

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ DOLGULARIN DEFORMASYON DAVRANIŞININ
SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

Mücahid Tuğberk ÖZSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Şubat, 2022

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ DOLGULARIN DEFORMASYON DAVRANIŞININ
SAYISAL ANALİZLERLE İNCELENMESİ

Mücahid Tuğberk ÖZSOY tarafından hazırlanan tez çalışması 25.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. PELİN TOHUMCU ÖZENER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. HAVVANUR KILIÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. NİL TAYLAN KUTLU, Üye
Maltepe Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Sıkıştırılmış Dolguların Deformasyon Davranışının Sayısal Analizlerle İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mücahid Tuğberk ÖZSOY

İmza



Sevgili aileme..

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesinden oldukça yararlandığım, yürüttüğüm çalışma kapsamında yol gösterici olan, ders dışındaki zamanlarında da öğrencilerinin sıkıntılarıyla ilgilenen, saygıdeğer hocam Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İhtiyaç duyduğumda yardımını esirgemeyen, her zaman sıkıntılarımı paylaşan Arş. Gör. Berna AKSOY'a ve değerli görüşlerinden yararlandığım, lisans bitirme tez sürecimde yaptığı yardımların ardından yüksek lisans tez sürecimde de desteğini esirgemeyen Hazal Berrak GENÇDAL'a şükranlarımı sunarım. Üzerimde çok büyük emekleri olan, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, aile kavramının ne kadar önemli olduğunu bana her an hissettiren aileme bu zorlu süreçte yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Mücahid Tuğberk ÖZSOY
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Hipotez	9
2 DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN MEKANİĞİ	10
2.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Özellikleri	11
2.2 Zemin-Su Karakteristik Eğrisi	12
3 SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN DAVRANIŞINDA KULLANILAN BÜNYE MODELLERİ ve BARCELONA BASIC MODEL	15
4 SIKIŞTIRILMIŞ KİL DOLGUNUN DEFORMASYON DAVRANIŞININ ANALİZİ	19
4.1 Homojen Olarak Sıkıştırılmış Kil Dolgunun Deformasyon Davranışının Analizi	20
4.2 Dolgu Kesiti Farklı Sıkıştırma Su Muhtevalarında Sıkıştırılmış Kil Dolgunun Deformasyon Davranışının Analizi	48
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	64
6 KAYNAKÇA	66
7 TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	68

SİMGE LİSTESİ

P_0	Hava Giriş Değeri (MPa)
r	Maksimum Zemin Rijitliği
S	Doygunluk Derecesi (%)
s_0	Başlangıç Matrik Emme Değeri (MPa)
s	Matrik Emme Değeri (MPa)
u_a	Boşluk Hava Basıncı (MPa)
u_w	Boşluk Suyu Basıncı (MPa)
λ	Zemin-Su Karakteristik Eğrisinin Eğimini Kontrol Eden Parametre
$\lambda(s)$	Elastoplastik Zemin Sıkışabilirliği
$\lambda(0)$	Doygun Durumdaki Sıkışma Katsayısı
β	Matrik Emme ile Birlikte Rijitlikteki Artış Oranı (MPa ⁻¹)
γ	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)

KISALTMA LİSTESİ

AEV	Air Entry Value (Hava Giriş Değeri)
BBM	Barcelona Basic Model
SWCC	Soil-Water Characteristic Curve (Zemin-Su Karakteristik Eğrisi)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Tipik bir SWCC gösterimi [8]	3
Şekil 1.2	Beliche barajının farklı inşa aşamalarında düşey yer değiştirmelerin zamanla değişimi	5
Şekil 1.3	Lechago barajı çekirdeğinin yapım sonunda doygunluk derecesi dağılımı [17]	6
Şekil 1.4	Çalışma dahilinde incelenen homojen olmayan toprak dolgu baraj kesiti [18]	7
Şekil 1.5	Çalışma kapsamında incelenen bağlama modelinin sonlu elemanlar ağı [19]	7
Şekil 1.6	Bağlamanın merkezinde düşey eksen boyunca oturmalara başlangıç matrik emme değerinin etkisi [19]	8
Şekil 2.1	Doygun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi [23]	12
Şekil 2.2	Çeşitli zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrileri	13
Şekil 3.1	Doygun-doygun olmayan zeminler için gerilme-şekil değiştirme modelleri [8]	16
Şekil 4.1	Homojen sıkıştırılmış analizlerde kullanılan 50 m yüksekliğindeki kil dolgu kesiti	20
Şekil 4.2	Homojen sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m granüler tabaka yerleştirilmesi durumundaki dolgu kesiti	20
Şekil 4.3	Analizlerde kullanılan kil zemine ait kompaksiyon eğrisi	21
Şekil 4.4	Analizlerde kullanılan zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrileri ...	23
Şekil 4.5	Sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları	24
Şekil 4.6	Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun başlangıç durumundaki doygunluk derecesi dağılımı	26
Şekil 4.7	Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	27
Şekil 4.8	Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	27
Şekil 4.9	Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	28

Şekil 4.10 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	28
Şekil 4.11 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	29
Şekil 4.12 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	29
Şekil 4.13 Model B için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	30
Şekil 4.14 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	30
Şekil 4.15 Model D için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	31
Şekil 4.16 Model E için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	31
Şekil 4.17 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi.....	32
Şekil 4.18 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi.....	32
Şekil 4.19 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz başlangıcındaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi.....	33
Şekil 4.20 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analizin orta aşamasındaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi	33
Şekil 4.21 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi	34
Şekil 4.22 Farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip kil dolguların su etkisine maruz kaldıkları durumda dolgu düşey eksen boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı	35
Şekil 4.23 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	36

Şekil 4.24 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	36
Şekil 4.25 Model B için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	37
Şekil 4.26 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	37
Şekil 4.27 Farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip kil dolguların dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı	38
Şekil 4.28 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerin dağılımı	39
Şekil 4.29 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumundaki analiz sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı	40
Şekil 4.30 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumundaki analiz sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı	40
Şekil 4.31 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı	41
Şekil 4.32 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı	41
Şekil 4.33 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca düşey şekil değiştirmelerin dağılımı	42
Şekil 4.34 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı	43
Şekil 4.35 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı	43
Şekil 4.36 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı	44

Şekil 4.37 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı	44
Şekil 4.38 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabaka yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca yatay yer değiştirmelerin dağılımı	45
Şekil 4.39 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay şekil değiştirmelerin dağılımı	46
Şekil 4.40 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay şekil değiştirmelerin dağılımı	46
Şekil 4.41 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay şekil değiştirmelerin dağılımı	47
Şekil 4.42 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay şekil değiştirmelerin dağılımı	47
Şekil 4.43 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabaka yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca yatay şekil değiştirmelerin dağılımı	48
Şekil 4.44 Sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan analizlerde kullanılan 50 m yüksekliğindeki kil dolgu kesiti (Model F1)	49
Şekil 4.45 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m granüler tabaka yerleştirilmesi durumundaki dolgu kesiti (Model F2)	49
Şekil 4.46 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun başlangıç durumundaki suya doygunluk derecesi dağılımı	50
Şekil 4.47 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun analiz sonundaki suya doygunluk derecesi dağılımı	50
Şekil 4.48 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	51
Şekil 4.49 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	52
Şekil 4.50 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	52

Şekil 4.51	Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı	53
Şekil 4.52	Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	54
Şekil 4.53	Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı	54
Şekil 4.54	Model F1 için farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi	55
Şekil 4.55	Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi	55
Şekil 4.56	Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerin dağılımı	56
Şekil 4.57	Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	57
Şekil 4.58	Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı	57
Şekil 4.59	Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı	58
Şekil 4.60	Oluşturulan çeşitli modellerin dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı	59
Şekil 4.61	Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı	60
Şekil 4.62	Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı	60
Şekil 4.63	Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı	61

- Şekil 4.64** Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı61
- Şekil 4.65** Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu dūřey eksenini boyunca yatay yer değiştirmelerin dağılımı62
- Şekil 4.66** Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun dolgu dūřey eksenini boyunca yatay yer değiştirmelerinin dağılımı63



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Parametrik çalışmada kullanılan farklı sıkıştırma koşulları için suya doygunluk derecesi ve başlangıç matrik emme değerleri	6
Tablo 2.1 Farklı zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrisi parametrelerinin yaklaşık değer aralıkları	14
Tablo 4.1 Çalışma kapsamında kullanılan sıkıştırılmış kil dolgu ve kırmataş granüler dolgu tabakası için Barcelona Basic Model parametreleri [26]	22
Tablo 4.2 Homojen sıkıştırılmış kil dolgularında farklı sıkıştırma koşullarını yansıtan modeller için başlangıç matrik emme değerleri ve zemin-su karakteristik eğrisi parametreleri	25

Sıkıştırılmış Dolguların Deformasyon Davranışının Sayısal Analizlerle İncelenmesi

Mücahid Tuğberk ÖZSOY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Zeminin inşa malzemesi olarak kullanıldığı sıkıştırılmış kil dolgularda, dolgu zemini suya doymun olmayan zemin özellikleri taşımaktadır. Bu nedenle, dolguların deformasyon analizleri doymun olmayan zemin mekaniği prensipleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmelidir. Suya doymun olmayan zeminlerin mühendislik davranışını etkileyen en önemli faktör ise zeminin zemin-su karakteristik eğrisidir (SWCC). Zemin-su karakteristik eğrisi, zeminin hidrolik açıdan davranışını matrik emme-su içeriği ilişkisi üzerinden analiz etmede anahtar bir role sahiptir. Bu çalışmada, doymun olmayan koşullarda inşa edilen kil dolguların su etkisine maruz kalmaları durumunda deformasyon davranışı ve bu davranışa sıkıştırma su muhtevasının etkisi incelenmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri, kil zeminler için literatürdeki ampirik zemin-su karakteristik eğrisi tahminleriyle (van Genuchten model) iyi uyum gösteren deneysel çalışma sonuçlarından alınmıştır. Çalışmalar, son dönemde kullanılmaya başlanan ve doymun olmayan zeminlerin mekanik açıdan davranışını en iyi yansıtan model olan Barcelona Basic Model kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda; optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması halinde dolguda yüksek yer değiştirmelerin meydana geldiği belirlenmiştir. Optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolguların su etkisi altındaki bu davranışını minimize etmek amacı ile kil dolguların tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesinin dolgunun deformasyon davranışına olan etkisi incelenmiş ve böyle bir granüler dolgu tabakasının yer değiştirmeleri önemli miktarda azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Doygun olmayan zeminler, zemin-su karakteristik eğrisi, Barcelona Basic Model, sıkıştırılmış dolguların deformasyonu



Numerical Analyses of Deformation Behavior of Compacted Fills

Mücahid Tuğberk ÖZSOY

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Compacted fill material which is used as a construction material possess unsaturated soil properties. For this reason, deformation analysis of compacted fills should be performed by considering the principles of unsaturated soil mechanics. The most important factor that affects the engineering behavior of unsaturated soils is the soil-water characteristic curve (SWCC) of the soil. The soil-water characteristic curve plays a key role in analyzing the hydraulic behavior of the unsaturated soil through the matric suction-water content relationship. In this study, deformation behavior of compacted fills which are exposed to water investigated by numerical analyses. The material parameters used in the analyses were taken from the results of experimental studies which are good compatible with the empirical soil-water characteristic curve estimates (van Genuchten model) for the clay soils in the literature. The studies were carried out on the basis of the Barcelona Basic Model, which has been used recently and reflects the unsaturated soil behavior mechanically best. As a result of the study; it is seen that the clay fill that compacted at the dry side of optimum moisture content gives high

displacement values when exposed to water. In order to minimize this behavior of clay fills that compacted with dry side of optimum moisture content, the effect of placement a granular fill layer on the bottom of the clay fills on the deformation behavior of the fill was examined and it was observed that such a granular fill layer reduced the displacements significantly.

Keywords: Unsaturated soils, soil-water characteristic curve, Barcelona Basic Model, deformation of compacted fills



1.1 Literatür Özeti

Zeminlerin özellikleri ve mekaniği ile ilgilenen geoteknik mühendisliği; artış gösteren dünya nüfusu ile beraber ihtiyaçların daha çabuk, düşük maliyetli ve risksiz bir şekilde giderilebilmesi adına devamlı gelişme içerisinde. Yakın dönemde deneysel araştırmaların yaygın hale gelmesi ve deney düzeneklerinin modernleşmesiyle beraber farklı araştırma yöntemleri geliştirilmiş ve klasik zemin mekaniği teorilerine alternatifler türetilmiştir. Doymun olmayan zemin mekaniği üzerine yapılan çalışmaların sayısı da bu gelişmelere paralel olarak son yıllarda artış göstermiştir[1].

Klasik zemin mekaniği pratiğinde taşıma gücü, sızma, şev stabilitesi ve oturma problemleri; doymun olmayan zeminlerin doymun olduğu kabul edilerek, ortamdaki doymun zemin özelliklerinin kararlı ve sürekli olduğu düşüncesiyle çözülmektedir. Gerçekleştirilen deneylerin ekonomik olması ve hızlı sonuçlar vermesi, bilinen zemin parametrelerinin kullanılabilmesi doymun zemin varsayımının sebeplerinden bazılarıdır. Ancak sayısal analiz çalışması yapmak için kullanılan parametreler, zemin boşluklarının su ile dolu olduğu kritik duruma denk düşmektedir. Doymun olmayan zeminler için doymun zemin varsayımı yapmak taşıma gücü ve oturmalar açısından, hatalı ve ekonomik olmayan analizler ortaya koyabilmektedir[2].

Dünya genelinde ve özellikle Türkiye’de gerçekleştirilen altyapı inşaatları son dönemde artış göstermektedir. Karayolu, havalimanı, köprüler ve barajlar gibi yapıların tamamı sıkıştırılmış zeminler üzerine inşa edilmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde ise sıkıştırılmış zeminler, rezidüel zeminler, göçebilen zeminler ve şişen zeminler konularının doymun olmayan zemin mekaniğine özel konular arasında oldukları görülmektedir. Bu durumda da

doygun olmayan zemin mekaniği özelliklerini kullanmanın yerinde olacağı anlaşılmaktadır.

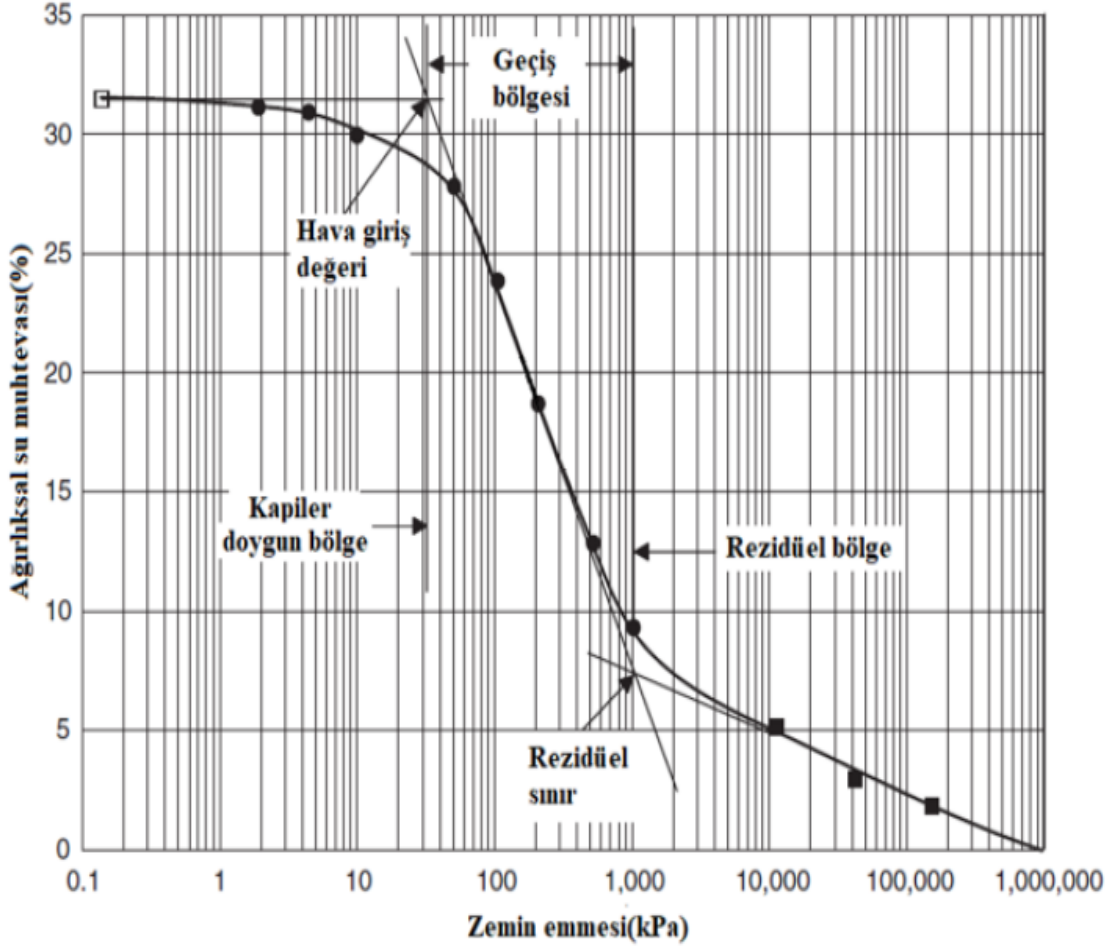
İlk olarak, 1950'lerin sonlarında yapılan deneysel laboratuvar çalışmaları sonucunda, doygun ve doygun olmayan zemin davranışlarında temel farklılıklar bulunduğu rapor edilmiştir. İlerleyen dönemlerde çeşitli çalışmalarla doygun ile doygun olmayan zemin koşulları aralığının uzantısı olarak, elastoplastik model formunda, hacimsel değişme ile kayma mukavemeti kombine edilmeye çalışılmıştır.

Doygun olmayan zemin mekaniğinin uygulanmasının öncelikli zorlukları ise şu şekilde sıralanabilir:

- a) Suyu doygun olmayan zeminin temel ve teorik davranışını anlama ihtiyacı,
- b) Uygun yapısal bağıntının formülasyonu ve önerilen yapısal ilişkilerin test edilmesi,
- c) Nümerik yöntemler kullanarak bir veya birden fazla lineer olmayan kısmi diferansiyel denklem formüle etme ve çözme kabiliyeti,
- d) Suyu doygun olmayan zemin özellik fonksiyonlarının tahmin edilmesinde dolaylı tekniklerin belirlenmesi,
- e) Zemin matrik emmesinin geniş aralıktaki değerleri için, yerinde ölçüm ve laboratuvar ölçüm cihazları[3].

Suyu doygun olmayan zeminlerde, matrik emme değeri-su muhtevası ilişkisi zemin davranışını ölçmek için önemli bir parametredir[4]. Suyu doygun zeminlerin davranışının analizindeki gerilme durumu ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi tanımlayan konsolidasyon eğrisine benzer olarak, suyu doygun olmayan zeminlerin zemin davranışının analizinde zemin-su karakteristik eğrisi önemli bir rol oynamaktadır[5]. Suyu doygun olmayan zeminin sahip olduğu su muhtevası (veya doygunluk derecesi) ve matrik emme değeri ilişkisi “Zemin-Su Karakteristik Eğrisi (SWCC)” olarak bilinmektedir. Bu eğrinin iki önemli parametresi vardır; hava giriş değeri (veya kabarcıklanma basıncı) ve rezidüel doygunluk derecesi[6]. Hava giriş değeri (AEV), zemin-su karakteristik eğrisindeki ilk kırılmadır[7]. Bu

matrik emme değerinde, önce büyük boşluklardan olmak üzere su çıkışı başlamaktadır. Rezidüel doygunluk derecesinden itibaren ise zeminden su çıkışı çok daha zorlaşmaktadır. Tipik bir zemin-su karakteristik eğrisi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Tipik bir SWCC gösterimi [8]

Zemin-su karakteristik eğrisini tahmin etmek için en sık kullanılan eşitliklerden biri ise van Genuchten (1980) tarafından şu şekilde ifade edilmektedir:

$$S_e = \left(1 + \left(\frac{P_a - P_w}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (1.1)$$

λ : Zemin-su karakteristik eğrisinin eğimini belirleyen parametre

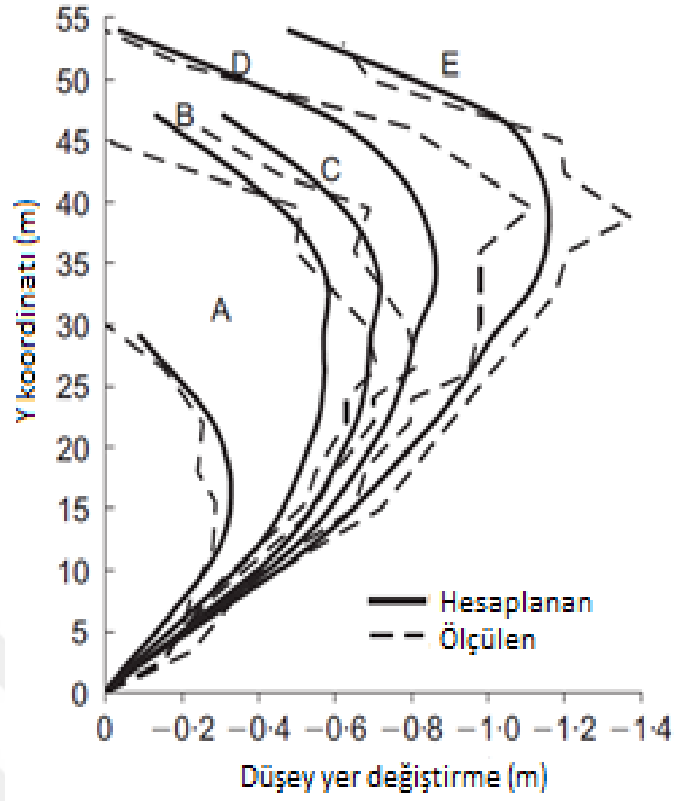
P_0 : Hava giriş değeri (Air entry value)

$p_a - p_w$: Matrik emme [9]

Matrik emme, doygun olmayan zemin davranışını kontrol eden en önemli parametrelerden biridir[10]. Suyu doygun olmayan zeminlerde beliren negatif boşluk suyu basıncını, zeminin matrik emmesi olarak tarif etmek mümkündür. Matrik emme basitçe, zeminin su çekmeye ve tutmaya olan yeteneği olarak tanımlanabilir[11].

Matrik emme, kılcal gerilme ve eriyik emme bileşenlerinden oluşmaktadır[12]. Kılcal gerilme, zemin boşluk suyundaki rölatif negatif basınçtır[13]. Kılcallık olayı ile ilgilidir ve zemin boşluklarındaki hava ve su basınçları arasındaki fark olarak tanımlanır[14]. Eriyik emme ise kil mineralleri ile boşluk suyu arasındaki fiziko-kimyasal etkileşimlere bağlıdır. Kılcal gerilme değeri, zemin yapısı tarafından kontrol edildiği için zemin davranışını göstermesi açısından eriyik emme değerine göre daha dikkat çekicidir[15].

Bu konu özelinde daha önceki dönemlerde yürütülen sayısal analiz çalışmaları incelendiğinde, Alonso vd. (2005) tarafından ortaya koyulan çalışma ilk olarak göze çarpmaktadır. Alonso vd. (2005) çalışmalarında Beliche toprak dolgu barajını incelemişler, kil çekirdek ve taş dolgu malzemelerin her ikisi için de, toprak dolgu barajın yapım, su tutma ve işletme aşamaları esnasındaki davranışını açıklayan temel değişkenin matrik emme parametresi olduğunu belirtmişlerdir[16]. Barajın doldurulması, rölatif sabit ortalama gerilme altında, matrik emme değerinde ani düşüşe sebep olmakta ve bu da oturmalarda ani artışlara sebep olmaktadır. Beliche barajının farklı inşa aşamalarında düşey yer değiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Araştırmacılar analizlerinde "Code_Bright" sonlu elemanlar modelini uygulamışlar, bu yaklaşımın sağladığı avantaj olarak da su transferi ve deformasyon mekanizmasının tutarlı entegrasyonunu göstermişlerdir.



