

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞEY DRENLERLE (PVD) İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLDE KONSOLİDASYON  
OTURMALARININ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Ahmet Can MERT**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**  
**Programı: Geoteknik**

**2018**

**T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞEY DRENLERLE (PVD) İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLDE KONSOLİDASYON**  
**OTURMALARININ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet Can MERT**

**(1101010004)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.05.2018**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 29.05.2018**

**Tez Danışmanı: Doç.Dr. Ersin AREL**  
**Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Akın ÖNALP**  
**Prof.Dr. İlknur BOZBEY (İ.Ü)**

**2018**

## ÖNSÖZ

Tez çalışma sürecim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen ve beni en iyi şekilde yönlendiren danışman hocam Doç.Dr. Ersin AREL ile, engin tecrübe ve bilgisiyle lisans/ yüksek lisans eğitimime yaptığı katkılarıyla değerli hocam Prof.Dr. Akın ÖNALP'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, İstanbul Kültür Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirdiğim deneysel çalışmalarda bana yardım eden Tekniker Aykut AYDIN ve Tekniker Suat YAKUT'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
TABLO DİZİNİ.....	iii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iv
SİMGELER .....	v
1. GİRİŞ .....	1
2. RADYAL KONSOLİDASYON .....	2
2.1. İki ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Teorisi .....	2
2.2. Konsolidasyonun Düşey Dren ile Hızlandırılması .....	3
3. YAPAY DÜŞEY DREN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....	6
4. PVD İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLDE OTURMALARIN ANALİZİ.....	9
4.1. Genel Zemin Profili ve Zemin Özellikleri .....	9
4.2. Uygulanan PVD' nin Tasarımı .....	15
4.3. Asaoka ile Oturmaların Kontrolü ve Arazi Ölçümleriyle Karşılaştırılması.....	17
4.4. PVD Tasarımının Sayısal Analiz ile Modellenmesi .....	21
4.5. Yatay-Düşey Geçirimsizlik Oranının Konsolidasyona Etkisi.....	23
4.6. Dren Yatay Aralıklarının Konsolidasyona Etkisi.....	32
4.7. Konsolidasyon Oturmalarına Dren Boyunun Etkisi.....	34
5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	37
6. SONUÇLAR .....	38
KAYNAKLAR.....	39

## TABLO DİZİNİ

Tablo 4.1. İnceleme alanındaki zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	13
Tablo 4.2. Bölgedeki zeminlerin sıkışabilirlik ve geçirimsizlikleri .....	14
Tablo 4.3. Uygulanan PVD tasarım bilgileri.....	15
Tablo 4.4. Beklenen oturmalar ve arazi ölçümleri .....	16
Tablo 4.5. Ölçülen ve hesaplanan konsolidasyon süreleri ve oturmalar .....	21
Tablo 4.6. 3DCONS ve FEM Modellerinde tanımlanan zemin profili ve özellikleri .....	22
Tablo 4.7. 3DCONS ve FEM modelinde kullanılan düşey geçirimsizlik katsayıları.....	22
Tablo 4.8. 3DCONS, FEM ve Asaoka sonuçlarının karşılaştırılması.....	23
Tablo 4.9. Asaoka, 3DCONS ve FEM çözümüyle $k_h/k_v$ karşılaştırması .....	30
Tablo 4.10. Farklı $s_{dren}$ ve Asaoka çözümü için $t_{95}$ değerleri .....	34
Tablo 4.11. Farklı $L_{dren}$ ve Asaoka çözümü için $t_{95}$ değerleri .....	37

## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Radyal akım koşulları .....	3
Şekil 2.2. Konsolidasyonun düşey dren ile hızlandırılması .....	4
Şekil 2.3. Yapay düşey drenin yerleştirilmesi.....	5
Şekil 3.1. Asaoka Diyagramı.....	7
Şekil 3.2. Asaoka diyagramında (a) ilave yükleme ve (b) başlangıç okumalarının etkisi .....	8
Şekil 4.1. İyileştirme Bölgesi Kısımları .....	9
Şekil 4.2. Kısım 1A, 1B ve 5B' de yapılan sondaj yerleri.....	10
Şekil 4.3. 2015 yılında (solda) ve 2017 yılında (sağda) yapılan sondajlara ait numune sandıkları .....	11
Şekil 4.4. a) 2015, b) 2012 ve c) 2017 yıllarında yapılmış sondajlardan örnek loglar .....	12
Şekil 4.5. Kısım 1A, 1B ve 5B arazi oturma-zaman eğrileri .....	16
Şekil 4.6. Kısım 1A için Asaoka diyagramı.....	17
Şekil 4.7. Kısım 1B için Asaoka diyagramı .....	18
Şekil 4.8. Kısım 5B için Asaoka diyagramı .....	18
Şekil 4.9. Kısım 1A oturma-zaman eğrisi .....	19
Şekil 4.10. Kısım 1B için oturma-zaman eğrisi .....	20
Şekil 4.11. Kısım 5B için oturma-zaman eğrisi .....	20
Şekil 4.12: Kısım 1A için FEM ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	24
Şekil 4.13. Kısım 1A için 3DCONS ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	25
Şekil 4.14.Kısım 1A için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri .....	25
Şekil 4.15. Kısım 1B için FEM ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	26
Şekil 4.16. Kısım 1B için 3DCONS ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	27
Şekil 4.17. Kısım 1B için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri .....	27
Şekil 4.18. Kısım 5B için FEM ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	28
Şekil 4.19. Kısım 5B için 3DCONS ile $k_h/k_v$ belirlenmesi .....	29
Şekil 4.20. Kısım 5B için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri .....	29
Şekil 4.21. Kısım 1A, 1B ve 5B için arazi, FEM ve 3DCONS oturma-zaman eğrileri.....	31
Şekil 4.22. Kısım 1A için $s_{dren}$ değişiminin etkisi .....	32
Şekil 4.23. Kısım 1B için $s_{dren}$ değişiminin etkisi .....	33

Şekil 4.24. Kısım 5B için $s_{dren}$ değişiminin etkisi .....	33
Şekil 4.25. Kısım 1A için $L_{dren}$ değişiminin etkisi .....	35
Şekil 4.26. Kısım 1B için $L_{dren}$ değişiminin etkisi.....	35
Şekil 4.27. Kısım 5B için $L_{dren}$ değişiminin etkisi.....	36

## SİMGELER

$\alpha$	: Dren aralıklarıyla ilgili katsayı
$b$	: Yapay dren genişliği
$\beta_0, \beta_1$	: Asaoka diyagramında elde edilen doğrunun kesim noktası ve eğimi
$c_v, c_{vz}$	: Düşey konsolidasyon katsayısı
$c_h, c_r$	: Yanal (Radyal) konsolidasyon katsayısı
$C_c$	: Sıkışma indisi
$C_r$	: Yeniden yükleme indisi
$\Delta t$	: Zaman aralığı
$d$	: Dren çapı
$D$	: Dren etkin çapı
$e, e_0$	: Boşluk oranı, ilk boşluk oranı
$E$	: Elastisite modülü
$H$	: Drenaj yolu, tabaka kalınlığı
$I_L$	: Sıvılık indisi
$k_h$	: Yanal geçirimsizlik katsayısı
$k_v$	: Düşey geçirimsizlik katsayısı
$L_{dren}$	: Dren boyu
NL	: Normal yüklenmiş
OC	: Aşırı konsolide
$\rho_n$	: Doğal birim hacim ağırlık
$\rho_d$	: Doygun birim hacim ağırlık
$s, s_{dren}$	: Dren yatay aralığı
$s_f$	: Asaoka çözümüyle son oturma
$s_n$	: n-inci oturma ölçümü
$S_u$	: Drenajsız kayma direnci
$t$	: Konsolidasyon zamanı
$t_{95}$	: %95 konsolidasyon yüzdesine karşılık gelen zaman
$T_r$	: Radyal zaman faktörü
$u, u_w$	: Boşluk suyu basıncı
$U$	: Konsolidasyon Yüzdesi
$U_r$	: Radyal konsolidasyon yüzdesi
$U_z$	: Düşey konsolidasyon yüzdesi
$U_{zr}$	: Hem radyal hem düşey yönde toplam konsolidasyon yüzdesi
$w_n$	: Doğal su muhtevası
$w_L$	: Likit limit

Enstitü : Fen Bilimleri Enstitüsü  
Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği  
Programı : Geoeknik  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ersin AREL  
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans- 2018

## ÖZET

### DÜŞEY DRENLERLE (PVD) İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLDE KONSOLİDASYON OTURMALARININ ANALİZİ

Ahmet Can MERT

Bu çalışmada; İstanbul Halkalı bölgesinde, yapay düşey drenlerle (PVD) iyileştirilmiş konsolidasyonun devam ettiği belirlenen kısımlardaki oturmaların analizi yapılmıştır. Arazi ölçümleri ve Asaoka grafik yöntemi kullanılarak konsolidasyonu devam eden kısımlar için son oturmalar ve konsolidasyon zamanı hesaplanmıştır. Oluşturulan oturma-zaman eğrilerinin birbirine uyumu incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve üç boyutlu konsolidasyon analizi (3DCONS) kullanılarak her bir kısım için sayısal analiz modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerde farklı yatay-düşey geçirimsizlik katsayısı oranı ( $k_h/k_v$ ) değerleriyle arazi ölçümleri karşılaştırılmış ve %90 konsolidasyon için  $k_h/k_v$  tüm kısımlarda belirlenmiştir. Elde edilen oranlar için oluşturulan oturma-zaman eğrileri arazi ölçümleri ve teorik çözümle karşılaştırılmıştır. Belirlenen  $k_h/k_v$  değerleri ile; her bir kısımda, dren yatay aralığı ( $S_{dren}$ ) ve dren boylarındaki ( $L_{dren}$ ) değişiminin konsolidasyon oturmalarına olan etkisi incelenmiştir. Teorik çözüm ve arazi ölçümleriyle elde edilen oturma-zaman eğrileri kullanılarak, konsolidasyonun %95 tamamlanması için gerekli süre ( $t_{95}$ ) hesaplanmıştır. Belirlenen  $t_{95}$  ve farklı  $S_{dren}$  veya  $L_{dren}$  değerleri için bulunan  $t_{95}$  zamanları karşılaştırılmış, mevcut  $t_{95}$  için gerekli  $S_{dren}$  ve  $L_{dren}$  değer aralıkları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapay Düşey Dren (PVD), Radyal Konsolidasyon, Konsolidasyonun Hızlandırılması, Konsolidasyon Oturması, Geçirimsizlik Katsayısı, Konsolidasyon Yüzdesi, Konsolidasyon Zamanı



University : Istanbul Kultur University  
Institute : Institute of Sciences  
Department : Civil Engineering  
Programme : Geotechnical Engineering  
Supervisor : Assoc.Prof.Dr. Ersin AREL  
Degree Awarded and Date : MSc- 2018

## ABSTRACT

### CONSOLIDATION SETTLEMENT ANALYSIS OF VERTICAL DRAIN (PVD) IMPROVED CLAY

Ahmet Can MERT

In this study, a settlement analysis has been carried out for the sectors of a prefabricated vertical drain (PVD) improved area in Istanbul, Halkalı region which exhibited extended consolidation beyond expected values. For these sectors, final settlement and end of settlement times have been calculated using the Asaoka graphical procedure along with in-situ measurements. The compliance of settlement-time curves for in-situ measurements and Asaoka solution have been investigated. For each sector, a numerical analysis model has been constructed by using finite element method and three-dimensional consolidation analysis. The model solutions for horizontal- vertical permeability coefficient ratio ( $k_h/k_v$ ) and in-situ measurements have been compared, and  $k_h/k_v$  value corresponding to 90% degree of consolidation has been obtained for all sectors. The specified ratios have been kept constant, and the effect of drain horizontal spacing ( $S_{drain}$ ) as well as drain length ( $L_{drain}$ ) has been examined for each sector. The times corresponding to 95% degree of consolidation ( $t_{95}$ ) have been calculated using the theoretical solution and in-situ measurements. Calculated  $t_{95}$  have been compared to the  $t_{95}$  by varying  $S_{drain}$  or  $L_{drain}$  values. Also, the required intervals of  $S_{drain}$  and  $L_{drain}$  have been obtained corresponding to the calculated  $t_{95}$  times.

**Key Words:** Prefabricated Vertical Drain (PVD), Radial Consolidation, Acceleration of Consolidation, Consolidation Settlement, Permeability Coefficient, Degree of Consolidation, Time of Consolidation

## 1. GİRİŞ

Konsolidasyon, geoteknik mühendisliğinde incelenen başlıca konulardandır. Özellikle kil gibi ince daneli zeminlerin düşük geçirimsizliği sonucunda, dış yüklemenin ardından oluşan fazla boşluk suyu basıncının sönmülmesi uzun zaman almaktadır. Bu süreçte gerçekleşen birincil konsolidasyon oturmaları ise, zemin üzerine uygulanacak her türlü mühendislik yapısına hasar verebilmektedir. Özellikle oluşacak aşırı oturmaların yapıya vereceği hasarın fazla olacağı ve konsolidasyonun tamamlanmasının oldukça uzun zaman alacağı belirlenen zeminlerde bir yapının inşaatından önce iyileştirme uygulaması gerekebilmektedir. Yapılacak iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, oturmalarının daha kısa sürede tamamlanması için konsolidasyonun hızlandırılmasıdır. Yaygın kullanılan iyileştirme yöntemlerinden biri, fitil benzeri malzemenin bir makine yardımıyla zemine ittirilmesi sonucu yanal yönde drenaj sağlanan yapay düşey dren (PVD- *prefabricated vertical drain*) uygulamasıdır. Radyal konsolidasyon teorisine dayanılarak gerçekleştirilen hesaplarla oturmaların hızlandırıldığı PVD yönteminde en etkili zemin özelliklerinin başında yanal yöndeki geçirimsizlik katsayısı ( $k_h$ ) gelmektedir. Zeminin yatay geçirimsizliğinin düşeyden fazla olması durumunda, PVD uygulaması verimli olarak konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Oturmaların tamamlanması için istenen süre ve zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak PVD tasarımında etkili diğer parametreler ise, dren yatay aralıkları ve dren boylarıdır. Dren aralıklarının kısalması durumunda konsolidasyonun daha hızlı, aralıklar açıldıkça daha yavaş olacağı bilinmektedir. Dren boylarının hesaplanmasındaki önemli konu ise, konsolidasyonu hızlandırılacak sıkışabilir tabakanın tamamında suyun yanal (radyal) akımına izin verecek uzunlukta olması gerektiğidir. Dren boylarının kısa kalması durumunda, sıkışabilir tabakanın iyileştirilme yapılmamış kısmında yalnızca düşey yönde konsolidasyon gerçekleşmekte ve oturmaların tamamlanma süresi uzamaktadır.

