum aynı sıkılıkta yerleştirilmiştir (Şekil 4.27).

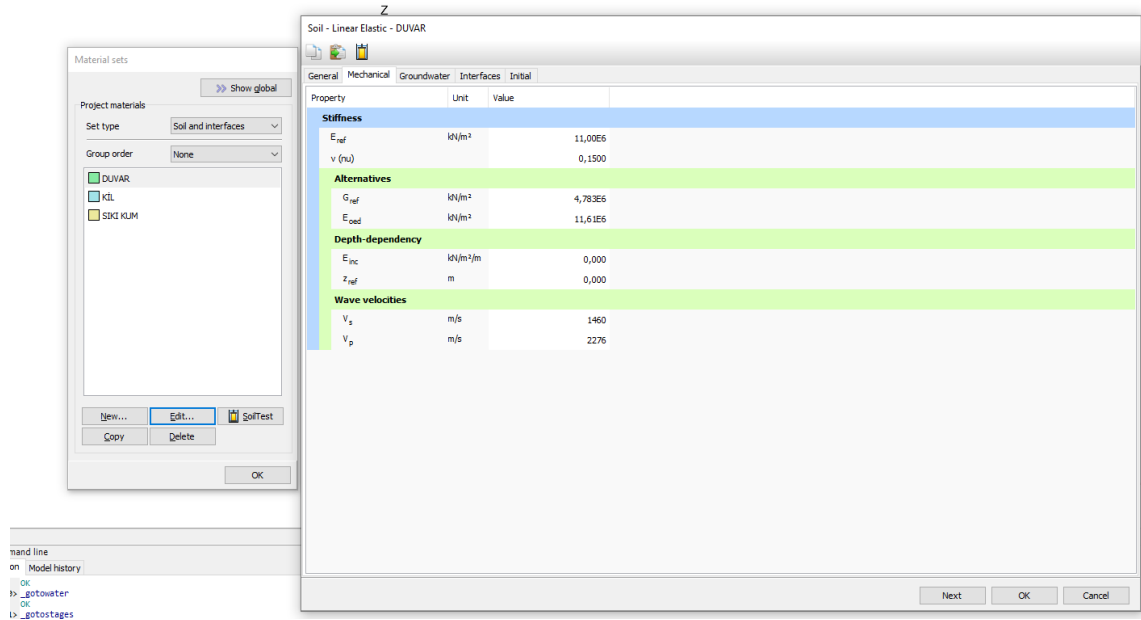
Plaxis 3D programında istinat duvarlarında betonarme için girilen parametreler tüm duvarlarda sabit olarak alınmıştır. Üretilmiş olan model istinat duvarını temsilen

kırılan beton numunelerin Serbest basınç mukavemeti değerleri dikkate alınarak duvar için alınan parametreler Şekil 4.28'de verilmiştir.

Bu kısımda programa verilerin girişi, analiz parametreleri, analizlerden elde edilen yük deformasyon ilişkileri ve duvarın yük etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.



Şekil 4.27. Plaxis 3D analizleri için; İstinat duvarı altındaki sıkı kum zemine ait parametreler



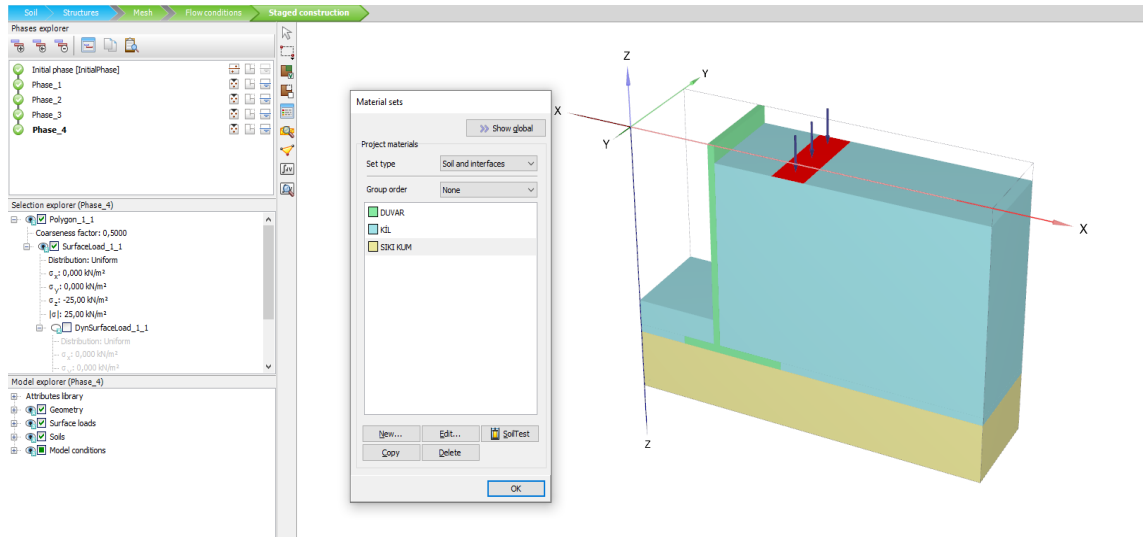
Şekil 4.28. Plaxis 3D analizleri için; İstinat duvarına ait parametreler

4.3.1. Geri dolgu malzemesi saf kil olan durumda Plaxis 3D analizleri

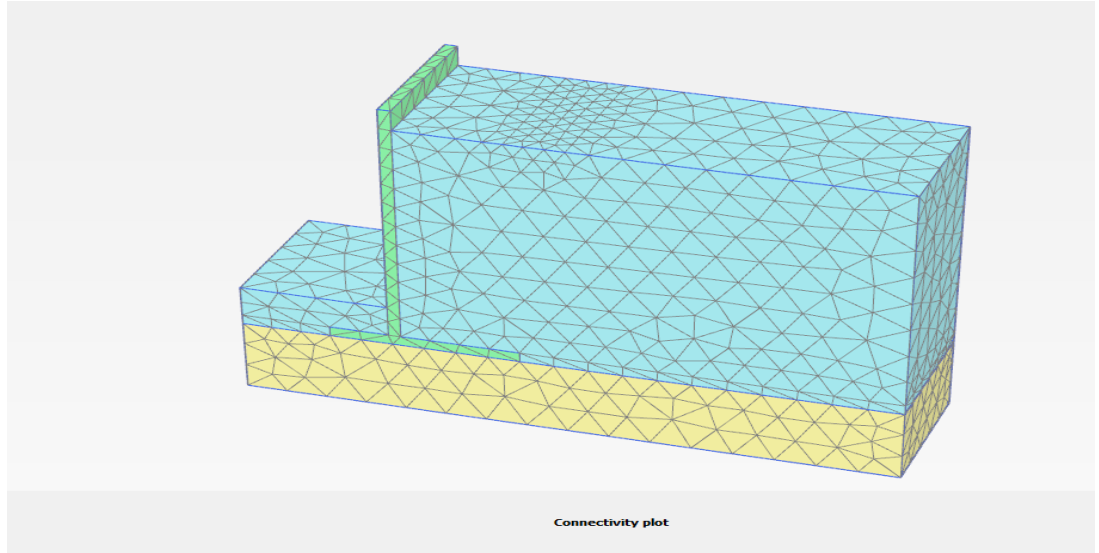
Geri dolgu malzemesi saf kil olan Referans deneyde Plaxis 3D programında kullanılan zemine ve duvara ait parametreler Çizelge 3.'te verilmiştir. Geri dolgu malzemesi saf kil olan istinat duvarı arkasındaki yükleme deneyi için yapılan Plaxis 3D analizlerinde Materyal özelliklerine ait ekran görüntüleri ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı (mesh) Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Taban kısmına sıkı kum olarak yerleştirilen alt temel dolgusu üzerine yerleştirilen kil üzerine 25 kPa'a kadar yükleme yapılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.16).

Çizelge 4.16. Geri dolgusu saf kil olan durum için zemin ve duvara ait parametreler

Betona ait özellikler	E (kN/m²)	17x10 ⁶
	γ (kN/m³)	22
	ν	0,15
Kil zemine ait özellikler	c (kN/m²)	66,88
	φ (°)	3

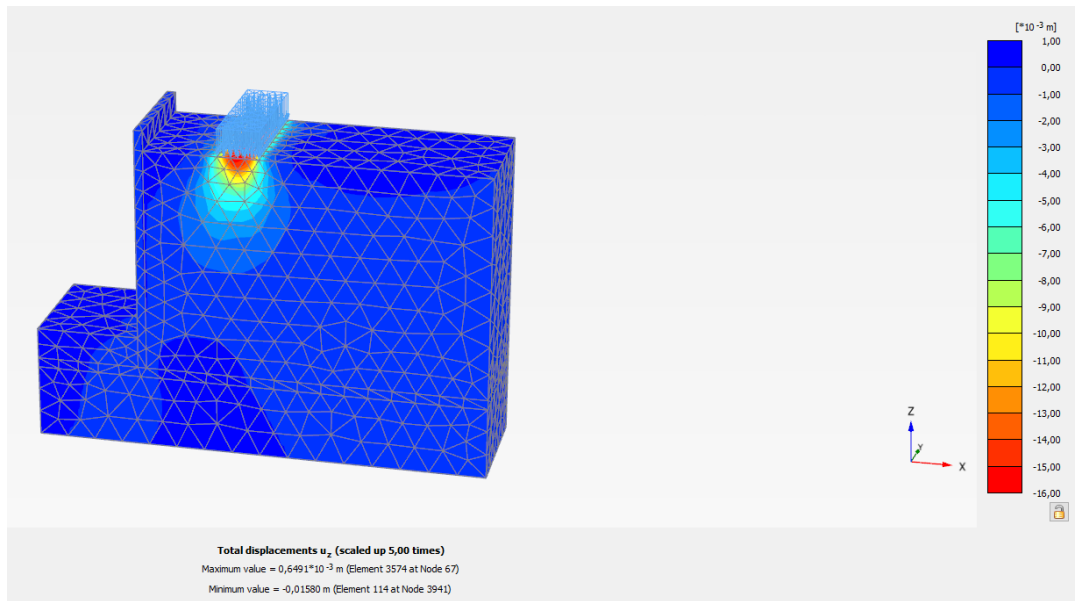


Şekil 4.29. Geri dolgusu saf kil olan durum için modelleme ve materyal özellikleri