Şekil 1.2 Beliche barajının farklı inşaa aşamalarında düşey yer değıştirmelerin zamanla değışimi*

A – 29 m yüksekliğe kadar inşaa aşaması (t = 0 – 180. gün)

B – 47 m yüksekliğe kadar inşaa aşaması (t = 180 – 360. gün)

C – Rezervuarın 29 m yüksekliğe kadar doldurulması aşaması
(t = 360 – 420. gün)

D – 55 m yüksekliğe kadar inşanın tamamlanması aşaması
(t = 420 – 450. gün)

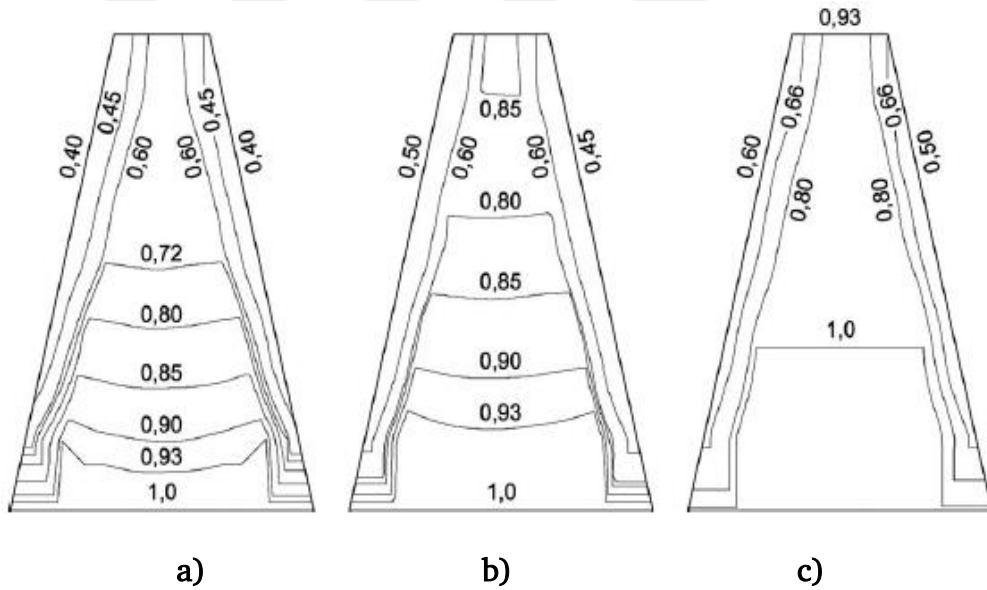
E – Rezervuarın 49 m yüksekliğe kadar doldurulması aşaması
(t = 450 – 1500. gün)

*Kesikli çizgili eğri ekstansometre ölçümlerini, düz çizgili eğri ise model analiz sonuçlarını göstermektedir[16].

Alonso ve Costa (2009) tarafından “Code_Bright” sonlu elemanlar modeli kullanılarak yürütülen bir diğer çalışmada, zeminin mukavemeti ve rijitliğine matrik emmenin etkisi gösterilmiştir[17]. Çalışma kapsamında sıkıştırma koşulları, suya doygunluk derecesi (S_0) ve başlangıç matrik emme değeri (s_0) üzerinden tanımlanmış olup parametrik çalışmada kullanılan değerler Tablo 1.1’de verilmiştir. Lechago barajı çekirdeğinin farklı sıkıştırma koşulları altında, yapım sonundaki suya doygunluk derecesi dağılımı ise Şekil 1.3’te gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Parametrik çalışmada kullanılan farklı sıkıştırma koşulları için suya doygunluk derecesi ve başlangıç matrik emme değerleri

Sıkıştırma Koşulları	S_0 (%)	s_0 (MPa)
Kuru	55	15
Optimum + %2.7	75	3
Islak	90	0.8

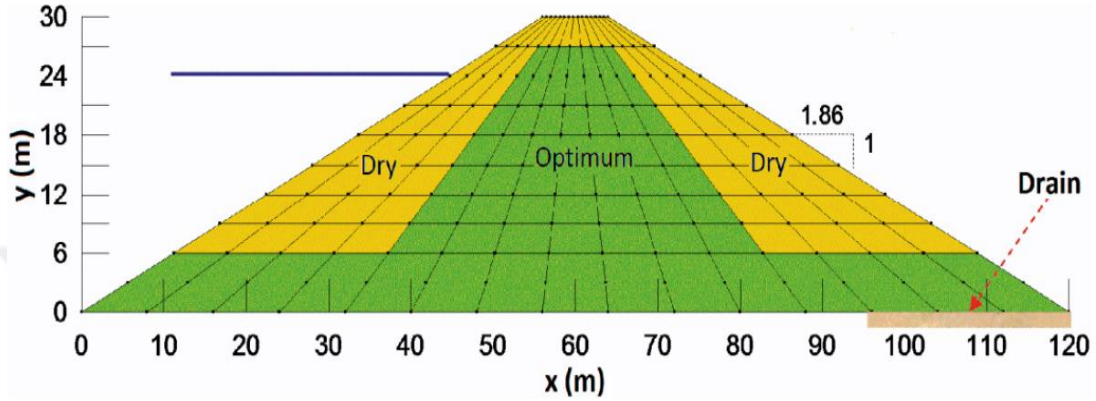


Şekil 1.3 Lechago barajı çekirdeğinin yapım sonunda doygunluk derecesi dağılımı

- a) optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil çekirdek,
- b) optimum + %2.7 su muhtevasında sıkıştırılmış kil çekirdek,
- c) optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılmış kil çekirdek [17]

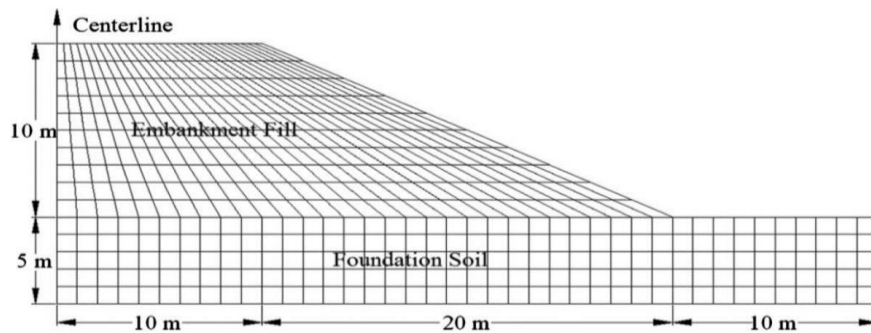
Farias ve Cordao Neto (2010) ise, toprak dolgu baraj kesitinin homojen olarak aynı su muhtevası değerinde sıkıştırılmaması durumu üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. ALLFINE programını kullanarak ortaya koydukları

çalışmalarında, homojen olarak optimum sıkıştırma su muhtevasında sıkıştırılan kesit ile yaklaşık olarak aynı ve hatta bazı durumlarda daha iyi performans gösteren, daha düşük maliyetli homojen olmayan kesitler tasarlanmanın mümkün olduğunu vurgulamışlardır. Şekil 1.4'te verilen kesitte gösterildiği gibi, en yüksek gerilme değerlerinin gözlemlendiği kısımları optimum sıkıştırma su muhtevası değerinde sıkıştırarak bu tasarımların gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir.



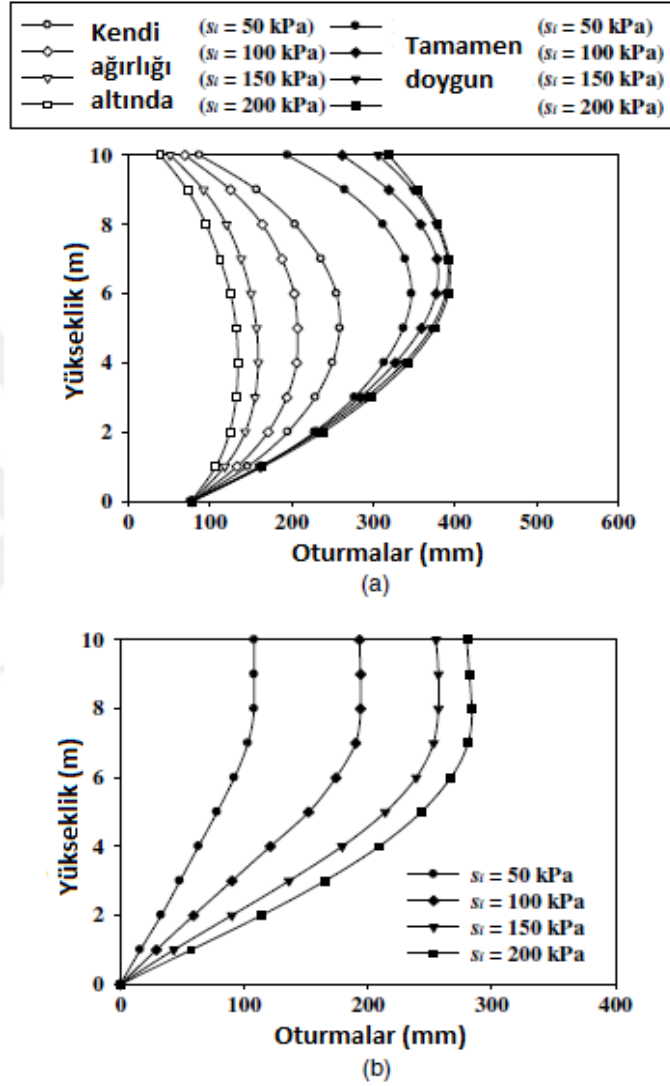
Şekil 1.4 Çalışma dahilinde incelenen homojen olmayan toprak dolgu baraj kesiti [18]

Zheng vd. (2017) ise çalışmalarında, suya doymun olmayan sıkıştırılmış dolgu bağlamaların ıslanmaya bağlı deformasyon ve stabilitelerini Şekil 1.5'te gösterilen kesit üzerinden analiz etmişlerdir. Başlangıç su muhtevası değerinin, bağlama yüksekliğinin ve şev eğim açısının bu konuda belirleyici parametreler olduklarını belirtmişlerdir[19]. Su muhtevası, zemin-su karakteristik eğrisi ile matrik emme olarak analizlere yansıtılmıştır.



Şekil 1.5 Çalışma kapsamında incelenen bağlama modelinin sonlu elemanlar ağı [19]

Çalışma kapsamında incelenen sıkıştırılmış dolgu bağlamalarda oturmalar genellikle, bağlamanın kendi ağırlığı nedeniyle meydana gelen oturmalar ve ıslanma etkisiyle meydana gelen oturmalar şeklinde iki bileşen olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1.6'da bağlamanın merkezinde düşey eksen boyunca oturma değerleri gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Bağlamanın merkezinde düşey eksen boyunca oturmalar başlangıç matrik emme değerinin etkisi
a) Bağlamanın kendi ağırlığı altındaki ve tamamen doygun durumdaki oturma değerleri
b) Islanma etkisiyle meydana gelen oturmalar [19]

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, suya doygun olmayan koşullarda inşa edilen, sıkıştırılmış yüksek kil dolguların deformasyon davranışına etki eden parametreler araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, sıkıştırma su muhtevasının farklı değerlerinin sıkıştırılmış kil dolgunun deformasyon davranışına olan etkisi parametrik analizlerle incelenmiştir. Sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumundaki deformasyon davranışı farklılıkları incelenmiş ve yer değiştirmeleri minimize etmek için kullanılacak, kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi uygulaması araştırılmıştır. Ayrıca, kil dolgu kesitinin belirli bir sıkıştırma su muhtevası değerinde homojen olarak sıkıştırılması ve çeşitli sıkıştırma su muhtevalarına sahip tabakalar halinde sıkıştırılması durumlarındaki deformasyon davranışları karşılaştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Dolgular, mühendislik özellikleri bakımından çoğu zaman homojen durumda değildir. Yani suya doygun ve suya doygun olmayan zemin parametreleri dolgu kesitinin her noktasında aynı değerlerde olmayabilir. Dolgu kesitinin farklı kısımları çeşitli sıkıştırma koşulları altında sıkıştırıldığında bu durum dolgunun deformasyon davranışını etkileyecektir. Bunun yanı sıra sıkıştırılmış kil dolgu tabanına yerleştirilecek bir drenaj tabakası, dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda dolgunun deformasyonlar açısından performansını olumlu yönde etkileyecektir.

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN MEKANİĞİ

Geoteknik mühendisliği uygulama ve eğitiminde, doygun olmayan zemin mekaniğinin ortaya çıkması için Terzaghi'nin temel tanımının geliştirilmesi gerekmektedir. Terzaghi'nin klasik tanımının geliştirilmesiyle birlikte doygun olmayan zemin mekaniği; mekanik, hidrolik ve arayüzey ile ilişkili fizik kurallarının kısmen doygun zeminler ile ilgili olarak uygulanması olarak tanımlanabilir[20].

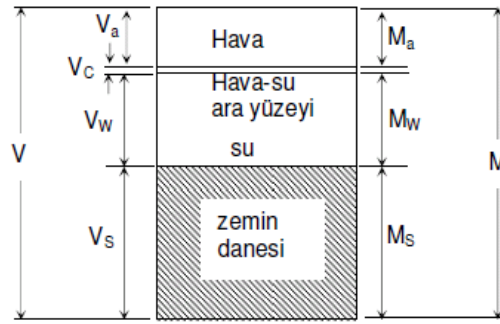
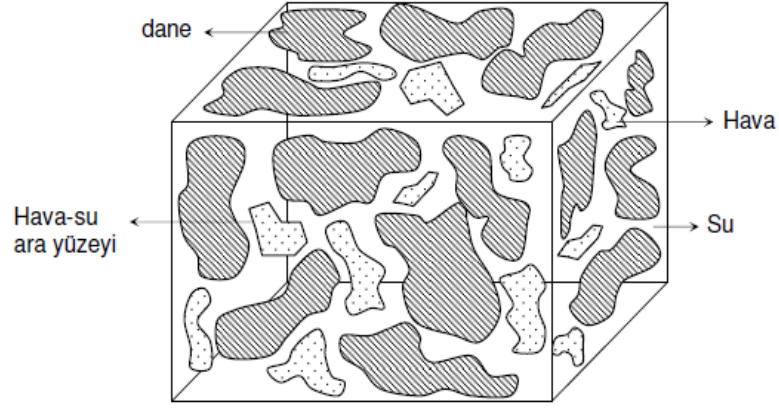
Zemin mekaniğinin genel çalışma alanı suya doygun ve suya doygun olmayan zeminler olarak ikiye ayrılmaktadır. Suyu doygun ve suya doygun olmayan zeminler arasındaki fark, bu zeminlerin mühendislik davranışları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Suyu doygun olmayan bir zemin ikiden fazla faza ve boşluk hava basıncı ile ilişkili olarak negatif boşluk suyu basıncına sahiptir. Yeraltı su seviyesinin üst kesiminde yer alan, tamamen kuru olmayan doğal zeminlerde ve sıkıştırılmış zeminlerde, doygun olmayan zemin mekaniği koşulları ile karşılaşılmaktadır. Suyu doygun olmayan zeminler için belirleyici kavramlar ise; matrik emme basıncı, permeabilite ve zemin-su karakteristik eğrisidir. Zemin-su karakteristik eğrisinin genel şekli ise; gözenek geometrisi, gözenek boyutu dağılımı, kil mineral içeriği, zeminin kuru yoğunluğu gibi bünye özellikleri tarafından belirlenen hava giriş değeri (AEV), rezidüel doygunluk derecesi ve dehidrasyon oranından etkilenir.

Bu konu kapsamında yürütülen araştırmalar incelendiğinde, negatif boşluk suyu basıncı veya matrik emme basıncının dolguların deformasyon davranışında etkili olacağını söylemek mümkündür. Yakın dönemde gerçekleştirilen çalışmalar ışığında negatif boşluk suyu basıncı değerinin ölçümü daha kolay hale gelmiş, özellikle yeraltı su seviyesinin derinlerde olduğu durumda negatif boşluk suyu basıncının kayma mukavemetini büyük oranda yükselttiği ortaya çıkarılmıştır.

2.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Özellikleri

Klasik zemin mekaniğinde zeminlerin katı (dane), sıvı (su) ve gaz (hava) olmak üzere üç farklı fazdan meydana geldiği kabul görmektedir[21]. Eğer zemindeki boşlukların %98'i ve daha fazlası su ile dolu ise zeminin boşluklarında bulunan hava kabarcıkları ayrıık durumdadır. Hava kabarcıklarının birbirleri ile direkt bağlantılarının bulunmadığı bu haldeki zeminler suya doygun zeminler olarak isimlendirilirler. Eğer su, boşluk hacminin %95'i veya daha düşük bir hacime sahipse, zeminin boşluklarında bulunan hava ayrıık durumdan çıkarak sürekli hale geçer ve zemin suya doygun olma özelliğini kaybeder. Bu haldeki zeminler suya doygun olmayan zeminler olarak isimlendirilirler[22].

Suya doygun olmayan zeminlerin de genel itibarıyla üç farklı fazdan meydana geldikleri kabul görmüştür. Fakat geçtiğimiz yıllarda yürütölen araştırmalar, kabul gören üç fazın yanı sıra su ve hava fazının arasında meydana gelen, su-hava ara yüzeyi (contractile skin) şeklinde isimlendirilen ince bir katmanın da gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Suya doygun olmayan zeminlere ait kütle-hacim bağlantılarını analiz ederken, su-hava ara yüzeyi oldukça küçük hacimde olduğundan göz ardı edilip su fazına dahil olarak kabul edilir. Fakat gerilme durumu söz konusu olduğunda, su-hava ara yüzeyi çekme gerilmesi oluşturduğu ve elastik membran gibi bir davranış sergilediği için su fazından bağımsız bir faz şeklinde davranmaktadır. Şekil 2.1'de suya doygun olmayan bir zemin elemanında gözlemlenen dört faz gösterilmiştir.

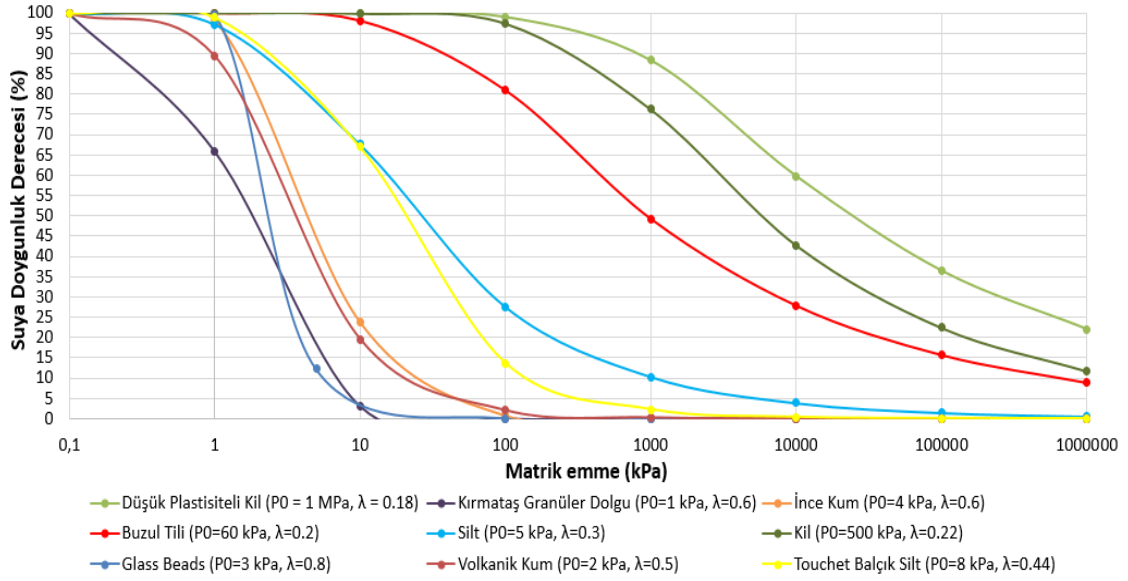


Şekil 2.1 Doygun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi [23]

Suya doygun olmayan zeminlerin incelendiği alanlar ise; şişen zeminler, atık depolama sahalarının yapımı, yüzeysel temellerin taşıma kapasiteleri, yüksek yoğunluktaki yağışlar sonrası ortaya çıkan şev stabilite sıkıntıları, toprak dolgu barajlar, gevşek olarak sıkıştırılmış dolgulara ait stabilite problemleri, köprü ayaklarının temelini oluşturan sıkıştırılmış zeminler, istinat yapılarının arkasında bulunan kohezyonlu dolgular, düşey kazılar, karayolu ve demiryolu yapıları olarak sıralanabilir.

2.2 Zemin-Su Karakteristik Eğrisi

Suya doygun olmayan zeminlerin yük altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışını anlayabilmek için suya doygun olmayan zeminin hidromekanik davranışını belirlemek son derece önem arz etmektedir. Bunun için de zeminin hidrolik açıdan davranışını belirleyen zemin-su karakteristik eğrisini bilmek gerekmektedir. Şekil 2.2'de farklı zemin tiplerine ait zemin-su karakteristik eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.2 Çeşitli zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrileri

Şekil 2.2'deki zemin-su karakteristik eğrilerinde zeminlerin su içeriği, suya doygunluk derecesi cinsinden gösterilmiştir. Zeminlerin su içeriğini, suya doygunluk derecesi cinsinden tanımlamanın avantajları olarak; hava giriş değerini (AEV) eğri üzerinde en açık şekilde tanımlaması ve doymayan zemin özellik fonksiyonlarını en yakından kontrol eden değişkenin suya doygunluk derecesi olması söylenebilir.

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere farklı zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrileri farklı biçimlerde olmaktadır. İnce daneli zeminler ile iri daneli zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrilerinde iki temel farklılık göze çarpmaktadır. İnce daneli zeminler daha yüksek matrik emme değerlerine kadar doymun durumda kalmakta, zeminden su çıkışı daha zor olmaktadır. Ancak iri daneli zeminler daha düşük matrik emme değerlerinden itibaren doymun durumdan çıkmakta, zeminden su çıkışı daha kolay olmaktadır. Yani sonuç olarak, ince daneli zeminlerin hava giriş değeri (P_0) iri daneli zeminlerin hava giriş değerinden büyük olmaktadır.

Bir diğer farklılık ise zemin-su karakteristik eğrilerinin eğimleri ile ilgilidir. İnce daneli zeminlerin bünyelerindeki suyun zeminden ayrılıp, rezidüel duruma geçmeleri çok yüksek matrik emme değerlerine kadar devam ettiği için bu zemin türlerine ait eğrilerin eğimi düşük olmaktadır. Fakat iri daneli zeminlerin

bünyelerindeki suyun zeminden ayrılıp rezidüel duruma geçmeleri için düşük matrik emme değerleri yeterli olmaktadır. Bu yüzden iri daneli zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrilerinin eğimi daha dik olmaktadır. Sonuç itibarıyla zemin-su karakteristik eğrisinin eğimini belirleyen λ değeri, ince daneli zeminlerde iri daneli zeminlere göre daha düşük olmaktadır.

Yürütülen literatür taramaları sonucunda elde edilen, farklı zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrisi parametrelerinin yaklaşık değer aralıkları Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Farklı zemin türlerine ait zemin-su karakteristik eğrisi parametrelerinin yaklaşık değer aralıkları

Zemin Türü	Değer Aralığı	
Kil	λ	0.18 – 0.22
	P_0	60 – 1000 kPa
Silt	λ	0.3 – 0.44
	P_0	5 – 8 kPa
Kum	λ	0.5 – 0.6
	P_0	2 – 4 kPa
Çakıl	λ	0.6 – 0.8
	P_0	1 – 3 kPa

Zemin-su karakteristik eğrisi, suya doymun olmayan zemin özellik fonksiyonlarını elde etmek için anahtar bilgi haline gelmiştir. Permeabilite, kayma dayanımı, hacim değişimi gibi suya doymun olmayan zemin özellik fonksiyonlarının tahmini için çeşitli ampirik prosedürler türetilmiş ve test edilmiştir. Her durum için, tahmin prosedürü suya doymun zemin özelliklerinin, zemin-su karakteristik eğrisi ile birlikte kullanılmasını içermektedir. Suya doymun olmayan zemin özelliklerindeki değişimler, öncelikle zemindeki su içeriğinin bir fonksiyonu olduğu için suya doymun olmayan zemin özellikleri zemin-su karakteristik eğrisi ile ilgilidir[8]. Buradan, doymun olmayan zeminlerin mekaniğinde zemin-su karakteristik eğrisinin çok önemli bir rolü olduğu görülmektedir.

SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN DAVRANIŞINDA KULLANILAN BÜNYE MODELLERİ VE BARCELONA BASIC MODEL

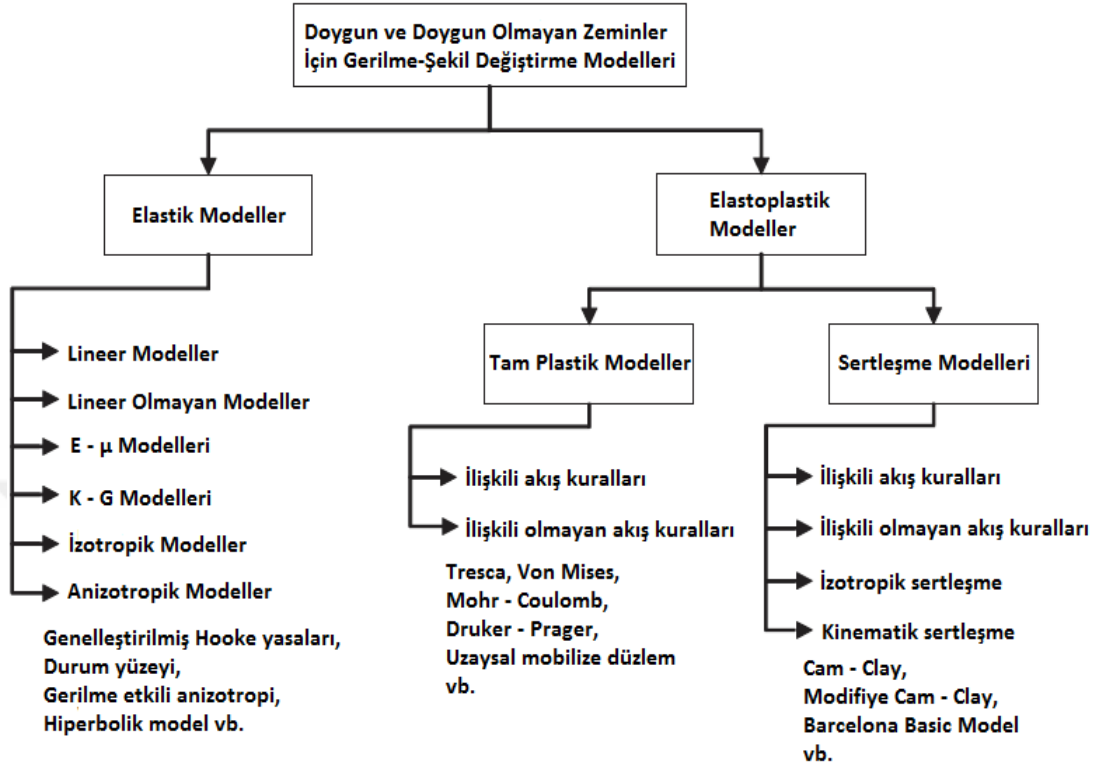
Zemin bünye modelleri, zemin davranışını yansıtmayı amaçlayan ve mekanik davranışı matematiksel olarak açıklayan ifadelerin tamamıdır. Zemin bünye modellerinden faydalanılarak, zemin ile gerilme ve şekil değiştirme arasındaki bağıntı sayısal analizler ile belirlenmeye çalışılır. Zemin homojen olmayan bir yapıda olduğu için ilgili zemin davranışını modelleyebilmek oldukça zor olmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak yürütülen sayısal analizlerde, tanımlı bünye modelleri sayesinde zeminin doğrusal olmayan davranışı modellenmektedir.