Bu çalışmada, PVD uygulaması ile iyileştirilmiş İstanbul Halkalı bölgesindeki bir projede, oturmaların beklenen sürelerin ötesinde devam ettiği belirlenen kısımlar için konsolidasyon analizi yapılmıştır. Alanda yapılan arazi ölçümleri kullanılmasıyla son oturma ve bu oturma için gereken süreler hesaplanmıştır. Konsolidasyonun devam ettiği tüm kısımlar için oluşturulan sayısal analiz modelleriyle, yatay-düşey geçirimsizlik katsayısı oranları ( $k_h/k_v$ ) belirlenmiştir. Belirlenen oranlar kullanılarak; dren yatay aralıklarının ve dren boylarındaki değişimin, konsolidasyonun tamamlanma zamanına olan etkisi incelenmiştir.

## 2. RADYAL KONSOLIDASYON

### 2.1. İki ve Üç Boyutlu Konsolidasyon Teorisi

Terzaghi' nin geliştirdiği bir boyutlu konsolidasyon teorisi (1925), günümüzde de yaygın olarak kullanılmasına karşın karmaşık diferansiyel denklemlerin çözümünün basitleştirilmesi amacıyla gerçek zemin davranışından uzak birçok kabul içermektedir. Bu kabullerin en önemlilerinden biri, zeminde boşluk suyunun sönümlenme sırasında sadece düşey yönde hareket ettiğidir. Bu durumda sadece düşey yönde geçirimsizlik katsayısı ( $k_v$ ) göz önüne alınmakta, gerçekte  $k_v$ ' den ve sıfırdan farklı olan yanal geçirimsizlik katsayısı ( $k_h$ ) ihmal edilmektedir. Terzaghi 1943' te yayımlanmış "Teorik Zemin Mekaniği" adlı kitabında, zemin mekaniğinde geliştirilen teorilerin gerçek zemin davranışı göz önüne alınarak dikkatle kullanılması gerektiğini vurgulamıştır. Buna göre, zeminde meydana gelen konsolidasyonun, suyun iki veya üç boyutta akım koşullarını kullanılarak çözülmesi gerekmektedir. Böylece konsolidasyonun temel denklemi x-y-z kartezyen eksenlerindeki akım koşulları için,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1)$$

ile ifade edilmiştir.

Burada, konsolidasyon katsayısının ( $c_v$ ) üç boyutta aynı değer olduğu kabul edilmiştir.  $c_{vz} \neq c_{vy} \neq c_{vx}$  olması durumunda eşitlik 2.1, aşağıdaki bağıntıya dönüşür:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{vy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

Genişliğine oranla sonsuz sayılabilecek toprak dolgu barajın kil çekirdeğinde oluşacak akım koşullarına benzer bir örnek ele alınırsa, konsolidasyon denkleminde y-eksenindeki suyun akımı ihmal edilebileceğinden eşitlik 2.2' deki genel konsolidasyon bağıntısında bu yöndeki akımı ifade eden terim ihmal edilebilir. Bu durumda, suyun akımı düşey ve birbirine paralel yatay düzlemler boyunca iki boyutta olacaktır.

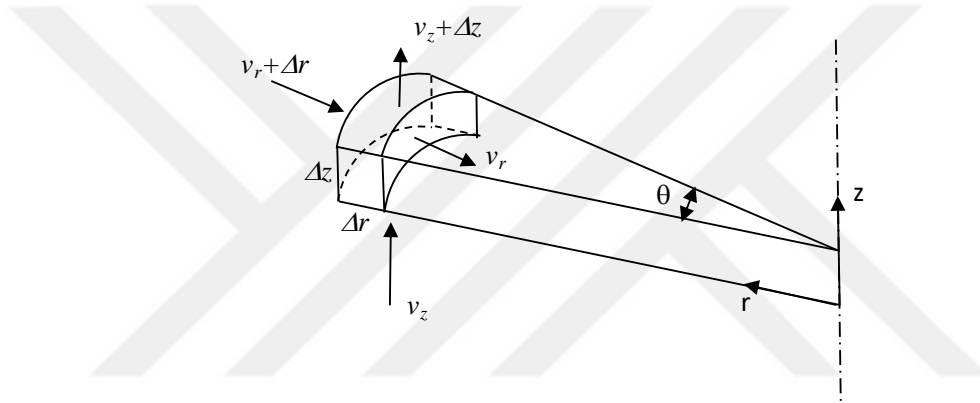
Zemin tabakasındaki suyun düşey ve rastgele düzlemler boyunca akımı olması durumundaki üç boyutlu konsolidasyonun genel çözümü, elastisite teorisi kullanılarak yapılmıştır (Biot, 1941). Konsolidasyonun düşey yöndeki su akımına ek olarak radyal akım sonucu gerçekleşmesi durumunda (Şekil 2.1) kutupsal eksenler kullanılarak konsolidasyonun diferansiyel denklemi yazılmaktadır:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vr} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

Burada  $c_{vr}$ , radyal konsolidasyon katsayısıdır ve  $c_v$ ' ye benzer şekilde geçirimsizlik katsayısı ile ifade edilmektedir:

$$c_{vr} = \frac{k_h}{\rho_w m_v} \quad (2.4)$$

Zeminin  $k_h$  değeri,  $k_v$ ' den oldukça farklı ve özellikle bazı killerde çok daha yüksek olabileceğinden  $c_{vr}$  ve  $c_{vz}$  değerleri de önemli farklar gösterir. Eşitlik 2.3' te ilk terim radyal konsolidasyonu gösterirken ikinci terim düşey yönde konsolidasyonu temsil etmektedir.



Şekil 2.1. Radyal akım koşulları

## 2.2. Konsolidasyonun Düşey Dren ile Hızlandırılması

Arazi koşullarında, suyun akımı yanal yönde de gerçekleştiğinden konsolidasyonun radyal yöndeki bileşeninin de kullanılarak sürecin hızlandırılması mümkündür. Bu konuda ilk uygulama, konsolidasyonun hızlandırılması amaçlanan tabaka boyunca düşey kuyular açıp içerisini kum ile doldurmak olmuştur. Kum dreni olarak adlandırılan uygulamada tabakanın yüklenmesiyle düşey yönde oluşan drenajın yanı sıra suyun hareketi drenlere doğru yöneleceğinden radyal drenaj da gerçekleşir (Şekil 2.2). Bu durumda, kum dreni uygulanmış tabakanın konsolidasyon yüzdesi eşitlik 2.5' teki ifadeye dönüşür (Carillo, 1942):

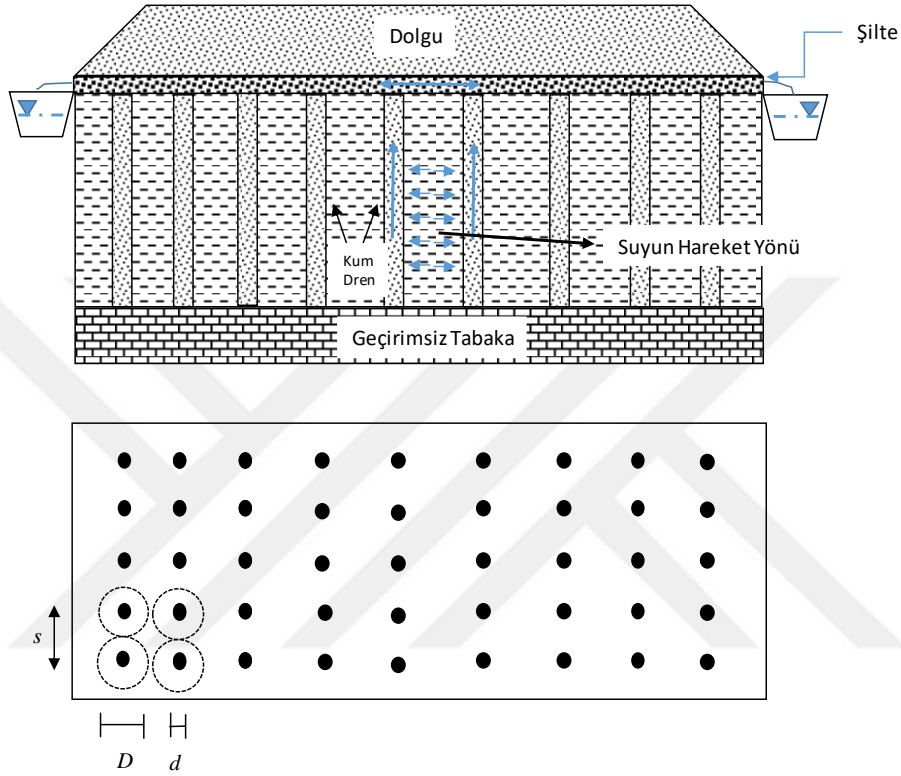
$$(1 - U_{zr}) = (1 - U_r)(1 - U_z) \quad (2.5)$$

Burada,

$U_{zr}$  Radyal ve düşey yöndeki drenajlar ile toplam konsolidasyon yüzdesi,

$U_r$  Radyal konsolidasyon yüzdesi,

$U_z$  Düşey konsolidasyon yüzdesidir.



Şekil 2.2. Konsolidasyonun düşey dren ile hızlandırılması

Bir boyutlu konsolidasyon teorisi kullanılarak  $U_z$  elde edilebilir. Radyal konsolidasyon yüzdesi  $U_r$ ' nin hesaplanması için birçok araştırmacı çeşitli bağıntılar geliştirmiştir. Bunlardan en önemlisi, 1935' te Rendulic' in  $U_r$ ' nin radyal konsolidasyon katsayısının veya radyal zaman faktörünün ( $T_r$ ) fonksiyonu olduğunu göstermesidir:

$$U_r = F(T_r) \quad (2.6)$$
$$T_r = \frac{c_{vr}}{D^2} t$$

Burada  $D$ , drenin etkin çapı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 2.6' daki ifadeden radyal konsolidasyon yüzdesi, düşey dren özellikleri ve eşit oturma (*equal strain*) koşulu göz önüne alınarak yazılır (Barron, 1948):

$$U_r = 1 - \exp\left(\frac{-8T_r}{\alpha}\right) \quad (2.7)$$

Burada  $\alpha$ , düşey dren aralıklarıyla ilgili katsayıdır.

Kum dreninde karşılaşılan önemli sorun, delgi sırasında kuyu çeperindeki zeminin örselenmesi sonucu istenilen drenaj veriminin sağlanamamasıdır. Sıvaşma etkisi (*smear effect*) adı verilen bu durumun aşılması için kum dreni ile aynı işlevde fakat sıvaşmayı en aza indirecek, böylece konsolidasyonu da hızlandırılacak zemin tabakası boyunca fitil benzeri drenlerin zemine ittirilmesi ile radyal drenaj sağlanması yaygın uygulanan çözümlerdendir. Kullanılan malzemeler yapay düşey dren (PVD) veya fitil dren (*wick drain*) olarak adlandırılır. Bu yöntemde; rulo olarak itici bir küreğin ucuna tutturulan dren, geçirimli zemin tabakasına kadar hidrolik güçle itilerek indirilir (Şekil 2.3) ve buraya plastik bir pabuç yardımıyla raptiyelenir. Drenler, konsolide edilmesi istenen alana sistematik bir düzen ile yerleştirildikten sonra zemin yüzeyi iri dolgu malzemesi ile yüklenir.



Şekil 2.3. Yapay düşey drenin yerleştirilmesi

Yapay dren ile elde edilen radyal konsolidasyon yüzdesi eşitlik 2.7' ye benzer olarak çözülebilir. Kullanılan drenler dairesel olmadığından  $s$  aralığında yerleştirilmiş drenler için  $\alpha$  katsayısı değişecektir. Yapay dren uygulaması sonucu konsolidasyonun tamamlanma süresi  $t$ ,

$$t = \frac{D^2}{8c_{vr}} \left[ \ln \frac{D}{d} - \frac{3}{4} \right] \ln \frac{1}{1-U_r} \quad (2.8)$$

olarak yazılır (Kjellman, 1948).

Burada  $D$ , her bir drenin eşdeğer etkin çapı olarak tanımlanır ve üçgen dizilim için  $D=1.05s$ , karelaj yapılmışsa  $D=1.128s$  alınabilir. Eşdeğer dren çapı  $d$  ise,  $b$  dren genişliği olmak üzere  $d=b/2$  dir.

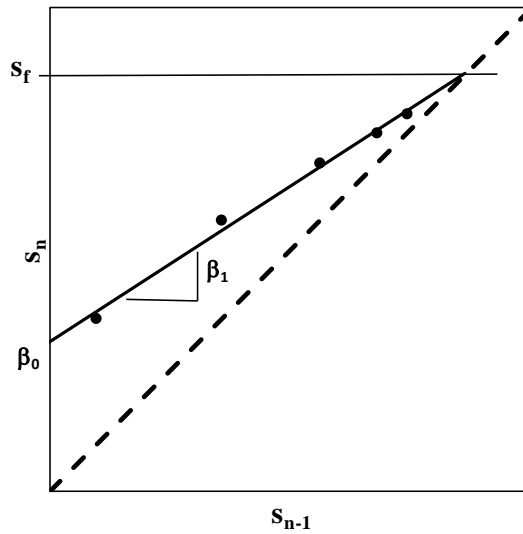
Radyal konsolidasyon için kullanılan bağıntılarda birincil parametre yatay konsolidasyon katsayısı, dolayısıyla zeminin yanal yöndeki geçirimsizliğidir. Birçok durumda zeminin yanal geçirimsizlik katsayısı düşeydekenden yüksektir. Özellikle makro-dokunun gelişmiş olduğu killerde  $k_h/k_v$  oranı 1.5-15 arası olabilir (Önalp & Arel, 2013). Buna bağlı olarak, zeminin yanal (radyal) konsolidasyon katsayısı ( $c_h \equiv c_{vr}$ ),  $c_v$ ' den çoğu zaman farklıdır. Radyal konsolidasyonda kullanılan  $c_h$ , radyal yönde drenaj olanağı sağlayan hidrolik konsolidasyon (Rowe) hücresi kullanılarak laboratuvarında ölçülebilmektedir. Gerçeğe yakın  $c_h$  değerinin ölçümü için arazide uygulanan geçirimsizlik deneylerinden belirlenen  $k_h$  ile eşitlik 2.8 kullanılarak hesap yapılabilir veya PCPT (*PiezoCone Penetration Test*)' de ölçülen boşluk suyu basıncı sönümlenmeleri kullanılabilir.