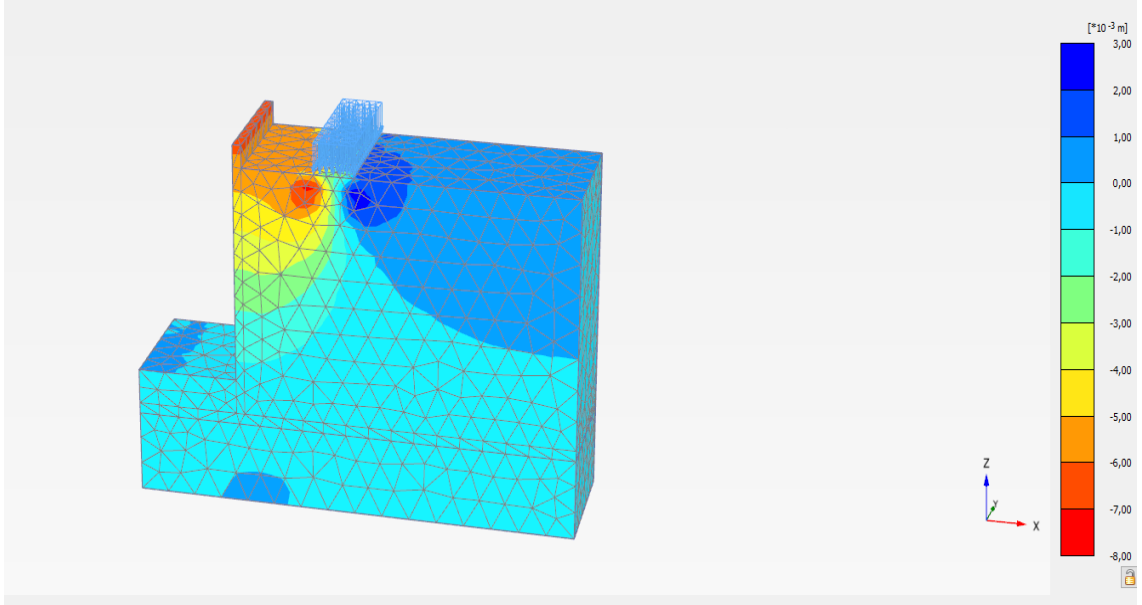


Şekil 4.30. Geri dolgusu saf kil olan durum için sonlu elemanlar ağı

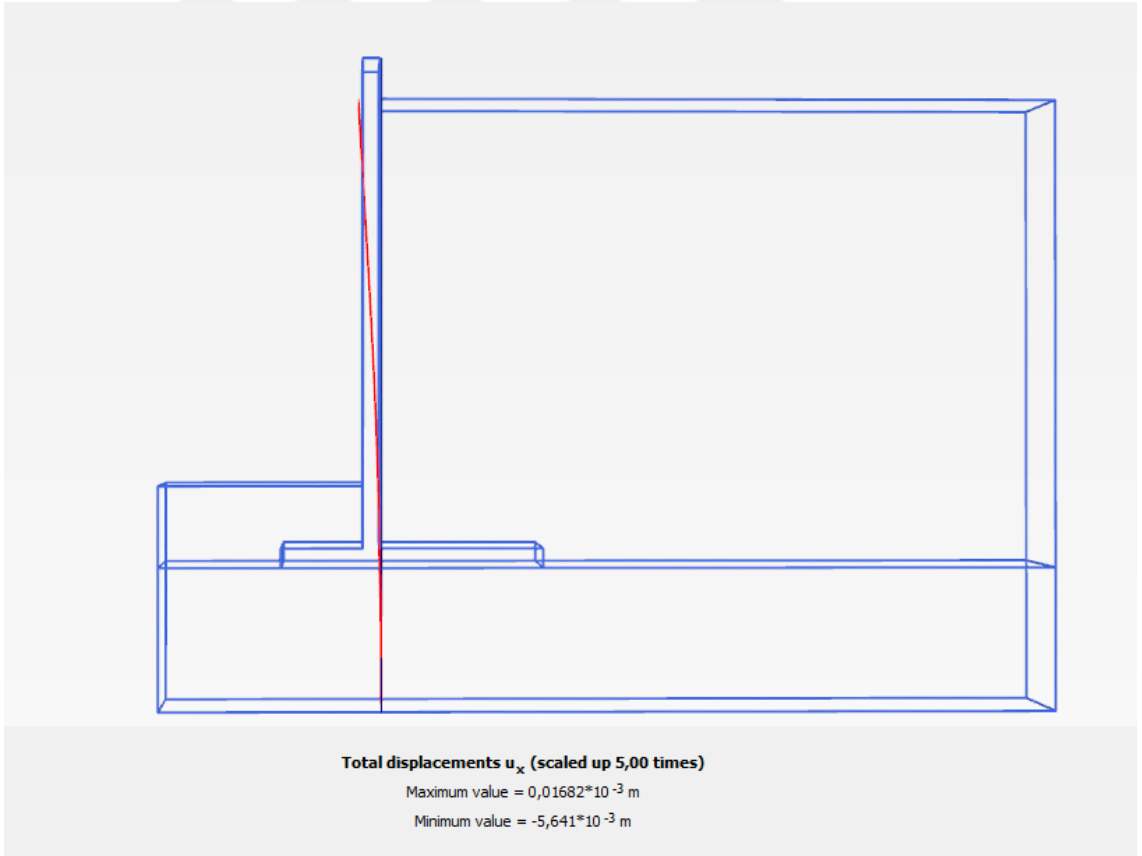
25 kPa'lık gerilme etkisi altında gerçekleştirilen analizin sonucunda elde edilen yatay deplasman ve düşey deformasyonlar Şekil 4.31., Şekil 4.32. ve Şekil 4.33'de verilmiştir. Yükleme sonucunda yapılan deneylerde 5,1 mm yatay deformasyon elde edilmiştir. PLAXIS programında ise 5,64 mm yatay deformasyon elde edilmiştir. Değerler yaklaşık olarak aynıdır. Yüklemede 12,4 mm düşey deformasyon elde edilirken bilgisayar ortamında ise 15,8 mm düşey deformasyon sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.31). Buradaki farkın sebebi gerçekte ne kadar sıkıştırılmış olsa da küçük boşluklar yükleme esnasında kapanmıştır, ancak deformasyon o anlarda kaydedilmemiştir.



Şekil 4.31. Geri dolgusu saf kil olan durum için düşey deformasyonların değişimi



Şekil 4.32. Geri dolgusu saf kil olan durum için yatay deplasmanların değişimi



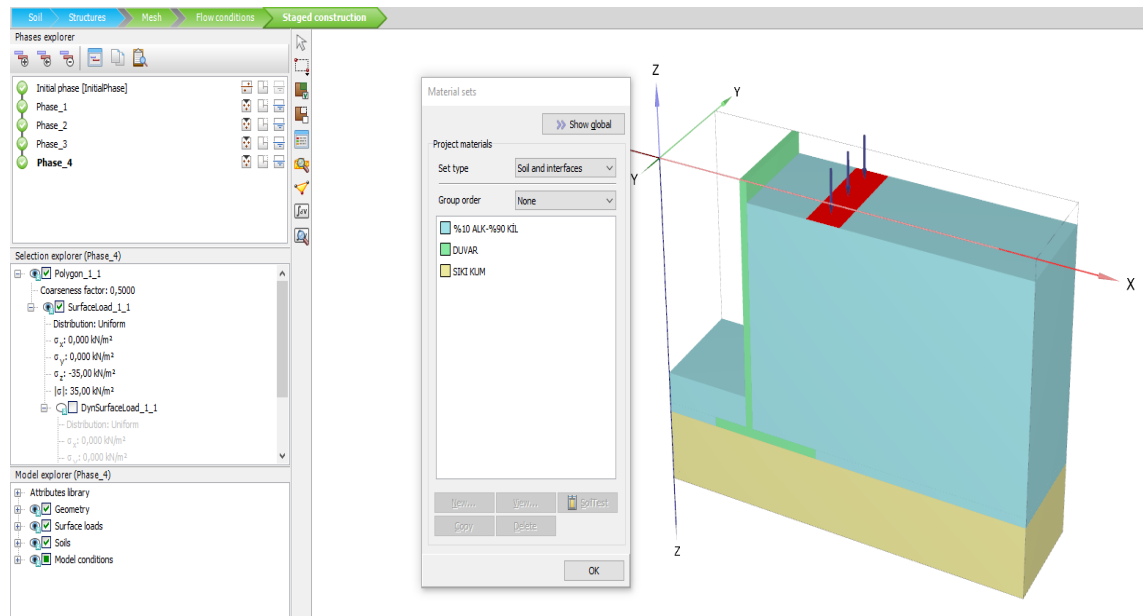
Şekil 4.33. Duvarın yanal zemin basıncı altındaki yatay deplasmanı için kesit görünümü

4.3.2. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri

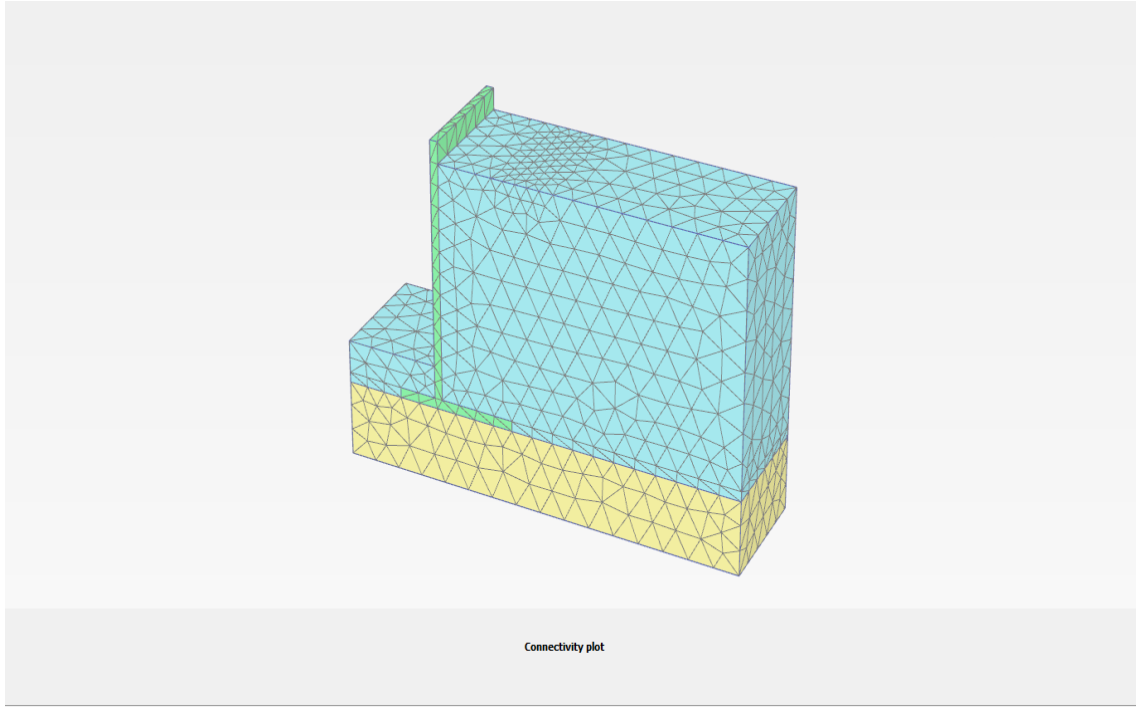
Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan durumda Plaxis 3D programında kullanılan zemine ve duvara ait parametreler Çizelge 4'ta verilmiştir. Geri dolgu malzemesi %10 ALK + %90 kil olan istinat duvarı arkasındaki yükleme deneyi için yapılan Plaxis 3D analizlerinde Materyal özelliklerine ait ekran görüntüleri ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı (mesh) Şekil 4.34 ve 4.35'de gösterilmiştir. Taban kısmına sıkı kum olarak yerleştirilen alt temel dolgusu üzerine yerleştirilen kil üzerine 35 kPa'a kadar yükleme yapılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17 Geri dolgusu %10 atk lastik + %90 kil olan durum için zemin ve duvara ait parametreler

Betona ait özellikler	E (kN/m²)	17x10⁶
	γ (kN/m³)	22
	ν	0,15
Kil zemine ait özellikler	c (kN/m²)	27
	ϕ (°)	11,3

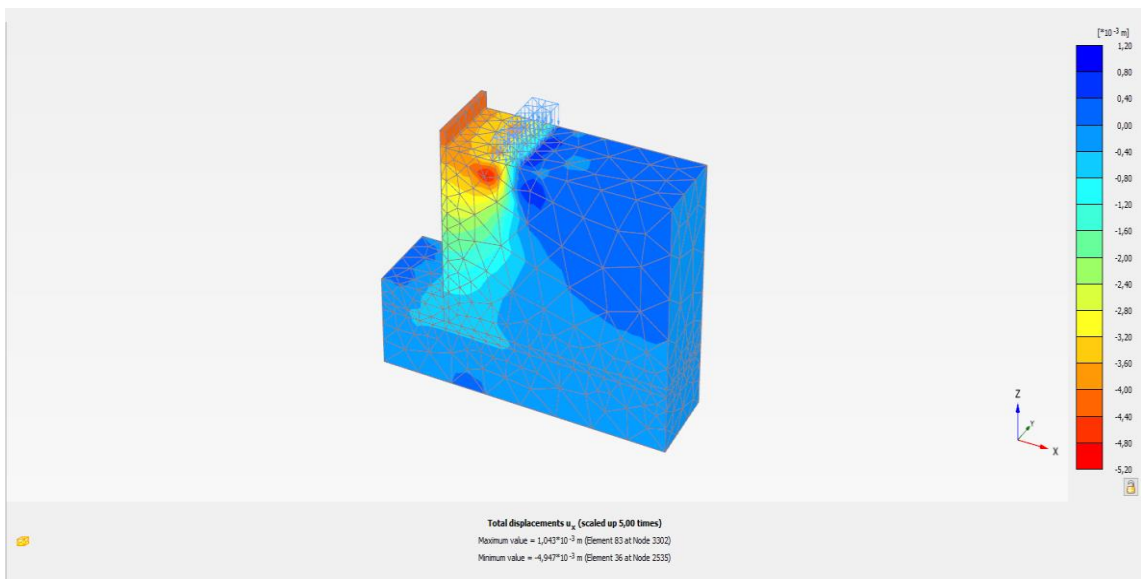


Şekil 4.34 Geri dolgusu %10 ALK + %90 kil olan durum için modelleme ve materyal özellikleri