Suya doygun olmayan zemin davranışının modellenmesi; zemin yapısının gerilme-şekil değiştirme davranışı, boşluk-hava ve boşluk-su fazlarının hacim değişimi, boşluk-hava ve boşluk-su akışı, boşluk-hava sıkışabilirliği gibi durumlar için yapısal bağıntılar gerektirir. Suya doygun olmayan zemin davranışını açıklamak için gereken yapısal bağıntılar ise literatürde elastisite, sıkışabilirlik ve zemin mekaniği gibi çeşitli biçimler kullanılarak sunulmuştur. Bunların içerisinde elastisite modelleri, gerilme-deformasyon analizinin formülasyonu için kullanılmıştır[8].

Gerilme-şekil değiştirme analizleri için kullanılan ve lineer elastik davranışı baz alan Hooke yasası, zeminlerin davranışlarının doğrusal olmaması sebebiyle geoteknik modelleme süreçlerinde yetersiz kalmaktadır.

Suya doygun olmayan zeminler için olan çoğu yapısal bağıntı lineer olmayan zemin özellik (gerilme durumlarına bağlı olan özellikler) fonksiyonlarına dayalı olarak tanımlanır. Suya doygun olmayan zemin özellik fonksiyonları terimi, zeminin özelliği ve gerilme durumu değişkenleri ($\sigma - u_a$ ve $u_a - u_w$) arasındaki ilişkiyi açıklayan matematiksel eşitlikleri temsil etmektedir. Suya doygun ve suya

doygun olmayan zeminler için kullanılan çeşitli gerilme-şekil değiştirme modelleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir[8].



Şekil 3.1 Doygun-doygun olmayan zeminler için gerilme-şekil değiştirme modelleri [8]

Suya doygun olmayan zeminler için kullanılan elastik modeller genellikle Hooke yasalarını baz almaktadır. Bu modeller, suya doygun olmayan zeminlerdeki hacim değişiminin, net gerilme ve matrik emmedeki değişimlerin bir fonksiyonu olduğu kabulüne dayanır. Elastik modeller genellikle monoton net gerilme ve matrik emme durumlarının analizi için daha uygunken; diğer durumlarda elastik ve elastik olmayan şekil değiştirmelerin ayırımından ötürü yeteri kadar doğru olmamaktadır[8]. Mühendislikte oluşan temel zemin davranışı üzerine kurgulanan lineer elastik bünye modeli, zeminde oluşması muhtemel elastik davranışı modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Lineer elastik bünye modeli, zeminin rijitliğinin değişmediğini varsaymaktadır. Yani ortam boyunca bir tek elastisite modülü olduğunu kabul eden bir modeldir. Modelde, elastisite modülü ve Poisson oranı olmak üzere iki temel değişken kullanılır. Zeminlerin homojen

olmayan malzemeler olmalarından dolayı, lineer elastik modelin kullanımı gerçekçi olmayan sonuçlar ortaya koymaktadır.

Elastoplastik modeller ise, göçme ve elastik olmayan şekil değiştirmeler gibi zemin davranış özelliklerini ele almak için kullanılabilir. Çoğu elastoplastik model aynı temel prensiplere dayanmaktadır ancak farklı göçme kriteri, akış kuralları ve sıkışabilirlik fonksiyonları kullanılır. Genel olarak zeminlerin davranışlarını modelleme konusunda ilk yaklaşım tam plastik bünye modeli olmaktadır. Suyu doymuş zeminler için kullanılan tam plastik model, genelleştirilmiş Hooke yasaları kullanılarak ve göçme kriterine matrik emme etkisinin dahil edilmesi ile birlikte suya doymuş olmayan zeminler için de genişletilebilir. Modelde parametre olarak zeminin elastisite modülü, içsel sürtünme açısı, Poisson oranı, dilatans açısı ve kohezyon değeri değişkenleri yer almaktadır. Tam plastik Mohr-Coulomb modelinin yeterli görülmemesine sebep olan eksik yönler; hacimsel ve kayma pekleşmesinin, başlangıç aşamasındaki yükleme ve boşaltma durumlarına ait elastik davranışı göz ardı etmesidir.

Suya doymuş olmayan zeminler için kritik durum çerçevesine dayanan çok sayıda model önerilmiştir. Bu modellerde, potansiyel göçme koşulları altında sıkıştırılan zeminlere önemli vurgu yapılmıştır[8]. Bu çalışma kapsamında yürütülen sayısal analizlerde baz alınan ve suya doymuş olmayan zeminlerin elastoplastik davranışını açıklayan en önemli model olan Barcelona Basic Model, Modifiye Cam Clay Model formülasyonuna matrik emme etkisinin de yansıtılmasıyla elde edilmiştir[25]. Modelde durum değişkenleri olarak, Bishop gerilmeleri ve matrik emme yer almaktadır. Barcelona Basic Model, matrik emme değerinin artışıyla birlikte suya doymuş olmayan durum için yapısal model haline gelir. Modelin temel özellikleri; suya doymuş olmayan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışını açıklaması, matrik emme ve net gerilmeler ile çalışması ve matrik emmedeki değişimlere bağlı olan elastik şekil değiştirme bileşenini göz önüne alması olarak sıralanabilir. Ancak Barcelona Basic Model hidrolik etkiler ile birleşik değildir. Yani matrik emme bağımsız olarak su muhtevası ve stres durumu ile ilgili olmalıdır. Modele göre dayanım, matrik emmenin artmasıyla birlikte artar[17].

Barcelona Basic Model üzerinden deformasyon hesabına dair en önemli eşitliklerden biri ise şu şekildedir;

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \quad (3.1)$$

$\lambda(s)$: Elastoplastik zemin sıkışabilirliği

$\lambda(0)$: Doygun durumdaki sıkışma katsayısı

β : Matrik emme ile birlikte rijitlikteki artış oranı (MPa^{-1})

r : Maksimum zemin rijitliği

$s = u_a - u_w$: Matrik emme (MPa)



SIKIŞTIRILMIŞ KİL DOLGUNUN DEFORMASYON DAVRANIŞININ ANALİZİ

Günümüzde, suya doygun olmayan zeminlerden inşa edilmiş sıkıştırılmış kil dolguların davranışları suya doygun zemin bünye modelleri ile dolgunun tamamen doygun şartlarda olduğu varsayılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak, sıkıştırılmış kil dolguların deformasyon davranışının modellenmesinde suya doygun olmayan zemin bünye davranışının dikkate alınması, arazi koşullarının daha gerçekçi modellenmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada, suya doygun olmayan koşullarda inşa edilen yüksek kil dolguların su etkisine maruz kalıp kalmama durumlarındaki deformasyon davranışı farklılıkları ve bu davranışa sıkıştırma su muhtevasının etkisi incelenmiştir.

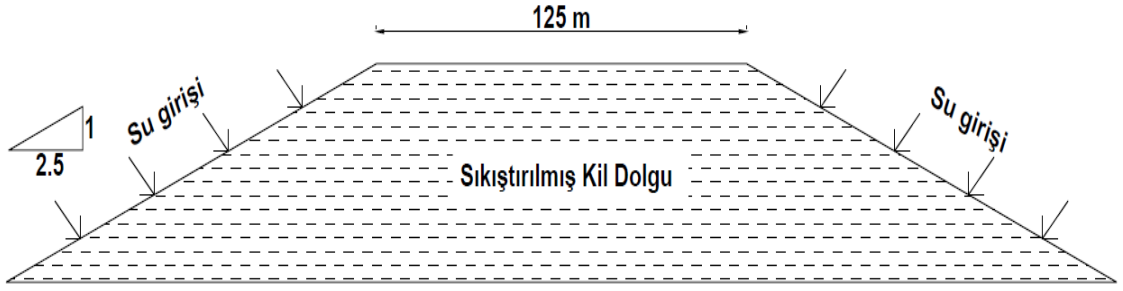
Çalışma kapsamında, sıkıştırılmış kil dolguların deformasyon davranışına etki eden parametrelerin araştırılması amacıyla “Code_Bright” programı kullanılmıştır. Program, Universitat Politecnica de Catalunya-Geoteknik Mühendisliği Departmanı tarafından geliştirilmiştir. Code_Bright, Barcelona Basic Model baz alınarak tasarlanmıştır. Code_Bright, eş zamanlı ve monolitik olarak; ısı transferi denge denklemlerini, su ve hava akışı denge denklemlerini ve mekanik denge denklemlerini çözebilmektedir. Net gerilme ve matrik emme olmak üzere iki bağımsız gerilme değişkeni açısından formüle edilmiştir[16].

COupled **DE**formation, **BR**ine, **G**as and **H**eat **T**ransport = **Code_Bright** [24]

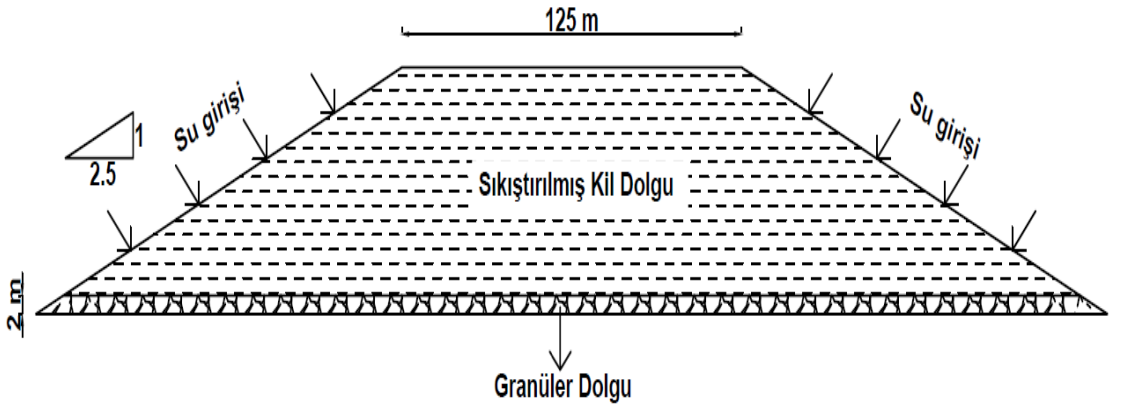
Farklı sıkıştırma su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolguların deformasyon davranışlarını analiz etmek amacıyla iki farklı türde dolgu kesiti modellenmiştir. İlk olarak dolgunun homojen olarak sıkıştırıldığı durum ele alınmış, analizler dolgu kesitinin her noktasında sıkıştırma su muhtevasının aynı olduğu kesitler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise dolgunun homojen olmadığı, farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip tabakalar halinde sıkıştırıldığı durum incelenmiştir.

4.1 Homojen Olarak Sıkıştırılmış Kil Dolgunun Deformasyon Davranışının Analizi

Çeşitli sıkıştırma su muhtevalarında homojen olarak (dolgu kesiti boyunca aynı sıkıştırma su muhtevasında) sıkıştırılmış kil dolguların inşa sonrası deformasyon davranışını analiz etmek için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterildiği üzere 50 m yüksekliğinde iki farklı dolgu kesiti modellenmiştir. Şekil 4.1’de gösterilen kesit homojen olarak sıkıştırılan bir kil dolgu kesitini, Şekil 4.2’de gösterilen dolgu kesiti ise homojen olarak sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunu temsil etmektedir. Her iki dolgu kesiti de dolgu şevlerinden su girişine maruz bırakılmış ve çeşitli sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların ıslanma durumunun deformasyon davranışına olan etkisi sayısal analizlerle incelenmiştir.

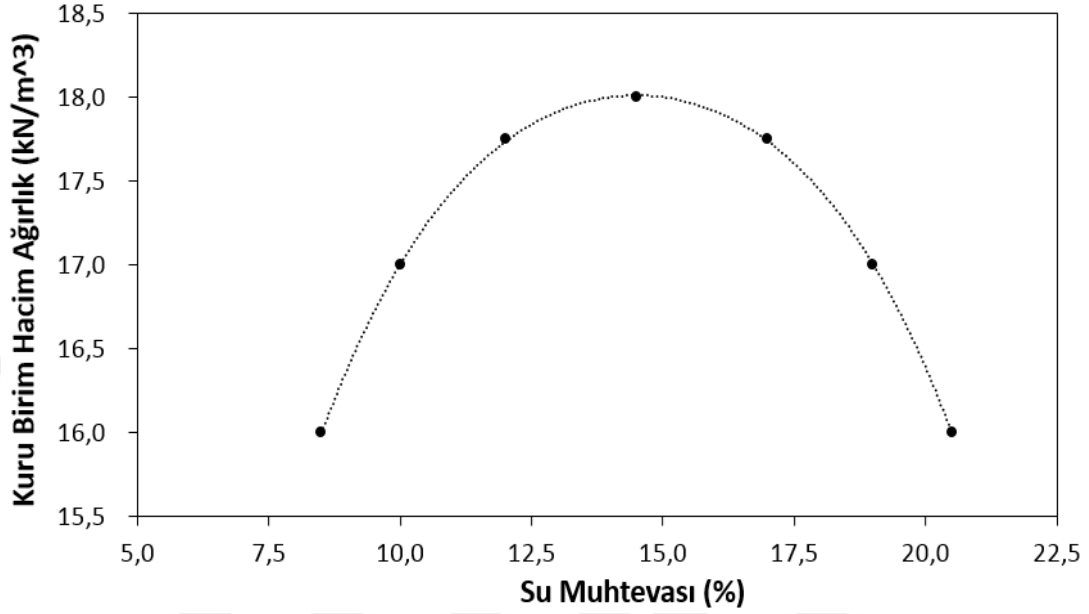


Şekil 4.1 Homojen sıkıştırılmış analizlerde kullanılan 50 m yüksekliğindeki kil dolgu kesiti



Şekil 4.2 Homojen sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m granüler tabaka yerleştirilmesi durumundaki dolgu kesiti

Çalışma kapsamındaki analizlerde, dolgu kesitinde Alonso vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada yer alan, kuru birim hacim ağırlığı 18 kN/m^3 ve optimum su muhtevası %14.5 olan düşük plastisiteli kil zemin kullanılmıştır. Kil zemine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 4.3'te verilmiştir.



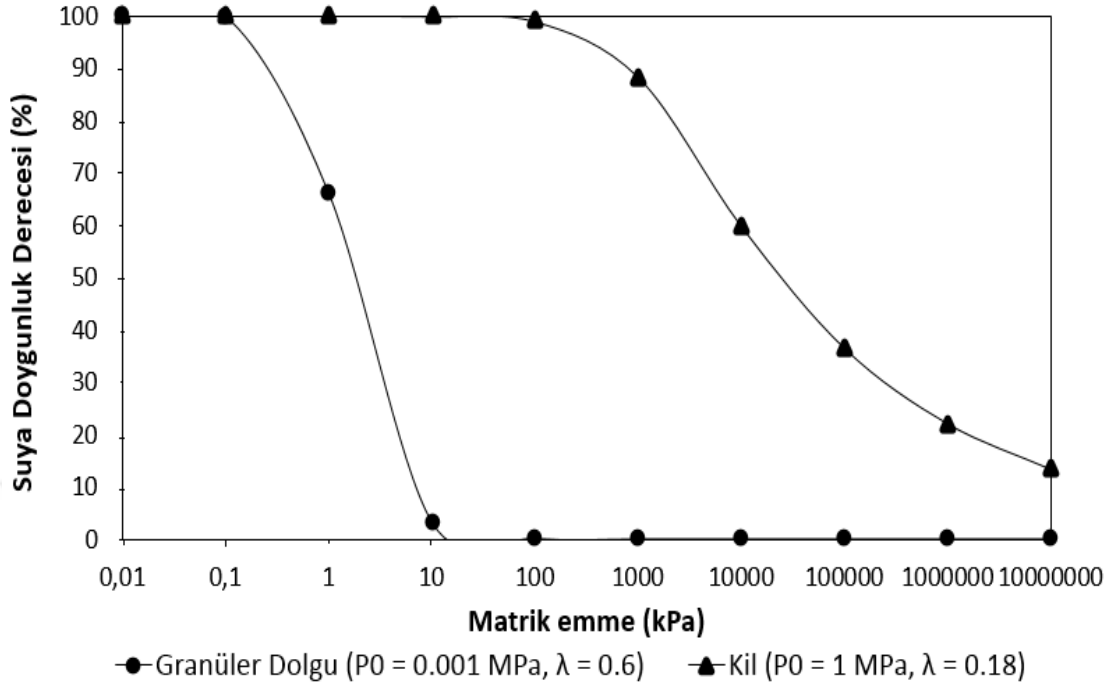
Şekil 4.3 Analizlerde kullanılan kil zemine ait kompaksiyon eğrisi

Kırmataş granüler dolgu tabakası için gerekli olan hidromekanik malzeme parametreleri için ise Alonso vd. (2005) yapılan çalışmada yer alan granüler zemine ait değerler kullanılmıştır. Çalışma kapsamındaki suya doymun olmayan sıkıştırılmış kil dolgunun ve kırmataş granüler dolgu tabakasının Barcelona Basic Model parametreleri Olivella vd. (2020) [26] tarafından yapılan çalışmadaki baraj örneği değerlerinden alınmış olup değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Çalışma kapsamında kullanılan sıkıştırılmış kil dolgu ve kırmataş granüler dolgu tabakası için Barcelona Basic Model parametreleri [26]

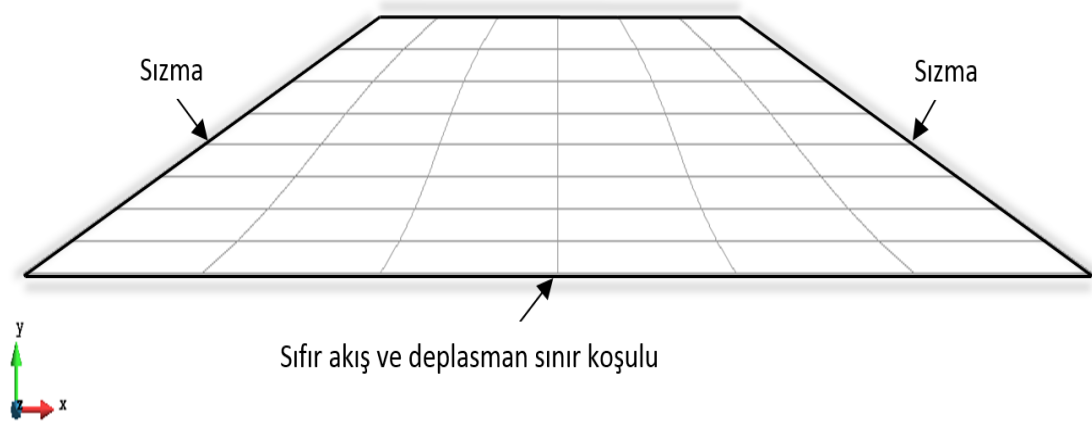
Parametre tanımı	Sembol	Birim	Sıkıştırılmış Kil Dolgu	Kırmataş Granüler Dolgu
Visko-plastik sıkışabilirlik parametresi	κ	-	0.0001	0.0001
Doygun durumdaki visko-plastik sıkışma parametresi	$\lambda(0)$	-	0.02	-
Maksimum zemin rijitliği	r	-	0.7	-
Dane yerleşimine bağlı sıkışma parametresi	λ_i	-	-	0.025
Klastik deformasyon mekanizmasına bağlı sıkışma parametresi	λ_d	-	-	0.028
Matrik emme ile birlikte rijitlikteki artış oranı	β	MPa ⁻¹	12	-
Matrik emme ile birlikte sıkışmadaki artış oranı	α_s	-	-	0.01
Referans gerilme değeri	p_c	MPa	0.02	0.01
Sabit	k_2	-	-0.301	-0.001
Sabit	k_3	-	0.301	0.001

Çalışma kapsamındaki analizlerde kullanılan kil zemin ve granüler dolgu zemine ait zemin-su karakteristik eğrileri ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Analizlerde kullanılan zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrileri

Sayısal analizlerde farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların deformasyon davranışlarını gözlemleyebilmek için dolguların su ile etkileşimini incelemeye olanak sağlayacak sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, dolgu tabanının düşey ve yatay yönde hareketi engellenmiş ve her iki şev yüzeyinden dolguya su girişine izin verilmiştir. Deformasyon davranışı incelenen sayısal modellerde dolgu tabanı geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Sayısal analizlerde, sıkıştırılmış kil dolguların su etkisine maruz kalma süresi 300 gün olarak tanımlanmıştır. Analizlerde dikkate alınan modele ait sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları

Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların su etkisine maruz kalması durumundaki deformasyon davranışlarını incelemek için dolgunun; optimum sıkıştırma su muhtevasının kuru tarafında, optimum sıkıştırma su muhtevasının ıslak tarafında ve tamamen doygun durumlarda sıkıştırılması halindeki deformasyon davranışları sayısal analizlerle incelenerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, analizlerde farklı sıkıştırma su muhtevasının etkisini inceleyebilmek için kil dolguların farklı sıkıştırma koşullarını yansıtan Model A1, Model A2, Model B, Model C, Model D ve Model E modelleri oluşturulmuştur. Bu sayısal modellerde, farklı sıkıştırma su muhtevası etkisini analizlere yansıtabilmek amacıyla farklı başlangıç matris emme değerleri (s_0) kullanılmıştır. Sıkıştırılmış kil dolgu ve sıkıştırılmış kil dolgu tabanına yerleştirilen granüler dolgu tabakası için sayısal analizlerde kullanılan zemin-su karakteristik eğrisi parametreleri Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2 Homojen sıkıştırılmış kil dolgularda farklı sıkıştırma koşullarını yansıtan modeller için başlangıç matrik emme değerleri ve zemin-su karakteristik eğrisi parametreleri

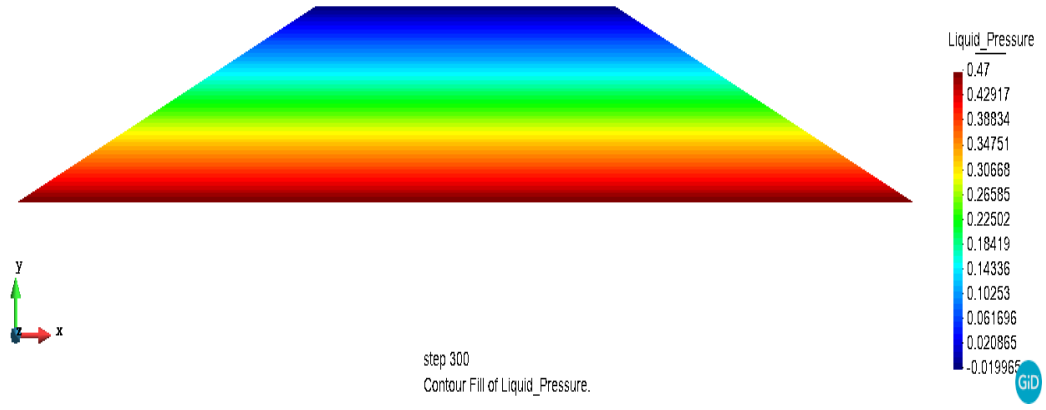
Sayısal Model	Sıkıştırma Koşulları	S_0 (%) ^a	s_0 (MPa) ^b	λ	P_0 (MPa)
Model A1	Kuru Taraf	55	15	0.18	1
Model A2*	Kuru Taraf	55	15	0.18	1
	Granüler Dolgu	30	0.002	0.6	0.001
Model B	Islak Taraf-1 (Optimum + %2.7)	75	3.0	0.18	1
Model C	Islak Taraf-2 (Optimum + %5)	87	1.0	0.18	1
Model D	Islak Taraf-3 (Optimum + %7)	91	0.8	0.18	1
Model E	Tamamen Doygun	100	0.001	0.18	1

* Model A2: Şekil 4.2'de gösterilen, kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m yüksekliğinde granüler dolgu tabakası yerleştirilmesi durumundaki sayısal analizi temsil etmektedir.