### 3. YAPAY DÜŞEY DREN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapay düşey dren performansının değerlendirilmesi ve kontrolü için arazide ölçüm ve gözlemler yapılması gereklidir. PVD uygulamasında amaç konsolidasyon oturmalarının öngörülen süre içerisinde tamamlandığını kontrol etmek olduğundan, gözlemlenen ve ölçülen değişkenler oturma ve boşluk suyu basınçları olmalıdır. Bu parametrelerden en az birinin elde edilmesiyle öngörülen oturma miktarı ve konsolidasyonun tamamlanma süreleri incelenebilir. PVD uygulanan alana yerleştirilen oturma plakaları (*settlement plate*) ile ölçüm gerçekleştirilir. Boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ise dren boyunca yerleştirilen piyezometreler ile kontrol edilebilir veya PCPT ile gerçekleştirilen sönümleme deneyi sonuçları kullanılabilir. Hansbo v.d. (1981), düşey drenlerle ilgili yaptıkları çalışmada konsolidasyon sırasında kayma

direncinin değişmez boşluk suyu basıncı ölçümlerine rağmen arttığını göstermiş, konsolidasyon hızının belirlenmesinde oturma ölçümlerine güvenilmesini önermiştir.

Arazi ölçümleri kullanılarak son oturma miktarı ve oturma süresinin belirlenmesinde Asaoka grafik yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Asaoka diyagramı, eşit zaman aralıklarında ( $\Delta t$ ) ölçülmüş  $n$  sayıda oturma değeri ( $s_n$ ) ile her oturma değeri bir önceki ölçüme ( $s_{n-1}$ ) karşı noktalanmasıyla elde edilir (Asaoka, 1978). Noktalanmış değerlerden geçirilen doğrunun  $y=x$  doğrusunu kestiği nokta son oturma ( $s_f$ ) olarak belirlenir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Asaoka Diyagramı

Geliştirilen yöntem,  $\Delta t$  aralıklı alınmış ölçümlerle konsolidasyon miktarının eşitlik 3.1' deki gibi ifade edilebileceğini göstermiştir:

$$s_n = \beta_0 + \sum_{i=1}^j \beta_i s_{n-i} \quad (3.1)$$

Buradan, birincil konsolidasyon için ( $j=1$ ),

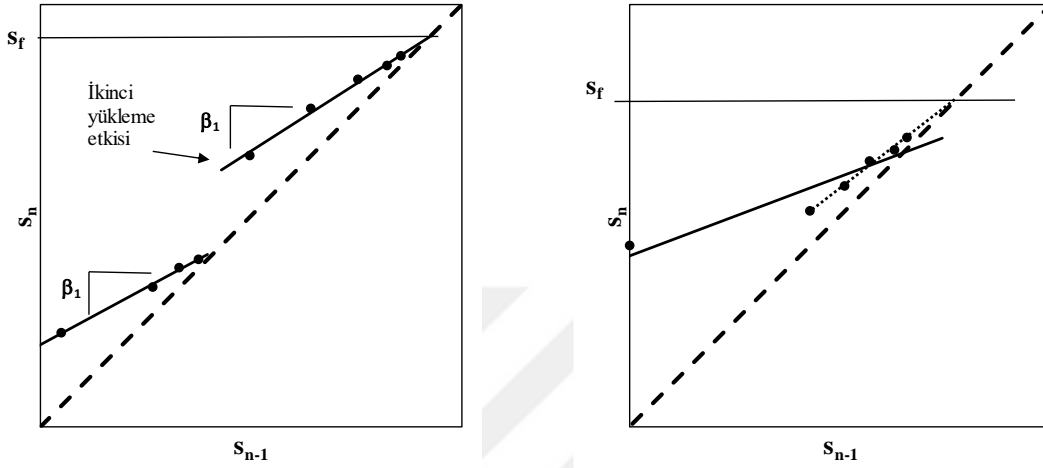
$$s_n = \beta_0 + \beta_1 s_{n-1} \quad (3.2)$$

yazılabilir.

PVD veya kum dreni ile iyileştirilmiş zeminde yapılan kademeli yükleme, Asaoka diyagramında zıplamaya neden olur (Şekil 3.2a). Bu durumda yüklemenin tamamlanmasının



ardından alınan ölçümler ile son oturmanın hesaplanması daha uygun olmaktadır. Teorik olarak her bir yükleme kademesinde geçirilen doğrular birbirine paraleldir. Asaoka diyagramı, oturma ölçümleri ile oluşturulduğunda başlangıçtaki okumalar alınarak hesaplanan son oturma düşük çıkabileceğinden  $s_f'$  nin belirlenmesinde ilk okumaların alınmaması daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Şekil 3.2b) (Asaoka, 1978).



Şekil 3.2. Asaoka diyagramında (a) ilave yükleme ve (b) başlangıç okumalarının etkisi

Asaoka diyagramından belirlenen  $\beta_1$  eğimi ve ödometreden elde edilen  $c_v$  ile radyal konsolidasyon teorisi birleştirilerek  $c_h$  hesaplanır:

$$-\frac{\ln \beta_1}{\Delta t} = \frac{8c_h}{D^2 \alpha} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2} \quad (3.3)$$

Burada,  $D$  ve  $\alpha$  eşitlik 2.7 ve eşitlik 2.8' de verilen ifadelerdir.  $H$  ise, bir boyutlu konsolidasyon teorisindeki drenaj yolu uzunluğudur. Eşitlik 3.3' teki son terimin etkisi  $c_h$  içeren terime kıyasla küçüktür ve bu nedenle  $c_v$ ' nin değişiminin etkisi de ihmal edilebilir (Hausmann, 1990). Asaoka yöntemi ile  $j$ -inci oturma değeri ( $s_j$ ) ve bu oturma için gerekli süre  $t_j = \Delta t \cdot j$  diyagramda kullanılan ilk oturma değeri  $s_0$  olmak üzere,

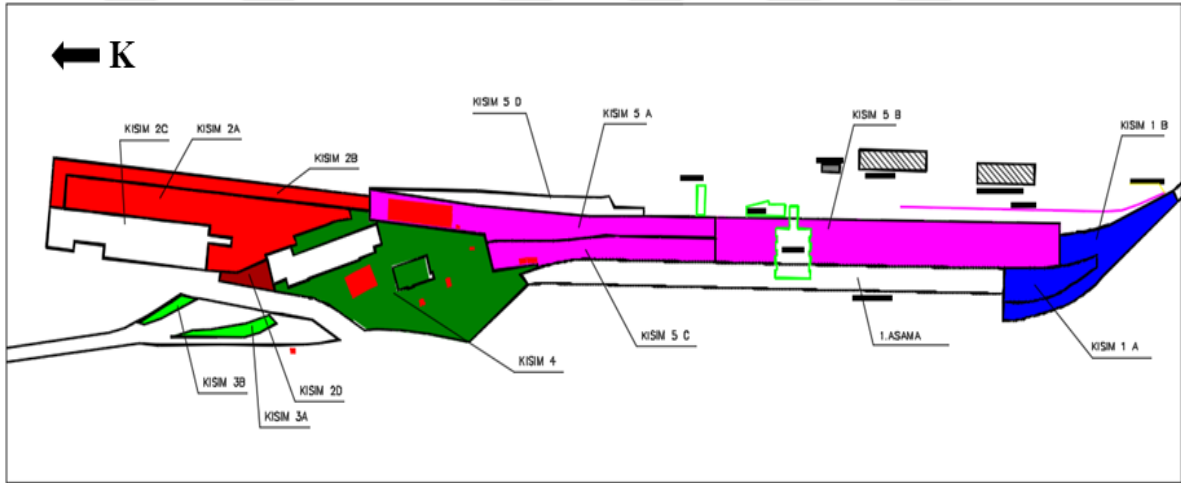
$$s_j = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} - \left( \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} - s_0 \right) (\beta_1)^j \quad (3.4)$$

elde edilir.

Buradan  $s_f$ ' ye ulaşılan kadar geçen süre hesaplanır ve Asaoka çözümüyle elde edilen  $s_j-t_j$  değerleri, arazi oturma-zaman değerleri karşılaştırılır.

#### 4. PVD İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ KİLDE OTURMALARIN ANALİZİ

Yüze inşa edilecek yapılar, dolgular ve de uygulanacak hareketli yükler etkisinde aşırı oturmaların gerçekleşeceği belirlenen İstanbul Halkalı bölgesindeki bir proje alanında, normal yüklenmiş (NL) kilin PVD ve önyükleme ile iyileştirilmesine karar verilmiştir. Şekil 4.1' de alanın, zemin koşulları ve iyileştirme yöntemine göre ayrıldığı kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. İyileştirme Bölgesi Kısımları

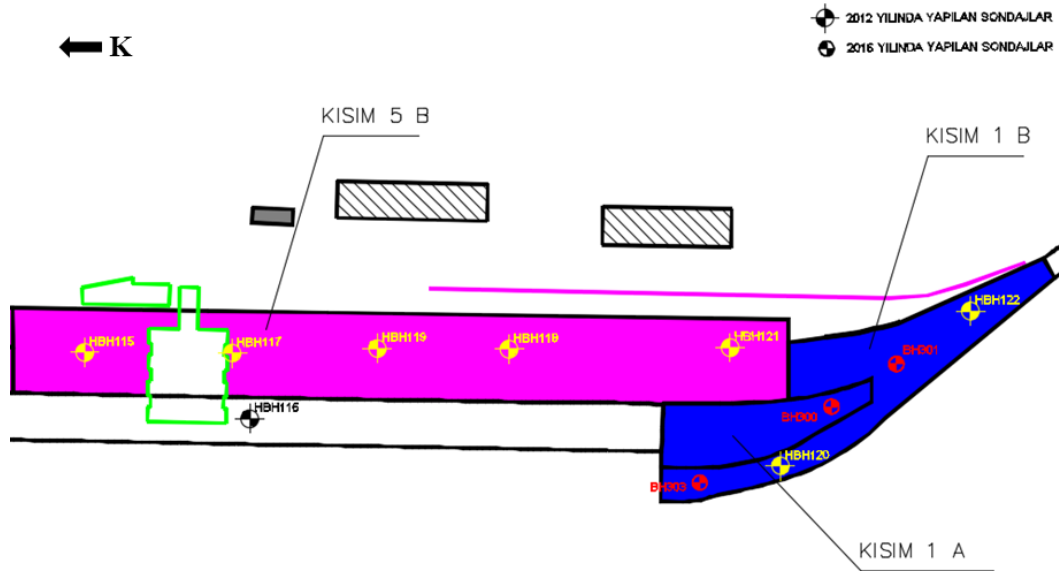
Alınan oturma okumalarının izlenmesiyle, PVD uygulanmış olan Kısım 1A, 1B ve 5B' de oturmaların beklenenin ötesinde devam ettiği belirlenmiş ve bu çalışmada özellikle bu bölgelerdeki iyileştirme uygulaması ve oturmaların değerlendirilmesine ağırlık verilmiştir.

##### 4.1. Genel Zemin Profili ve Zemin Özellikleri

İnceleme bölgesinde, genç alüvyonlar, göl çökeltileri ile anakaya olan kireçtaşı- marn tabakaları kesilmiştir. Bölgedeki sondajların büyük bir kısmında; Holosen yaşlı kumlu, siltli-killi, kahve-sarımsı kahve renkli alüvyon tabakası kesilmiştir. Bu tabakanın YASS' nin üstünde kalmış kısmı genellikle kuruma ile aşırı konsolide (*over-consolidation by desiccation*) olmuş durumdadır. Karşılaşılan koyu gri, yeşilimsi gri ve yeşil renkli, kavkılı, organik içerikli ve

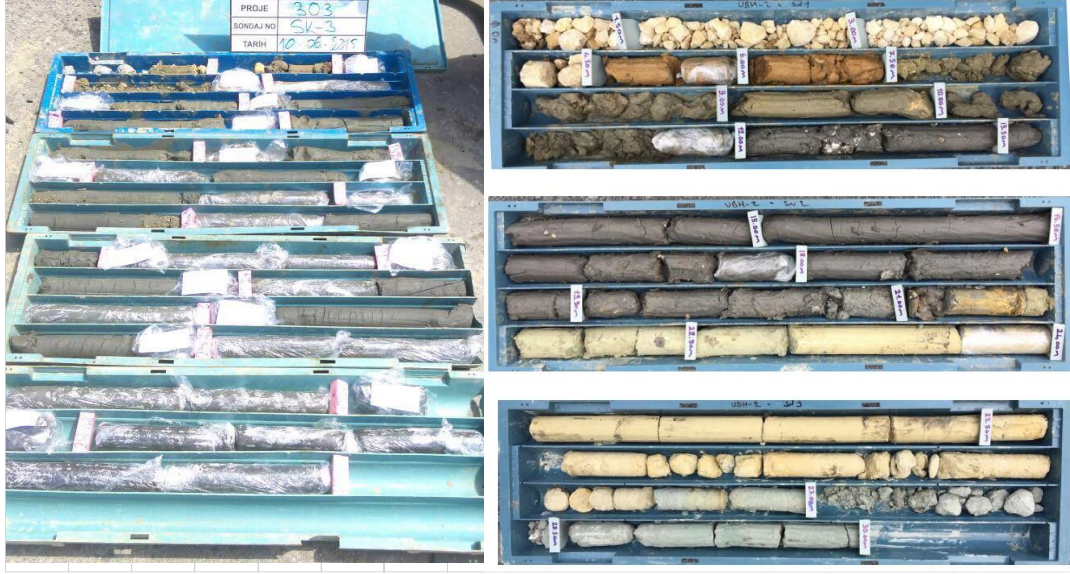
kokulu Kuvaterner (Holosen) yaşlı Kuşdili Formasyonu NL ve hafif aşırı konsolide killeri, bölgedeki alüvyon tabakasının altında değişken derinliklerde gözlemlenmiştir. Kuşdili tabakasının altında, bölgedeki kısımlarda farklılık göstermesine karşın hakim tabaka, sarımsı-bej renkli marn ve kireçtaşından oluşan Üst Eosen- Oligosen yaşlı Ceylan Formasyonudur. Bu formasyon ile Kuşdili tabakasının arasında açık yeşil-sarı-bej renkli ayrılmış marn tabakaları da bazı kısımlarda görülmektedir.

Arazi genelinde Alüvyon ve Kuşdili tabakaları 30-40m derinliklere ulaşmaktadır. Ceylan Formasyonuna ait kumtaşı, kireçtaşı ve marnlar daha çok proje alanının kenarlarında gözlemlenmiştir. Alanda 2007 yılından başlayarak birçok sondaj ve bu sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılmış laboratuvar deney sonuçları mevcuttur. Bu çalışmada; 2012, 2015 ve 2017 yıllarında yapılmış sondajlardan elde edilen bilgiler ve İstanbul Kültür Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda bu sondajların numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Koordinat bilgileri mevcut sondajların özellikle oturmanın devam ettiği belirlenen Kısım 1A, 1B ve 5B' deki yerleri saha planında verilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Kısım 1A, 1B ve 5B' de yapılan sondaj yerleri

Farklı zamanlarda yapılan sondajların birçoğunda yakın derinliklerde aynı tabakaların gözlemlenmesi, bölgedeki zemin profili hakkında tutarlı bilgiler elde edilmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, farklı tarihlerde elde edilmiş sondajlardan alınan numuneler karşılaştırıldığında, sondajların tümünde bölgenin genel jeolojisinde hakim olan koyu gri yumuşak Kuşdili killeri gözlemlenmektedir (Şekil 4.3).