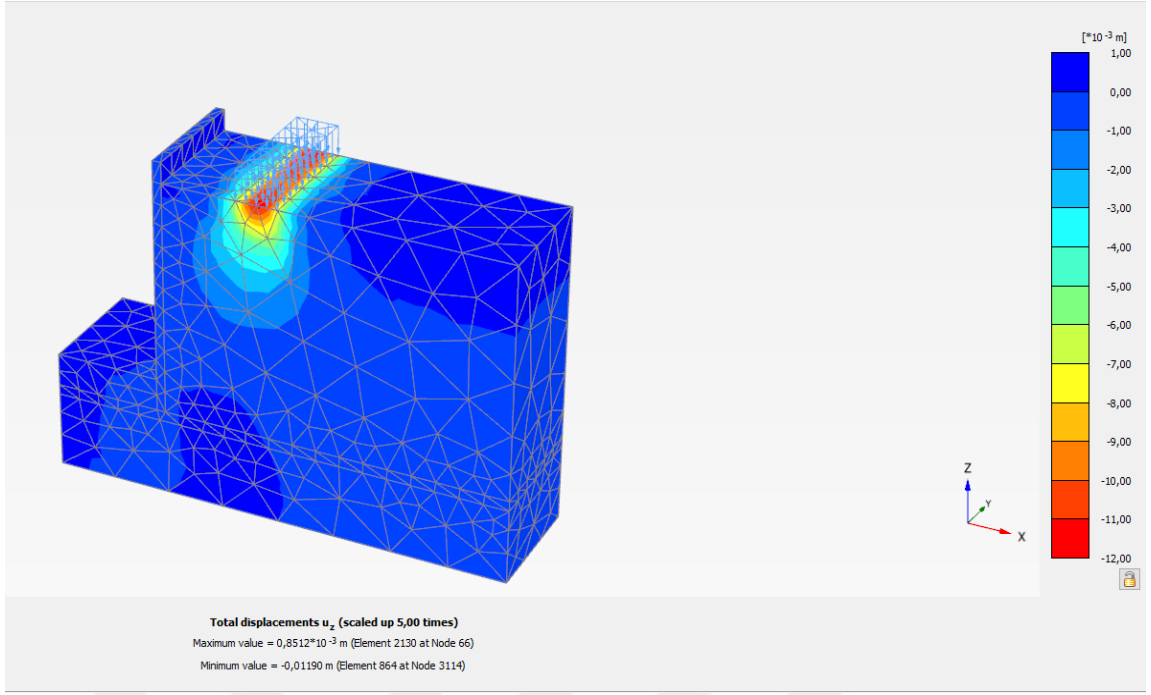


Şekil 4.35 Geri dolgusu %10 ALK + %90 kil olan durum için sonlu elemanlar ağı

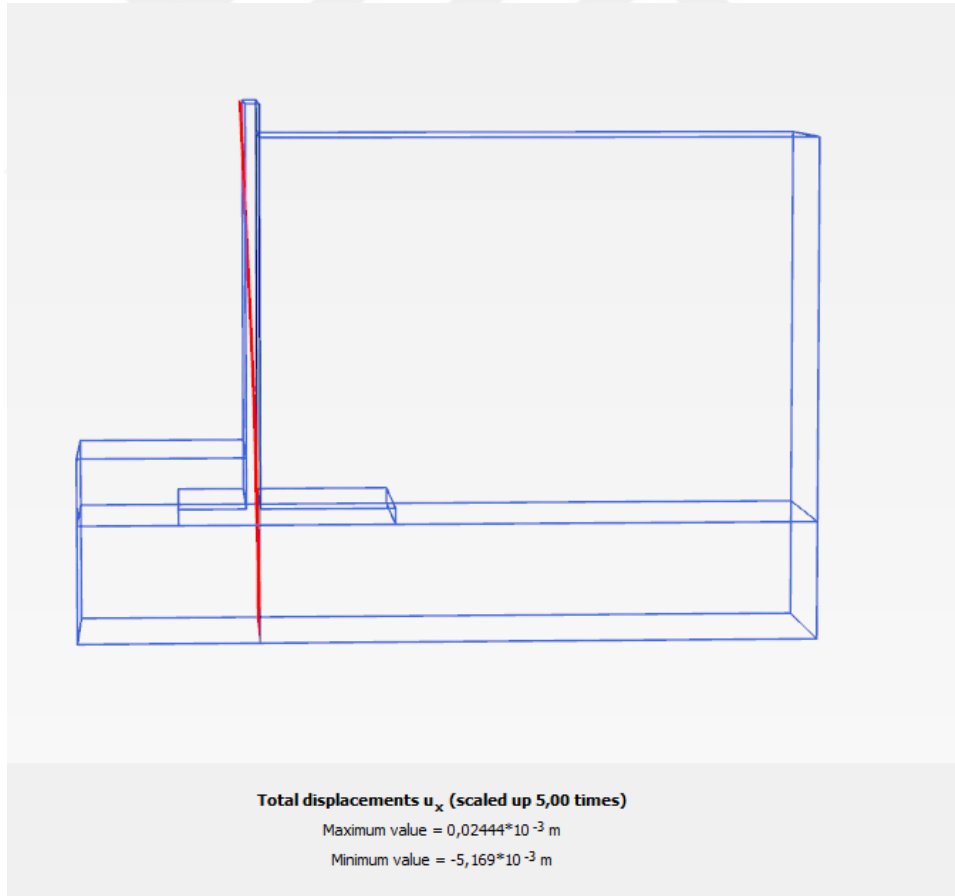
35 kPa'lık gerilme etkisi altında gerçekleştirilen analizin sonucunda elde edilen yatay deplasman ve düşey deformasyonlar Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmiştir. Yükleme deneylerinde maksimum 5.07 mm yatay deformasyon elde edilirken PLAXIS ortamında bu değer 5.17 mm olarak elde edilmiştir. Buradaki değerler birbirini desteklemektedir. Ayrıca yükleme deneyinde 14,3 mm, PLAXIS ortamında ise 11,9 mm düşey deformasyon değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.36 Geri dolgusu %10 ALK + %90 kil olan durum için yatay deplasmanların değişimi



Şekil 4.37. Geri dolgusu %10 ALK + %90 kil olan durum için düşey deformasyonların değişimi



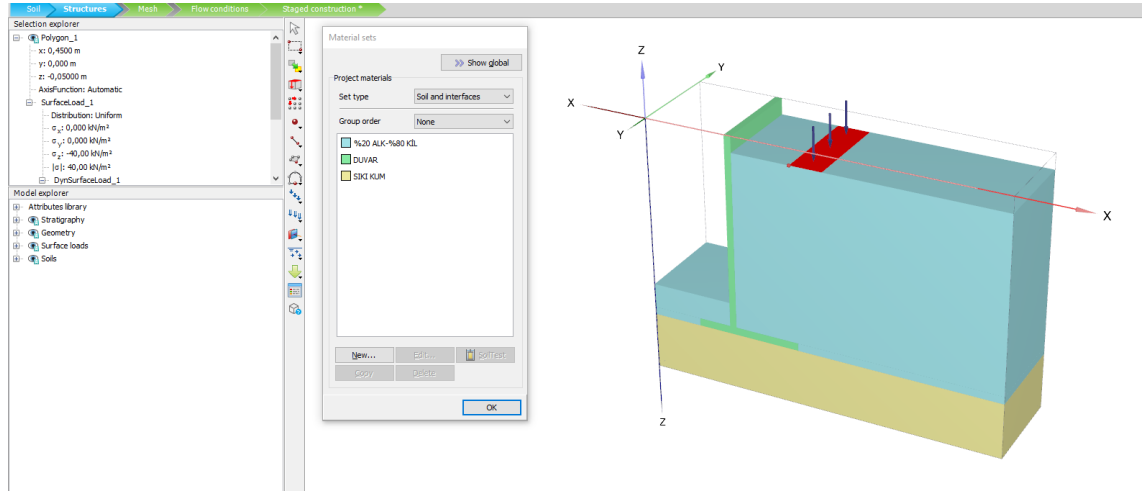
Şekil 4.38. Geri dolgusu %10 ALK+%90 kil olan Duvarın yanıl zemin basıncı altındaki yatay deplasmanı için kesit görünümü

4.3.3. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri

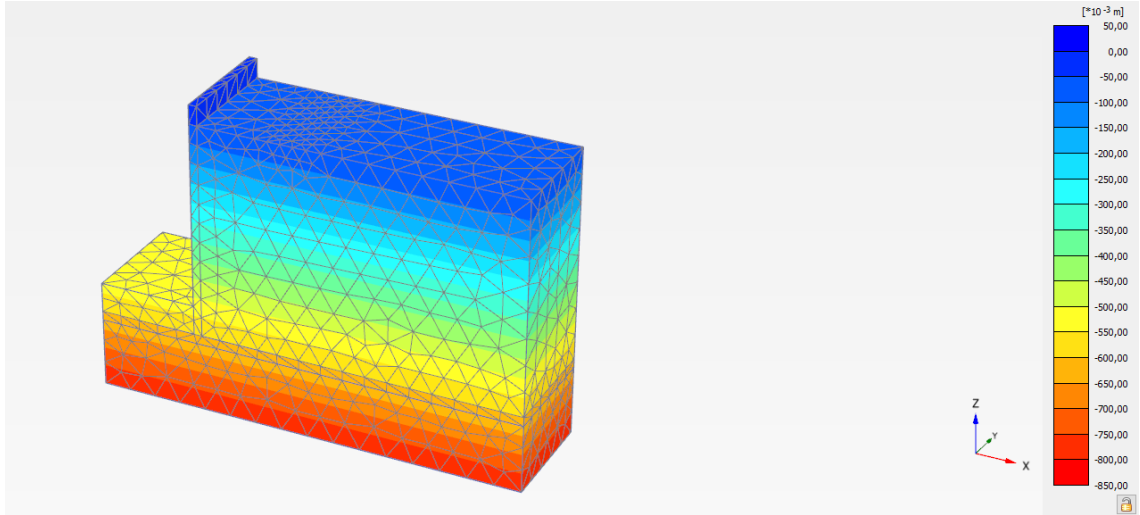
Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan durumda Plaxis 3D programında kullanılan zemine ve duvara ait parametreler Çizelge 5'te verilmiştir. Geri dolgu malzemesi %20 ALK + %80 kil olan istinat duvarı arkasındaki yükleme deneyi için yapılan Plaxis 3D analizlerinde Materyal özelliklerine ait ekran görüntüleri ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı (mesh) Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Taban kısmına sıkı kum olarak yerleştirilen alt temel dolgusu üzerine yerleştirilen kil üzerine 40 kPa'a kadar yükleme yapılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.18).

Çizelge 4.18. Geri dolgusu %20 atık lastik + %80 kil olan durum için zemin ve duvara ait parametreler

Betona ait özellikler	E (kN/m²)	17x10⁶
	γ (kN/m³)	22
	ν	0,15
Kil zemine ait özellikler	c (kN/m²)	20,88
	φ (°)	18,26

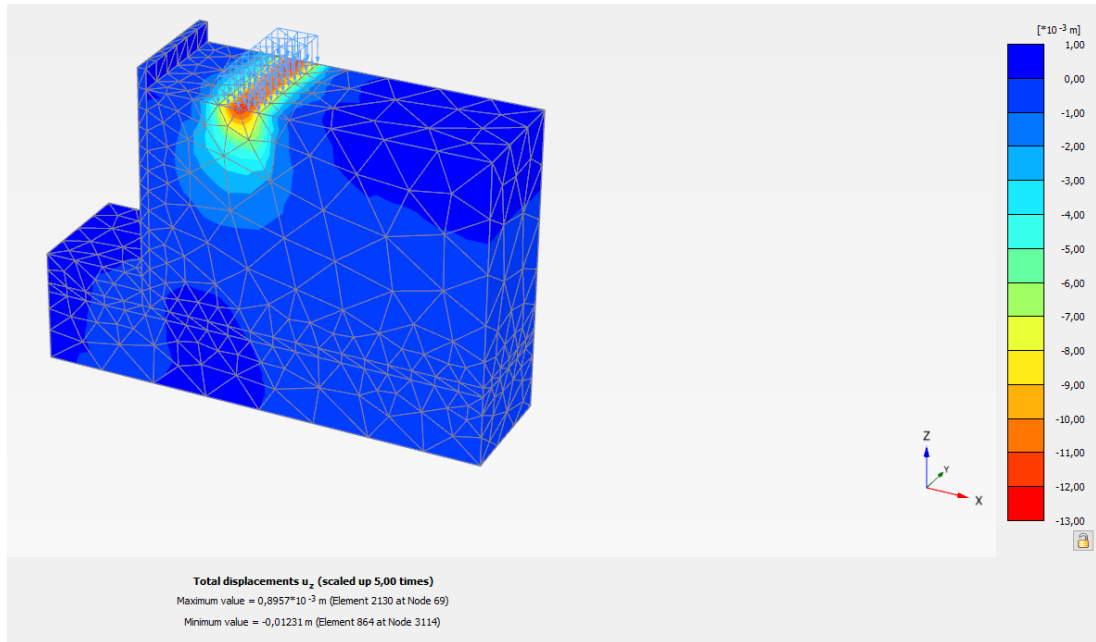


Şekil 4.39. Geri dolgusu %20 ALK+ %80 kil olan durum için modelleme ve materyal özellikleri