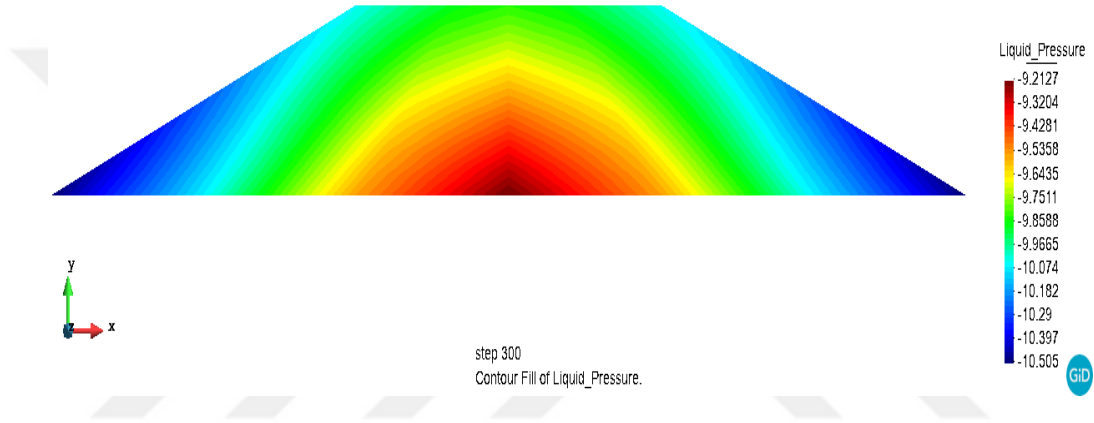
^a Suya Doygunluk Derecesi

^b Başlangıç Matrik Emme Değeri

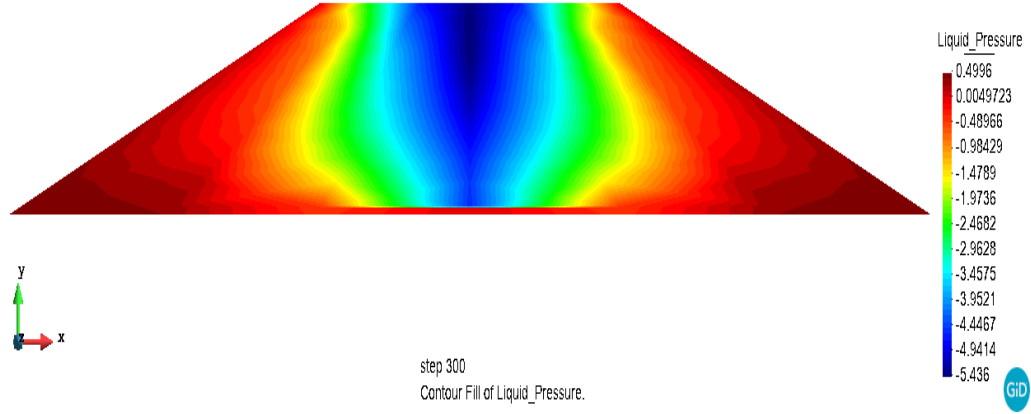
Sayısal analizlerde tanımlanan başlangıç matrik emme koşullarına göre, Model A1 için analiz başlangıcındaki suya doygunluk derecesi dağılımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil dolgu kesitinde başlangıç durumu için hesaplanan suya doygunluk derecesi değerleri %49-%69 arasında değişmekte olup, kil dolgunun büyük bir kısmında suya doygunluk derecesinin %55 mertebesinde olduğu görülmektedir. Buradan, Tablo 4.2'de verilen başlangıç matrik emme değeri-suya doygunluk derecesi değerlerinin örtüştüğü gözlemlenmektedir. Analiz sonunda ise dolgu tamamen doygun hale geçmektedir.



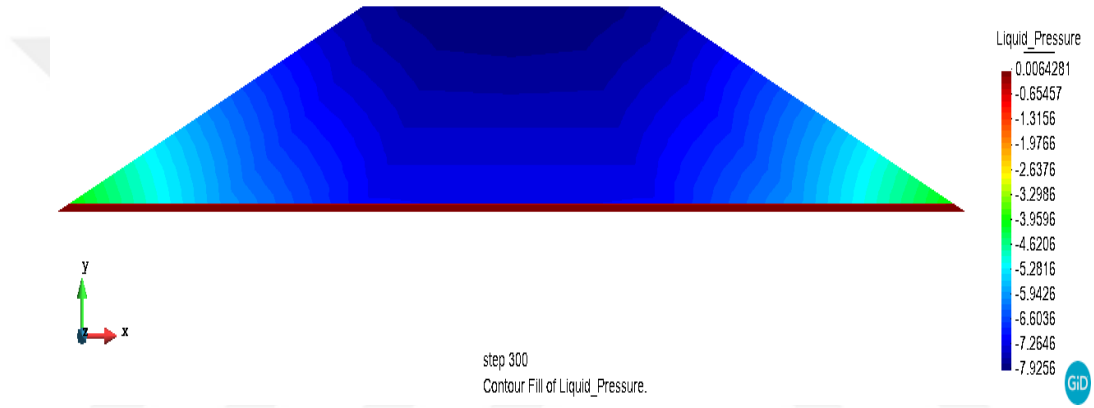
Şekil 4.7 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)



Şekil 4.8 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)



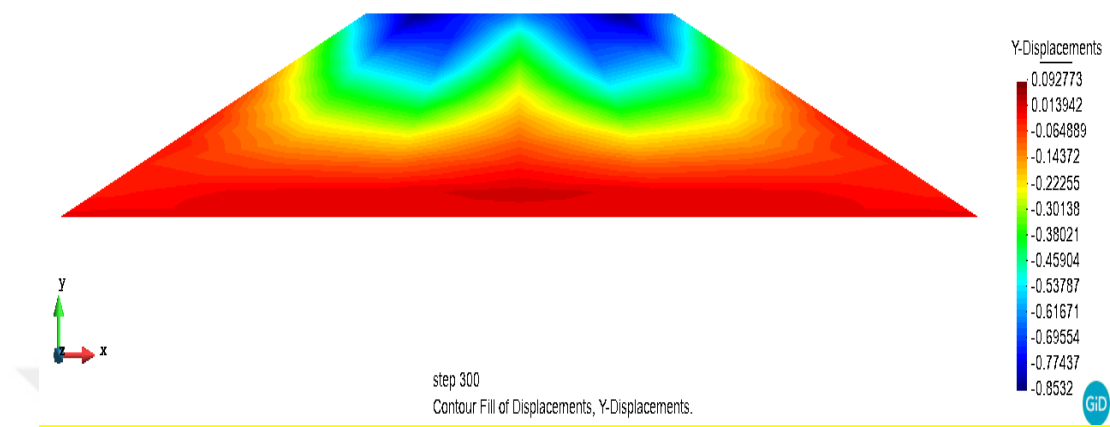
Şekil 4.9 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)



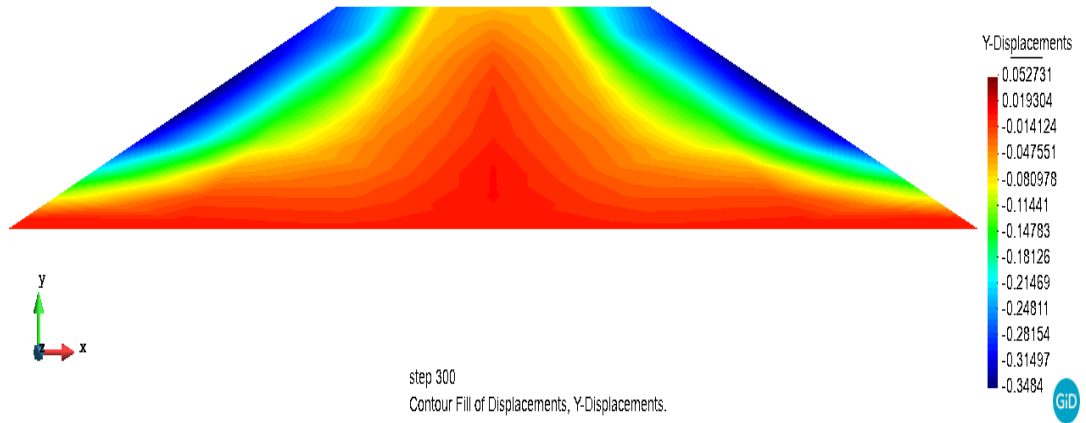
Şekil 4.10 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)

Oluşturulan modellerde sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda gelişen deformasyon davranışlarını karşılaştırabilmek amacı ile analiz sonundaki düşey yer değiştirme dağılımları Model A1 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için Şekil 4.11’de, Model A2 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için Şekil 4.12’de, Model B (optimum+%2.7 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için Şekil 4.13’te, Model C (optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için Şekil 4.14’te, Model D (optimum+%7 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için Şekil 4.15’te ve Model E (tamamen doygun durumda sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için Şekil 4.16’da gösterilmiştir.

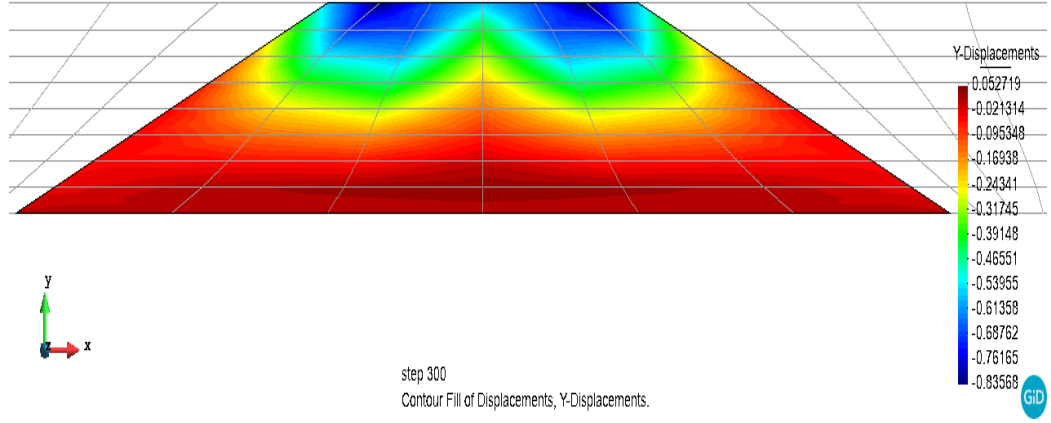
Düsey yer değiştirmeler, sıkıştırılmış kil dolguların üşt yüzeyine yakın kısımlarda yoğunlaşmış olup, kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakası yerleştirilen durumu temsil eden Model A2 için ise dolgu şev yüzeylerine yakın kısımlarda yoğunlaşmıştır.



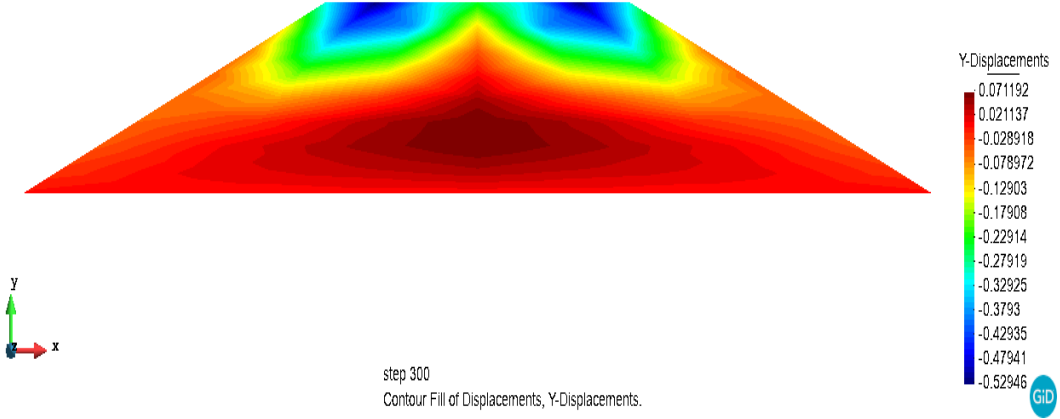
şekil 4.11 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düsey yer değiştirmeler dağılımı (m)



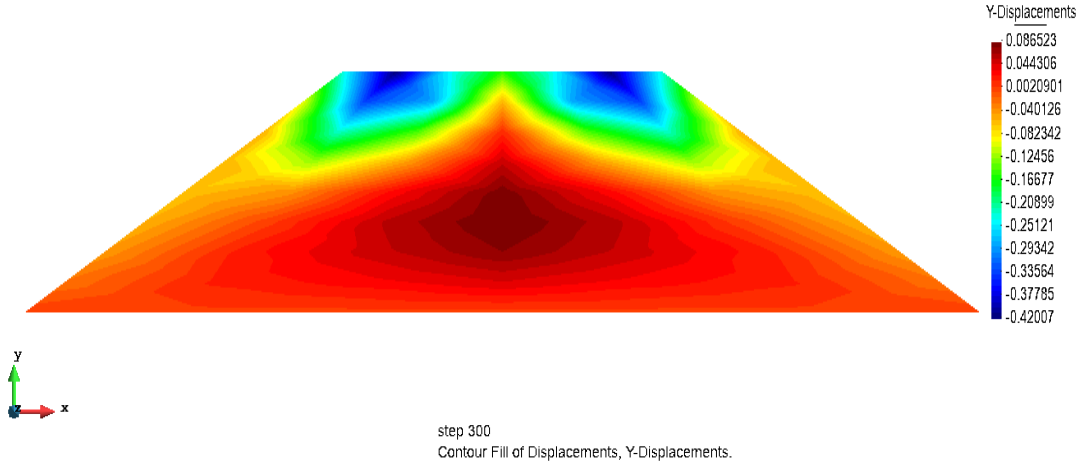
şekil 4.12 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düsey yer değiştirmeler dağılımı (m)



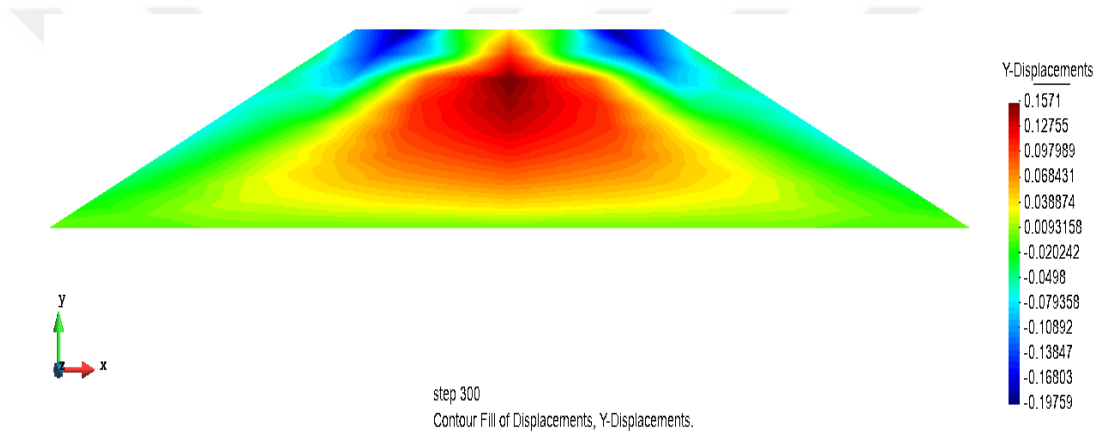
Şekil 4.13 Model B için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)



Şekil 4.14 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)

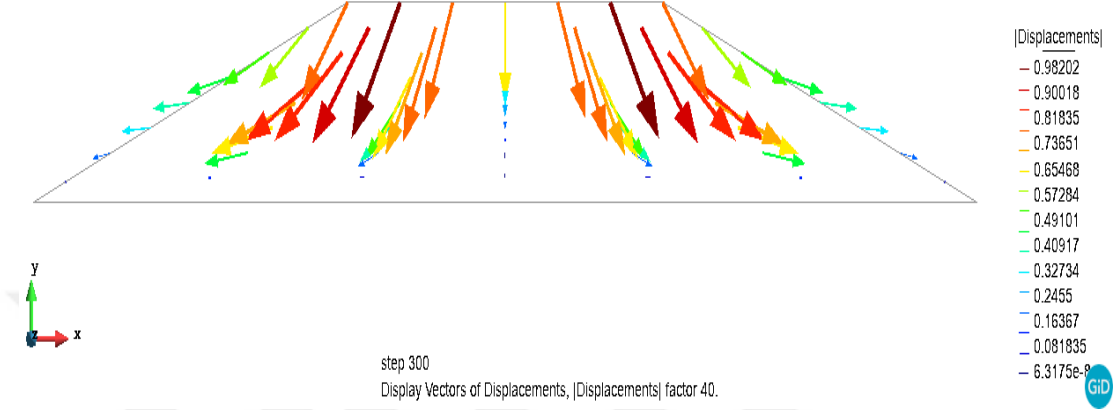


Şekil 4.15 Model D için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)

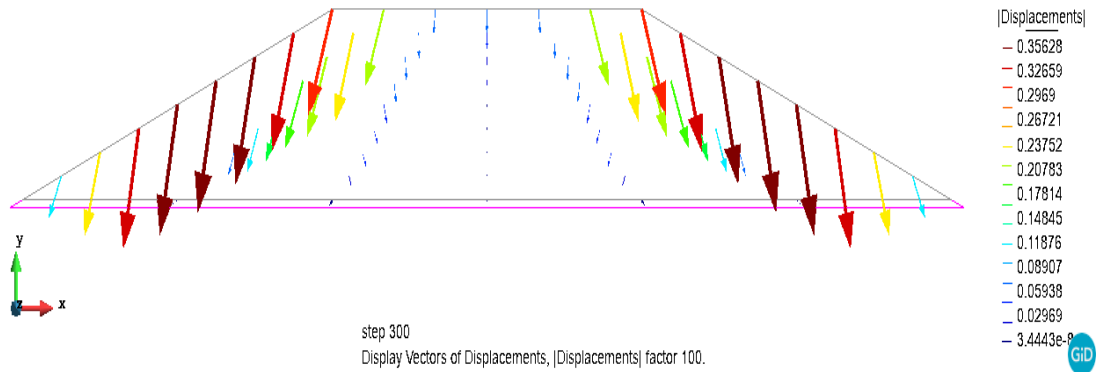


Şekil 4.16 Model E için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)

Model A1 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) ve Model A2 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için dolgunun su etkisine maruz kalması halinde analiz sonundaki yer değiştirmelerin vektörel olarak gösterimleri ise Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

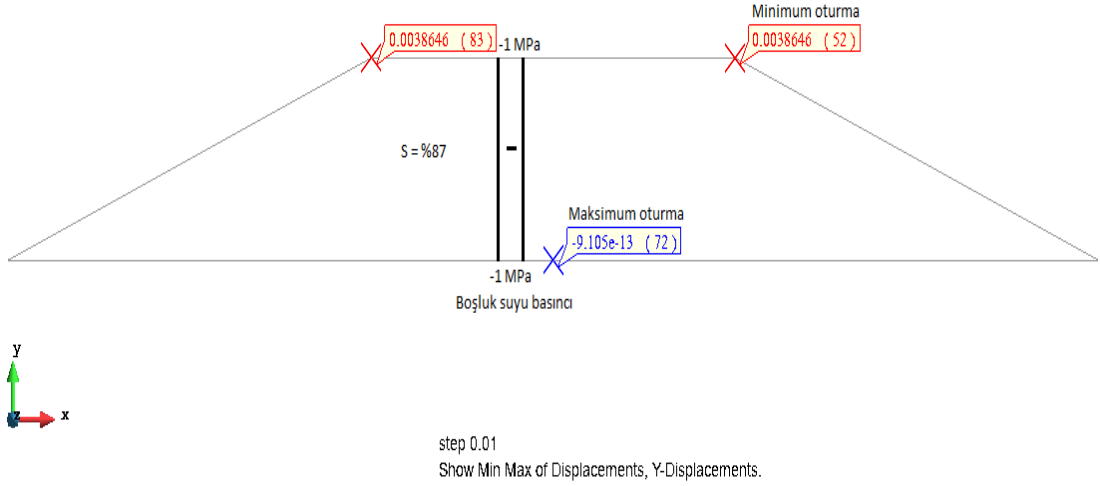


Şekil 4.17 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi

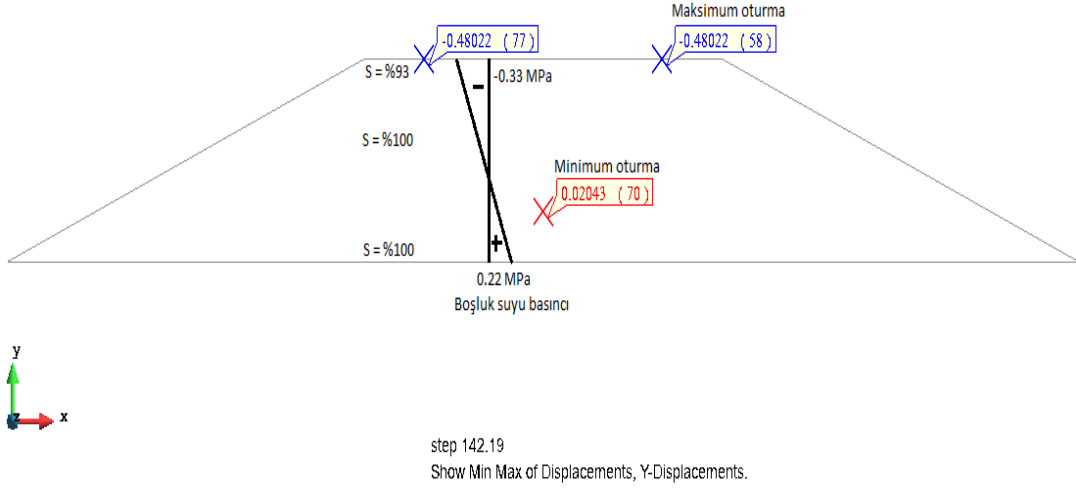


Şekil 4.18 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi

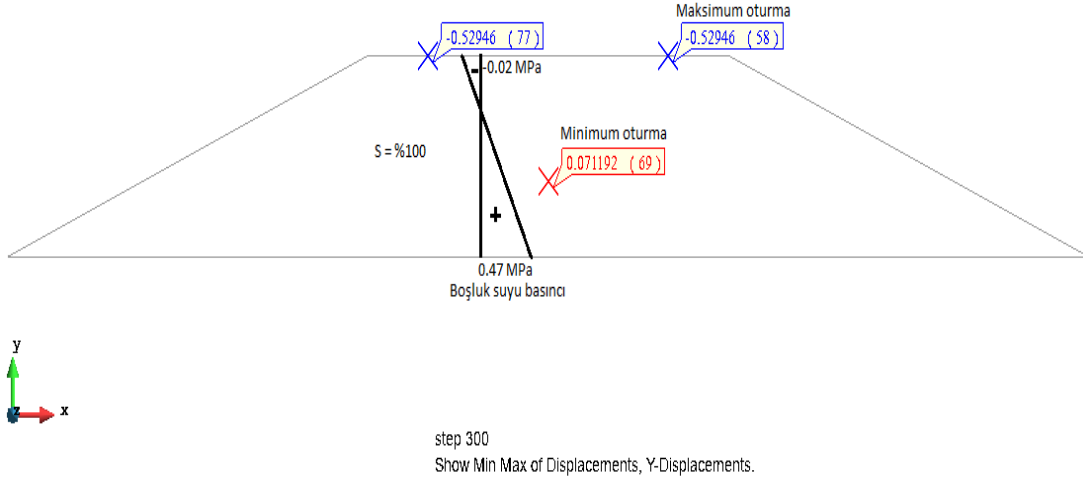
Sıkıştırılmış kil dolgularda, su etkisi nedeniyle meydana gelen oturmaları analiz edebilmek için kil zeminde meydana gelen boşluk suyu basıncı ve suya doygunluk derecesi değişimlerini de takip etmek gerekmektedir. Bu amaçla, sayısal analiz süresince sıkıştırılmış kil dolgunun suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerleri değişimini bir arada gözlemlemek amacıyla Model C (optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için oluşturulan gösterimler Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.19 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz başlangıcındaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi



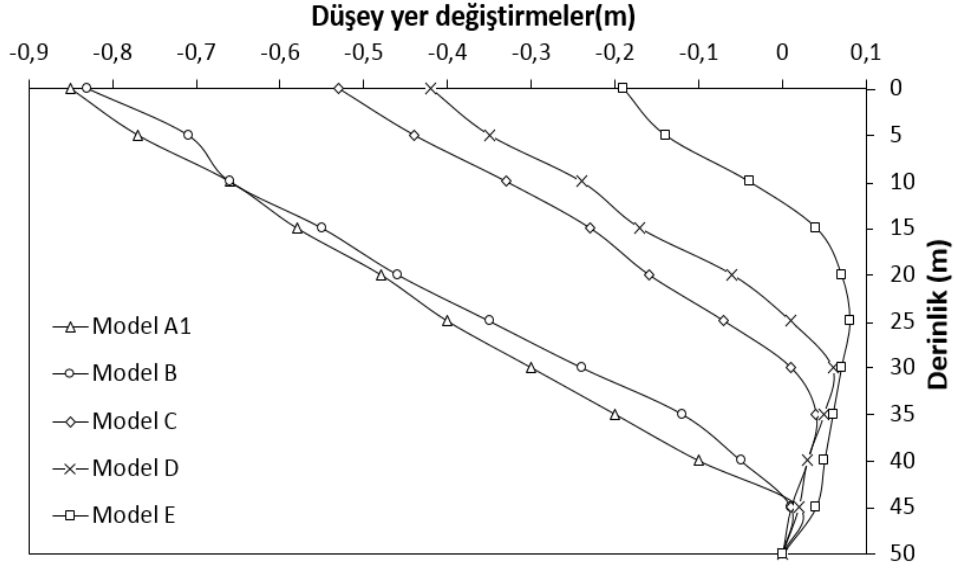
Şekil 4.20 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analizin orta aşamasındaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi



Şekil 4.21 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerlerinin gösterimi

Şekil 4.19’da Model C (optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için başlangıç durumundaki suya doygunluk derecesi, boşluk suyu basıncı ve maksimum-minimum oturma değerleri gösterilmiştir. Optimum su muhtevasının ıslak tarafındaki sıkıştırma durumunu yansıtabilmek amacıyla Model C için kullanılan 1 MPa başlangıç matrik emme değeri, analizlerde hava basıncı ihmal edildiği için -1 MPa başlangıç boşluk suyu basıncı olarak karşımıza çıkmaktadır. Benzer şekilde başlangıç matrik emme değerine karşılık gelen suya doygunluk derecesi değeri ilk etapta %87 olarak gözlemlenmektedir. Sonraki aşamalarda ise dolguya su girişi ile birlikte sıkıştırılmış kil dolgunun suya doygunluk derecesi artış göstermekte, pozitif boşluk suyu basınçları oluşmaya başlamakta ve buna bağlı olarak matrik emme değerinde düşüş meydana gelmektedir. Matrik emme değerindeki bu düşüşten dolayı meydana gelen dayanım kaybı nedeniyle ise oturma değerlerinde artışlar gözlemlenmektedir.