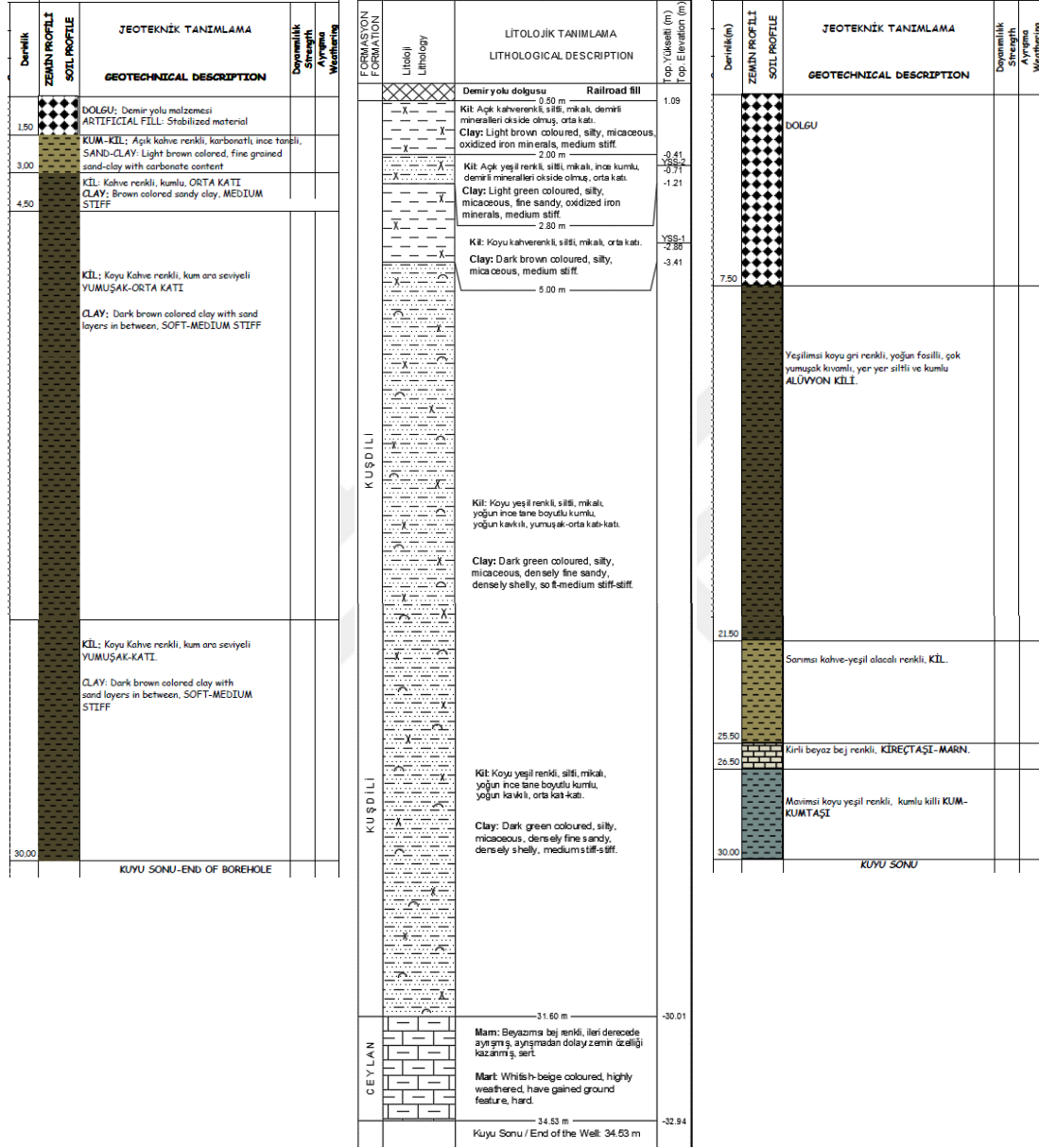
Şekil 4.3. 2015 yılında (solda) ve 2017 yılında (sağda) yapılan sondajlara ait numune sandıkları

Özellikle Kısım 1A, 1B ve Kısım 5B' nin bu iki kısma yakın bölgelerdeki zemin profilinde, Kuşdili kili birçok sondajda 30-35m derinliklere kadar ulaşmakta ve yine birçok sondajda kuyu sonunda anakaya tabakasına ulaşamamaktadır (Şekil 4.4a). Bu kısımlarda, Alüvyon tabakası 3-6m değişken kalınlıkta Kuşdili Formasyonu üzerinde belirlenmiştir. Kalın zemin tabakası altında, sondajlarda karşılaşılan Ceylan Formasyonu; mavimsi kumtaşı, sarımsı-bej kireçtaşı ve marnlar yaklaşık 30m derinlikten itibaren gözlemlenmiştir (Şekil 4.4b). Kaya tabakası genel olarak aşırı derecede ayrılmış zayıf-orta kalite olarak belirlenmiş ve bazı sondajlarda kaya tabakası ve Kuşdili kili arasında ayrışma ürünü aşırı konsolide killer tespit edilmiştir (Şekil 4.4c).

Bölgenin diğer kısımlarında Kuşdili tabakasının kalınlığı Kısım 1A, 1B ve 5B' ye göre daha az ve kaya tabakası yüzeye daha yakın derinliklerde gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak, proje alanının diğer kısımlarında oturmalar öngörölmüş sürelerde tamamlanmıştır.

Yapılan sondajlardan gelen numuneler üzerinde yapılmış laboratuvar deneylerine göre doğal arazi yüzeyinden itibaren 3-6m kalınlıkta değişen alüvyon tabakası; siltli-kumlu, açık kahve, sarımsı kahve, TS1500/2000' e göre ML, CI ve SW-SM sınıfı zemin olarak belirlenmiştir. Bu tabakanın altında görölen daha çok koyu gri renkli Kuşdili killeri ise CI ve CH olarak sınıflanmıştır. Bu zeminlerin doğal su muhtevaları ( $w_n$ ), likit limit ( $w_L$ ) civarında veya biraz daha düşüktür. Sıvılık inidisi ( $I_L$ ) 0.55-0.93 gibi 1' e yakın değerlerdedir. Kuşdili killlerinde yapılan konsolidasyonsuz drenajsız (UU, *Unconsolidated – Undrained*) üç eksenli

hücre kesme deneylerinden, drenajsız kayma direnci ( $S_u$ ) 10-20kPa gibi düşük düzeyde elde edilmiştir.



Numunelerden elde edilen deney sonuçlarında, özellikle Kuşdili tabakasının oldukça yumuşak kıvamda normal yüklenmiş veya hafif derecede aşırı konsolide (OC) killerden oluştuğu belirlenmiştir. Tablo 4.1' de laboratuvar deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1. İnceleme alanındaki zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Sondaj No.	Derinlik	Renk	w <sub>n</sub>	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	IP	I <sub>L</sub>	%İNCE	%C	SINIF	e <sub>0</sub>	ρ <sub>n</sub>	S <sub>u</sub>	E <sub>u</sub>	c	φ	e'	φ'
UBH-1	6.00	K	12	22	18	4	-1.27	51		ML								
BH 300	10.00	kG	46	56	22	34	0.69	94	60	CH								
BH 303	10.00	GY	37	38	17	21	0.93	73		CI								
BH 403	10.00	kY	48								1.24	17.42	20	2				
BH 401	11.50	K	36	48	16	32	0.62	76		CI	0.87	18.63	18	2				
UBH-1	12.00	SK	16	NP	NP	NP	-	8		SW-SM								
UBH-2	12.00	kG	49	69	22	47	0.55	90		CH								
BH 300	15.00	G	56	74	26	49	0.60	93		CH	1.53	16.75	21	3				
BH 301	15.00	Y	38								1.14	18.54	15	2				
BH 303	15.00	kG	48								1.12	18.40	12	1				
BH 404	15.00	aY	36								1.01	17.92	205	9				
UBH-1	15.50	kG	44															
UBH-2	16.00	kG	40								1.03	18.22			39	11	53	18
BH 300	20.00	kG																
BH 301	20.00	kG	54	75	27	48	0.57	93	50	CH	1.48	17.14	32	4	69	12	70	21
BH 303	20.00	kG	48	54	21	33	0.79	88	60	CH	1.27	17.34	10	1	8	16	11	30
UBH-1	22.50	YG	33	36	14	22	0.80	59		CI								
UBH-2	22.50	aYB	32	81	24	57	0.13	97		CH	1.00	18.06	156	9				
BH 300	25.00	G	54								1.44	16.65	11	1				
BH 301	25.00	kY	23								0.69	19.21	66	4				
BH 303	25.00	kG	45								1.10	18.18	11	1				
UBH-1	25.00	Y	23	46	15	31	0.26	51		CI								
UBH-1	27.00	kY	22	67	18	49	0.08	81		CH								
BH 303	30.00	GY	57	64	26	37	0.80	93		CH	1.62	16.35	14	1				

B:Bej G: Gri K: Kahve S: Sarı Y: Yeşil a: açık k: koyu

PVD ile iyileştirilen kildeki konsolidasyon oturmalarının hesaplanması amacıyla, ödometre deneyleri yapılmıştır. Zeminin sıkışabilirlik özellikleri ve geçirimsizlik katsayılarının belirlendiği deney sonuçları Tablo 4.2' de özetlenmiştir.

Ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlara göre; Kuşdili tabakasının aşırı konsolidasyon oranı OCR=1~2 olan,  $k_v=10^{-6}$  m/gün düzeylerinde oldukça düşük geçirimli olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu tabakanın sıkışma indisi  $C_c=0.673$  gibi yüksek değerlere erişmiştir.

Tablo 4.2. Bölgedeki zeminlerin sıkışabilirlik ve geçirimsizlikleri

Sondaj No.	Derinlik	Renk	SINIF	w <sub>n</sub>	I <sub>L</sub>	e <sub>0</sub>	ρ <sub>n</sub>	a <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /kN)	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /kN)	C <sub>c</sub>	C <sub>r</sub>	σ <sub>c</sub>	OCR	t <sub>50</sub> (dk.)	t <sub>90</sub> (dk.)	c <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /gün)				k <sub>v</sub> (m/gün)			
																t <sub>50</sub> ile	t <sub>90</sub> ile	t <sub>50</sub> ile	t <sub>90</sub> ile	t <sub>50</sub> ile	t <sub>90</sub> ile	t <sub>50</sub> ile	t <sub>90</sub> ile
UBH 1	6.00	K	ML	12	-1.27	0.54	21.61	4.94E-05	3.21E-05	0.144	0.016	382	5.40	0.60	2.89	4.73E-02	4.23E-02	1.49E-05	1.33E-05				
BH 403	10.00	kK		48		1.30	16.90	5.43E-04	2.36E-04	0.379	0.061	110	1.55	25.80	132.25	1.10E-03	9.23E-04	2.55E-06	2.14E-06				
BH 300	10.00	kG	CH	49	0.69	1.34	16.96	6.87E-04	2.93E-04	0.375	0.106	100	1.40	25.00	121.00	1.13E-03	1.01E-03	3.27E-06	2.90E-06				
BH 303	10.00	GY	CH	37	0.93	0.89	18.76	3.54E-04	1.87E-04	0.245			1.00	3.42	14.44	8.29E-03	8.46E-03	1.52E-05	1.55E-05				
BH 401	11.50	K	CI	36	0.62	0.74	20.02	3.56E-04	2.05E-04	0.231	0.062	270	2.30	25.16	64.00	1.13E-03	1.91E-03	2.26E-06	3.83E-06				
UBH 2	12.00	kG	CH	49	0.55	1.43	16.15	4.10E-04	1.69E-04	0.435	0.079	310	1.60	37.50	169.00	7.56E-04	7.23E-04	1.25E-06	1.20E-06				
BH 404	15.00	aY		34		0.76	19.97	1.87E-04	1.06E-04	0.158	0.017	190	1.25	1.58	9.00	1.80E-02	1.36E-02	1.87E-05	1.41E-05				
UBH 1	15.50	kG		44		1.10	18.07	5.03E-04	2.40E-04	0.338	0.075	276	0.99	13.07	64.00	2.17E-03	1.91E-03	5.10E-06	4.48E-06				
UBH 2	16.00	kG		46		1.27	16.88	3.33E-04	1.47E-04	0.443	0.122	170	1.50	49.19	225.00	5.77E-04	5.43E-04	8.30E-07	7.81E-07				
BH 300	20.00	kG	CH	56	0.60	1.58	16.15	6.77E-04	2.62E-04	0.455			1.00	33.81	169.00	8.39E-04	7.23E-04	2.16E-06	1.86E-06				
BH 301	20.00	kG	CH	57	0.54	1.35	17.02	4.71E-04	2.00E-04	0.673	0.222		1.00	11.34	64.00	2.50E-03	1.91E-03	4.92E-06	3.75E-06				
BH 303	20.00	kG	CH	47	0.79	1.12	18.70	5.44E-04	2.57E-04	0.343			1.00	14.72	81.00	1.93E-03	1.51E-03	4.85E-06	3.79E-06				
UBH 2	22.50	aYB	CH	32	0.13	1.05	17.74	1.28E-04	6.24E-05	0.341	0.083	861	4.83	5.09	36.00	5.57E-03	3.39E-03	3.41E-06	2.08E-06				
BH 303	25.00	kG	CH	57	0.80	1.71	15.47	7.86E-04	2.90E-04	0.510			1.00	26.48	100.00	1.07E-03	1.22E-03	3.05E-06	3.47E-06				
UBH 1	25.00	Y	CI	23	0.26	0.80	19.16	2.82E-04	1.57E-04	0.226	0.075	258	1.10	27.20	100.00	1.04E-03	1.22E-03	1.60E-06	1.88E-06				
BH 303	30.00	GY		58		1.56	16.17	7.32E-04	2.86E-04	0.451			1.00	13.93	64.00	2.04E-03	1.91E-03	5.71E-06	5.35E-06				