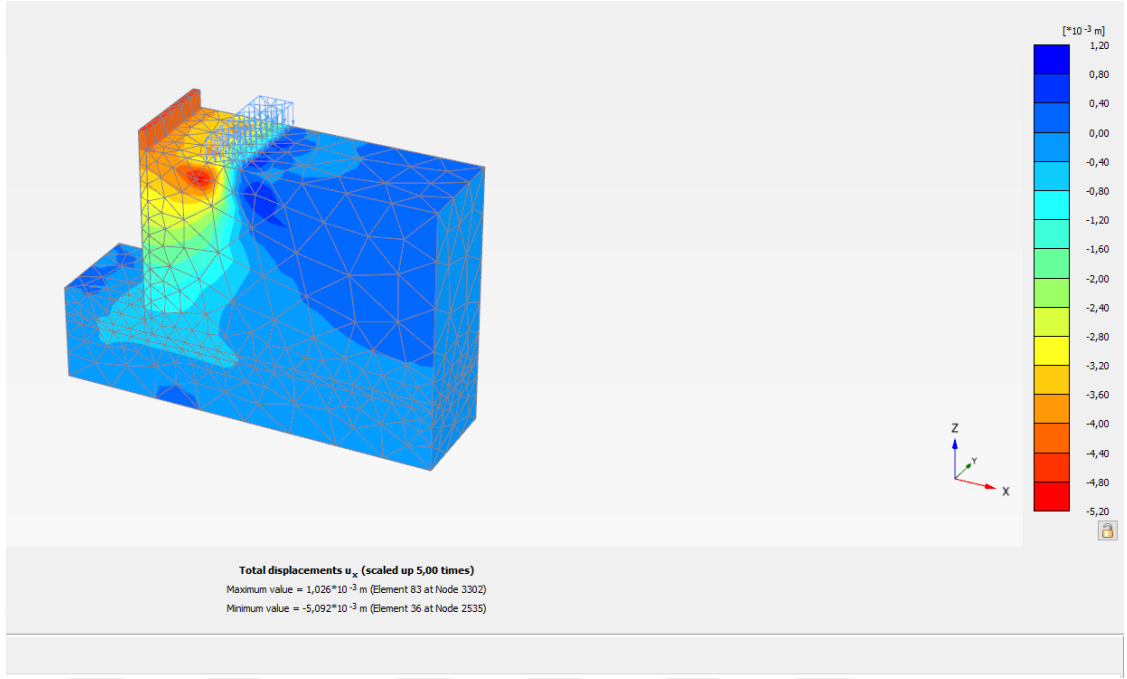


Şekil 4.40. Geri dolgusu %20 ALK + %80 kil olan durum için sonlu elemanlar ağı

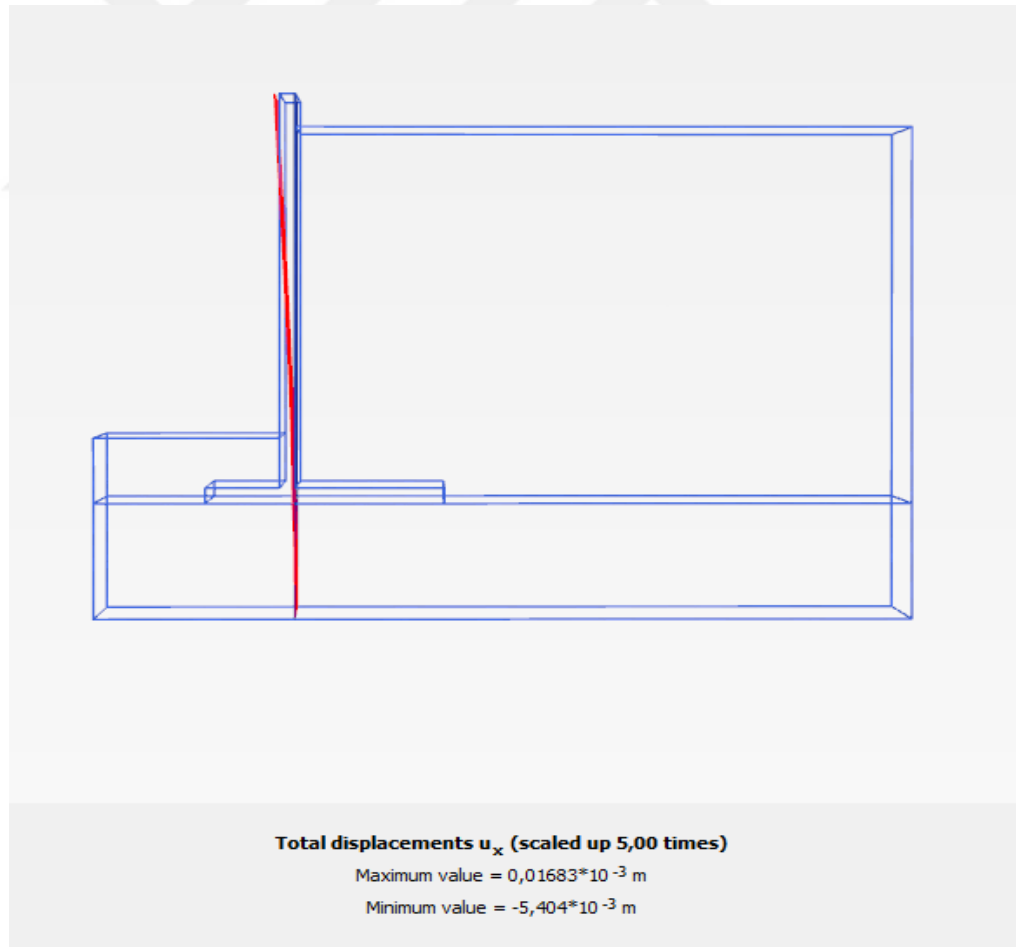
40 kPa'lık gerilme etkisi altında gerçekleştirilen analizin sonucunda elde edilen yatay deplasman ve düşey deformasyonlar Şekil 4.41, Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de verilmiştir. Yükleme deneylerinde 5,43mm, PLAXIS analizinde ise 5,4 mm maksimum yatay deformasyon değerleri elde edilmiştir. Burada zemine ait parametreler ve duvara ait parametreler yaklaşık doğru tespit edildiği için bilgisayar ve gerçek ortamda analiz sonuçları yakın çıkmıştır. Yükleme deneylerinde 14,3 mm, PLAXIS ortamında ise 12,3 mm maksimum düşey deformasyon değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.41. Geri dolgusu %20 ALK + %80 kil olan durum için düşey deformasyonların değişimi



Şekil 4.42. Geri dolgusu %20 ALK + %80 kil olan durum için yatay deplasmanların değişimi



Şekil 4.43. Geri dolgusu %20 ALK+%80 kil olan Duvarın yanal zemin basıncı altındaki yatay deplasmanı için kesit görünümü

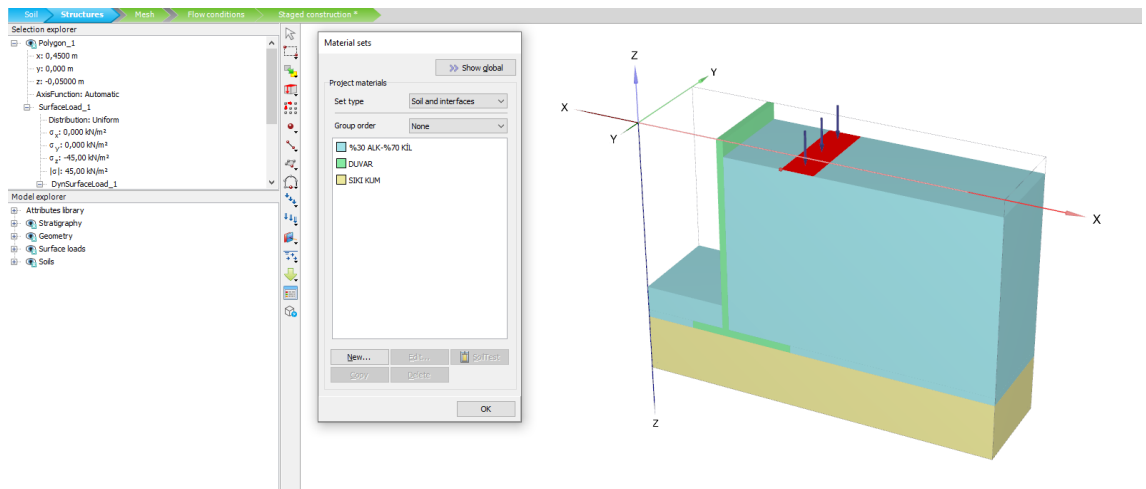
4.3.4. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan durumda Plaxis 3D analizleri

Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan durumda Plaxis 3D programında kullanılan zemine ve duvara ait parametreler Çizelge 4.19'da verilmiştir. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil olan istinat duvarı arkasındaki yükleme deneyi için yapılan Plaxis 3D analizlerinde Materyal özelliklerine ait ekran görüntüleri ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı (mesh) Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'de gösterilmiştir. Taban kısmına sıkı kum olarak yerleştirilen alt temel dolgusu üzerine yerleştirilen kil üzerine 45 kPa'a kadar yükleme yapılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir.

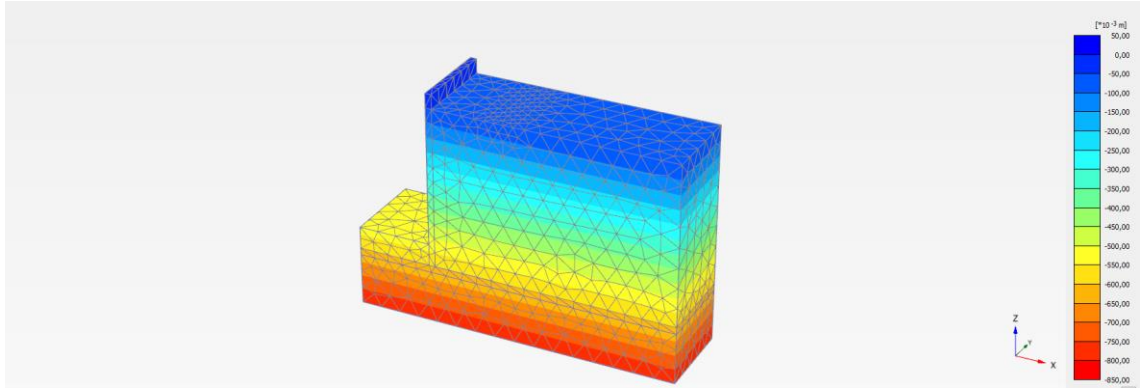
Bu yüklemede 5mm deformasyona 40 kPa sürşarj yükü seviyesinde ulaşılmıştır. Bu yük altında dolgudan dolayı duvar deformasyonu bir miktar azalmıştır. Daha yüksek yük seviyelerinde deformasyonlarda önemli artışlar olacağı yüklemeye 45 kPa seviyesinde son verilmiştir.

Çizelge 4.19 . Geri dolgusu %30 atık lastik + %70 kil olan durum için zemin ve duvara ait parametreler

Betona ait özellikler	E (kN/m²)	17x10⁶
	γ (kN/m³)	22
	ν	0,15
Kil zemine ait özellikler	c (kN/m²)	12,74
	φ (°)	27,7



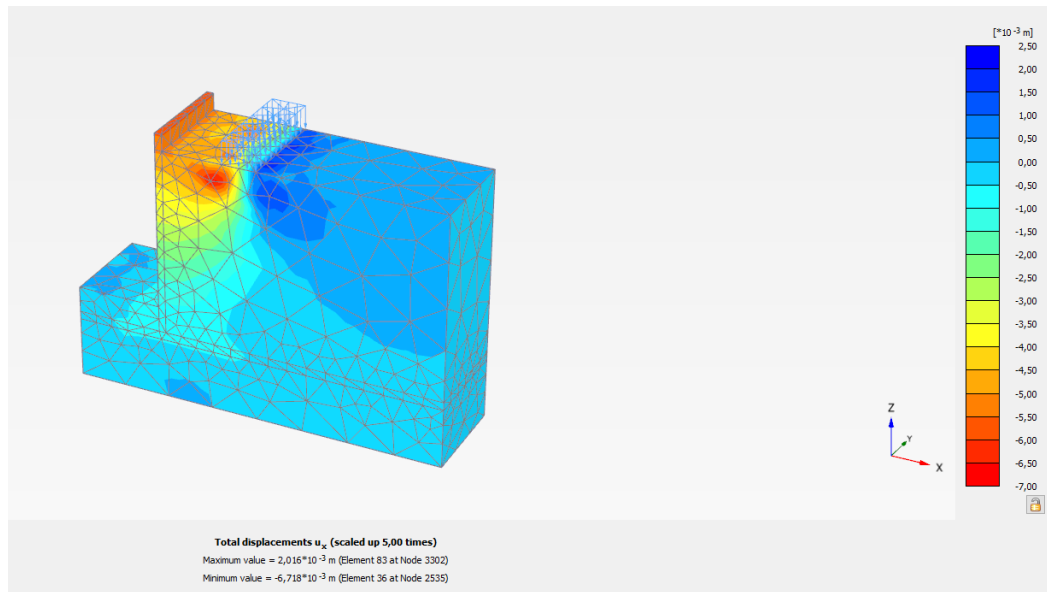
Şekil 4.44. Geri dolgusu %30 ALK- %70 kil olan durum için modelleme ve materyal özellikleri