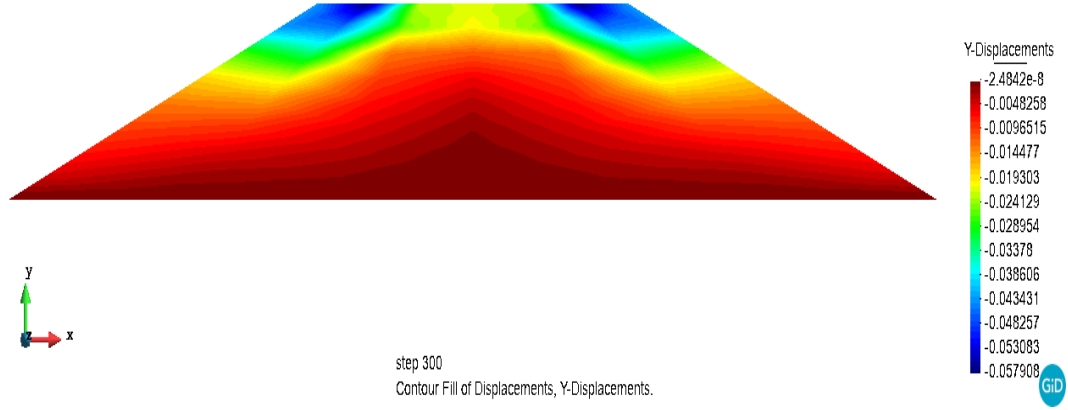
Oluşturulan modeller için kil dolgunun farklı sıkıştırma su muhtevalarında homojen olarak sıkıştırılması ve su etkisine maruz kalması halinde, analiz sonundaki düşey yer değiştirmelerinin dolgu düşey ekseninde derinlik boyunca değişimleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



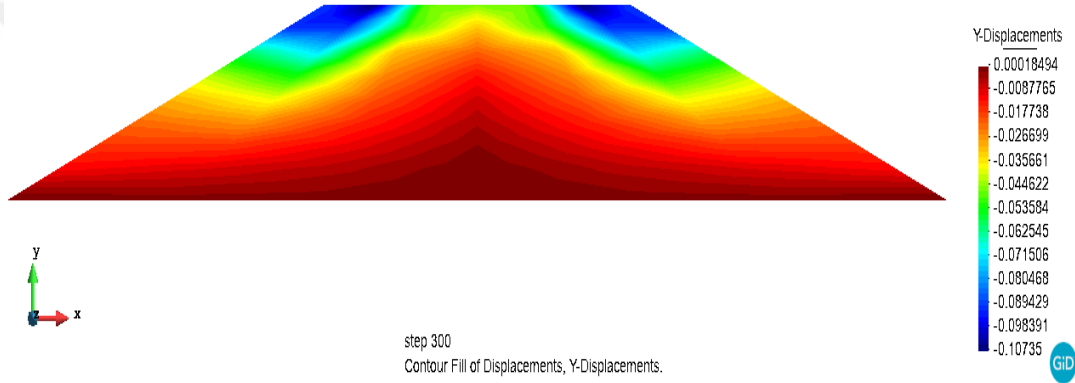
Şekil 4.22 Farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip kil dolguların su etkisine maruz kaldıkları durumda dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı

Şekil 4.22’de görüldüğü üzere, kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgular su etkisine maruz kaldığında, daha yüksek su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgulara göre daha fazla deformasyon davranışı sergilemektedir. Kuru tarafta sıkıştırılmış dolguyu temsil eden Model A1 için maksimum düşey yer değiştirme değeri 85.3 cm olarak gözlemlenirken, dolgunun ıslak tarafta sıkıştırılması durumunda ıslanmadan kaynaklı oturmaların azaldığı görülmüştür. Dolgunun doygun duruma çok yakın bir su muhtevasında sıkıştırılması durumunda (Model E) ise ıslanma etkisi nedeniyle gerçekleşen düşey yer değiştirmelerin 19.7 cm mertebelerine kadar düştüğü görülmektedir.

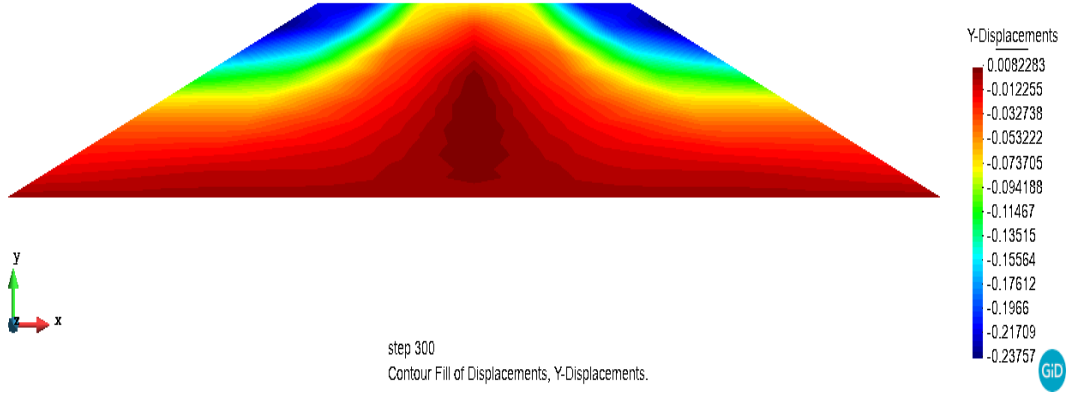
Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumundaki deformasyon davranışlarını incelemek için benzer analizler gerçekleştirilmiş ve dolguların su etkisine maruz kaldığı durumdaki deformasyon davranışları ile karşılaştırılmıştır.



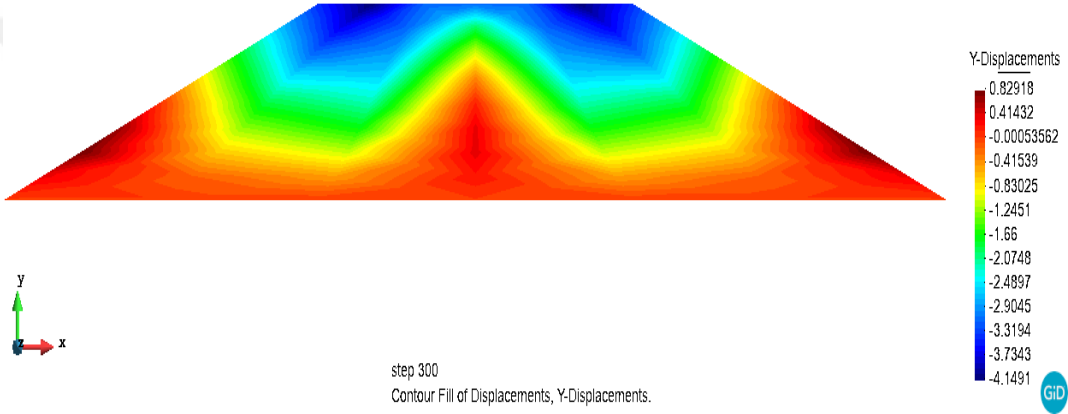
Şekil 4.23 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)



Şekil 4.24 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)



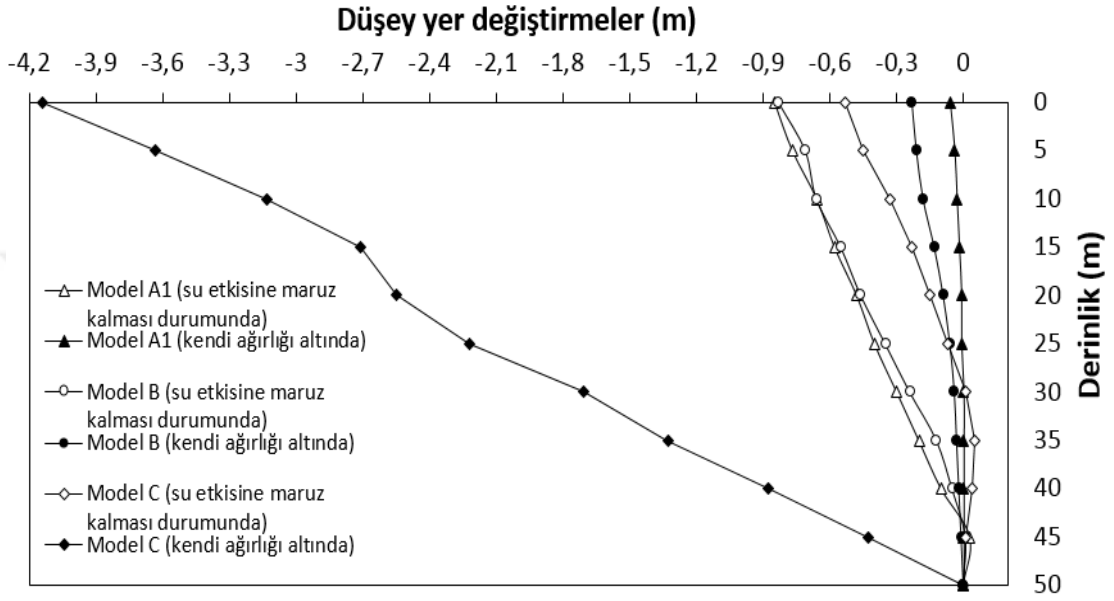
Şekil 4.25 Model B için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)



Şekil 4.26 Model C için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)

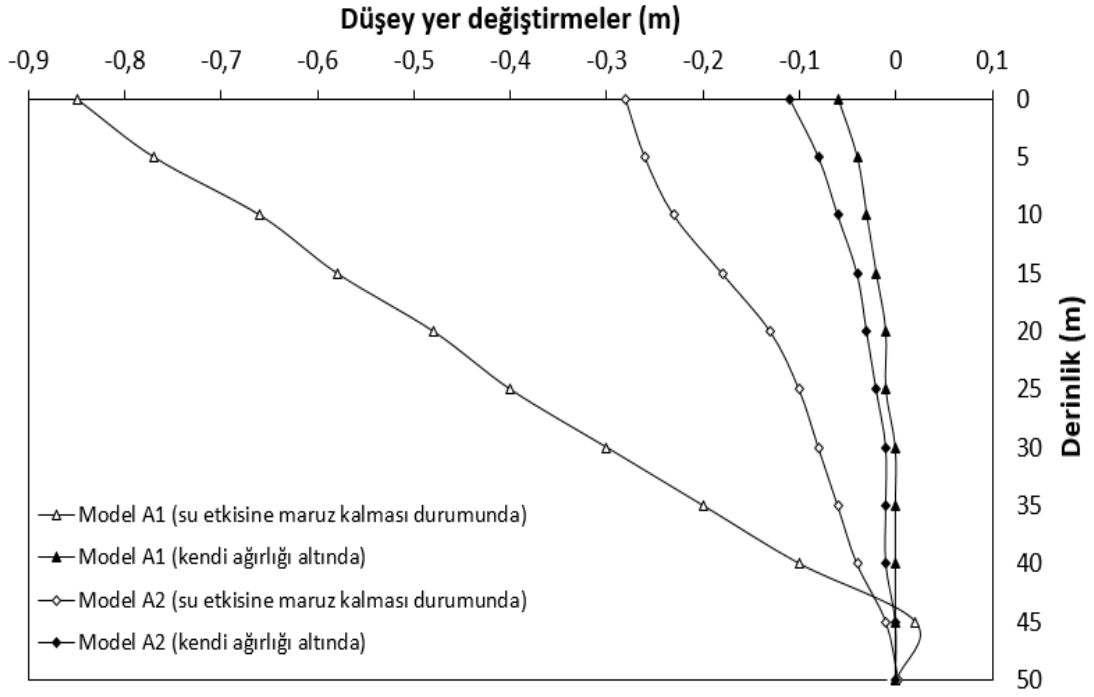
Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde; optimumun kuru tarafında sıkıştırılan kil dolguların su etkisine maruz kalmadığı durumdaki yer değiştirme değerlerinin ıslanma durumundaki yer değiştirme değerlerine göre daha az olduğu, diğer taraftan optimum su muhtevasından %5 ve daha fazla ıslak koşullarda sıkıştırılan kil dolgularında ise bünyelerindeki su içeriği etkisi ve düşük matrik emme değerleri nedeniyle kendi ağırlıkları altında çok daha yüksek yer değiştirmelerin meydana geldiği, Model D (optimum+%7 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) ve Model E (tamamen doygun durumda sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) özelinde ise göçme davranışı sergilendiği görülmektedir. Şekil 4.27'de Model A1 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu

kesiti), Model B (optimum+%2.7 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) ve Model C (optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) için, dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerin derinlik ile değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. İçi boş işaretleyicili eğriler dolgunun su etkisine maruz kaldığı analizleri temsil ederken, içi dolu işaretleyiciler dolgunun su etkisine maruz kalmadığı kendi ağırlığı altındaki analizleri temsil etmektedir.



Şekil 4.27 Farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip kil dolguların dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı

Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolguların ıslanması durumunda meydana gelebilecek yüksek mertebelerdeki deformasyonları ve buna bağlı olarak gelişebilecek olası göçmeleri engellemek amacı ile sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmiş ve bu granüler dolgu tabakasının deformasyon davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla yapılan analizlerde Şekil 4.2'de verilen dolgu kesiti (Model A2) göz önüne alınmıştır. Granüler dolgu tabakasının başlangıç matrik emme değeri ve zemin-su karakteristik eğrisi parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği durum için (Model A2), dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumları ayrı ayrı analiz edilmiş ve hesaplanan düşey yer değiştirmelerin dolgu düşey eksenini boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.28'de verilmiştir.

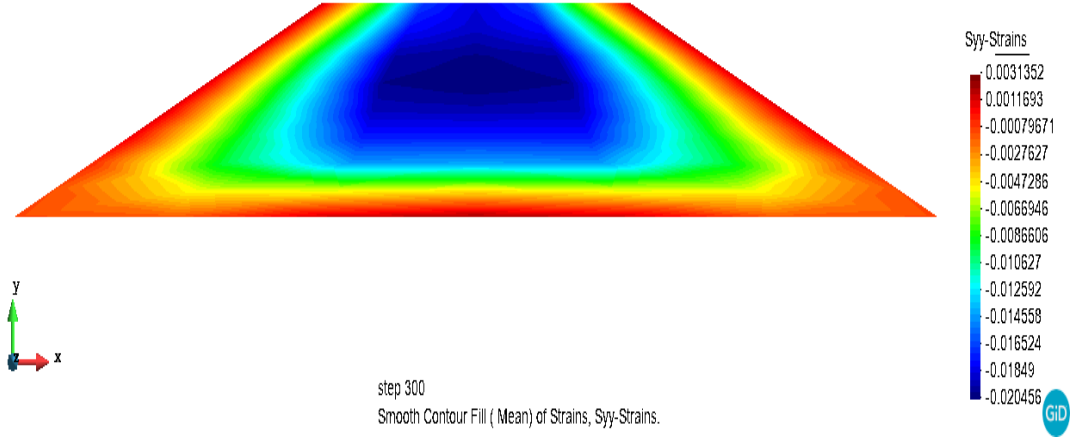


Şekil 4.28 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenı boyunca düşey yer değiştirmelerin dağılımı

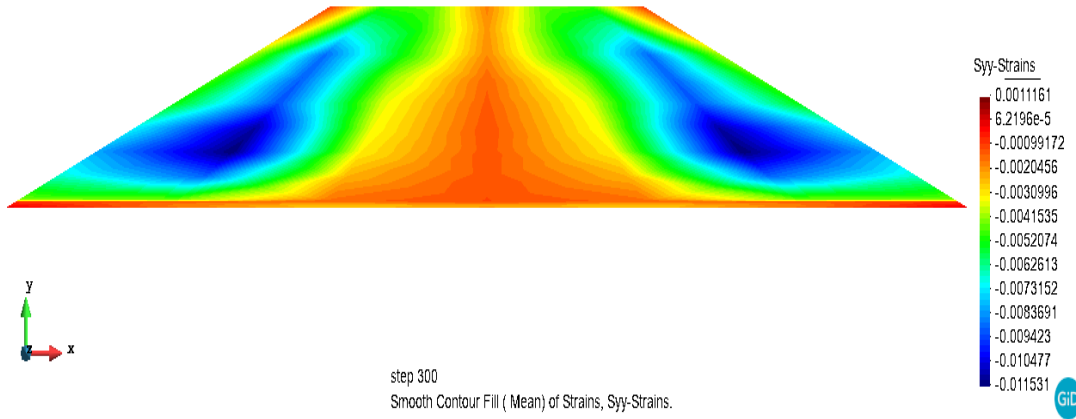
Şekil 4.28'de görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil dolguya su girişinin olmadığı ve dolgunun kendi ağırlığı altında sıkıştığı durumda meydana gelen düşey yer değiştirme değerleri her iki model için de dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumda meydana gelen düşey yer değiştirmelere göre daha düşük mertebelindedir. Sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakasının yerleştirildiği Model A2 için ise dolgu düşey eksenı boyunca ıslanmaya bağlı olarak meydana gelen düşey yer değiştirmelerin (maksimum 28.4 cm), granüler tabakanın olmadığı durumdaki yer değiştirmelere (maksimum 85.3 cm) göre daha düşük olduğu ve böyle bir granüler tabaka yerleştirilmesinin, dolguya su girişinin olduğu durumlarda düşey yer değiştirmeleri önemli ölçüde azaltan bir uygulama olduğu gözlemlenmektedir.

Model A1 ve Model A2 için düşey şekil değiştirme dağılımları da gözlemlenmiş olup, dolgunun su etkisine maruz kaldığı analiz için düşey şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da ve dolgunun su etkisine maruz kalmayıp

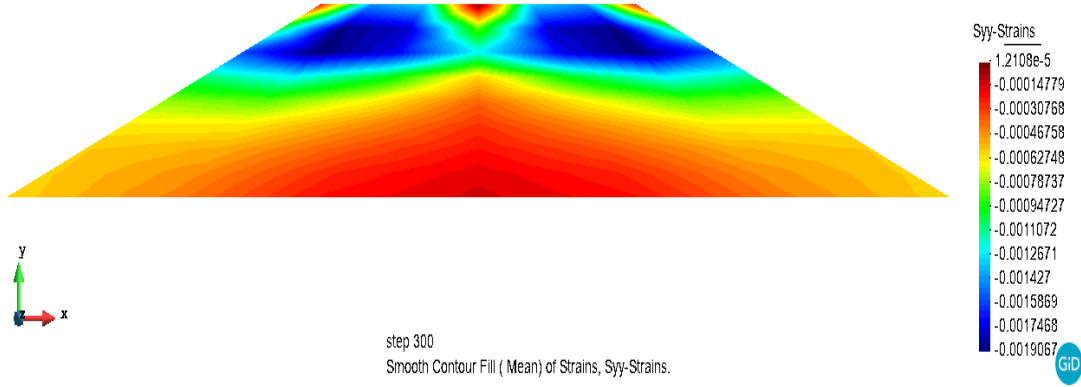
sadece kendi ağırlığı altında yapılan analizler için düşey şekil değiştirme dağılımları ise Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



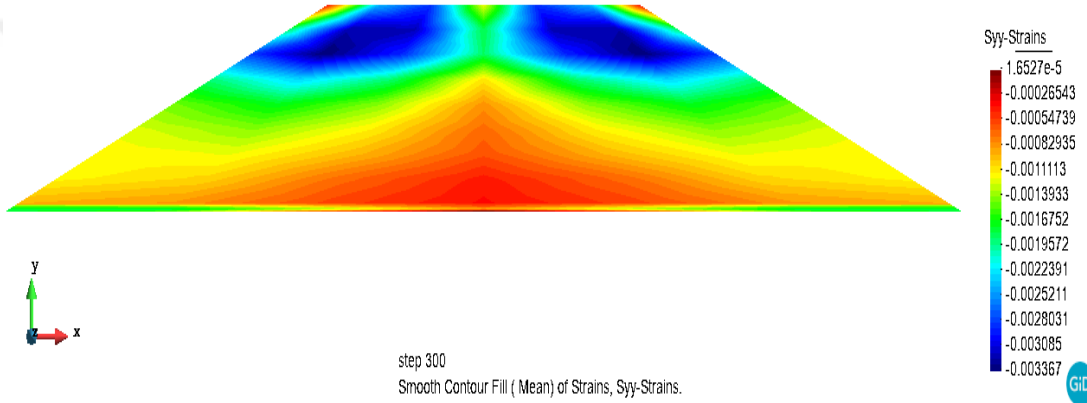
Şekil 4.29 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı



Şekil 4.30 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı

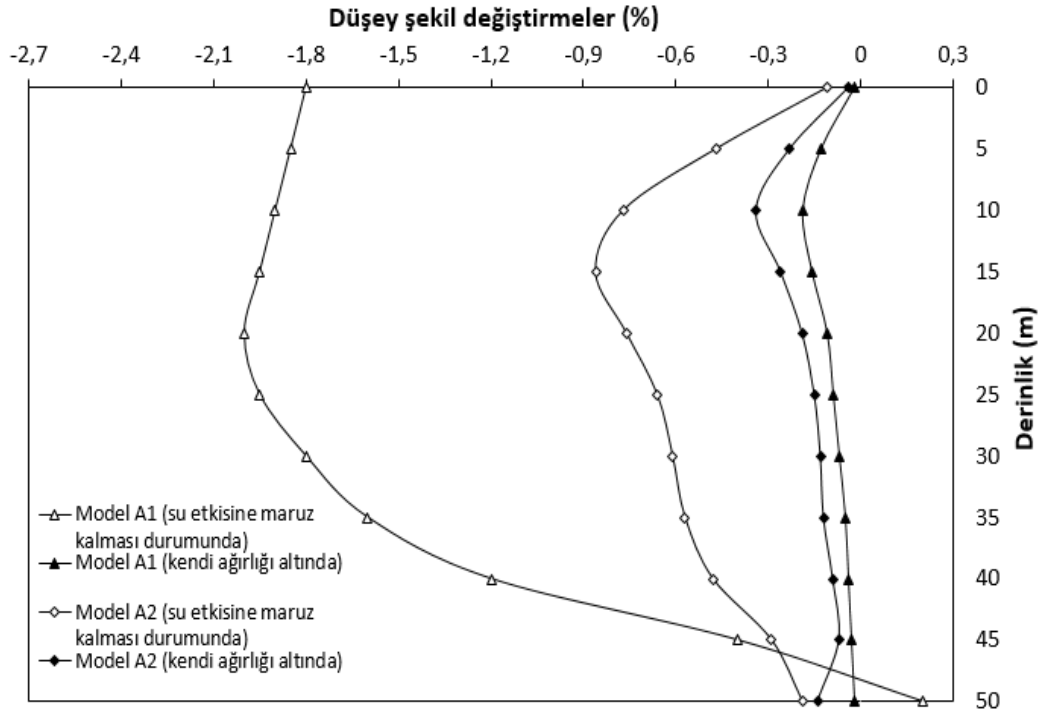


Şekil 4.31 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı



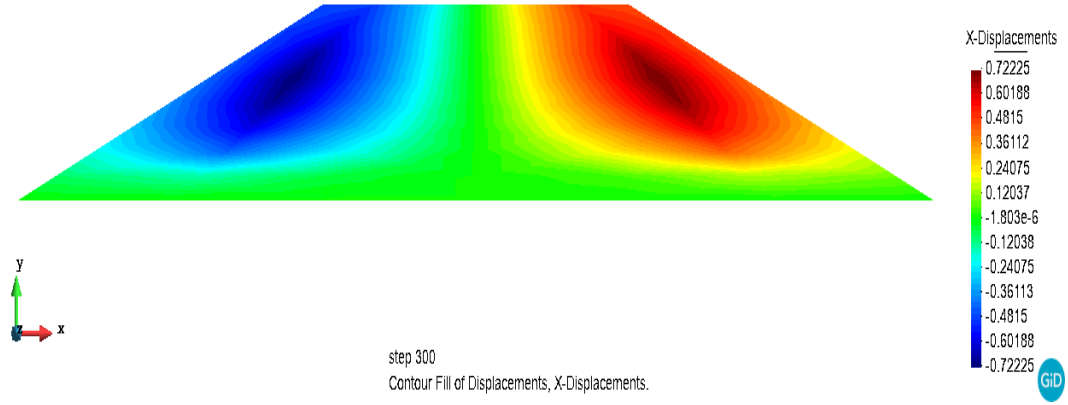
Şekil 4.32 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonucunda düşey şekil değiştirmelerin dağılımı

Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği durum için (Model A2), dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumu için hesaplanan düşey şekil değiştirmelerin dolgu düşey eksenini boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.33'te görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil dolgu tabanında granüler dolgu tabakasının olmadığı durumda (Model A1) dolgu su etkisine maruz kaldığında düşey şekil değiştirmeler dolgunun orta kısımlarında %2 mertebelerine kadar yaklaşırken, kil dolgu tabanına granüler tabaka yerleştirilmesi durumunda (Model A2) ise düşey şekil değiştirmeler izin verilebilir mertebelerde kalmaktadır.