#### 4.2. Uygulanan PVD' nin Tasarımı

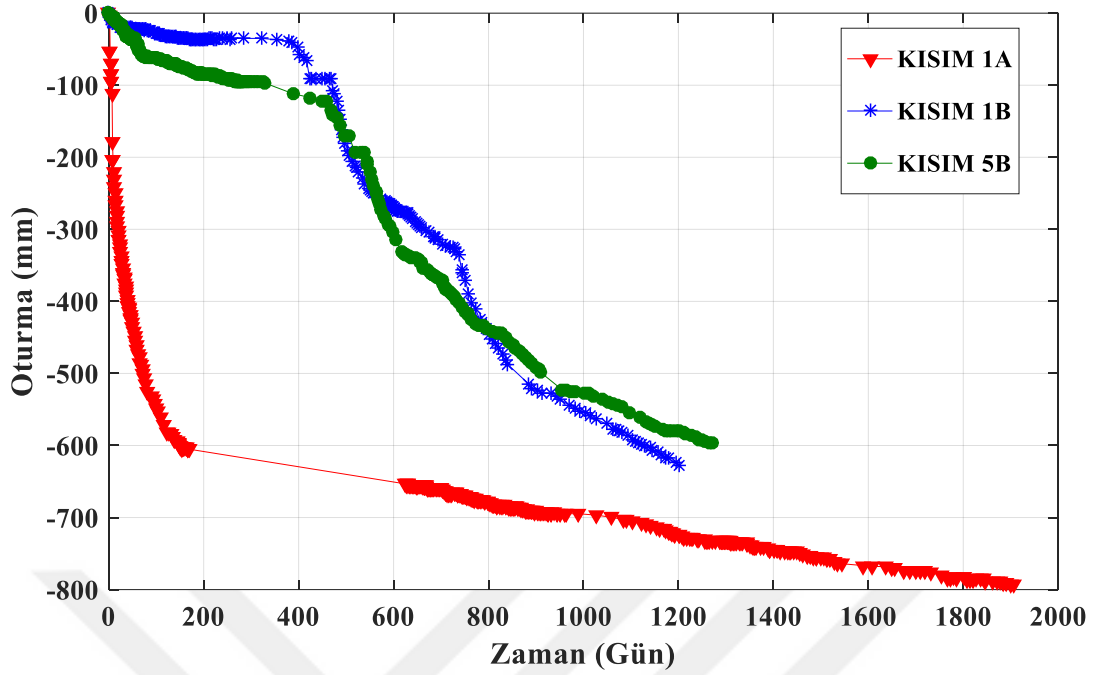
İncelenen bölgede gerçekleşeceği belirlenen aşırı oturmaların hızlandırılması için önyükleme ve PVD ile iyileştirme çözümü uygulanmıştır. Önyükleme ile iyileştirilen Kısım 3A ve 4; PVD uygulaması yapılan Kısım 2A, 2C, 3B, 5A ve 5C' de oturmalar öngörülen sürelerde tamamlanmıştır. Kısım 2B, 2D ve 5D' de iyileştirme uygulaması yapılmamıştır. Bu çalışmada yalnızca, oturmaların devam ettiği belirlenmiş olan Kısım 5B, 1B ve 1A' da uygulanan PVD tasarımı ve oturmalar incelenmiştir. Bölgedeki tüm kısımlar için uygulanan iyileştirme tasarımı Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3. Uygulanan PVD tasarım bilgileri

KISIM	DREN ARALIĞI (m)	DREN BOYU (m)	ÖNYÜKLEME	ALAN (m <sup>2</sup> )
1A	1x1	20	3.0m	5134
1B	2x2	26	2.5m	10629
2A	1.2x1.2	21	3.0m	23760
2B	-	-	-	10981
2C	1.2x1.2	21	3.0m	14182
2D	-	-	-	2003
3A	-	-	1.0m	1896
3B	1x1	20	3.0m	450
4	-	-	1.5m	35033
5A	2x2	24	2.0m	18528
5B	2x2	24	2.0m	16307
5C	2x2	24	2.0m	11416
5D	-	-	-	7032

İnceleme bölgesinde uygulanmış PVD ile iyileştirme tasarımı sonucunda, projeci oturmaların %90'ının 6-10 ay gibi bir sürede tamamlanacağı öngörmüştü. Ancak, birçok kısımda oturmalar belirlenen sürelerde tamamlanmasına karşın, Kısım 1A, 1B ve 5B' deki oturmaların projede belirlenen sürelerin oldukça ötesinde devam ettiği belirlenmiştir. Bu kısımlarda alınmış en yüksek ölçümlerle oluşturulan oturma-zaman eğrileri Şekil 4.5' te verilmiştir.





Şekil 4.5. Kısım 1A, 1B ve 5B arazi oturma-zaman eğrileri

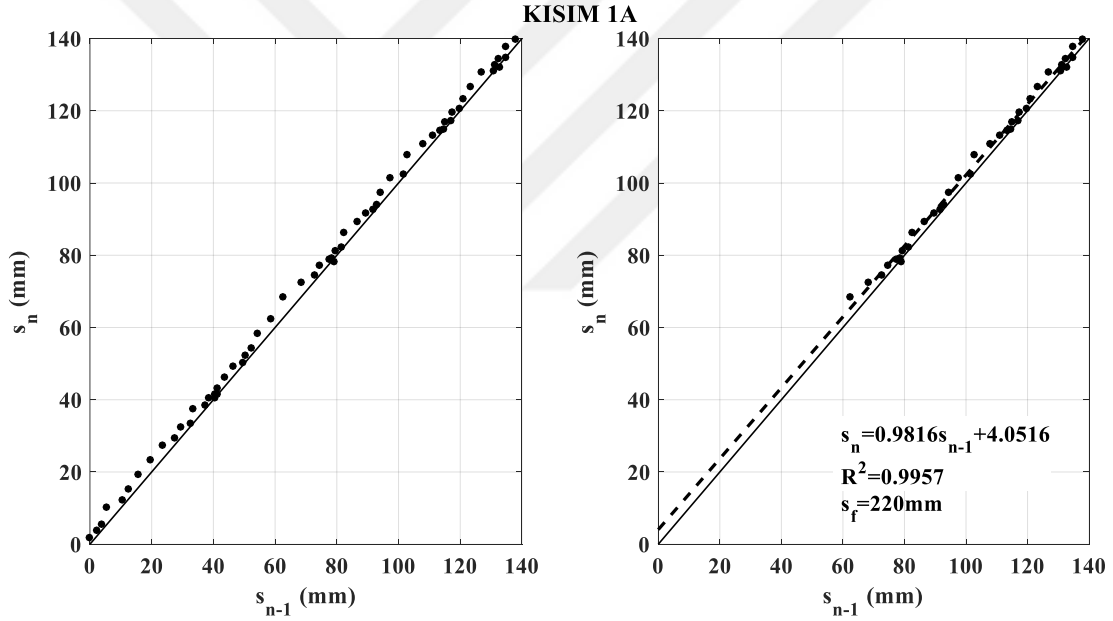
Oturmalar, 400-650mm düzeyinde beklenirken, ölçümlere göre konsolidasyonun devam ettiği kısımlar için 600-800mm düzeyine erişmiştir. Kısım 1B ve 5B için oturmaların 400mm düzeyinde ve 180 gün içerisinde tamamlanacağı öngörülmüş, ancak arazi ölçümleri oturmaların bu sürenin ötesinde devam ettiğini göstermiştir. Kısım 1A için oturmalar 180 gün içerisinde 650mm düzeyinde beklenmiş, komşu bölgelerin (Kısım 1B ve 5B) yüklenmesiyle oluşacak ilave oturmaların bu sürenin ardından 100mm' yi geçmeyeceği beklenmiştir. Arazideki ölçümlere göre, Kısım 1A' daki oturmaların, komşu bölgelerin yüklenmesinin ardından beklenen sürenin ötesine uzadığı belirlenmiştir. Tablo 4.4' te arazi ölçümleri ve beklenen oturmalar ile konsolidasyon süreleri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 4.4. Beklenen oturmalar ve arazi ölçümleri

	Beklenen Oturma (mm)	Beklenen Süre (Gün)	Son Ölçüm (mm)	Geçen Süre (Gün)
<b>KISIM 1A</b>	650	180	793	1906
<b>KISIM 1B</b>	450	180	627	1201
<b>KISIM 5B</b>	410	180	597	1271

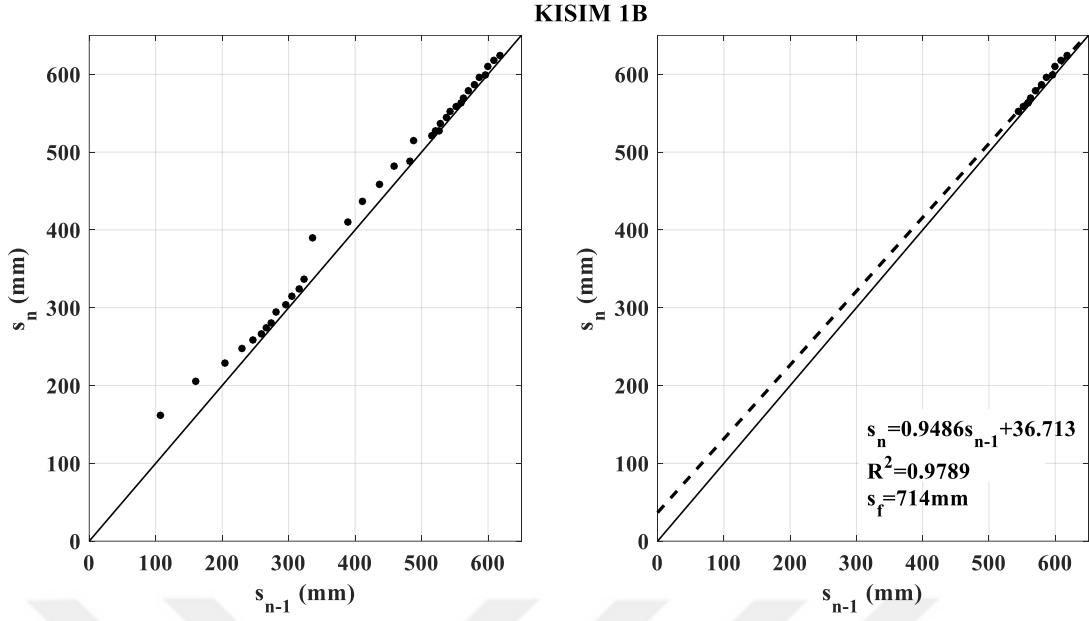
### 4.3. Asaoka ile Oturmaların Kontrolü ve Arazi Ölçüleriyle Karşılaştırılması

İncelenen bölgede yapılmış PVD uygulamasının oturmalara etkisinin kontrolü Asaoka yöntemi ile yapılmıştır. Bu bağlamda, oturmaların devam ettiği Kısım 1A, 1B ve 5'te alınmış olan en yüksek plaka ölçümleri kullanılarak Asaoka diyagramları hazırlanmıştır. Kısım 1A için hazırlanan diyagramda tüm okumalar gösterilmiş (Şekil 4.6a); ancak son oturmanın hesaplanmasında, ilk okumaların meydana getirebileceği hataların önlenmesi amacıyla bunlar kullanılmamıştır (Şekil 4.6b). Kısım 1A için elde edilen son oturma ( $s_f$ ) değeri, arazide komşu kısımların tekrar yüklenmesinden sonra alınan okumaların etkisinde elde edilmiştir. Bu kısmın toplam oturması, önyüklemenin kaldırılmasından önceki okumalar ve elde edilen  $s_f$ 'nin toplamıdır.



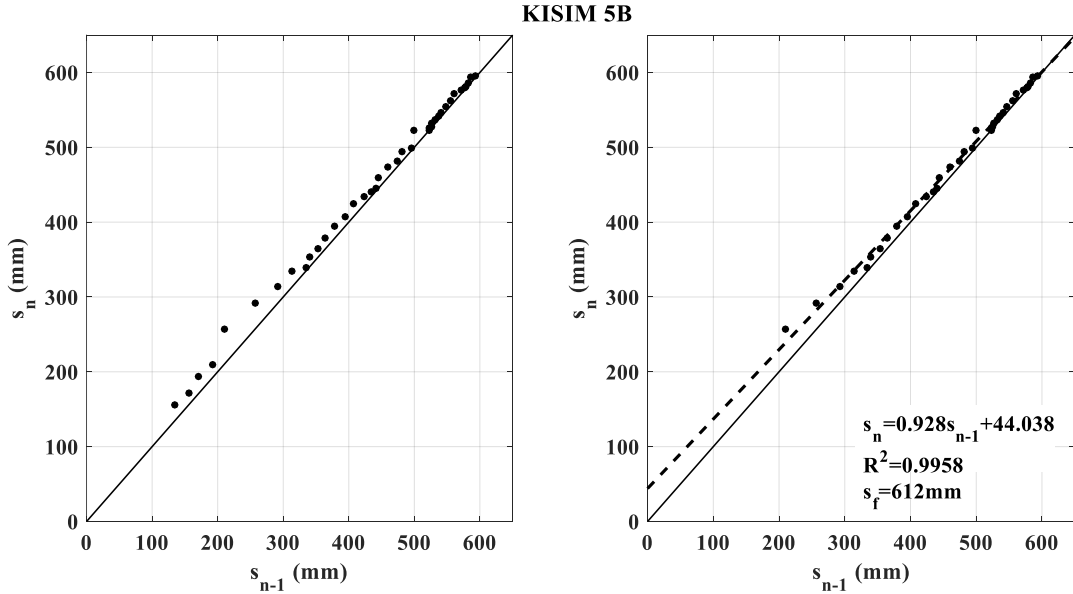
Şekil 4.6. Kısım 1A için Asaoka diyagramı

Kısım 1B de yapılan ikinci aşırı yüklemenin etkisi, diyagramda noktaların zıplamasıyla belirmektedir (Şekil 4.7a). Son oturmanın hesaplanması, ikinci yükleme sonrasında okumalar kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.7b).



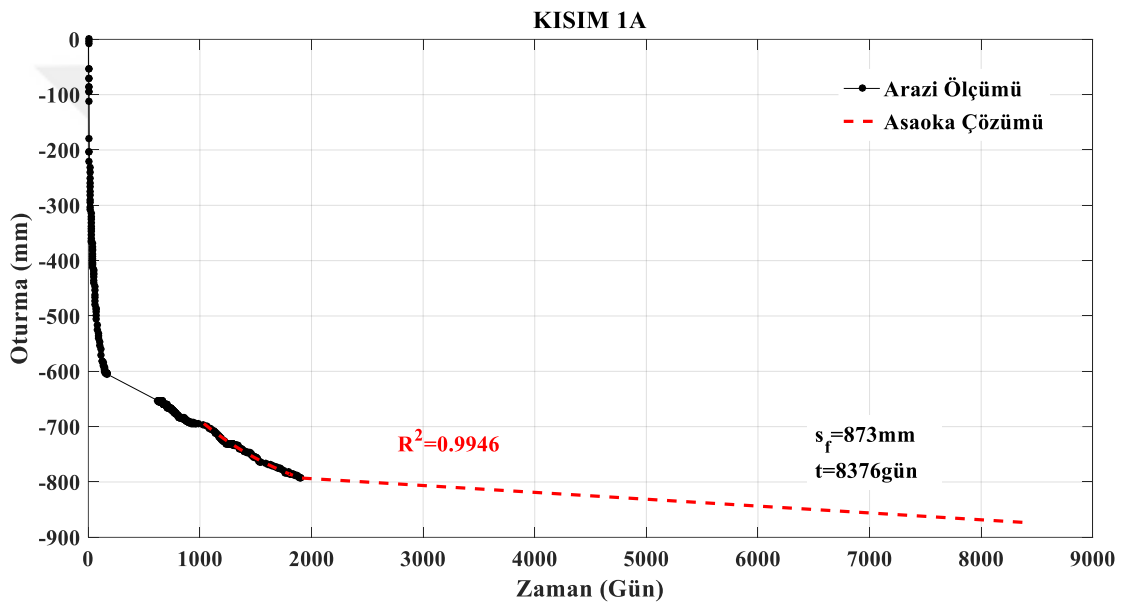
Şekil 4.7. Kısım 1B için Asaka diyagramı

Kısım 1B’ deki ilave yüklemenin etkisi Kısım 5’ in özellikle 1B’ ye yakın olan kısmı 5B’de de gözlemlenmektedir (Şekil 4.8a). Kısım 5B için son oturma, benzer şekilde ek yüklemenin etkisinden sonraki okumalar kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.8b).