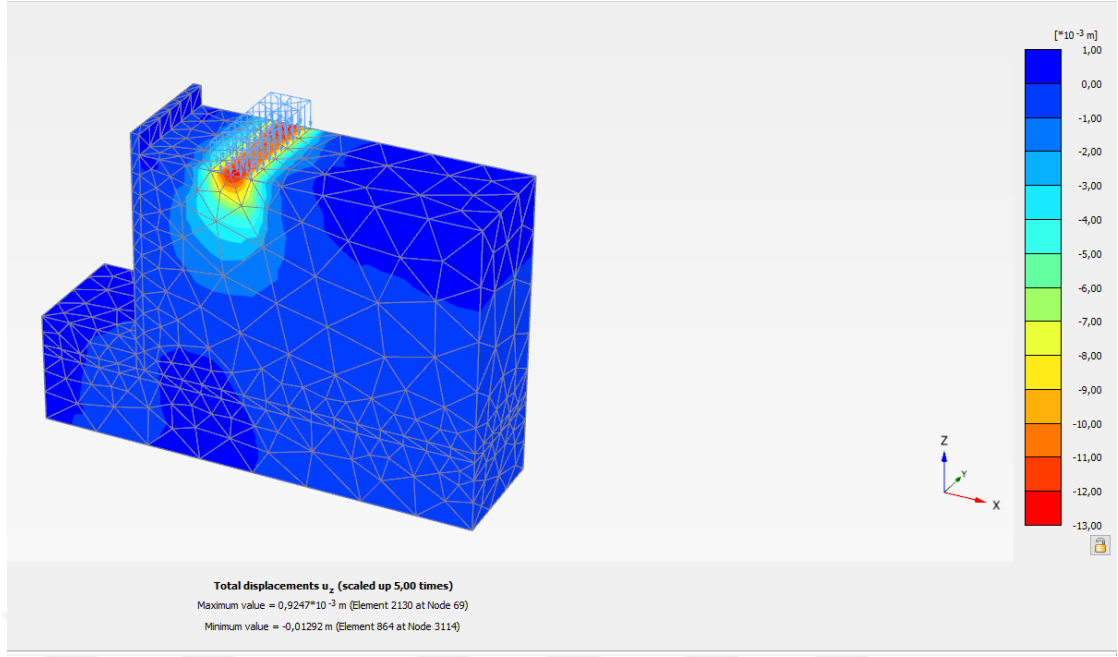
Şekil 4.45. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil olan durum için sonlu elemanlar ağı

45 kPa'lık gerilme etkisi altında gerçekleştirilen analizin sonucunda elde edilen yatay deplasman ve düşey deformasyonlar Şekil 4.46, Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de verilmiştir. Yükleme deneyinde 5,69 mm, PLAXIS ortamında ise 5,6 mm maksimum yatay deformasyon değeri elde edilmiştir. Bilgisayar ve gerçek ortamındaki değerler birbirine yakın elde edilmiştir. Tank içerisinde yapılan deneylerde 12,2 mm, Plaxis analizinde ise 12,92 mm maksimum düşey deformasyon değeri elde edilmiştir.

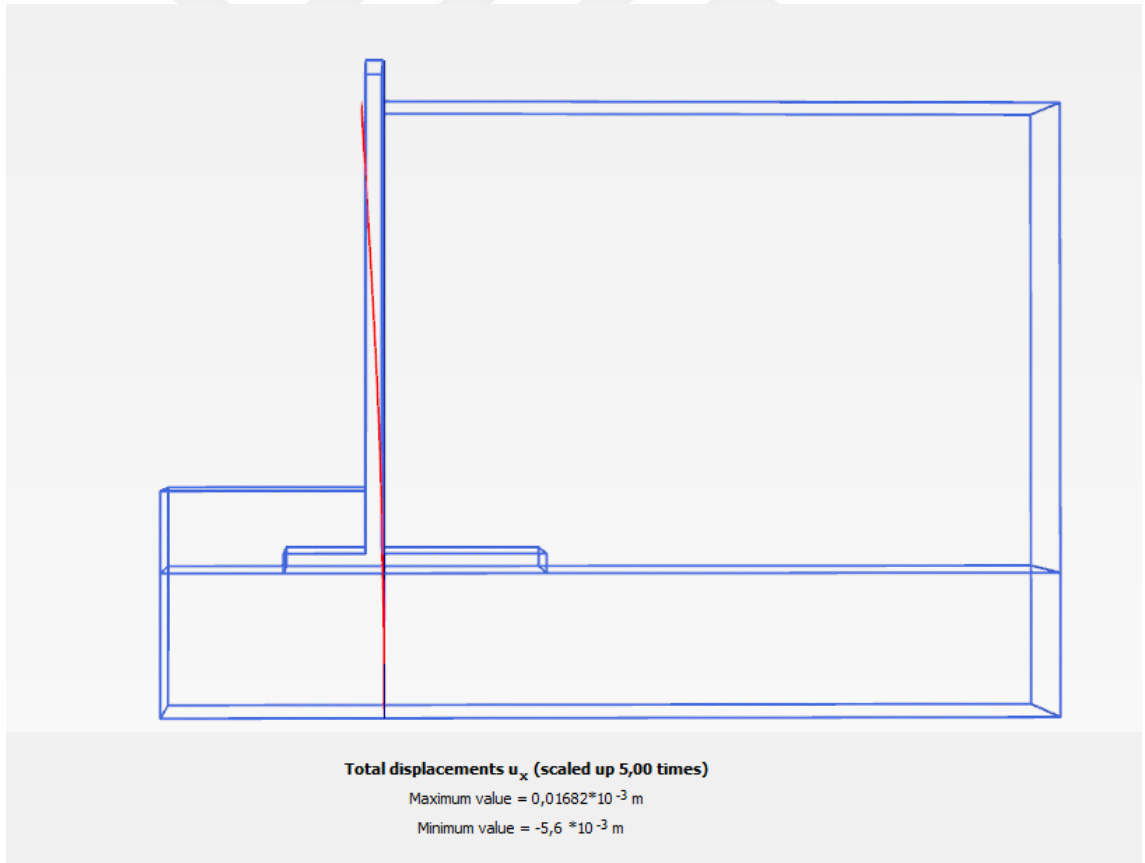
Plaxis ile yapılan tüm analizler ele alındığında yükleme deneylerinde elde edilen sonuçlara paralel sonuçlar elde edildiği görülmektedir. ALK oranı arttıkça zemin taşıma gücünde iyileşmeler görülmüştür. Yatay ve düşey deformasyon değerleri için en uygun değerler geri dolgusu içerisinde %20-30ALK katkısı kullanılan durumda elde edilmiştir.



Şekil 4.46. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil olan durum için yatay deplasmanların değişimi



Şekil 4.47. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil kil olan durum için düşey deformasyonların değişimi



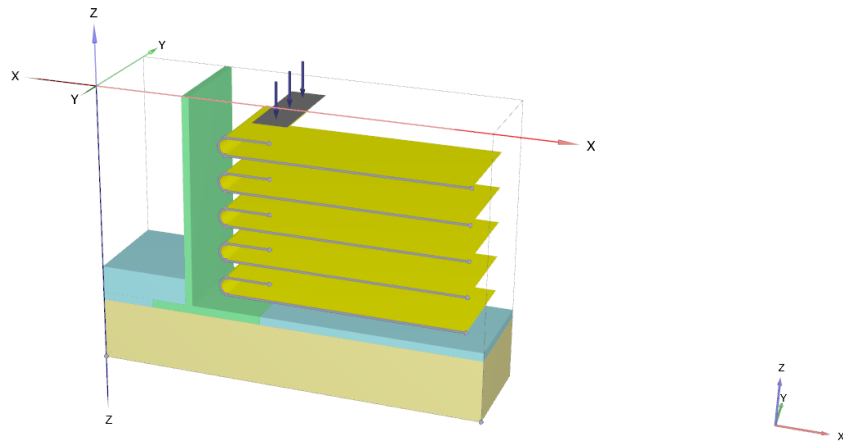
Şekil 4.48 Geri dolgusu %30 ALK+%70 kil olan Duvarın yanal zemin basıncı altındaki yatay deplasmanı için kesit görünümü

4.3.5. Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda Plaxis 3D analizleri

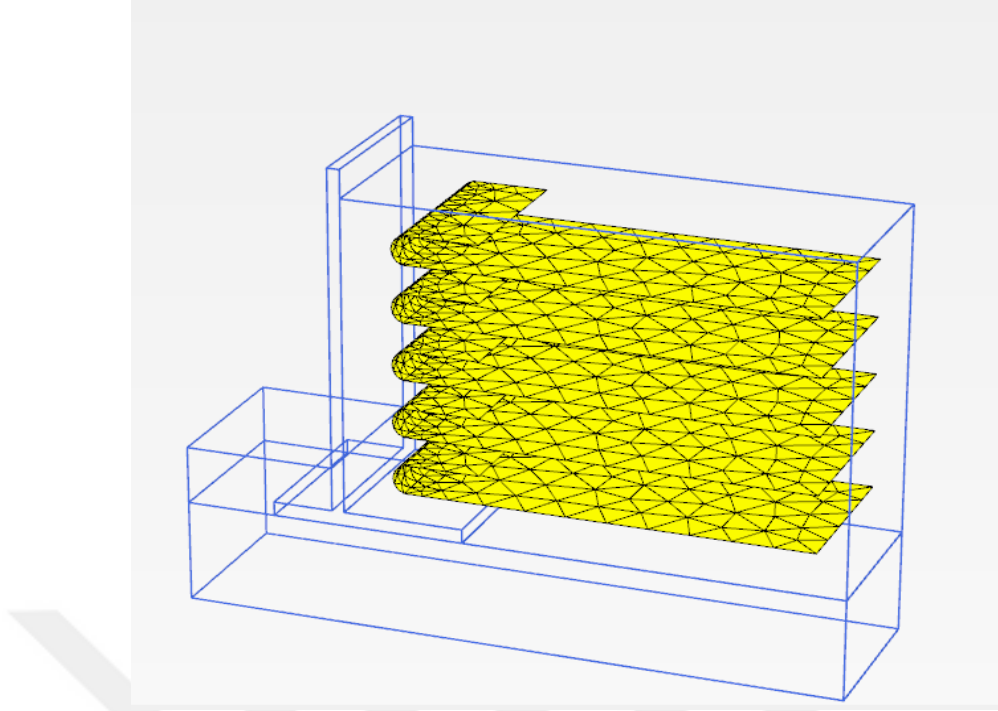
Geri dolgu malzemesi %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda Plaxis 3D programında kullanılan zemin, geotekstil ve duvara ait parametreler Çizelge 7’de verilmiştir. İstinat duvarı arkasındaki yükleme deneyi için yapılan Plaxis 3D analizlerinde Materyal özelliklerine ait ekran görüntüleri ve oluşturulan sonlu elemanlar ağı (mesh) Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Taban kısmına sıkı kum olarak yerleştirilen alt temel dolgusu üzerine yerleştirilen kil üzerine 55 kPa’a kadar yükleme yapılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.20).

Çizelge 4.20 Geri dolgusu %30 atık lastik + %70 kil + geotekstil donatı olan durum için zemin, geotekstil ve duvara ait parametreler

Betona ait özellikler	E (kN/m²)	17x10⁶
	γ (kN/m³)	22
	ν	0,15
Zemine ait parameteler	c (kN/m²)	12,74
	φ (°)	27,7
Geotekstile ait özellikler	EA (kN/m²)	10

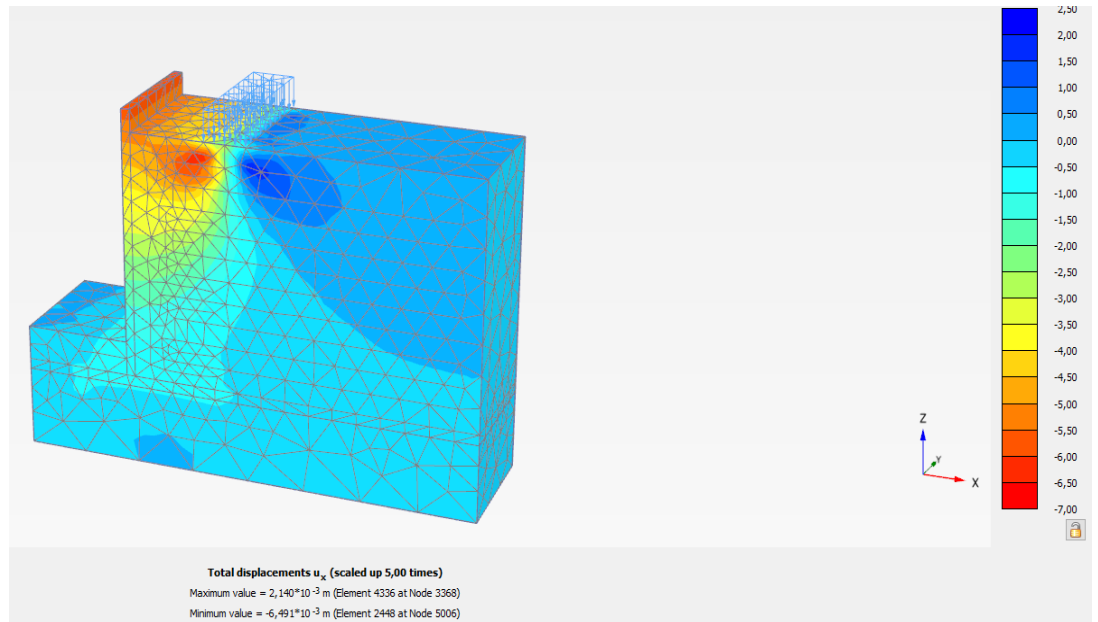


Şekil 4.49. Geri dolgusu %30 ALK- %70 kil + geotekstil donatı kil olan durum için modelleme ve materyal özellikleri