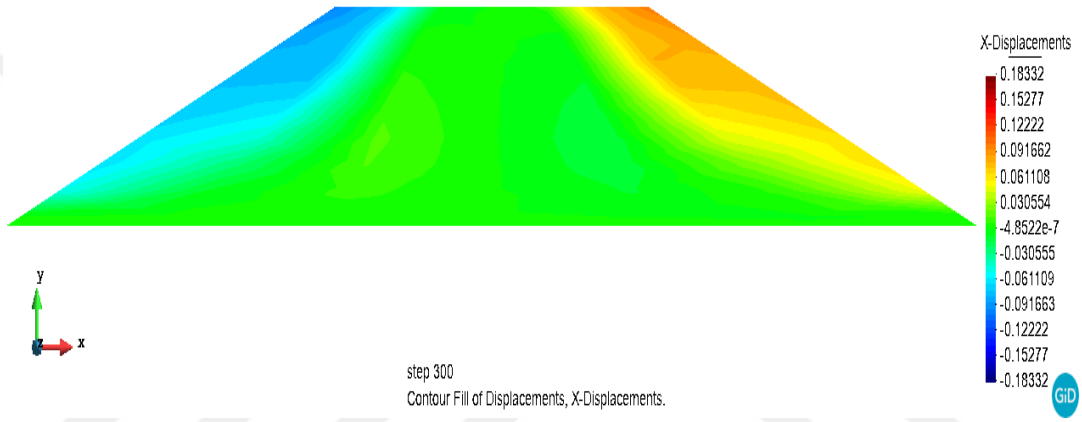


Şekil 4.33 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca düşey şekil değıştirmelerin dağılımı

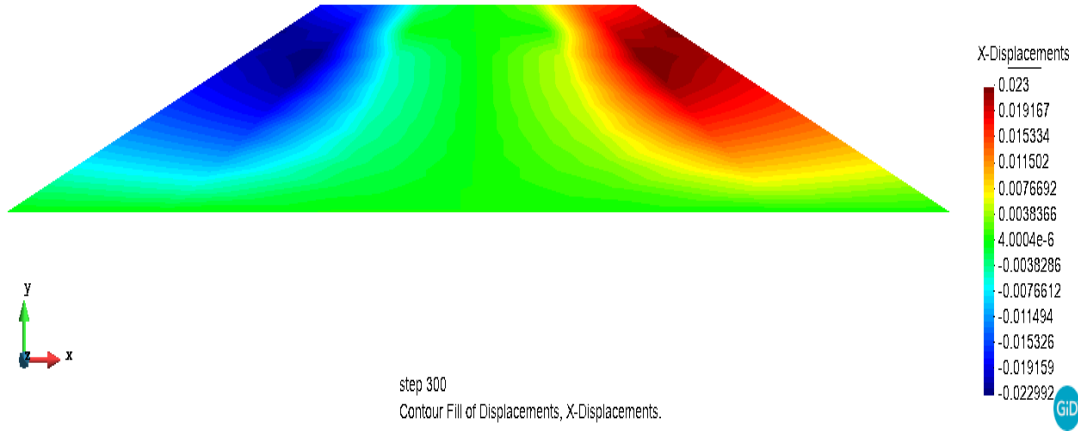
Model A1 ve Model A2 için yataydaki deformasyon davranışı ayrıca gözlemlenmiş olup, sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumdaki yatay yer değıştirme değeri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te, dolgunun su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında analiz edildiği durumdaki yatay yer değıştirme değeri Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



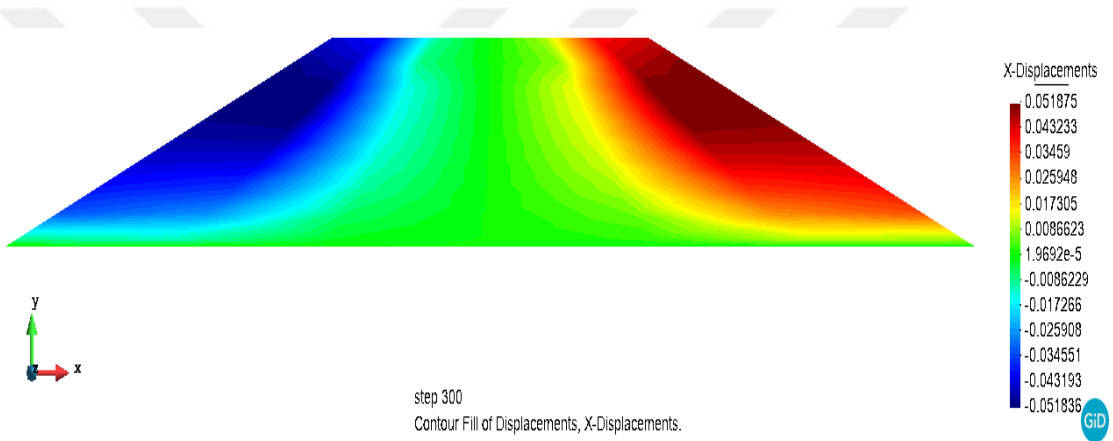
Şekil 4.34 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı (m)



Şekil 4.35 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı (m)



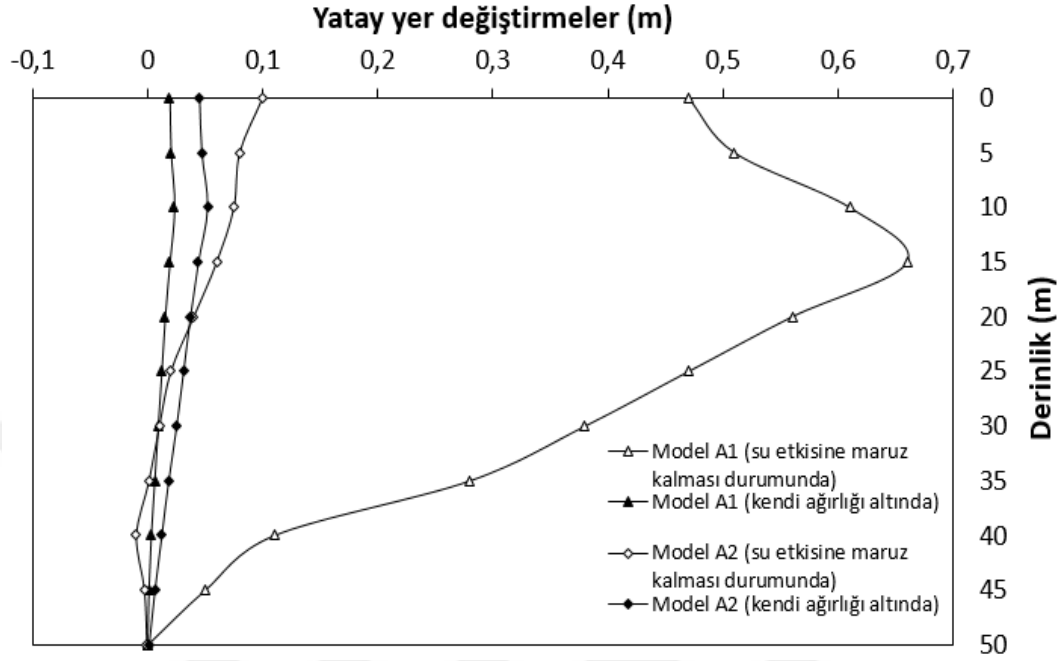
Şekil 4.36 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı (m)



Şekil 4.37 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı (m)

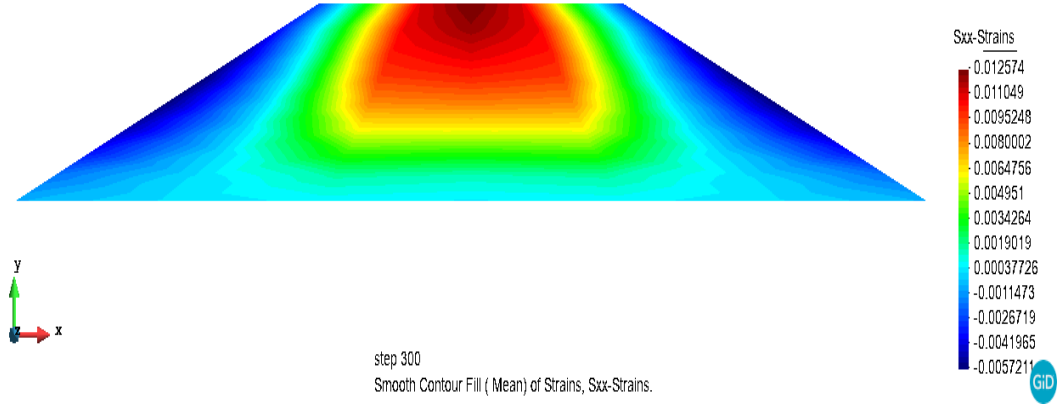
Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği durum için (Model A2), dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumu için hesaplanan yatay yer değiştirmelerin dolgu düşey eksenini boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Şekil 4.38'de görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil dolgu tabanında granüler dolgu tabakasının olmadığı durumda (Model A1) dolgu su etkisine maruz kaldığında yatay yer değiştirmeler dolgunun orta kısımlarında 0.65 m değerlerine ulaşırken, kil dolgu tabanına granüler tabaka yerleştirilmesi durumunda (Model A2) ise yatay yer değiştirmeler 0.1 m değerini aşmamaktadır. Sıkıştırılmış kil dolguda meydana gelen bu yatay yer değiştirme

değerleri göz önüne alındığında ise kil dolgu tabanına granüler dolgu tabaka yerleştirilmesi uygulamasının, dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumlarda yatay yer değiştirmeleri de önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.

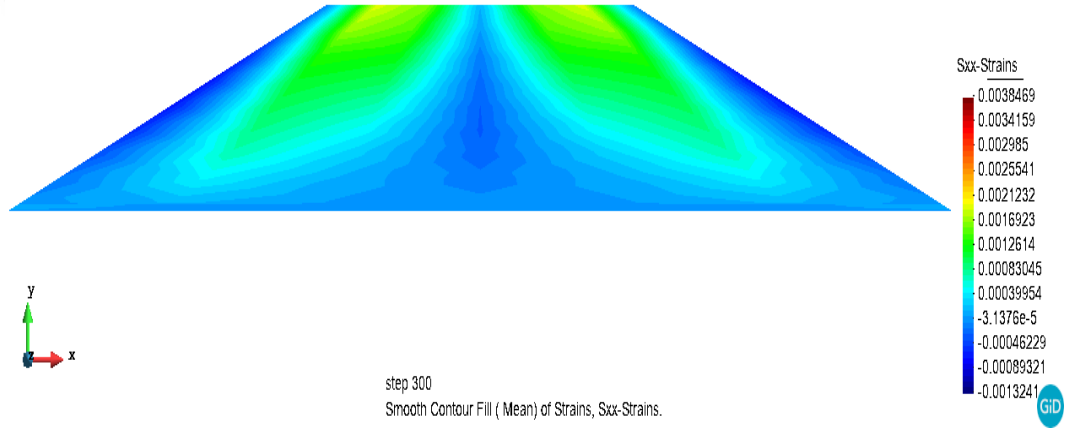


Şekil 4.38 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabaka yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenı boyunca yatay yer değiştirmelerin dağılımı

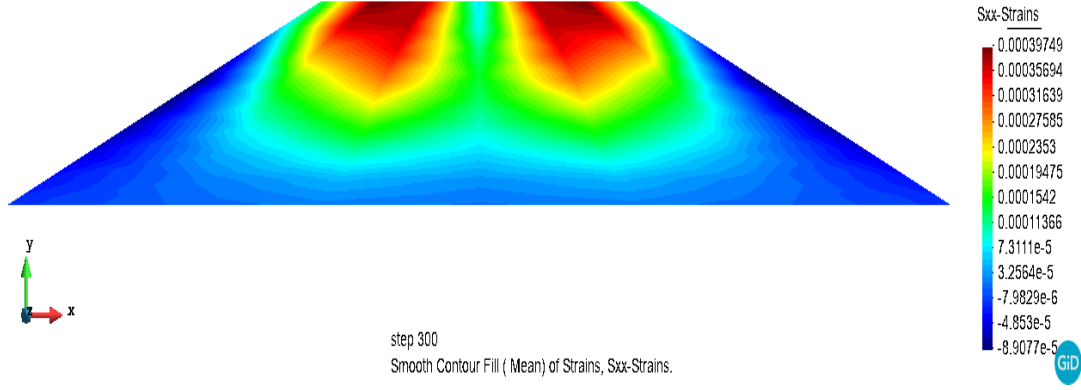
Model A1 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) ve Model A2 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumda yapılan analizler için yatay şekil değiştirme değerleri Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'ta ve dolgunun su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altındaki durumda yapılan analizler için yatay şekil değiştirme değerleri Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de gösterilmiştir.



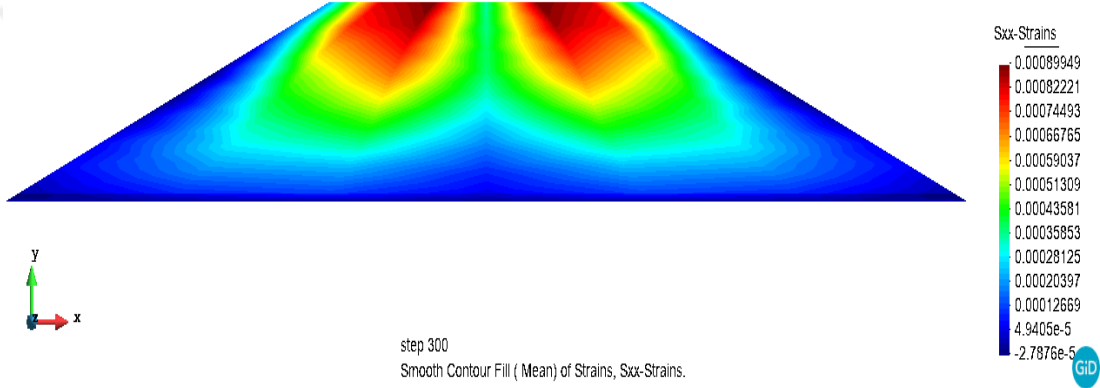
Şekil 4.39 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay şekil değiştirmeler dağılımı



Şekil 4.40 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay şekil değiştirmeler dağılımı

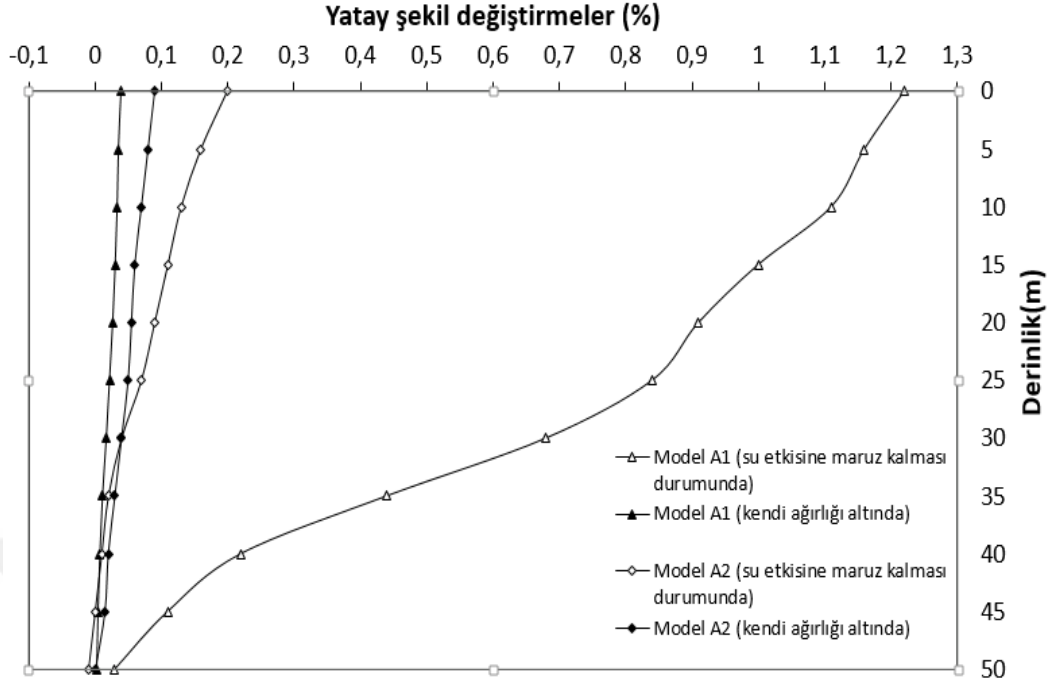


Şekil 4.41 Model A1 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay şekil değiştirmelerin dağılımı



Şekil 4.42 Model A2 için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay şekil değiştirmelerin dağılımı

Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği durum için (Model A2), dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumu için hesaplanan yatay şekil değiştirmelerin dolgu düşey eksenini boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.43'te verilmiştir. Şekil 4.43'te görüldüğü üzere sıkıştırılmış kil dolgu tabanında granüler tabakanın olmadığı durum (Model A1) için dolgu su etkisine maruz kaldığında yatay şekil değiştirmeler %1.2 mertebelerini geçerken, dolgu tabanına granüler bir tabaka yerleştirilmesi durumunda (Model A2) ise yatay şekil değiştirmeler %0.2 mertebelerine kadar düşmektedir.

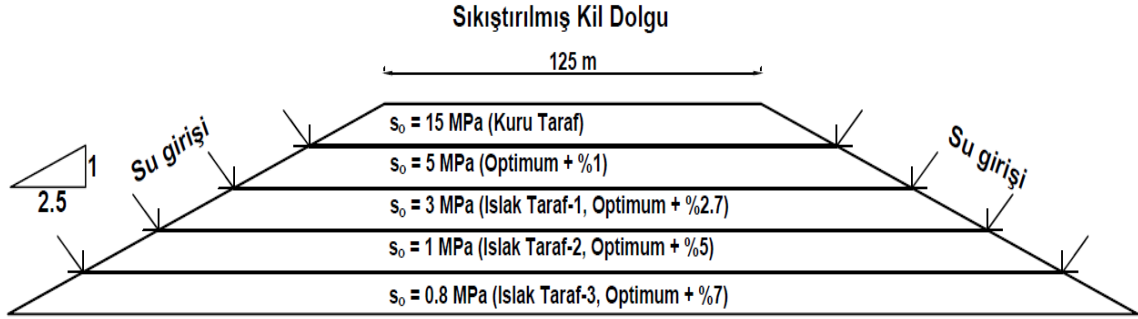


Şekil 4.43 Kuru tarafta sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler dolgu tabaka yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca yatay şekil değiştirmelerin dağılımı

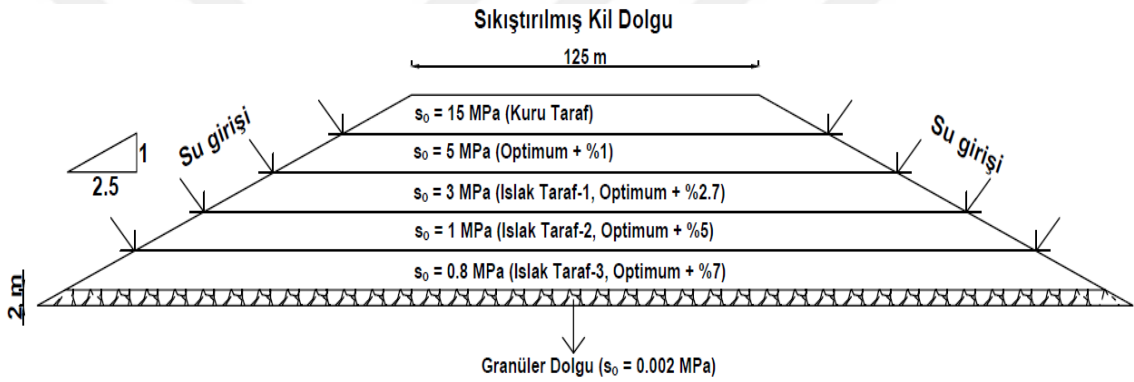
4.2 Dolgu Kesiti Farklı Sıkıştırma Su Muhtevalarında Sıkıştırılmış Kil Dolgunun Deformasyon Davranışının Analizi

Dolgu kesiti boyunca farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların deformasyon davranışını analiz etmek için Şekil 4.44 (Model F1) ve Şekil 4.45'te (Model F2) gösterildiği gibi 50 m yüksekliğinde iki farklı dolgu kesiti modellenmiştir. Şekil 4.44'te gösterilen dolgu kesiti sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan bir kil dolgu kesitini, Şekil 4.45'te gösterilen dolgu kesiti ise sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan bir kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunu temsil etmektedir. Her iki dolgu da şevlerinden su girişine maruz bırakılmış ve farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılan dolguların ıslanma durumunun deformasyon davranışına olan etkisi sayısal analizlerle incelenmiştir. Farklı sıkıştırma su muhtevası etkisini analizlere yansıtabilmek için başlangıç matrik emme değerleri kullanılmıştır. 50 m yüksekliğindeki kil dolgu kesiti, 10 m yüksekliğindeki

tabakalar halinde, 5 farklı sıkıştırma su muhtevası değerini içerecek şekilde modellenmiştir. Başlangıç matrik emme değerlerinin hangi sıkıştırma durumunu temsil ettiği Tablo 4.1’de gösterilmiştir.



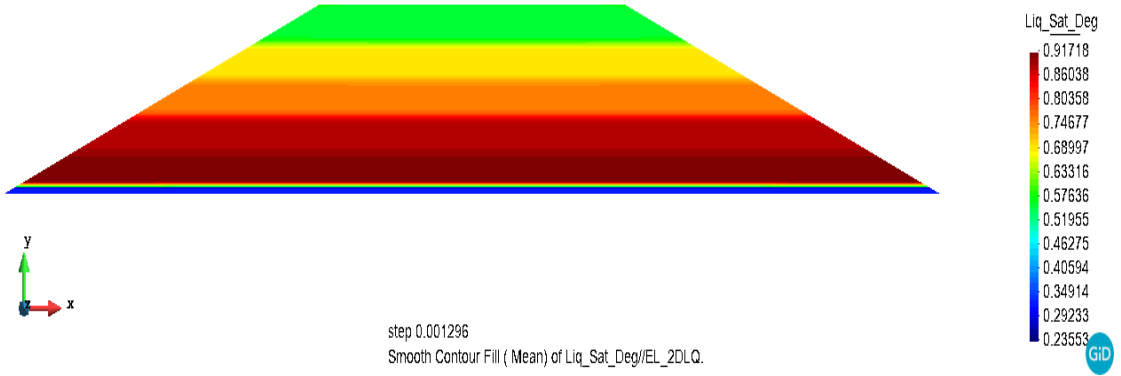
Şekil 4.44 Sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan analizlerde kullanılan 50 m yüksekliğindeki kil dolgu kesiti (Model F1)



Şekil 4.45 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m granüler tabaka yerleştirilmesi durumundaki dolgu kesiti (Model F2)*

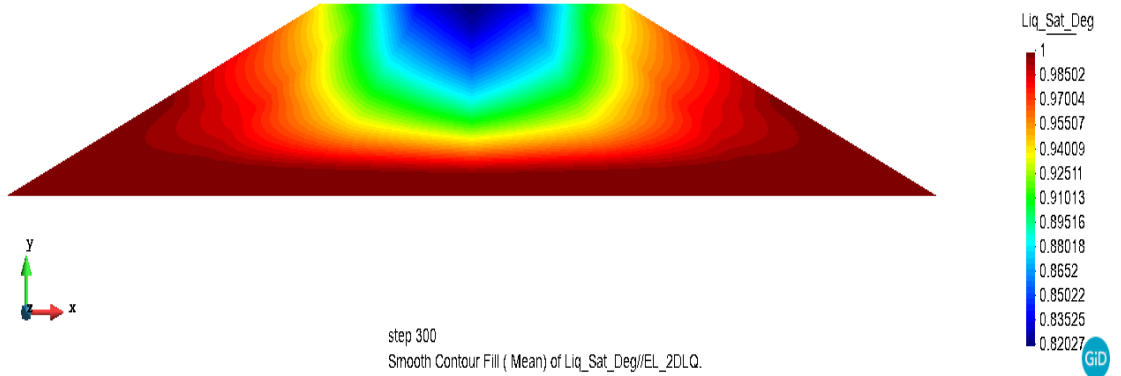
* Model F2: Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına 2 m granüler dolgu tabakası yerleştirilmesi durumundaki sayısal analizi temsil etmektedir.