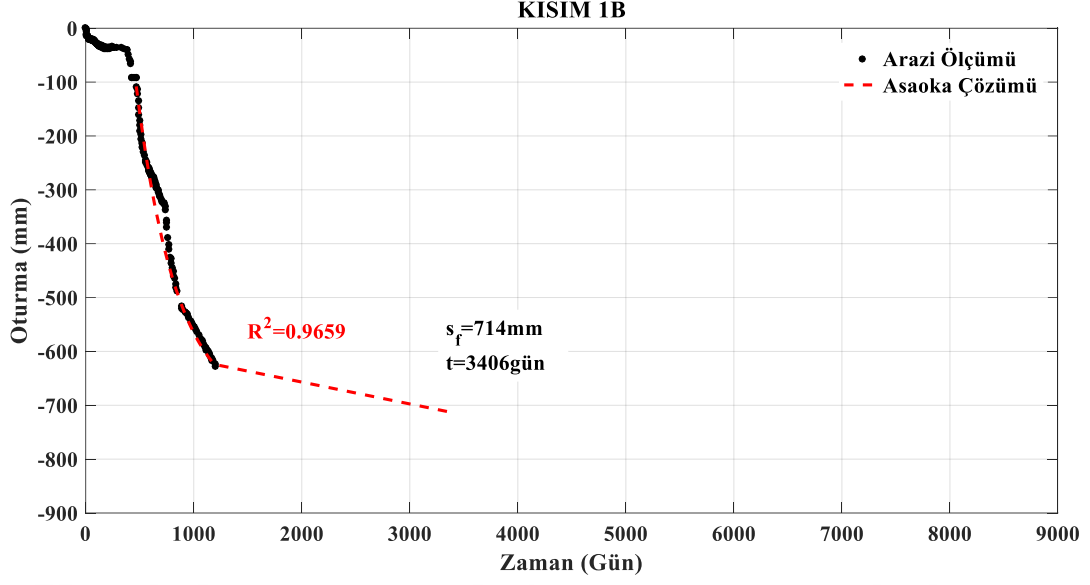
Şekil 4.8. Kısım 5B için Asaka diyagramı

Elde edilen son oturmalar ve bu oturmaların tamamlanma süreleri ile eşitlik 3.4 kullanılarak her bir kısım için oturma-zaman eğrisi oluşturulmuştur. Mevcut arazi oturma-zaman verileri ve Asaoka çözümü ile elde edilen oturma-zaman eğrileri birleştirilmiştir (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11). Bu yoldan, Asaoka metodu ile bulunan son oturma ve konsolidasyonun tamamlanma süresi arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Her bir kısım için arazi oturma-zaman eğrisinin eğilimi ve Asaoka çözümü, determinasyon katsayısı  $R^2 > 0.95$  ile oldukça uyumlu bulunmuştur. Diğer bir deyişle, teorik çözümle elde edilen son oturma değeri ve bu oturmaya ulaşılması için gerekli süre, arazi ölçümleriyle örtüşmektedir.

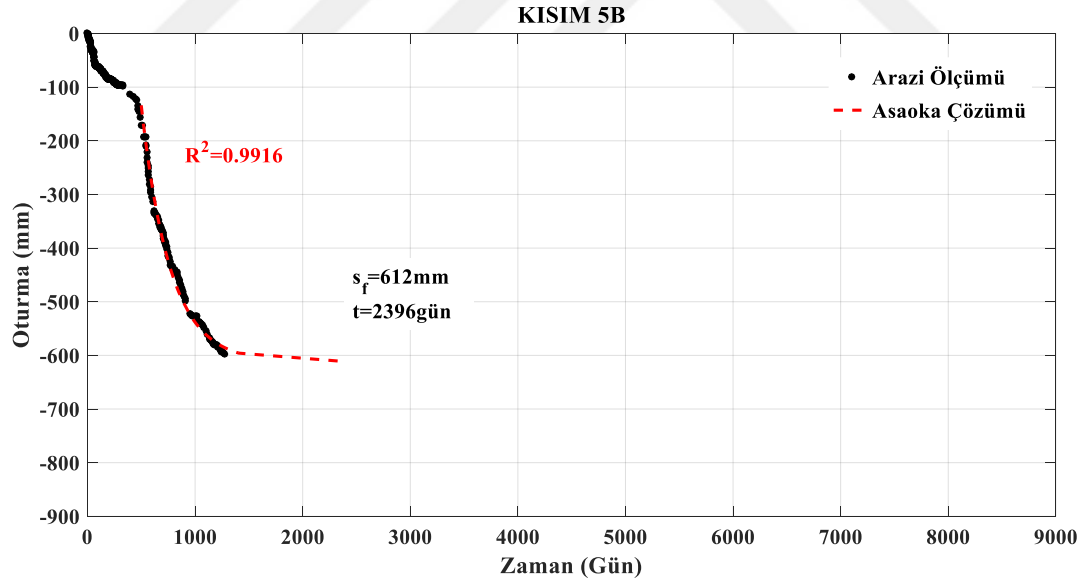


Şekil 4.9. Kısım 1A oturma-zaman eğrisi

Kısım 1A' da 180 gün sonunda yükleme kaldırılmış, 454 gün sonra Kısım 1B' de uygulanan ek yüklemelerin etkisiyle oluşan oturmalar sonucunda ölçüm alınmaya devam edilmiştir. Şekil 4.9' da verilen arazi oturma-zaman ölçümlerinin, yüklemenin kaldırılmasından sonraki okumalar ile Asaoka çözümü birleştirilmiştir. Teorik çözümden elde edilen eğri, arazi ölçümlerinin devamı niteliğinde bir eğilim göstermektedir.



Kısım 1B ve 5B' de okumaların başlangıcından sırasıyla 397 ve 467 gün sonra yükleme başlatılmış olup bunun etkisi arazi ölçümlerinde görülmektedir (Şekil 4.10 ve 4.11).



Asaoka çözümünden elde edilen eğriler, arazi ölçümlerinin yükleme başladıktan sonraki kısımları ile birleştirilmiş ve teorik çözüm ile ölçülen değerlerin eğilimlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Hesaplanan son oturma değerlerine bakıldığında, her bir kısım için ölçülen son okumalardan daha yüksek değer elde edildiği görülmektedir. Tüm kısımlar için son

okuma alındığında geçen süreler, Asaoka çözümüyle elde edilen son oturma için gerekli sürelerden düşüktür. Bu da, Kısım 1A, 1B ve 5B’ de konsolidasyonun devam ettiğini doğrulamaktadır. Tablo 4.5’ te Asaoka yöntemi ile değerlendirilen kısımlarda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 4.5. Ölçülen ve hesaplanan konsolidasyon süreleri ve oturmalar

	KISIM 1A	KISIM 1B	KISIM 5B
Ölçülen Son Okuma (mm)	793	627	597
Geçen Süre (Gün)	1906	1201	1271
Asaoka ile Hesaplanan Son Oturma (mm)	873	714	612
Asaoka Çözümüyle Toplam Süre (Gün)	8376	3406	2396

Bölgedeki PVD ile iyileştirme uygulamasına rağmen incelenen üç kısımda oturmaların devam ettiği, arazi ölçümü ve Asaoka yönteminden elde edilen son oturmalar karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca, hesaplanan son oturmalara ulaşılması için planlanandan çok daha fazla süre geçmesi gerektiği görülmüştür.

#### 4.4. PVD Tasarımının Sayısal Analiz ile Modellenmesi

İyileştirme yapılan bölgedeki PVD tasarımında başlıca parametreler olan  $c_h$  veya  $k_h$ , dren yatay aralıkları ( $S_{dren}$ ) ve dren boylarının ( $L_{dren}$ ) değişiminin konsolidasyona etkisinin irdelenmesi amacıyla üç boyutlu konsolidasyon analizi (3DCONS- *Three-Dimensional Consolidation Analysis*) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM- *Finite Element Method*) kullanılarak geoteknik modeller oluşturulmuştur. Üç boyutlu analiz Settle3D, sonlu elemanlar analizi Plaxis2D yazılımları ile yapılmıştır. Her bir kısım için ayrı ayrı yapılan 3DCONS ve FEM modellerinden elde edilen sonuçlar, Asaoka yönteminden elde edilen çözümler ve arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Zemin profili, sondajlardan elde edilen bilgiler ve bu sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre oluşturulmuştur. Her kısım için uygulanan PVD tasarımı ve önyüklemeye dolgu yükseklikleri Tablo 4.3’ teki bilgilere göre tanımlanmıştır. Kullanılan zemin parametreleri, arazi ölçümlerinden elde edilen değerlerden yararlanılarak gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde güncellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan 3DCONS ve FEM modellerinde tanımlı zemin profili ve zemin özellikleri Tablo 4.6’ da verilmiştir. Modellerde YASS’ nin yüzeyden 1.50 ile 2.0m aşağıda olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 4.6. 3DCONS ve FEM Modellerinde tanımlanan zemin profili ve özellikleri

KISIM 1A						
	BALLAST +3.00_0.00	ALÜVYON 0.00_-4.00	KUŞDİLİ KİLİ >-4.00			
Model	Pekleşen Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Birim		
$\rho_n$	22	18	17	$\text{kN/m}^3$		
$\rho_d$	23	19	18	$\text{kN/m}^3$		
$c'$	2	5	2	kPa		
$\phi'$	40	25	30	°		
$C_c$	-	0.250	0.500			
$C_r$	-	0.070	0.080			
$E_{50}^{ref}$	50000	-	-	kPa		
$E_{oed}^{ref}$	50000	-	-	kPa		
$E_{ur}^{ref}$	150000	-	-	kPa		
OCR	2	2.5	1			
KISIM 1B						
	BALLAST +2.50_0.00	ALÜVYON 0.00_-5.00	KUŞDİLİ KİLİ -4.00_-30.00	ARYIŞMIŞ MARN -30.00_-35.00	MARN/KİREÇTAŞI >-35.00	
Model	Pekleşen Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Birim
$\rho_n$	22	18	17	19	22	$\text{kN/m}^3$
$\rho_d$	23	19	18	20	23	$\text{kN/m}^3$
$c'$	2	5	2	25	150	kPa
$\phi'$	40	25	30	25	25	°
$C_c$		0.250	0.450			
$C_r$		0.070	0.080			
$E_{50}^{ref}$	50000			30000	75000	kPa
$E_{oed}^{ref}$	50000			30000	75000	kPa
$E_{ur}^{ref}$	150000			90000	225000	kPa
OCR	2	2.5	1	4	8.0	
KISIM 5B						
	BALLAST +2.00_0.00	ALÜVYON 0.00_-4.00	KUŞDİLİ KİLİ -4.00_-26.00	ARYIŞMIŞ MARN -26.00_-30.00	MARN/KİREÇTAŞI >-30.00	
Model	Pekleşen Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Yumuşayan Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Pekleşen Zemin Modeli	Birim
$\rho_n$	22	18	17	19	22	$\text{kN/m}^3$
$\rho_d$	23	19	18	20	23	$\text{kN/m}^3$
$c'$	2	5	2	25	150	kPa
$\phi'$	40	25	30	25	25	°
$C_c$		0.250	0.500			
$C_r$		0.070	0.080			
$E_{50}^{ref}$	50000			30000	75000	kPa
$E_{oed}^{ref}$	50000			30000	75000	kPa
$E_{ur}^{ref}$	150000			90000	225000	kPa
OCR	2	2.5	1	4	8.0	

Oluşturulan 3DCONS ve FEM modelleri ile konsolidasyon analizi yapılmış ve son oturmalar elde edilmiştir. Yapılan konsolidasyon analizinde en etkin parametre olan geçirimsizlik katsayısı, özellikle sıkışabilirliği incelenen tabakalar (Alüvyon ve Kuşdili) için Tablo 4.2' de verilen zemin özelliklerinden yararlanılarak tanımlanmıştır. Modellerde kullanılan zemin geçirimsizlik katsayıları Tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4.7. 3DCONS ve FEM modelinde kullanılan düşey geçirimsizlik katsayıları

	Düşey Geçirimsizlik, $k_v$ (m/gün)	
	ALÜVYON	KUŞDİLİ KİLİ
<b>KISIM 1A</b>	$2.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$
<b>KISIM 1B</b>	$2.0 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$
<b>KISIM 5B</b>	$2.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$

Kısım 1A, 1B ve 5B için son oturma değerleri ve bu oturmalara erişilmesi için geçen süreler Asaoka çözümü kullanılarak belirlenmiştir. Oluşturulan 3DCONS ve FEM modellerinde, Asaoka çözümüyle belirlenen sürelere karşılık gelen konsolidasyon oturmaları hesaplanmıştır. Araziden alınan son oturma ölçümleriyle karşılaştırıldığında, hem modellerden hem de Asaoka çözümlerinden elde edilen son oturmaların yüksek olduğu ve konsolidasyonun devam ettiği belirlenmiştir.

Asaoka ve FEM ile elde edilen son oturmalar birbirine yakın bulunmuş, 3DCONS ile hesaplanan son oturmalar diğer iki çözümden yüksek elde edilmiştir. Arazi ölçümleri ve Asaoka yöntemi ile hesaplanan son oturma değerleri ile 3DCONS ve FEM modellerinden elde edilen oturmaların karşılaştırması Tablo 4.8’ de yapılmıştır. Arazi ölçümlerinden elde edilmiş Asaoka çözümü referans alınarak, kullanılan iki yöntemin verdiği sonuçlar yüzdellik hata ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan negatif %Hata değeri, elde edilen sonucun referans alınan değerden düşük bulunduğunu ifade etmektedir.