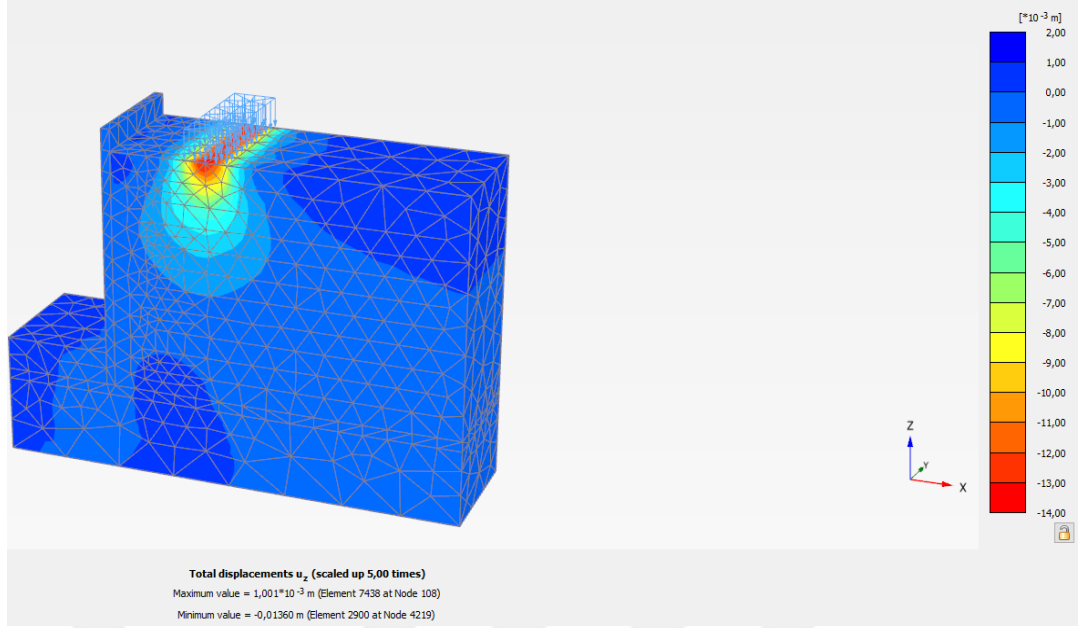


Şekil 4.50. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda geotekstiller için sonlu elemanlar ağı

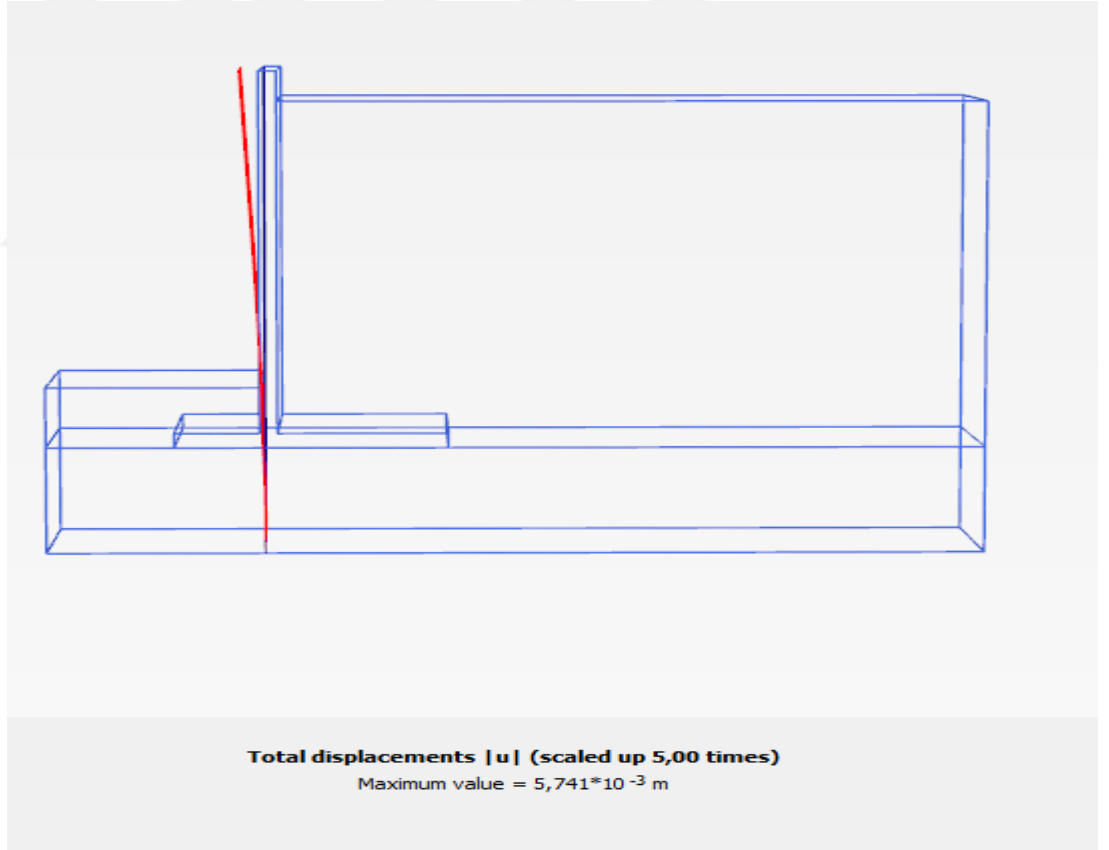
50 kPa'lık gerilme etkisi altında gerçekleştirilen analizin sonucunda elde edilen yatay deplasman ve düşey deformasyonlar Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te verilmiştir. Ayrıca aynı analize göre geotekstillerde oluşacak deformasyonlar Şekil 4.54'te verilmiştir. Yükleme sonucunda yapılan deneylerde elde edilen deformasyon değerleri ile Plaxis 3D'den elde edilen analiz sonuçları uyumlu olmuştur (Çizelge 4.21).



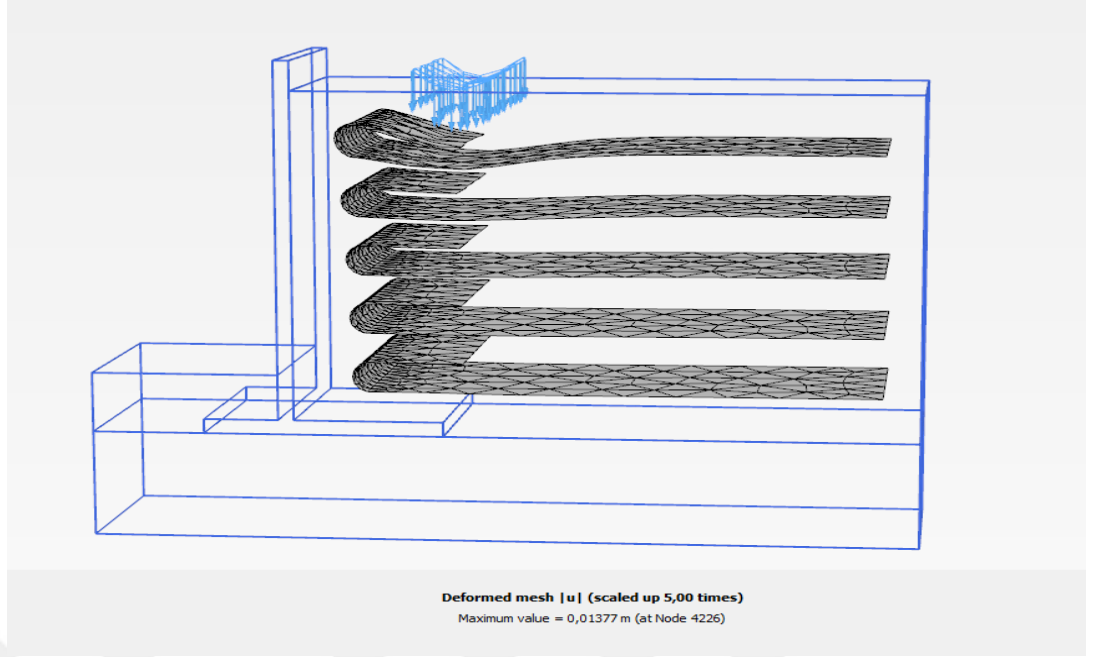
Şekil 4.51. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda yatay deformasyon



Şekil 4.52. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda düşey deformasyon



Şekil 4.53. Geri dolgusu %30 ALK+%70 kil + Geotekstil donatı olan Duvarın yanal zemin basıncı altındaki yatay deplasmanı için kesit görünümü



Şekil 4.54. Geri dolgusu %30 ALK + %70 kil + geotekstil donatı olan durumda geotekstillerin deformasyonu

Çizelge 4.21. Yükleme deneyleri ile PLAXIS analizlerinin kıyaslanması

Geri dolgu malzemesi	Max Gerilme (kPa)	Yatay deformasyon (deney, mm)	Yatay deformasyon (Plaxis 3D, mm)	Fark (%)
Saf kil	25	5,1	5,64	10,5
%10 ALK + %90 kil	35	5,07	5,17	2
%20 ALK + %80 kil	40	5,43	5,4	1
%30 ALK + %70 kil	45	5,69	5,6	2
%30 ALK + %70 kil + geotekstil	50	5,37	5,74	7

Çizelge 4.21’de tank içerisinde yapılan yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar ile Plaxis analiz sonuçları verilmiştir. Yükleme deneylerinde elde edilen değerler ile analiz sonuçları arasında benzerlik gözlenmiştir.

Yapılan analiz ve yüklemelere göre istinat duvarı arkası geri dolgu malzemesinde ALK oranı %20 miktarına ulaşana kadar zeminin taşıma kapasitesinde artış gözlenmekte ve bunun sonucunda yatay deformasyonlar azalmaktadır. Geri dolgu malzemesinin %30 ALK içeren killi malzeme olması durumunda ise %20 ALK içeren killi zemin dolgusu için elde edilen yatay deformasyona yakın değer elde edilmiştir. Yani ALK’nin %20-30 miktarından sonraki artan yüzdelerinde duvarın arkasındaki zeminin taşıma kapasitesi ve yatay deformasyonların azalması ile ilgili katkısının önemi olamamaktadır.

Plaxis ortamında yapılan analizlerle laboratuvar ortamında yapılan yüklemelerde elde edilen sonuçlar birbirine yakın elde edilmiştir. Gerek laboratuvar ortamında gerekse

bilgisayar analizinde optimum ALK oranının %20-30 arasında olduğu belirlenmiştir. Bu yüzdelerin üzerinde kullanılan atık lastiğin davranış üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında istinat duvarları arkasında geri dolgu malzemesi olarak atık lastik kırıntılarının (ALK) kullanımı ve sonrasında atık lastik kırıntıları + geotekstil kullanımının laboratuvar ölçekli model deneylerle araştırılması için deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında Konya ili sınırları içerisinde yer alan Konya Teknik Üniversitesi Sanayi Kampüs Alanı'ndan temin edilen kil zemin kullanılmıştır. Kil zemin içerisine yine sanayi de Özel bir işletmeden elde edilen granüler atık lastik kırıntıları farklı yüzdelerde (%0-10-20-30) karıştırılmış ve geri dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan kil zeminin likit limit değeri $w_L = \%33$ ve plastisite indisi değeri $PI = \%11$ olarak belirlenmiştir. Harward mini proktor deneyi ile her karışım için yapılmıştır. Kil zemin içerisine %0-10-20-30 ALK ilave edilerek hazırlanan karışımların optimum su muhtevaları sırasıyla %16.2, 15.9, 15.2 ve 14.1 olarak elde edilmiştir. karışımlar içerisindeki atık lastik miktarı arttıkça su emme kapasitesi düşeceğinden optimum su muhtevası azalmıştır. Kesme kutusu deneyleri de her karışım için ayrı ayrı yapılmış olup, ALK miktarının karışımda %0-10-20-30 olduğu durumlar için kohezyon değerleri sırasıyla $c = 66.88, 27.0, 20.88$ ve 12.74 kPa elde edilirken, içsel sürtünme açısı değerleri sırasıyla $3^\circ, 11.3^\circ, 18.26^\circ$ ve 27.7° elde edilmiştir. Killi zemin içerisindeki ALK yüzdesi arttıkça zemin granüler özellik kazanmakta ve kum zemin özelliklerine yaklaşmaktadır. ALK miktarındaki artışla kohezyon değerleri azalırken içsel sürtünme açısı değerleri artmaktadır.