Analizlerde tanımlanan başlangıç matrik emme koşullarına göre, Model F2 için analiz başlangıcındaki doygunluk derecesi dağılımı Şekil 4.46’da gösterilmiştir. Şekil 4.46’da görüldüğü gibi sıkıştırılmış kil dolgu kesitinde başlangıç durumundaki suya doygunluk derecesi değerleri %55 ile %91 arasında değişmektedir. Kil dolgu tabanına yerleştirilen granüler dolgu tabakası için ise başlangıç suya doygunluk derecesi %30 olmaktadır.



Şekil 4.46 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun başlangıç durumundaki suya doygunluk derecesi dağılımı

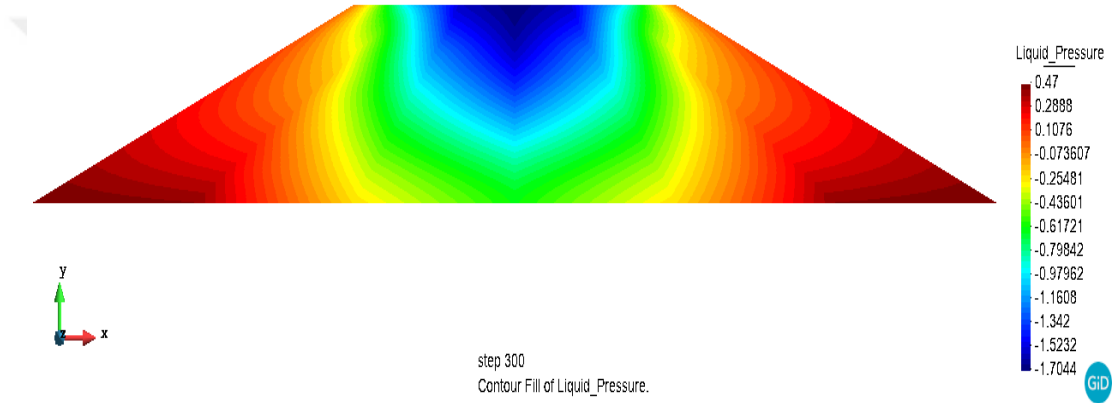
Analiz sonundaki suya doygunluk derecesi dağılımı ise Şekil 4.47’de gösterilmektedir. Kil dolgu tabanına yerleştirilen granüler dolgu tabakasının drenaj etkisinden dolayı analiz sonunda dolgu kesiti tamamen doygun durumda olmamaktadır.



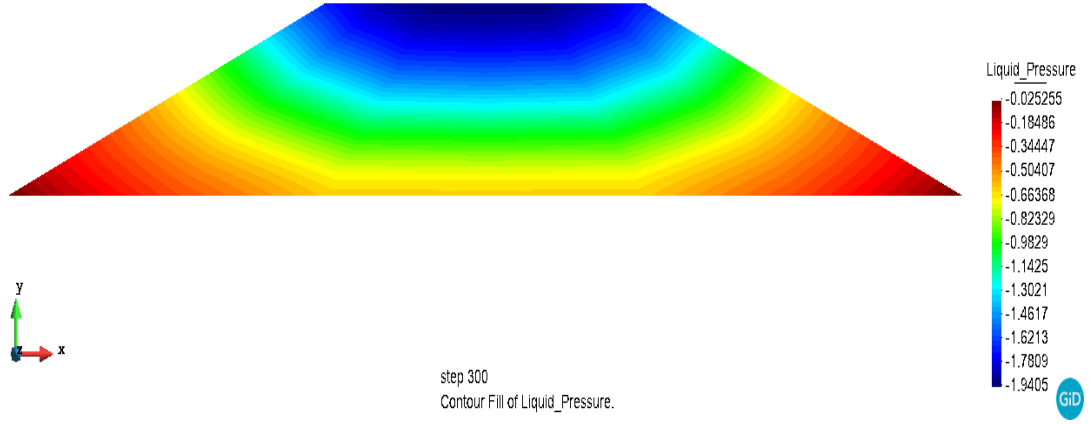
Şekil 4.47 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun analiz sonundaki suya doygunluk derecesi dağılımı

Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ve Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımları Şekil 4.48 ve Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Analiz sonunda sıkıştırılmış kil dolguya su girişinin olduğu şev yüzeylerinde pozitif boşluk suyu basınçları hesaplanmış olup, dolgunun orta kısımlarında ise negatif boşluk suyu

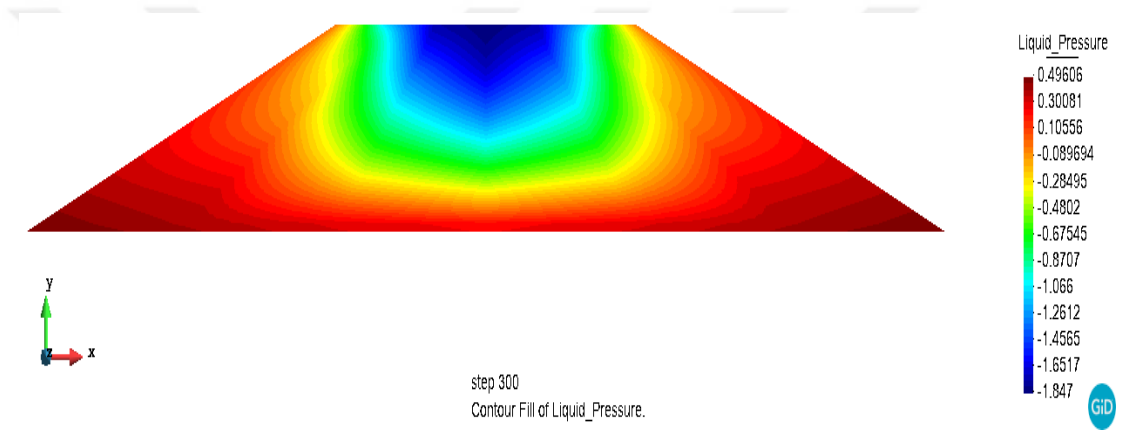
basınçları gözlemlenmektedir. Model F1 için boşluk suyu basıncı değerleri -1.7 MPa ile 0.47 MPa arasında değişirken, Model F2 için ise -1.84 MPa ile 0.49 MPa değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Dolgunun su etkisine maruz kalmadığı, sadece kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımları ise Şekil 4.49 ve 4.51’de gösterilmiştir. Bu durumda ise Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) için boşluk suyu basıncı değerleri -1.94 MPa ile -0.02 MPa arasında değişirken, Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için ise -2.08 MPa ile 0.01 MPa arasında değişmektedir.



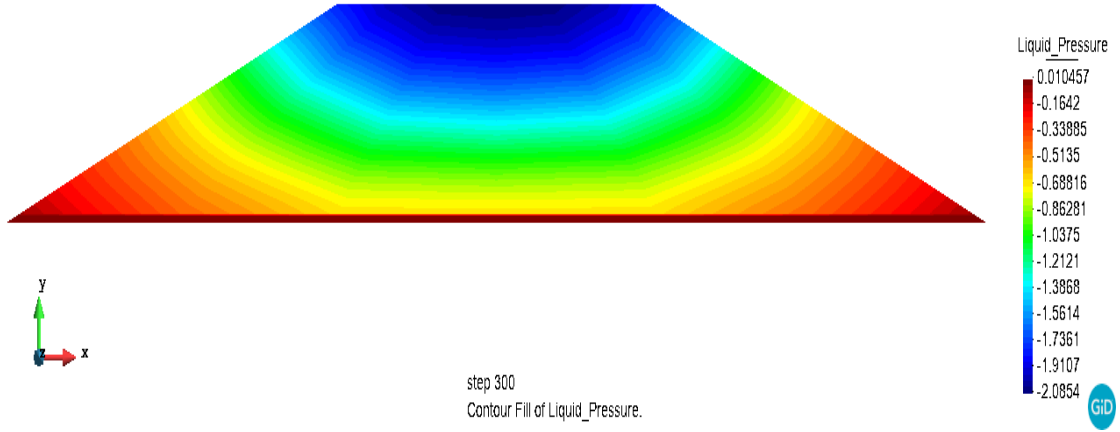
Şekil 4.48 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)



Şekil 4.49 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)

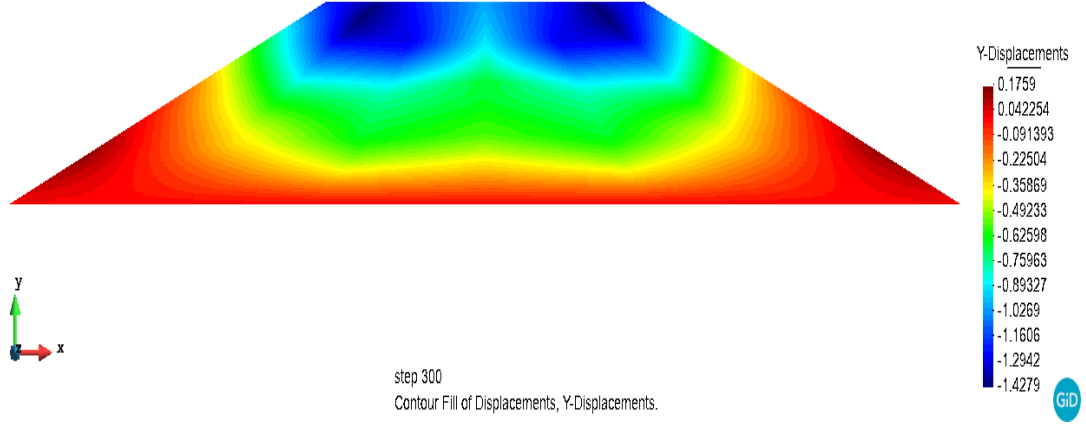


Şekil 4.50 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)

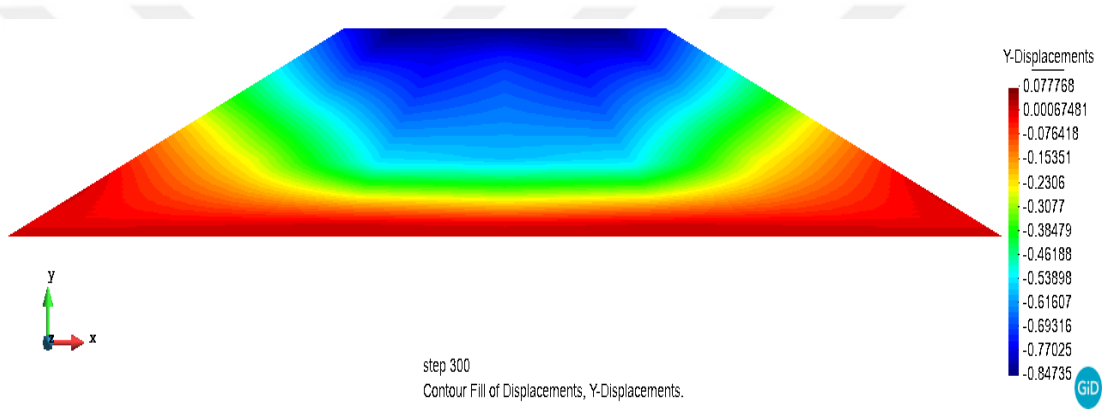


Şekil 4.51 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonundaki boşluk suyu basıncı dağılımı (MPa)

Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda gelişen deformasyon davranışını inceleyebilmek amacıyla, oluşturulan modellere ait analiz sonundaki düşey yer değiştirmelerin dağılımları karşılaştırılmıştır. Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) için düşey yer değiştirme dağılımları Şekil 4.52’de, Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için düşey yer değiştirme dağılımları Şekil 4.53’te gösterilmiştir. Düşey yer değiştirmelerin sıkıştırılmış kil dolgunun üst yüzeyine yakın kısımlarda yoğunlaşmış olduğu görülmektedir. Model F1 için maksimum düşey yer değiştirme değeri 142 cm olarak gözlemlenirken, Model F2 için ise maksimum düşey yer değiştirme değerinin 84 cm mertebelerine kadar düştüğü gözlemlenmektedir.

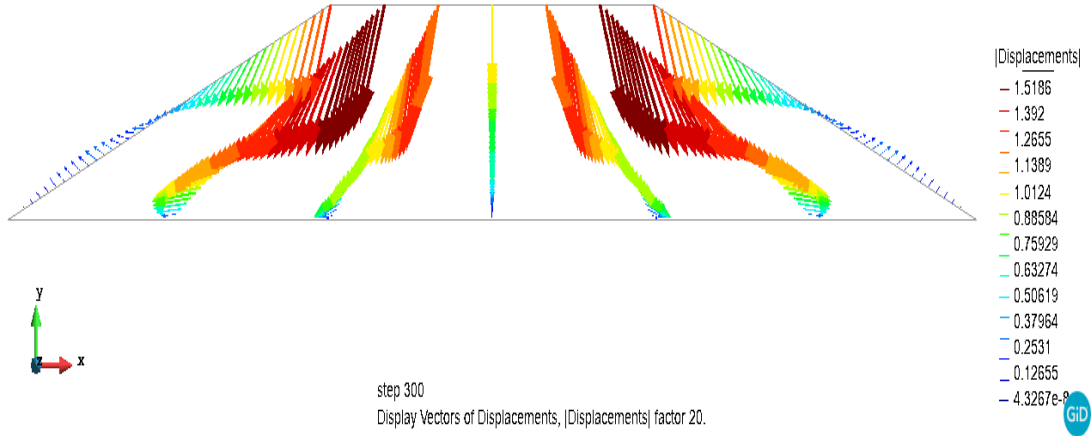


Şekil 4.52 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)

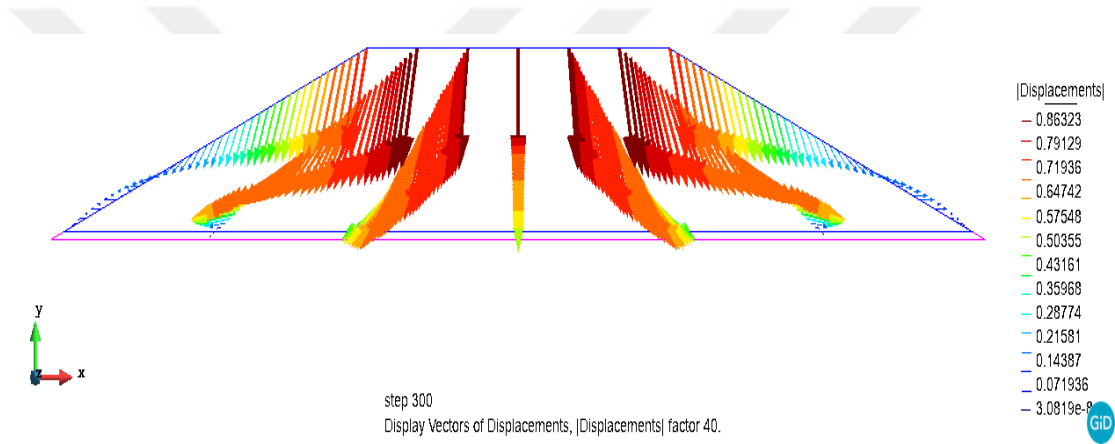


Şekil 4.53 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmeler dağılımı (m)

Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ve Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerin vektörel olarak gösterimleri ise Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te gösterilmiştir.

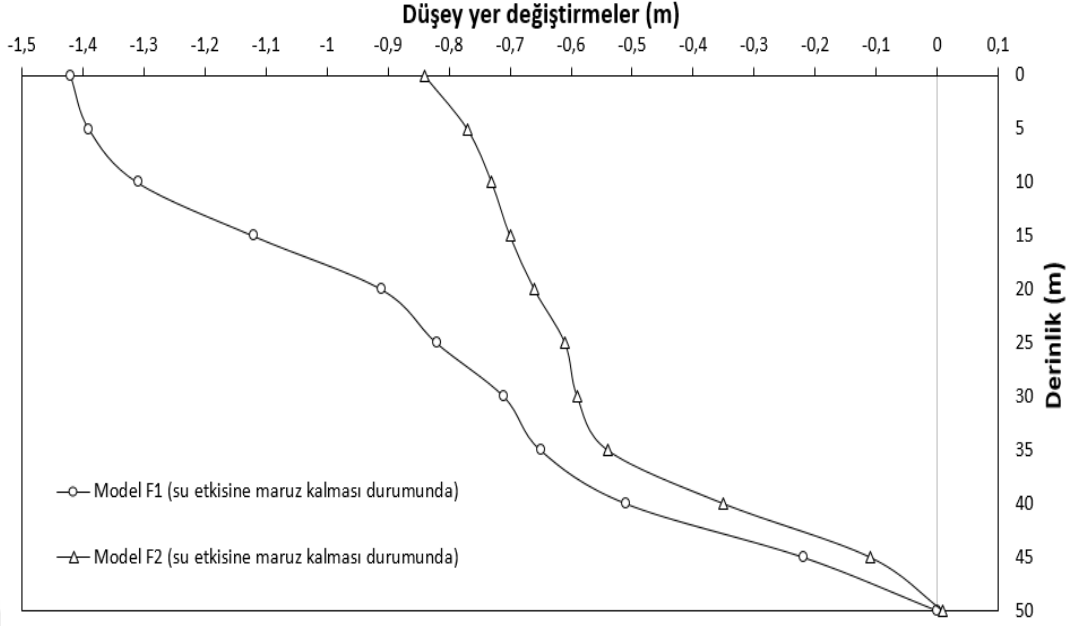


Şekil 4.54 Model F1 için farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi



Şekil 4.55 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yer değiştirmelerinin vektörel gösterimi

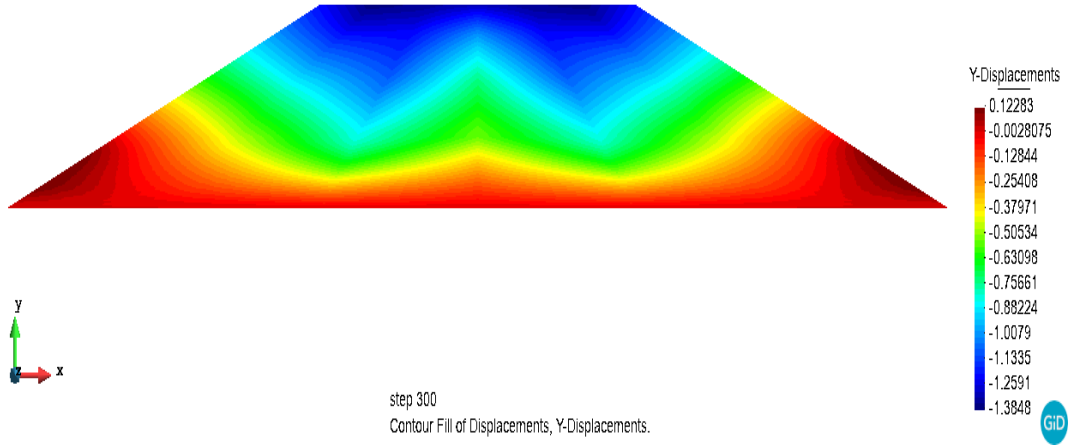
Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ve Model F2'nin (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki düşey yer değiştirmelerinin dolgu düşey eksenine boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.56'te gösterilmiştir.



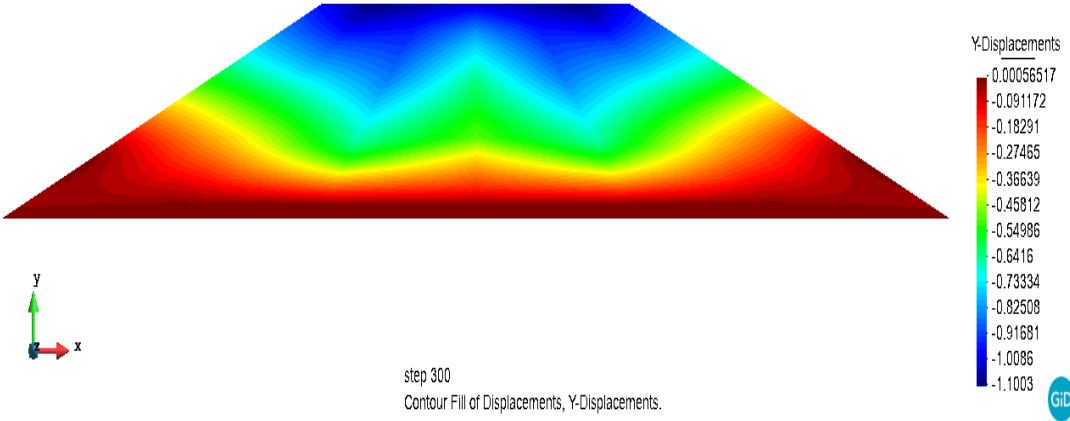
Şekil 4.56 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerin dağılımı

Şekil 4.56'da görüldüğü üzere farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumda, kil dolgu tabanına granüler bir tabaka yerleştirme uygulaması düşey yer değiştirmeleri büyük ölçüde azaltmaktadır. Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) için maksimum düşey yer değiştirme değeri 142 cm olarak gözlemlenirken, Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için maksimum düşey yer değiştirme değerinin 84 cm seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir.

Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış homojen olmayan kil dolgunun su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumundaki deformasyon davranışını incelemek ve su etkisine maruz kaldığı durumdaki deformasyon davranışları ile karşılaştırmak için benzer analizler gerçekleştirilmiştir.



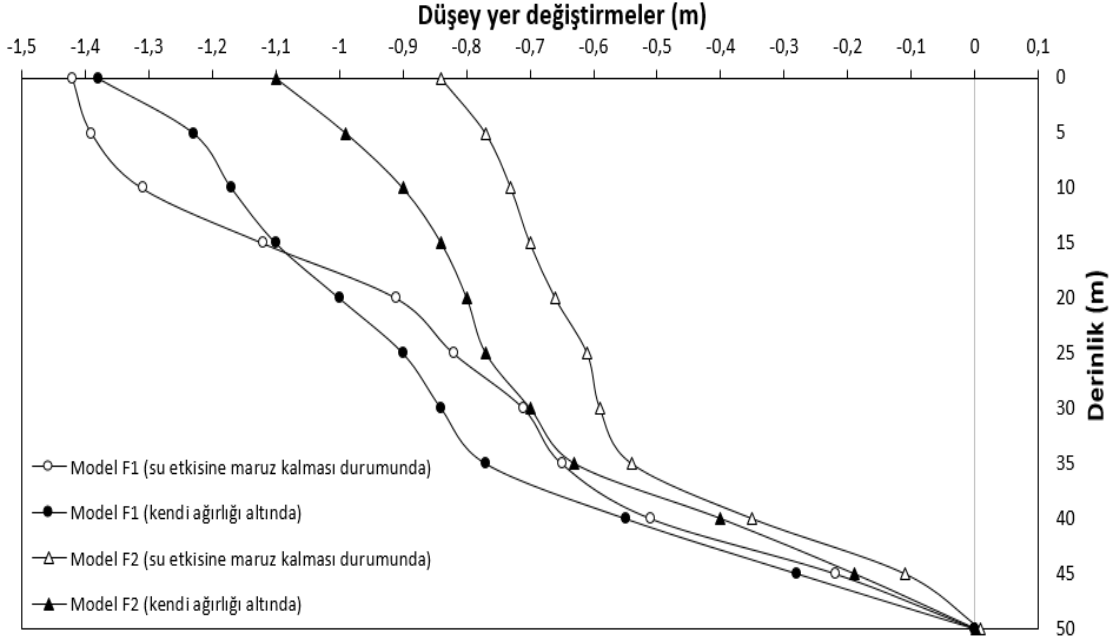
Şekil 4.57 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)



Şekil 4.58 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda düşey yer değiştirmelerin dağılımı (m)

Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ve Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için sıkıştırılmış dolguların su etkisine maruz kalmadığı durumda yalnızca kendi ağırlığı altındaki analizleri sonucunda meydana gelen yer değiştirmelerin dağılımları gösterilmiştir. Sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumları için ayrı ayrı hesaplanan düşey yer değiştirmelerin dolgu düşey eksenini boyunca derinlikle değişimleri Şekil 4.59’da karşılaştırmalı olarak

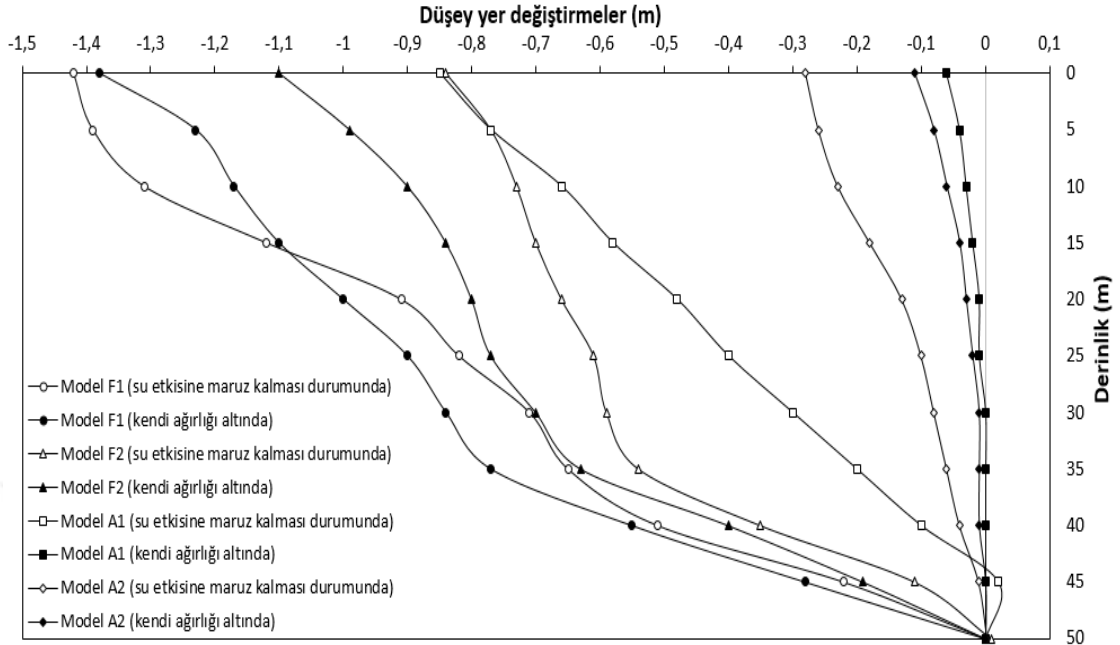
gösterilmiştir. İçi boş işaretleyicili eğriler dolgunun su etkisine maruz kaldığı analizleri temsil ederken, içi dolu işaretleyiciler dolgunun su etkisine maruz kalmadığı kendi ağırlığı altındaki analizleri temsil etmektedir.