Tablo 4.8. 3DCONS, FEM ve Asaoka sonuçlarının karşılaştırılması

	<b>KISIM 1A</b>	<b>KISIM 1B</b>	<b>KISIM 5B</b>
Son arazi ölçümü (mm)	793	627	597
Geçen süre (gün)	1906	1201	1271
Asaoka ile hesaplanan $s_f$ (mm)	873	714	612
Asaoka ile hesaplanan süre, t (gün)	8376	3406	2396
FEM modelinde t süre için hesaplanan $s_f$ (mm)	864	706	628
3DCONS modelinde t süre için hesaplanan $s_f$ (mm)	919	797	763
FEM sonucunun %Hatası	-%1.0	-%1.1	%2.6
3DCONS sonucunun %Hatası	%5.3	%11.6	%24.7

FEM ile hesaplanan son oturmalarındaki fark %5’ in altında kalmaktadır. 3DCONS ile hesaplanan son oturmalar ise Asaoka çözümüne göre %5-25 arası oldukça yüksek farklar belirlemektedir. Buna göre; yapılan konsolidasyon analizinde FEM ile hesaplanan son oturmalar, 3DCONS modellerine göre arazi ölçümlerine daha yakın sonuçlar vermiştir.

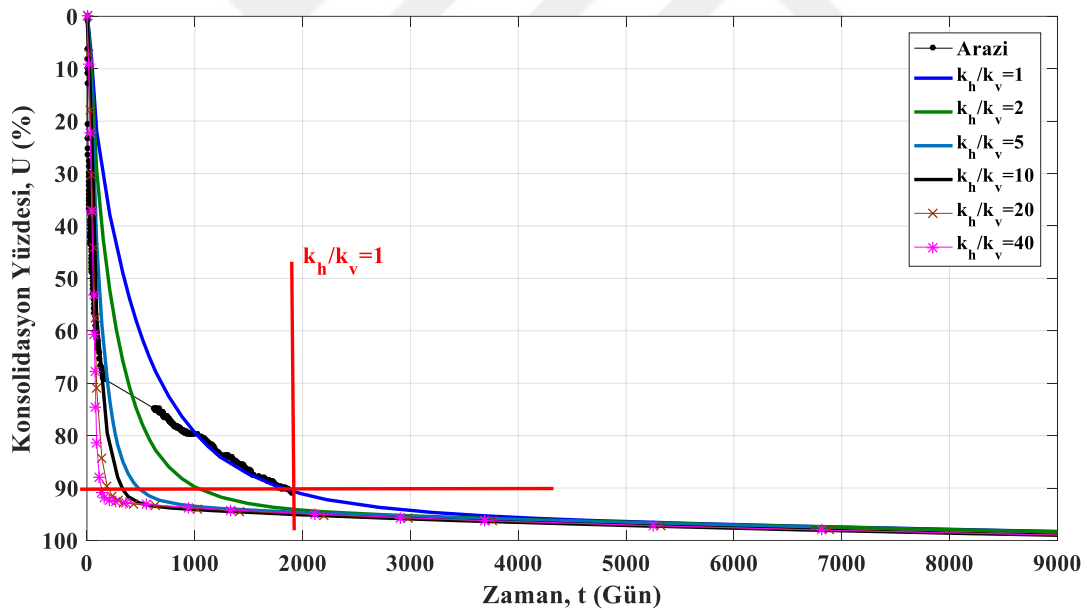
#### 4.5. Yatay-Düşey Geçirimsizlik Oranının Konsolidasyona Etkisi

PVD ile iyileştirilen bir zeminde konsolidasyonun tamamlanmasını kontrol eden başlıca parametre yatay geçirimsizlik katsayısıdır. Zeminde  $k_h/k_v$  oranının 1’ den büyük olduğu gerçeğinden yola çıkarak düşey drenlerle konsolidasyonun hızlandırılması tasarlanabilir. Bu çalışmada, PVD ile iyileştirilmiş bölgede tasarlanan yatay dren aralıklarına göre (Tablo 4.3)



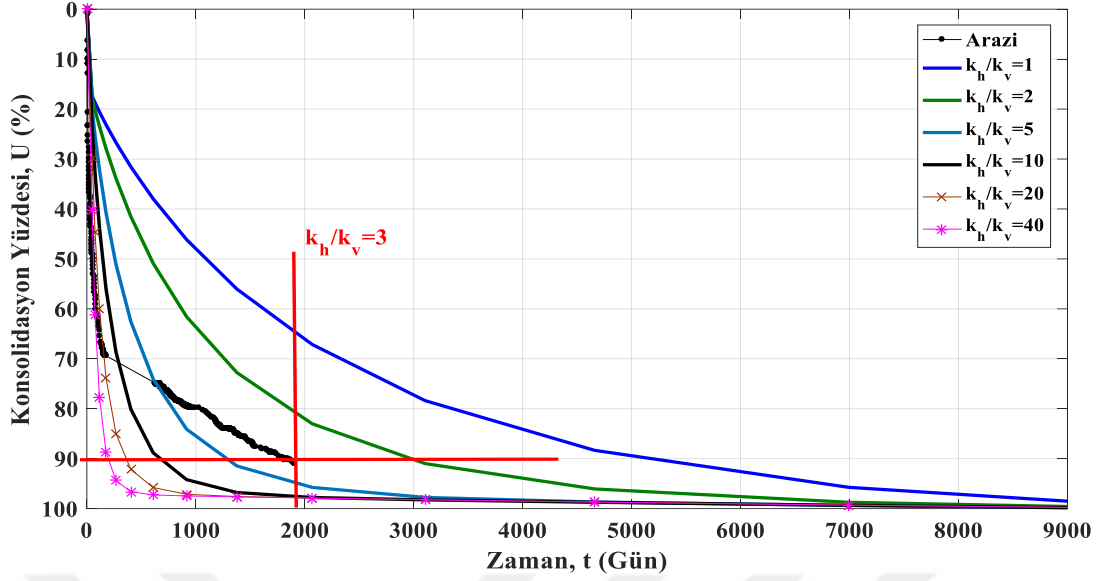
Asaoka yöntemi kullanılarak  $k_h$  değeri elde edilmiştir. Her bir bölge için kullanılan 3DCONS ve FEM modelinden farklı  $k_h/k_v$  için edinilen analiz sonuçları ile arazi okumaları birleştirilerek mevcut  $k_h/k_v$  belirlenmiş ve bu oranlar Asaoka çözümüyle belirlenen  $k_h/k_v$  ile karşılaştırılmıştır.

Kısım 1A için oluşturulan modellerde, arazide yüklemenin kaldırılmasından önce ve sonraki ölçümlerin tamamı ile karşılaştırma yapılmıştır. FEM modelinde, farklı  $k_h/k_v$  değerleri için konsolidasyon yüzdesine karşılık zaman ( $U-t$ ) eğrileri oluşturulmuş ve arazi ölçümleriyle oluşturulan  $U-t$  eğrisi birleştirilmiştir (Şekil 4.12). Konsolidasyon yüzdesi, oturma değerlerinin Asaoka çözümüyle elde edilen son oturma ( $s_f$ ) değerine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Tüm kısımlarda, belirlenen aynı noktadan değer elde edilmesi ve konsolidasyonun büyük oranda tamamlandığı durumun incelenmesi amacıyla  $U=90$ ' a karşılık gelen oranlar kullanılmıştır. Buna göre, Kısım 1A için FEM ile oluşturulan eğrilerde %90 konsolidasyona karşılık gelen  $k_h/k_v=1$  olarak elde edilmiştir.



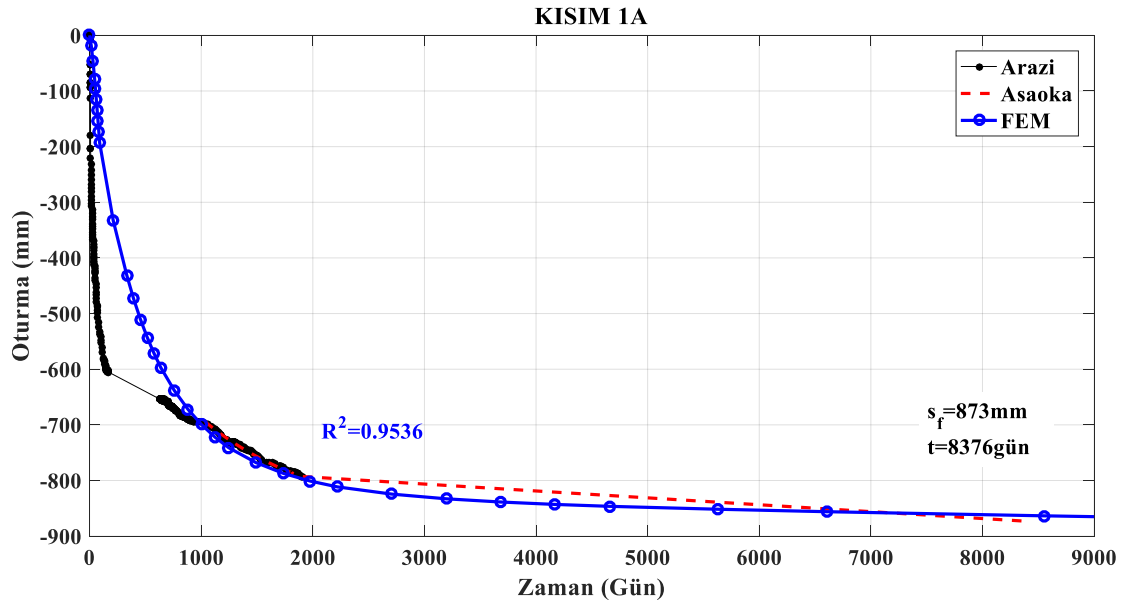
Şekil 4.12: Kısım 1A için FEM ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

$k_h/k_v$  değişimi, Kısım 1A için 3DCONS modeliyle de incelenmiş, farklı oranlar için oluşturulan  $U-t$  eğrileri ve arazi ölçümleriyle %90 konsolidasyona karşılık gelen  $k_h/k_v$  değeri belirlenmiştir. Buna göre, Kısım 1A için 3DCONS ile  $k_h/k_v=3$  bulunmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Kısım 1A için 3DCONS ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

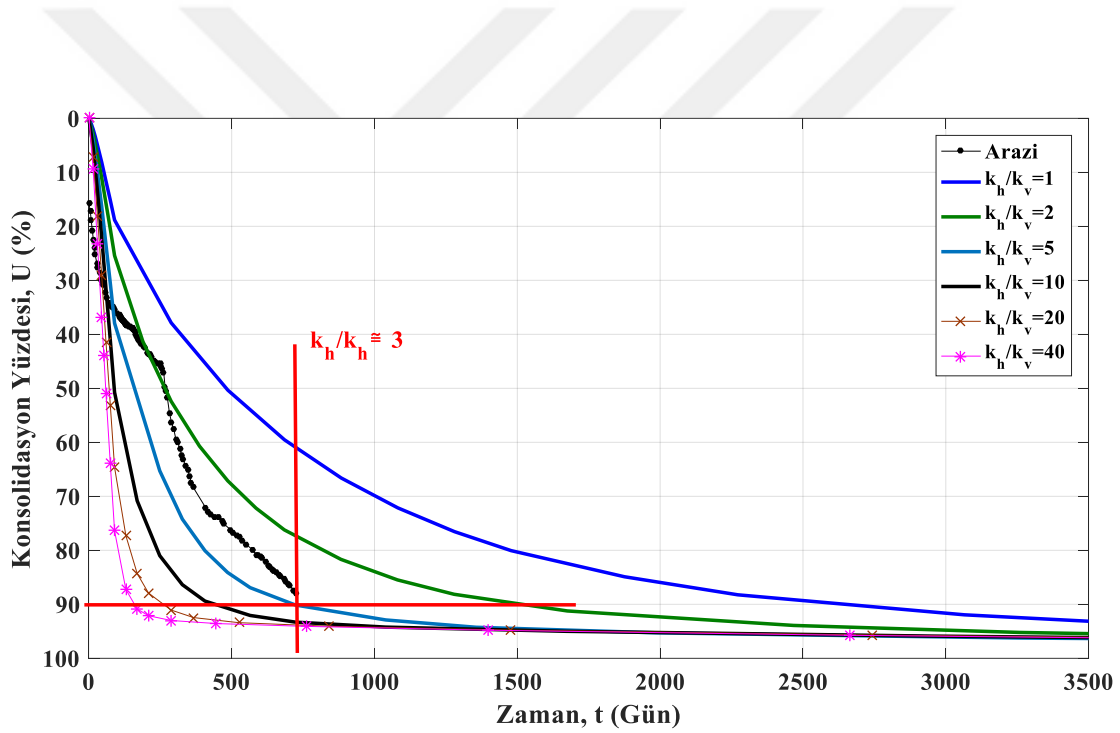
Belirlenen  $k_h/k_v$  için FEM modelinden elde edilen oturma-zaman (mavi düz çizgi) ile Şekil 4.8' deki oturma-zaman eğrisi (siyah noktalar ve kesikli kırmızı çizgi) birleştirilmiştir (Şekil 4.14). Eğrilerin birbiriyle uyumu, yüklemenin kaldırılmasından sonraki okumalarla hesaplanan  $R^2=0.95$  ile ifade edilmiştir.



Şekil 4.14. Kısım 1A için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri

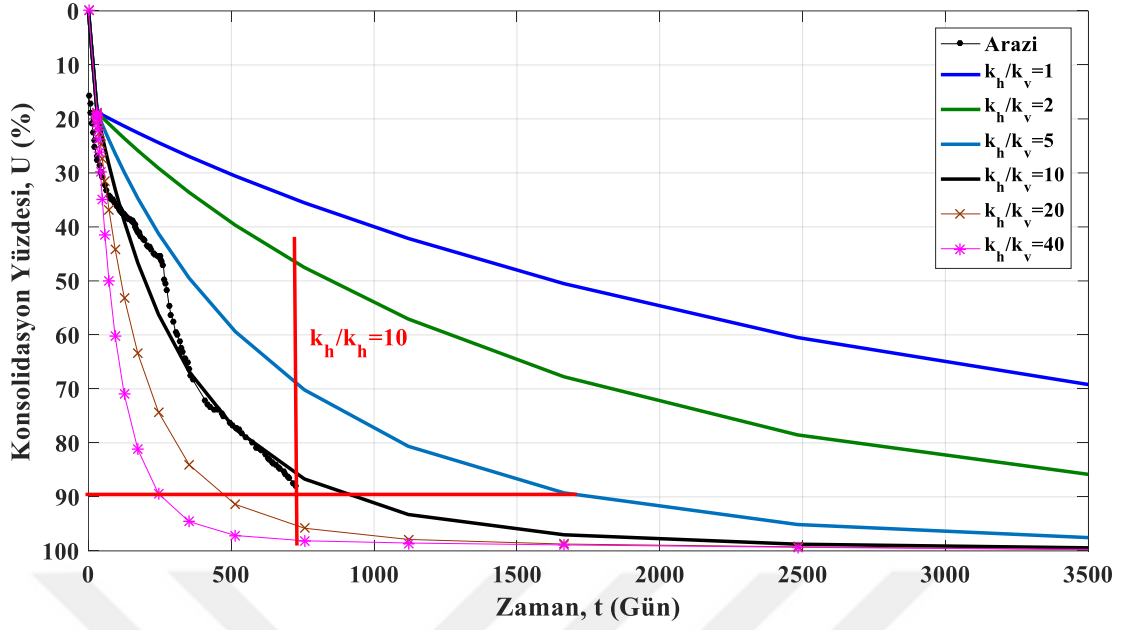
Oturmanın başlangıç sürelerinde arazi ölçümlerinin FEM çözümünden farklı olması, imalat sırasında dren çevresinde belirebilecek geçirimsizlik değişimiyle açıklanabilir. Ayrıca, Asaoka çözümü ve FEM ile oluşturulan oturma-zaman eğrilerinin her ikisinde  $s_f=873\text{mm}$  oturma için 8000 günden fazla zaman geçmesi gerektiği görülmektedir. Kısım 1A için yatay-düşey geçirimsizlik oranının birbirine eşit hesaplanması, PVD ile iyileştirme uygulamasına karşın oturmaların öngörölmüş sürelerden fazla devam etmesinde oldukça etkili bir unsurdur.