Laboratuvar ölçekli model deneylerin yapılması için üretilen istinat duvarının oluşturulmasında arazide daha önce imalatı yapılmış bir istinat duvarı dikkate alınmıştır. Gerçek boyutlu betonarme istinat duvarının yüksekliği 1/10 sabit ölçek kabul edilerek ölçeklendirme bağıntılarıyla laboratuvar ortamına göre küçültülmüş ve laboratuvar ortamında betonarme olarak imal edilmiştir. Üretilen istinat duvarının beton özelliklerini belirleyebilmek için küp numunelerin Serbest basınç deneyleri yapılmış ve ortalama elastisite modülü 17000 mPa olarak elde edilmiştir. Plaxis analizlerinde betonun elastisite modülü $17 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ olarak dikkate alınmıştır.

Laboratuvar ölçekli yapılan yükleme deneylerinde istinat duvarı arkasında geri dolgu malzemesi üzerine şerit yayılı yük olarak yükleme yapılmıştır. Her karışım için

istinat duvarının tepe noktasında yaklaşık 5 mm yatay deplasman oluşana kadar yükleme yapılmıştır. Sırasıyla %0, %10ALK, %20ALK, %30ALK ve %30ALK + geotekstil donatı karışımları için uygulanan maksimum gerilmeler sırasıyla 25kPa, 35kPa, 40kPa, 40kPa ve 50kPa olmuştur. Bu gerilmelere karşılık ölçülen yatay deformasyonlar ise sırasıyla: 5.1mm, 5.07mm, 5.43mm, 5.4mm ve 5.37mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre kil zemin içerisinde kullanılacak optimum ALK miktarının %20-30 aralığında olduğu bulunmuştur. %30ALK miktarından sonraki karışım oranlarında geri dolgu malzemesinin taşıma gücü kapasitesi artmamış ve yatay deformasyonlar artış göstermiştir. %20 ALK ilaveli geri dolgu malzemesi durumu için saf kile göre %60 civarında daha iyi taşıma kapasitesi sağlanmıştır. %30 ALK + geotekstil donatı ilaveli geri dolgu malzemesi durumunda sadece %30 ALK ilaveli dolgu malzemeli duruma göre taşıma gücü kapasitesinde %25 artış elde edilmiştir. Geotekstil tabakalar zeminde oluşan çekme gerilmelerini karşılamış ve yatay deformasyonları azaltmıştır. Yani içeriğinde ALK bulunan bir geri dolgu malzemesi içerisinde geotekstil donatı tabakaları kullanılarak daha rijit bir geri dolgu elde edilebilecektir.

Ölçeklendirilmiş istinat duvarı ve farklı ALK içerikli geri dolgu malzemeleri kullanılarak tüm modeller için Plaxis 3D programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli yapılan model yükleme deneylerinde ulaşılan maksimum gerilmeler kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizlerde sırasıyla %0-10-20-30 ALK ve %30 ALK + geotekstil donatılı durum için maksimum gerilmeler sırasıyla: 25kPa, 35kPa, 40kPa, 40kPa ve 50kPa olarak girilmiştir. Bunlara karşılık maksimum deformasyonlar sırasıyla: 5.64mm, 5.17mm, 5.4mm, 5.6mm ve 574mm olarak elde edilmiştir. Plaxis analiz sonuçlarında model yükleme deneylerinde elde edilen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Plaxis ile yapılan analizlere göre de geri dolgu malzemesi için en iyi performans %20-30 ALK içeriği için elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde elde edilen çalışmalarla da örtüşmektedir. Plaxis analizlerine göre de %20 ALK katkısı için zeminin taşıma kapasitesi geri dolgu malzemesinin saf kil olması durumundakine göre yaklaşık %60 artmıştır. Benzer şekilde %30 ALK katkılı geri dolgu malzemesinin içerisine geotekstil donatı tabakalarının ilave edilmesiyle, geotekstil zemindeki çekme gerilmelerini aldığından zeminin taşıma kapasitesi %25 artmıştır. Geri dolgu malzemesi farklı karışımlar için Plaxis ile yapılan analizlerde elde edilen yatay deformasyon ve taşıma kapasitesi değerleri ölçeklendirme ilkelerine bağlı kalarak yapılan laboratuvar deneylerinde elde edilen değerlerle önemli ölçüde uygunluk göstermiştir.

Ancak bu şekilde sonuçların elde edilebilmesi için ölçeklendirme kurallarının dikkate alınarak tasarımların yapılmasının önemli olduğu unutulmamalıdır.

Uygulamalarda özellikle geri dolgu malzemesi olarak kil yoğunluklu malzemelerin kullanılması durumu ile karşı karşıya kalındığında atık lastiklerin kullanımı ile duvar arkası kayma direncinin artırılabilceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumda duvar arkasında geçirimsizlik artırılarak zemin arkasında oluşan boşluk suyu basıncı azaltılabilmektedir. Laboratuvar deneylerinden ve Plaxis analizlerinden optimum atık lastik yüzdesinin %20-30 aralığında olduğu saptanmıştır.

5.2 Öneriler

Literatürde istinat duvarı ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle ölçeklendirme ilkelerine uyulmadığı belirlenmiştir. Bu ilkelere uyulmadan yapılan çalışmaların arazide ki gerçek uygulamaları tam olarak temsil edemeyeceği düşünülmektedir. Ancak dolgu malzemeleri için yapılan tasarımların kendi aralarındaki yeterliliğinin kıyaslanması için bu tip çalışmalar bir fikir verebilecektir. Bundan sonraki çalışmalarda ölçeklendirme ilkelerine bağlı kalarak istinat duvarlarının sarsma tablasıyla sarsılmasıyla dinamik etkiler altındaki davranışı incelenebilir. Yine aynı araştırma kapsamında geri dolgu malzemesi olarak başka atık malzemeler kullanılabilir. Geosentetik donatılarla bu araştırmalar genişletilebilir.

Yapılan çalışmada betonarme duvar sınıfı C16 olarak tasarlanmıştır. Ancak günümüzde beton sınıfları minimum C25 olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla yapılacak yeni çalışmalarda duvarın beton sınıfı C25 olarak yapılabilir.

Yapılan çalışmalarda genellikle tek tip istinat duvarları incelenmiştir. Ölçeklendirme ilkelerine bakılarak daha farklı istinat duvarı tipleri için çalışmalar genişletilebilir. Ölçeklendirme ilkelerinin hesap parametrelerinden yola çıkılarak çelik, ahşap, plastik gibi malzemeler elastisite modülü gibi parametrelere göre ölçeklendirilerek deneyleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Arefnia A., Dehghanbanadaki A., Kassim K.A. 2021, Sustainable Implementation of Recycled Tire-Derived Aggregate as a Lightweight Backfill for Retaining Walls, *Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia*.
- Aysu Ş., 2020, Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerde Cam Lifi Katkısının Zeminin Mukavemet, Permeabilite ve Konsolidasyon Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans, *Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya*.
- Bilgin H., 2006, İstinat Duvarlarının Dinamik ve Statik Yükler Altındaki Davranışları, Yüksek Lisans, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*.
- Can S., 2017, Geosentetik Donatılı İstinat Duvarlarının Nümerik Analizi ve Tasarım Aşamaları, Yüksek Lisans, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa*.
- Çolak, M. (2007), Dayanma Duvarlarının Oturmalarının Kohezyonsuz Zeminlerde SPT ve CPT sonuçlarından Belirlenmesi, Yüksek Lisans, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*.
- Demiröz, A. (2008), Geogrid Donatılı Kum Üzerine Oturan Sürekli Temellerde Taşıma Gücünü Etkileyen Tasarım Faktörlerinin Deneysel Olarak Araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- ÇŞB, 2006, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara*.
- Davarcı B., Örnek M., Türedi Y., 2014, Geogrid Donatılı Gevşek Kum Zemine Oturan Çok Kenarlı Yüzeysel Temellerin Deneysel Analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*.
- Epsiseli, S. E., 1996, İstinat duvarlarının bilgisayar yardımıyla projelendirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*.
- Erbil, S. (2009), Geosentetik Ürünlerin Türkiye'deki Uygulamaları, Gelişme Potansiyeli, Sağlanan Faydalar ve Mevcut Sorunlar ile Ekonomikliği Üzerine Genel Bir İnceleme, Yüksek Lisans, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- Erginer M. ve ark., (2019), Lastik Atık Katkılı Zeminlerde CBR Değerinin Araştırılması, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Osmaniye*.
- Güler E., 2006 Geosentetik Donatılı İstinat Duvarı bir şartname taslağı, *İkinci Uluslararası Geosentetikler Konferansı, İstanbul*.
- John, N.W.M. (1987), Geotextiles (First Edition), *Blackie and Son Ltd, Glasgow*.
- Kahyaoğlu M.R., Şahin M., 2017, Geotekstik Donatılı İstinat Duvarı Deplasman Davranışının Arazi Model Çalışmaları ile Belirlenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Düzce*.

Keskin S., Laman M., 2012, Atık Lastik-Kum Karışımlarının Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleriyle İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 27-35, Adana.

LASDER, www.lasder.org.tr

Leblebici T., 2021, Suyu Doygun Zeminlerde İnşa Edilen İstinat Duvarların Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışının Araştırılması, Yüksek Lisans, *Eskişehir Teknik Üniversitesi*, Eskişehir.

Livaoğlu, P. (2016), İller Bankası Uygulamalarında Geosentetikler, Uzmanlık Tezi, *İlbank AŞ*.

McCarthy, D.F.(2007), Essential of Soil Mechanics and Foundations:basic Geotechnics Prentice Hall, Seventh Edition, New Jersey.

Özaydın A., 2010, Arkasında Geotekstil ile Güçlendirilmiş Donatılı Kum Zemin Bulunan İstinat Duvarı Davranışının İncelenmesi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş.

Özbey K., 2003, İstinat Duvarı Analizleri, Yüksek Lisans, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Reddy S.B., Krishna A.M. 2021, Sand-Scrap Tyre Chip Mixtures for Improving the Dynamic Behaviour of Retaining Walls, *International Journal of Geotechnical Engineering* 1093-1105.

Sawwaf, M.E., 2007, Behavior of Strip Footing on Geogrid-Reinforced Sand over a Soft Clay Slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (1):50-60.

Shukla, S.K., ve Yin, J.H., 2016, Fundamentals of geosynthetic engineering, London.

Sungur, N. (2015), Jeogrid Donatılı Zeminlerde Taşıma Gücü Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması, Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Tan J., Zhou L, Ding G, 2021, Shaking Table Tests on Calcareous Sand Retaining Walls Reinforced by Concrete Canvas Geocell, *Arabian Journal of Geosciences* 14:2065,

TSE 7994, Zemin Dayanma Yapıları;Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Toka, E.B., (2021), Geoteknik Mühendisliğinde Fiziksel Modelleme Esasları, Doktora, *Konya Teknik Üniversitesi*, Konya.

Tuğrul, A.T.(2019), İstinat Yapılarının Depreme Dayanıklı Tasarımı, Yüksek Lisans, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.

Umu S.U., Okur D.V., 2020, Demiryolu Yol Altyapısının Parçalanmış Atık Lastik-Kum Karışımları ile Stabilizasyonu, *Eskişehir Teknik Üniversitesi*, Eskişehir.

Uzuner, B.A., 2007, Temel Zemin Mekaniği, *Derya Kitabevi*, Trabzon, 370-375.

Yıldırım E., 2019, Betonarme Konsol İstinat Duvarları ve Geogrid Donatılı İstinat Duvarlarının Teknik ve Ekonomik Yönden Araştırılması, Yüksek Lisans, *Konya Teknik Üniversitesi*, Konya.