Şekil 4.59 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı

Şekil 4.59’da sıkıştırılmış kil dolgunun kendi ağırlığı altında ve su etkisine maruz kalması durumundaki analizlerinde Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için hesaplanan düşey yer değiştirme değerlerinin Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) için hesaplanan düşey yer değiştirme değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, tabakalı olarak sıkıştırılmış kil dolguların tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi uygulamasının dolguların deformasyon davranışına olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, Model F1’e ait düşey yer değiştirme-derinlik değişimi eğrileri incelendiğinde ise dolgu kesitinde optimum sıkıştırma su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılan kısımların kendi ağırlığı altındaki analizde daha yüksek deformasyon davranışı sergilerken, optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılan dolgunun üst kesimlerinin

(dolgu yüzeyine yakın kesimler) su etkisinin olduğu durumda daha yüksek deformasyon davranışı sergilediği gözlemlenmektedir.

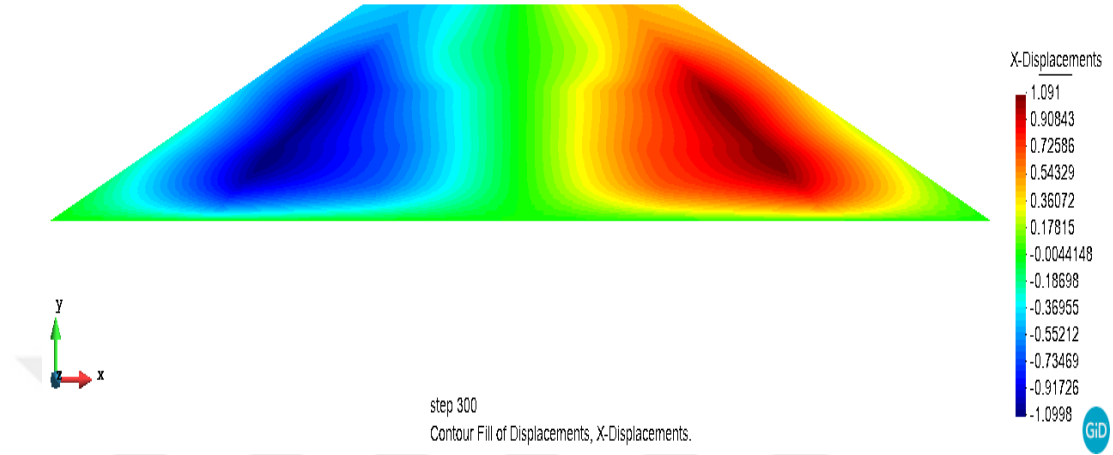


Şekil 4.60 Oluşturulan çeşitli modellerin dolgu düşey eksenini boyunca düşey yer değiştirmelerinin dağılımı

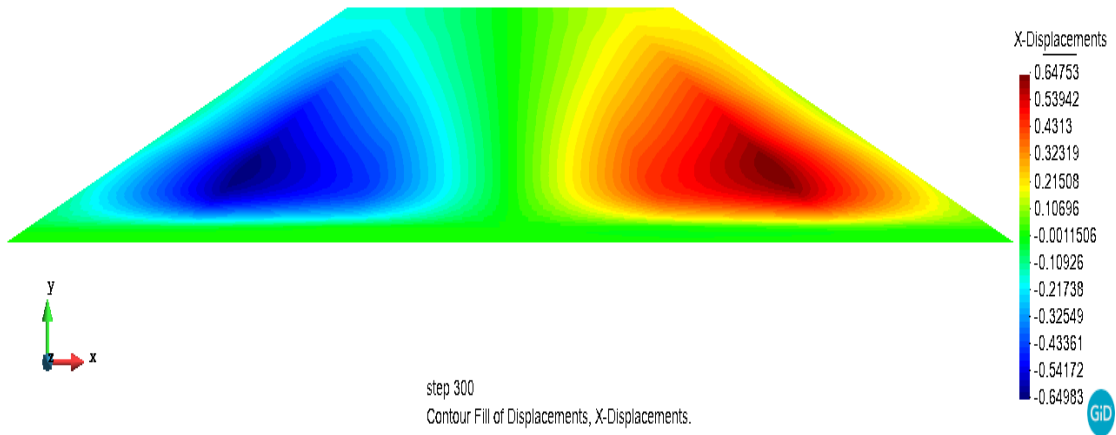
Şekil 4.60'da homojen olarak sıkıştırılmış ve sıkıştırma su muhtevası açısından homojen olmayan modellere ait düşey yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla; homojen olarak sıkıştırılan kil dolgu analizleri içerisinde su etkisine maruz kaldığında en yüksek yer değiştirme değerlerini veren, en düşük sıkıştırma su muhtevasına sahip Model A1 (optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılmış kil dolgu kesiti) ele alınmıştır. Dolgu kesiti farklı sıkıştırma su muhtevasında sıkıştırılmış Model F1'e (sıkıştırma su muhtevası açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ait düşey yer değiştirme değerlerinin, Model A1'e ait değerlerden daha yüksek olduğu Şekil 4.60'da görülmektedir. Buradan; kil dolguları homojen olarak belirli bir sıkıştırma su muhtevasında sıkıştırmanın, dolgunun deformasyon davranışı açısından homojen olmayan sıkıştırma koşullarına göre daha avantajlı olacağı anlaşılmaktadır.

Model F1 ve Model F2 (sıkıştırma su muhtevası açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için yatay doğrultudaki deformasyon davranışı ayrıca gözlemlenmiş olup, sıkıştırılmış kil

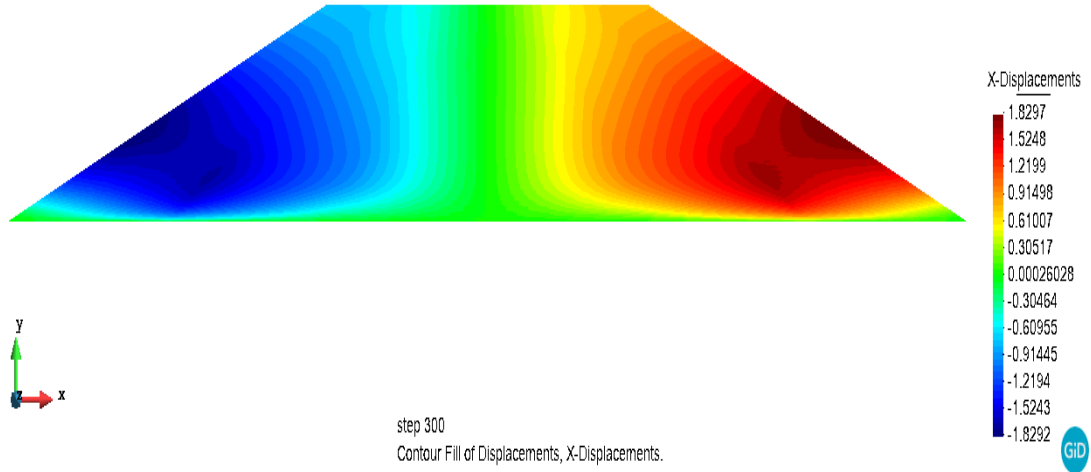
dolguların su etkisine maruz kaldığı durumda yapılan analizlere ait yatay yer değiştirme değerleri Şekil 4.61 ve Şekil 4.62’de, su etkisine maruz kalmayıp yalnızca kendi ağırlığı altındaki durumda yapılan analizlere ait yatay yer değiştirme değerleri Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’te gösterilmiştir.



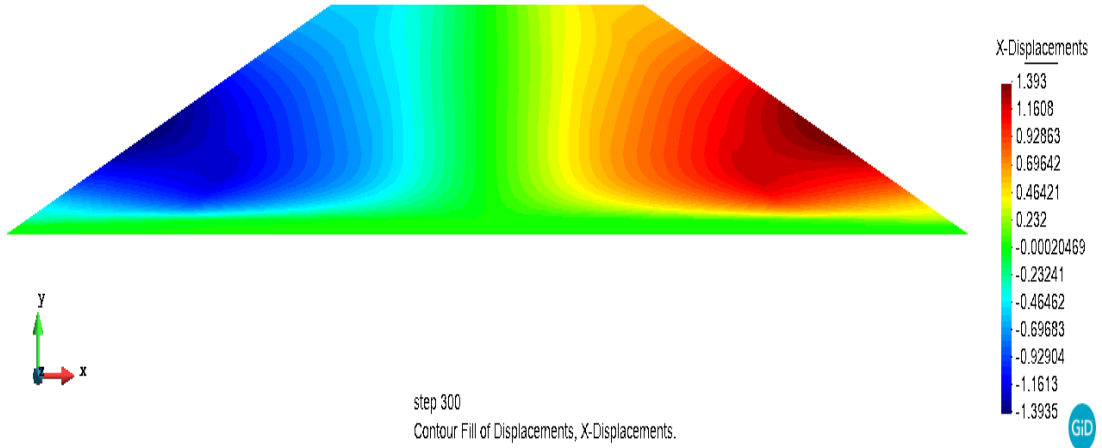
Şekil 4.61 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı (m)



Şekil 4.62 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda analiz sonundaki yatay yer değiştirmeler dağılımı (m)

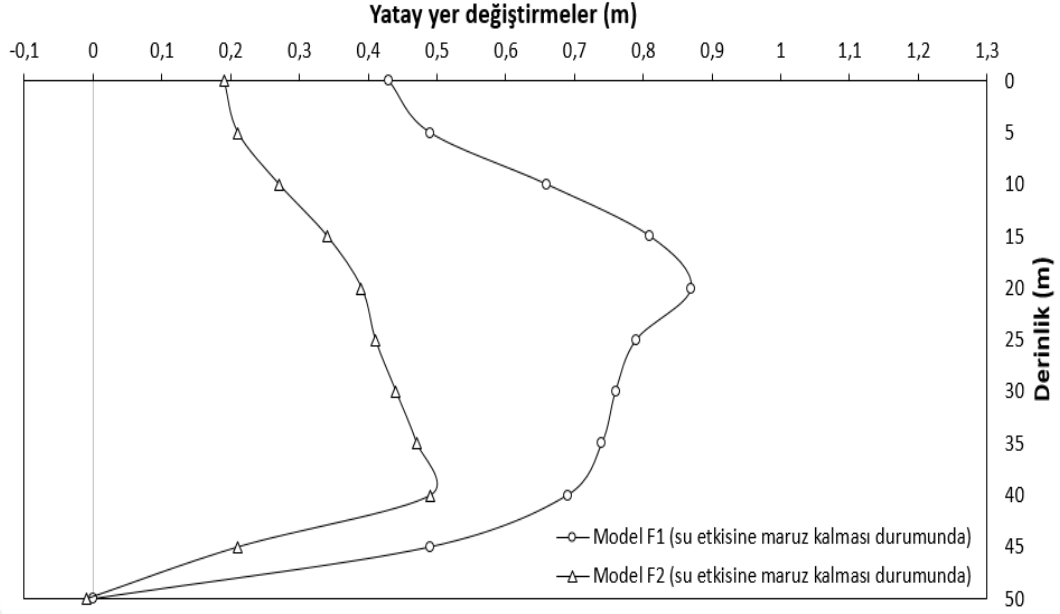


Şekil 4.63 Model F1 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı (m)



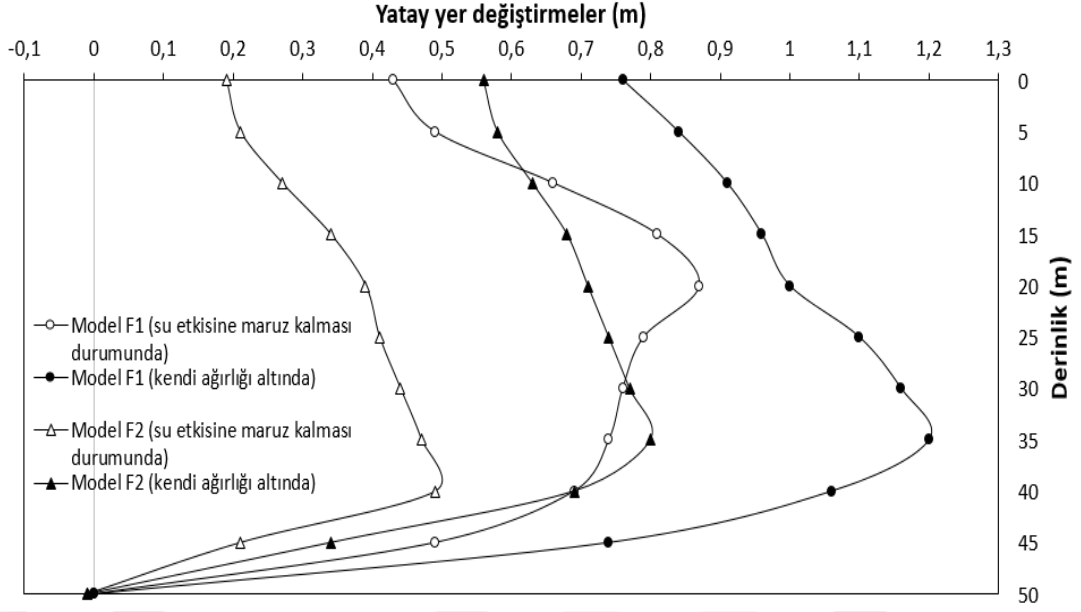
Şekil 4.64 Model F2 için farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalmadığı durumda kendi ağırlığı altındaki analizi sonunda yatay yer değiştirmelerin dağılımı (m)

Şekil 4.65'te sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan modellere ait yatay yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguda meydana gelen yatay yer değiştirmeler göz önüne alındığında ise yine sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi uygulamasının, kil dolguların su etkisine maruz kaldığı durumlarda yatay yer değiştirme değerlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.65 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesi durumunda dolgu düşey eksenı boyunca yatay yer değiştirmelerin dağılımı

Model F1 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu kesiti) ve Model F2 (sıkıştırma su muhtevaları açısından homojen olmayan kil dolgu tabanına granüler dolgu tabakasının yerleştirildiği dolgu kesiti) için, sıkıştırılmış kil dolgunun su etkisine maruz kalması durumu ve su etkisine maruz kalmayıp sadece kendi ağırlığı altında sıkışması durumu için ayrı ayrı hesaplanan yatay yer değiştirmelerin dolgu düşey eksenı boyunca derinlik ile değişimleri Şekil 4.66'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. İçi boş işaretleyicili eğriler dolgunun su etkisine maruz kaldığı analizleri temsil ederken, içi dolu işaretleyiciler dolgunun su etkisine maruz kalmadığı kendi ağırlığı altındaki analizleri temsil etmektedir.



Şekil 4.66 Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolgunun dolgu düşey eksenini boyunca yatay yer değiştirmelerinin dağılımı

Şekil 4.66'dan, kil dolgu kesitinin farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırıldığı homojen olmayan kil dolgular için dolgunun su etkisine maruz kalmadığı, sadece kendi ağırlığı altında sıkıştığı durumun yatay yer değiştirme davranışı açısından daha kritik durum olduğu gözlemlenmektedir.

Bu çalışmada, suya doygun olmayan kil dolguların deformasyon davranışına etkiyen parametreler incelenerek, farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış kil dolguların su etkisine maruz kalıp kalmama durumlarına göre deformasyon davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, suya doygun olmayan zeminlerin davranışını modelleme imkanı sağlayan Barcelona Basic Model ile sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıkıştırılmış kil dolguların su etkisine (ıslanmaya) maruz kalması durumunda sergileyeceği deformasyon davranışına sıkıştırma su muhtevasının oldukça büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür.
- Farklı sıkıştırma su muhtevalarında sıkıştırılmış homojen kil dolguların ıslanması durumunun incelendiği analizler sonucunda, en yüksek yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılan kil dolguda ($s_0=15$ MPa) meydana geldiği belirlenmiştir. Meydana gelen yüksek yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerinin, dolguya su girişi ile birlikte matrik emme değerinde ve buna bağlı olarak da kayma mukavemetinde meydana gelen azalma ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Aynı analizler dolgunun su etkisine maruz kalmadığı ve sadece kendi ağırlığı altında sıkıştığı durum için de tekrarlanmış, bu durumda ise en düşük sıkıştırma su muhtevasına sahip olan dolgunun ($s_0=15$ MPa) bu kez en düşük yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Başlangıçta doygun durumda olan sıkıştırılmış dolguda ($s_0=0.001$ MPa) ise dolgunun su etkisine maruz kalması durumunda, diğer sıkıştırma koşullarına (daha düşük sıkıştırma su muhtevaları) sahip homojen sıkıştırılmış kil dolgulardan daha düşük yer değiştirme değerleri meydana gelirken, dolguya su girişinin olmadığı

durumda ise sadece kendi ağırlığı altındaki analizi esnasında göçme meydana geldiği görülmüştür.

- Sıkıştırılmış dolguların performans ömrü boyunca su muhtevası değeri yükselebilmektedir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar dolguları $w_{opt} + \%2$ sıkıştırma su muhtevası değerinde sıkıştırmanın, dolgularda servis ömrü boyunca ıslanmaya bağlı olarak meydana gelebilecek oturumları azaltabileceğini göstermiştir. Dolguların kendi ağırlığı altındaki oturumlarının daha yüksek değerlerde olması ise ilerleyen zamanlarda meydana gelebilecek oturumlardan daha kolay bir şekilde henüz dizayn aşamasında tolere edilebilecektir.
- Kil dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakasının yerleştirilmesi durumunun dolgunun deformasyon davranışına olan etkisi de ayrıca araştırılmıştır. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, kil dolgu kesiti tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirilmesinin, dolgunun su etkisine maruz kaldığı durumlarda düşey ve yatay yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerini önemli ölçüde azalttığını ve dolgunun performansını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Buradan yola çıkarak, sıkıştırılmış kil dolguların tasarımında dolgu tabanına granüler bir dolgu tabakası yerleştirme işleminin, ıslanma etkisine bağlı olarak matrik emmenin azalmasından dolayı meydana gelebilecek potansiyel göçmeleri engellemek amacıyla başvurulabilecek bir mühendislik yöntemi olabileceği anlaşılmaktadır.
- Kil dolgunun homojen olarak sıkıştırıldığı analizlerin yanı sıra dolgu kesitinin farklı sıkıştırma su muhtevalarına sahip tabakalar halinde sıkıştırıldığı homojen olmayan durumlar için de analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda kil dolguyu homojen olarak sıkıştırmanın, homojen olmayan sıkıştırma koşullarına göre dolgunun deformasyon davranışı açısından daha avantajlı olacağı gözlemlenmektedir.

- [1] Gökoğlu, Ö. “Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizi,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2015.
- [2] Kocaman, K., Özocak, A. ve Özener, P. “Killi zeminlerde zemin-su karakteristik eğrisinin değişimi,” 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, p. 925-934, 2018.
- [3] Fredlund, D. G. “Unsaturated soil mechanics in engineering practice,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 3, p. 286-321, 2006.
- [4] Fredlund, D.G. ve Rahardjo, H. “The role of unsaturated soil behaviour in geotechnical engineering practice,” In Proc. of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, p. 37-49, 1993.
- [5] Barbour, S.L. “The soil-water characteristic curve: a historical perspective,” 19th Canadian Geotechnical Colloquium, Canadian Geotechnical Journal, 35(5), p. 873-894, 1998.
- [6] Fredlund, D.G., Sheng, D. ve Zhao, J. “Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve,” Canadian Geotechnical Journal, 48(2), p. 186-198, 2011.
- [7] Elkady T.Y., Al-Mahbashi, A., Dafalla, M. ve Al-Shamrani, M. “Effect of compaction state on the soil water characteristic curves of sand–natural expansive clay mixtures,” European Journal of Environmental and Civil Engineering, 21(3), p. 289-302, 2017.
- [8] Fredlund, D.G., Rahardjo, H. ve Fredlund, M.D. “Unsaturated soil mechanics in engineering practice,” John Wiley & Sons, 2012.
- [9] Van Genuchten, M.T. “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” Soil Science Society of America Journal, 44(5), p. 892-898, 1980.
- [10] Guan, Y. ve Fredlund, D.G. “Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction,” Canadian Geotechnical Journal, 34(4), p. 604-614, 1997.
- [11] Bulut, R. ve Wray, W. “Free energy of water-suction-in filter papers,” Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 4, p. 355-364, 2005.
- [12] Agus, S.S., Schanz, T. ve Fredlund, D.G. “Reply to discussion by Haghghi et al. on ‘Measurements of suction versus water content for bentonite–sand mixtures’,” Canadian Geotechnical Journal, 48(2), p. 336–337, 2011.
- [13] Krahn, J. ve Fredlund, D.G. “On total, matric and osmotic suction,” Journal of Soil Science Journal, Vol. 114, No. 5, p. 339–348, 1972.

- [14] Kim, H., Ganju, E., Tang, D., Prezzi, M. ve Salgado, R. "Matric suction measurements of compacted subgrade soils," *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), p. 358-378, 2015.
- [15] Wan, A.W.L., Gray, M.N. ve Graham, J. "On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays," In *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 1, p. 215-222, 1995.
- [16] Alonso, E.E., Olivella, S. ve Pinyol, N.M. "A review of Beliche dam," *Geotechnique*, 55, No. 4, p. 267-285, 2005.
- [17] Alonso, E.E. ve Costa, L.M. "Predicting the behavior of an earth and rockfill dam under construction," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 7, p. 851-862, 2009.
- [18] Farias, M.M. ve Cordao Neto, M.P. "Advanced numerical simulation of collapsible earth dams," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, p. 1351-1364, 2010.
- [19] Zheng, Y., Hatami, K. ve Miller, G.A. "Numerical simulation of wetting-induced settlement of embankments," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 31, No. 3, 2017.
- [20] Likos, W.J. ve Lu, N. "Unsaturated soil mechanics," 2004.
- [21] Kumbasar, V. ve Kip, F. "Zemin Mekaniği Problemleri," Çağlayan Kitabevi, 1999.
- [22] Önalp, A. ve Arel, E. "Geoteknik Bilgisi I Zeminler Mekaniği," Birsen Yayınevi, 2013.
- [23] Kayadelen, C. "Doygun olmayan ince daneli zeminlerin k_0 koşullarındaki yanal basınçlarının incelenmesi," Çukurova Üniversitesi, 2005.
- [24] Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. ve Alonso, E.E. "Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media," *Engineering Computations*, Vol. 13 No. 7, p. 87-112, 1996.
- [25] Alonso, E.E., Gens, A. ve Josa, A.A. "A constitutive model for partially saturated soils," *Geotechnique*, 40, No. 3, p. 405-430, 1990.
- [26] Olivella, S., Vaunat, J. ve Rodriguez, D. "Code_Bright Tutorial," 2020.

Konferans Bildirileri

1. Investigation of Deformation Behavior of Clay Fills with Different Compaction Moisture Contents – 14th International Congress on Advances in Civil Engineering