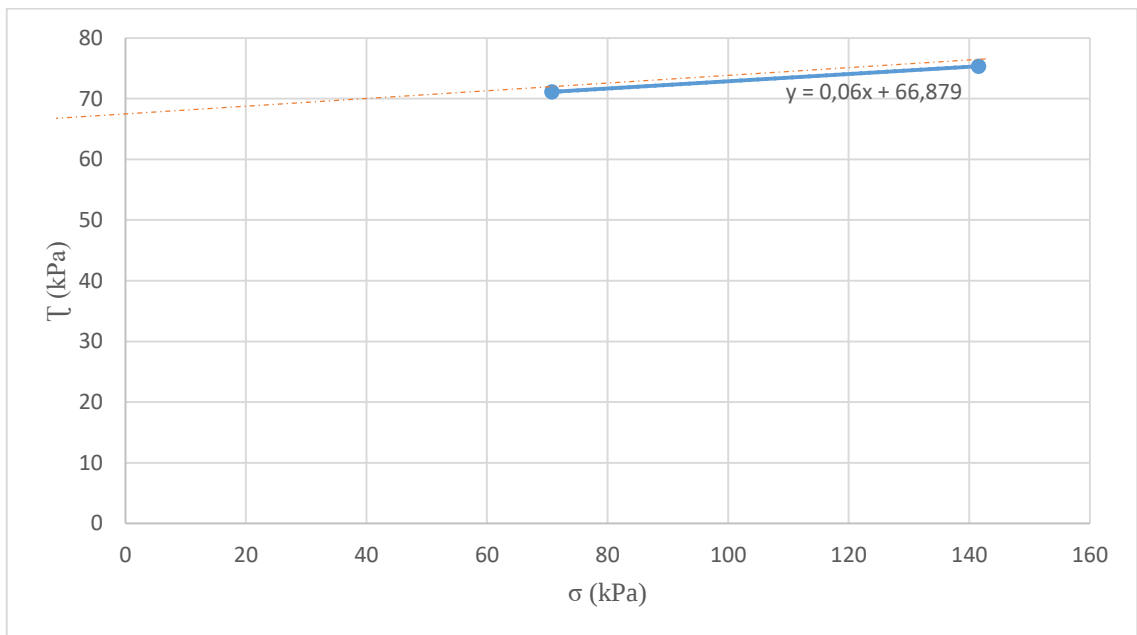
EKLER

EK-1 Karışımların Kesme Kutusu Sonuçları

Çizelge EK 1.1. Saf kil kesme kutusu yükleri

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
0,6	89,0	0,6	94,0
1,0	107,0	1,0	111,0
1,4	131,0	1,4	138,0
2,2	147,0	2,2	152,0
3,0	161,0	3,0	167,0
3,8	172,0	3,8	188,0
4,6	196,0	4,6	194,0
5,0	201,0	5,0	213,0
5,8	202,0	5,8	214,0
6,2	202,0	6,2	215,0
7,0		7,0	
7,8		7,8	
8,6		8,6	

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
5	201	5	213
σ_1	70,77141	τ_{max1}	71,12527
σ_2	141,5428	τ_{max2}	75,37155

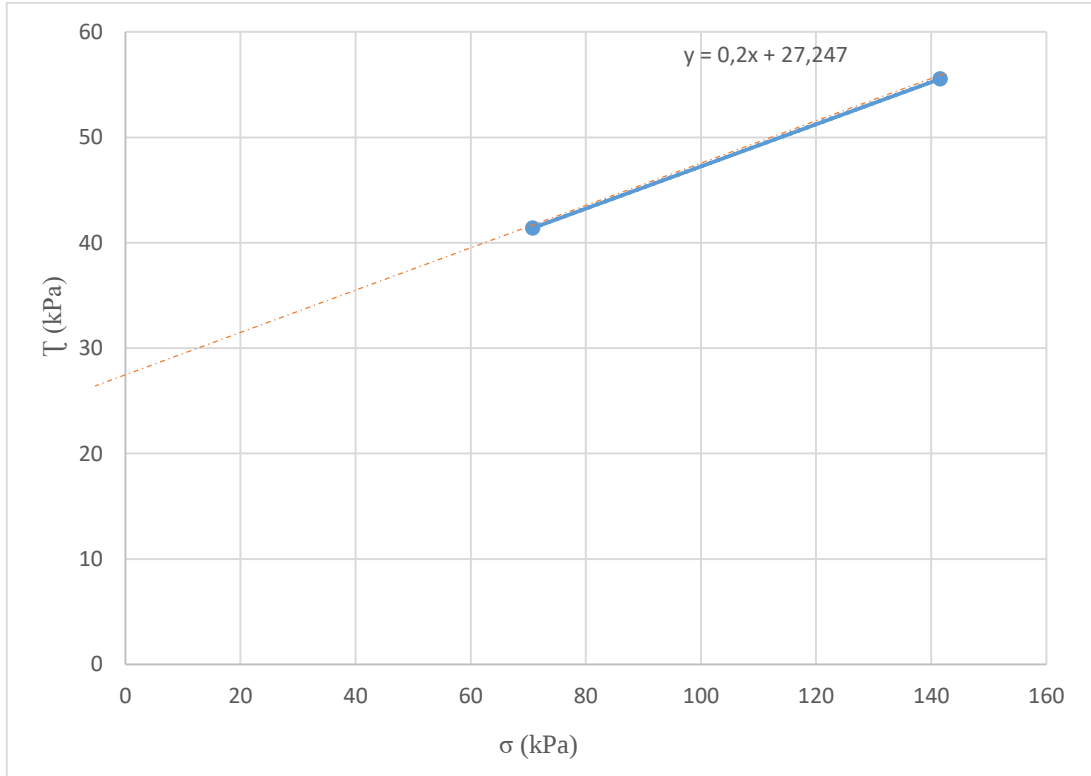


Şekil EK 1.1. Saf kil için kesme kutusu deney sonuçları.

Çizelge EK 1.2. %10 ALK için kesme kutusu sonuçları

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
0,6	37,0	0,6	57,0
1,0	57,0	1,0	73,0
1,4	68,0	1,4	82,0
2,2	79,0	2,2	94,0
3,0	88,0	3,0	101,0
3,8	97,0	3,8	107,0
4,6	107,0	4,6	114,0
5,0	114,0	5,0	121,0
5,8	117,0	5,8	128,0
6,2	118,0	6,2	141,0
7,0	119,0	7,0	157,0
7,8	120,0	7,8	157,0

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
5,8	117	7	157
σ_1	70,77141	τ_{max1}	41,40127
σ_2	141,5428	τ_{max2}	55,55556

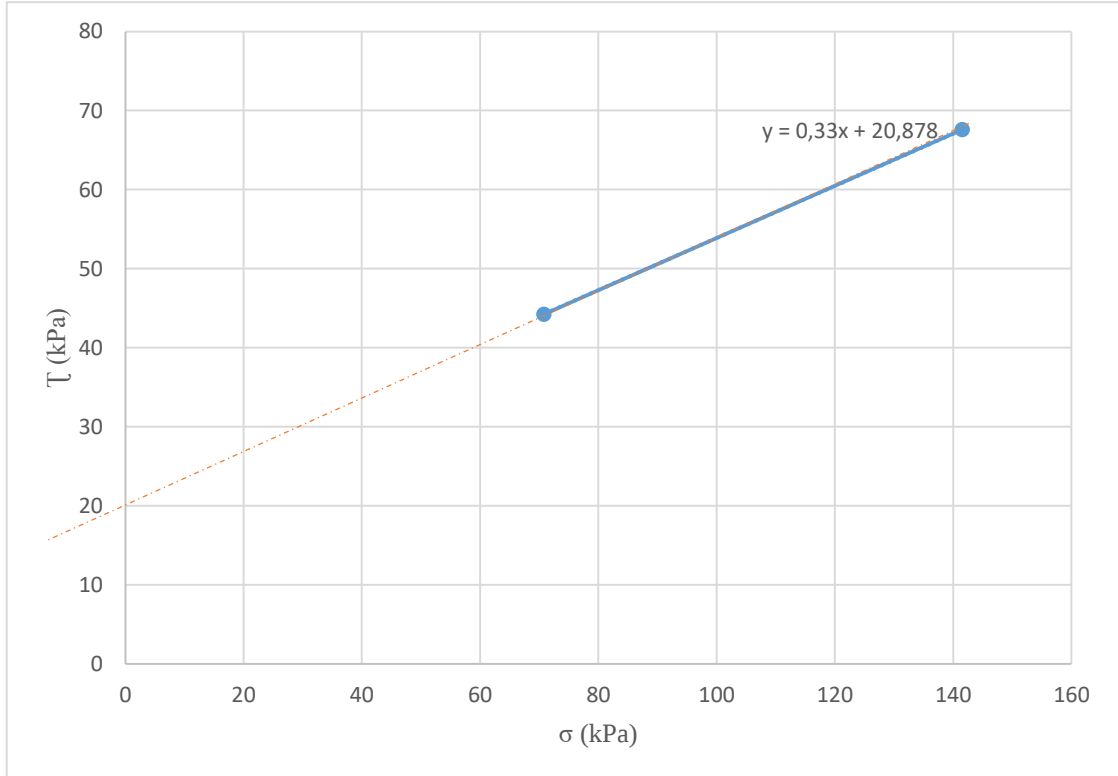


Şekil EK 1.2. %10 ALK için kesme kutusu deney sonuçları.

Çizelge EK 1.3. %20 ALK için kesme kutusu sonuçları

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
0,6	39,0	0,6	52,0
1,0	46,0	1,0	59,0
1,4	55,0	1,4	66,0
2,2	63,0	2,2	74,0
3,0	71,0	3,0	83,0
3,8	80,0	3,8	95,0
4,6	89,0	4,6	117,0
5,0	98,0	5,0	141,0
5,8	109,0	5,8	163,0
6,2	125,0	6,2	180,0
7,0	126,0	7,0	191,0
7,8	127,0	7,8	144,0
8,6	128,0	8,6	145,0

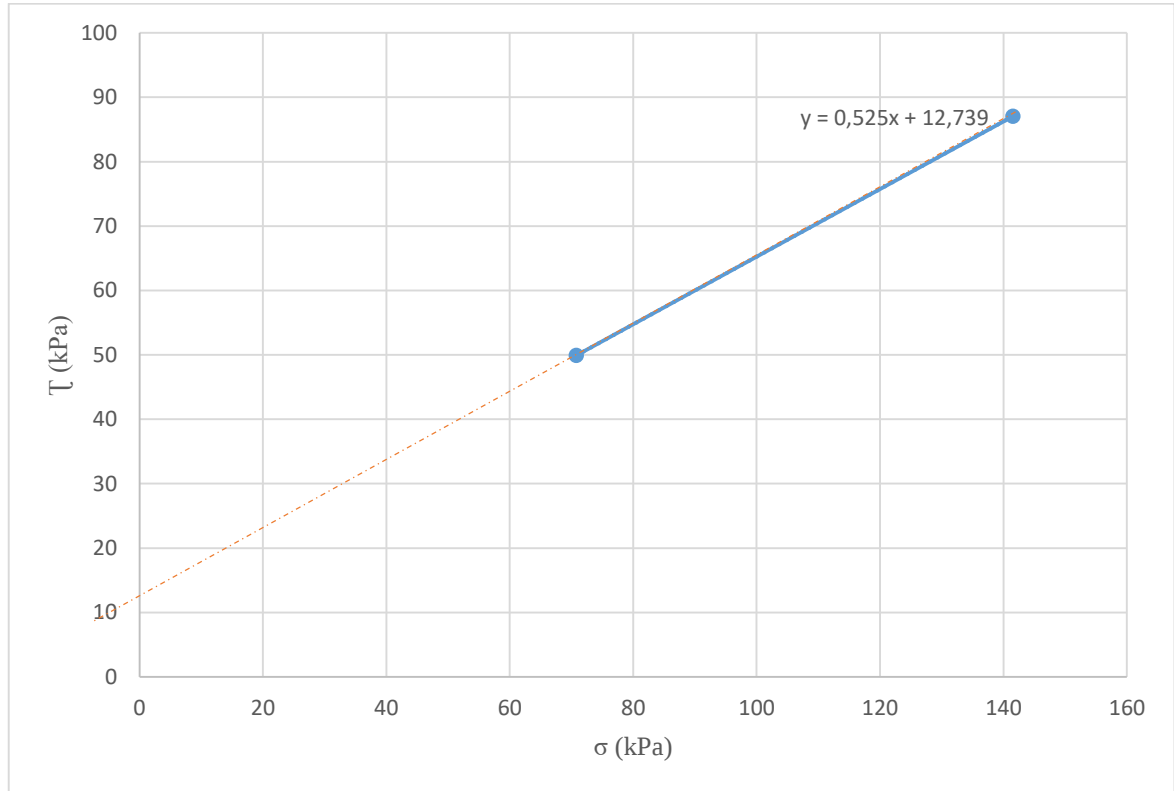
P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
6,2	125	7	191
σ_1	70,77141	T_{max1}	44,23213
σ_2	141,5428	T_{max2}	67,58669

**Şekil EK 1.3. %20 ALK için kesme kutusu deney sonuçları.**

Çizelge EK 1.4. %30 ALK için kesme kutusu sonuçları

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
0,6	43,0	0,6	61,0
1,0	51,0	1,0	69,0
1,4	61,0	1,4	81,0
2,2	72,0	2,2	93,0
3,0	85,0	3,0	107,0
3,8	97,0	3,8	128,0
4,6	108,0	4,6	139,0
5,0	112,0	5,0	149,0
5,8	127,0	5,8	162,0
6,2	133,0	6,2	178,0
7,0	135,0	7,0	187,0
7,8	136,0	7,8	196,0
8,6	137,0	8,6	197,0

P (kg)	2	P (kg)	4
ΔL (mm)	T max (N)	ΔL (mm)	Tmax (N)
6,2	141	7,8	246
σ_1	70,77141	τ_{max1}	49,89384
σ_2	141,5428	τ_{max2}	87,04883

**Şekil EK 1.4. %30 ALK için kesme kutusu deney sonuçları.**