Kısım 1B' de 3DCONS ve FEM çözümü, yüklemenin başlangıcından sonraki kısımlardaki arazi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır.  $k_h/k_v$  değerleri değiştirilerek  $U-t$  eğrileri elde edilmiştir. Arazi ölçümleri kullanılarak oluşturulan  $U-t$  eğrisi ve farklı  $k_h/k_v$  değerleri için FEM modelinden elde edilen  $U-t$  eğrileriyle  $U=90\%$  için mevcut  $k_h/k_v$  belirlenmiştir (Şekil 4.15).



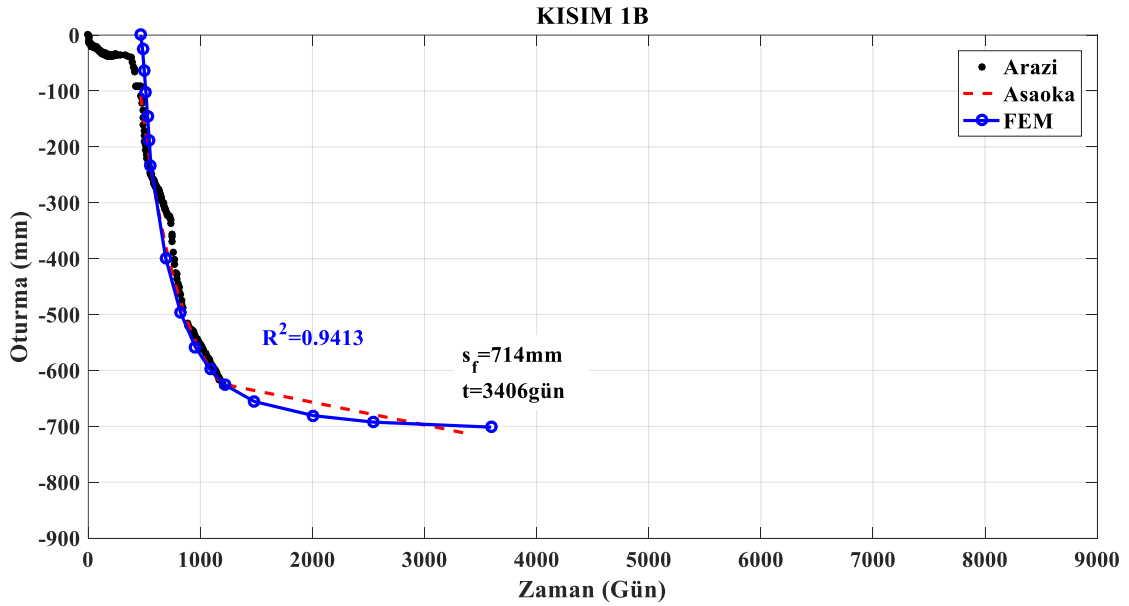
Şekil 4.15. Kısım 1B için FEM ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

3DCONS modeli için  $k_h/k_v$  değiştirilerek  $U-t$  eğrileri elde edilmiş ve arazi ölçümleriyle  $U=90\%$  değerine karşılık gelen oran  $k_h/k_v=10$  belirlenmiştir (Şekil 4.16). Kısım 1B için farklı iki yöntem ile elde edilen oranlar birbirinden oldukça farklı bulunmuştur.



Şekil 4.16. Kısım 1B için 3DCONS ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

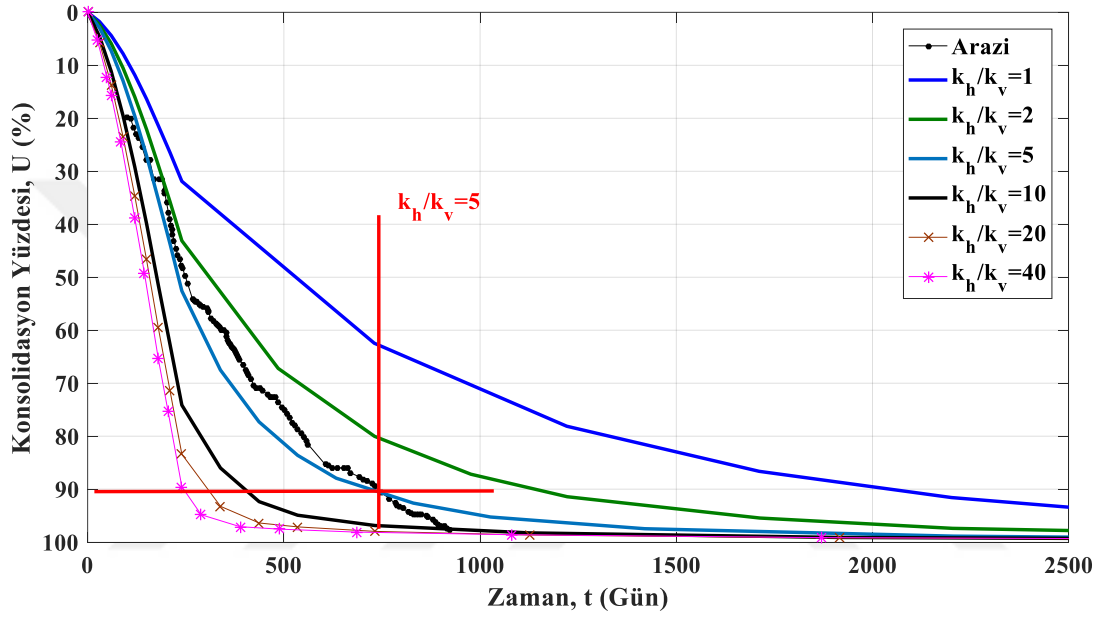
Kısım 1B' de yükleme sonrası alınan ölçümlerden itibaren karşılaştırılan,  $k_h/k_v=3$  için FEM oturma zaman eğrisi (mavi çizgi), arazi ölçümleri (siyah noktalar) ve Asaoka çözümüyle elde edilen oturma-zaman eğrilerinin (kırmızı kesikli çizgi) birbiriyle uyumlu olduğu ( $R^2=0.94$ ) belirlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Kısım 1B için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri

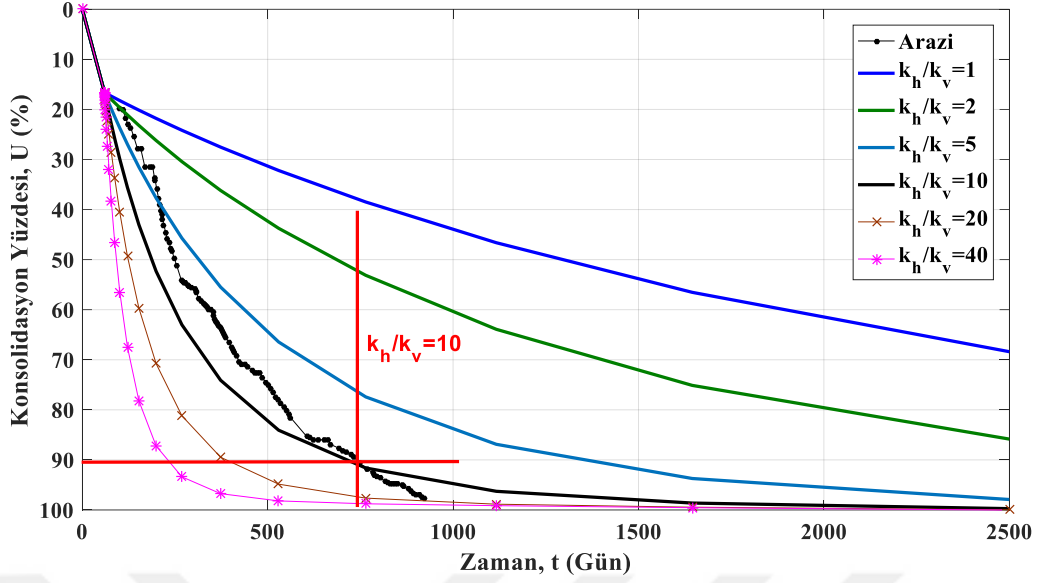
Asaoka çözümü ve FEM modelinin oturma-zaman eğrileri incelendiğinde, belirlenen  $s_f=714\text{mm}$  değerine 3000 günden fazla sürede ulaşılacağı görülmektedir.

Kısım 1A ve 1B için yapılan, farklı  $k_h/k_v$  değerleriyle FEM modelinden ve arazi ölçümlerinden elde edilen oturma-zaman eğrileri, Kısım 5B için de oluşturulmuş ve %90 konsolidasyona karşılık gelen mevcut  $k_h/k_v=5$  olarak belirlenmiştir (Şekil 4.18).



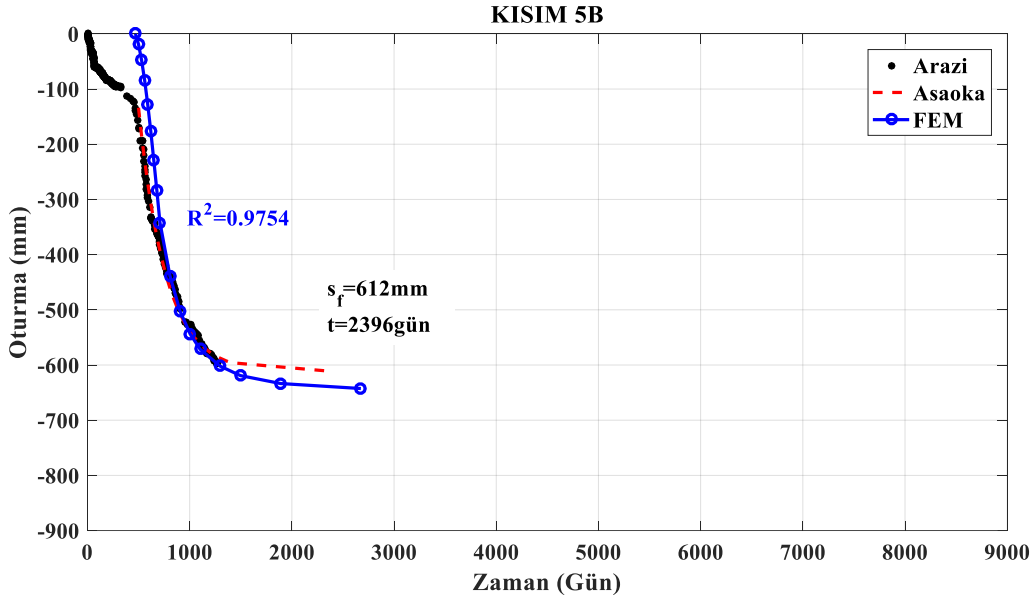
Şekil 4.18. Kısım 5B için FEM ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

Kısım 5B için oluşturulan 3DCONS modeli ile farklı  $k_h/k_v$  için  $U-t$  eğrileri oluşturulmuştur. (Şekil 4.19). Bu eğriler ve  $U=90$  değerine karşılık gelen arazi ölçümüne göre Kısım 5B için 3DCONS ile  $k_h/k_v=10$  bulunmuştur (Şekil 4.19). Kısım 5B için oluşturulan 3DCONS ve FEM modellerinde birbirinden oldukça farklı  $k_h/k_v$  değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Kısım 5B için 3DCONS ile  $k_h/k_v$  belirlenmesi

Arazide yüklemenin başlangıcından itibaren alınmış ölçümler ve belirlenen  $k_h/k_v$  için elde edilen oturma-zaman verileri birleştirilmiş ve Kısım 5B için oluşturulan eğriler birbiriyle uyumlu ( $R^2=0.98$ ) bulunmuştur (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Kısım 5B için Asaoka, FEM çözümü ve Arazi ölçümleriyle oturma-zaman eğrileri

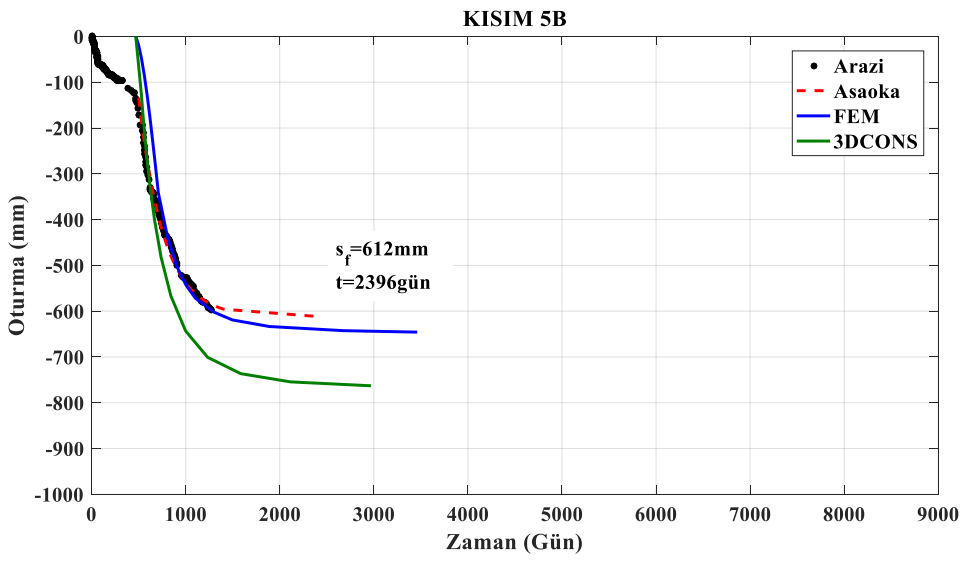
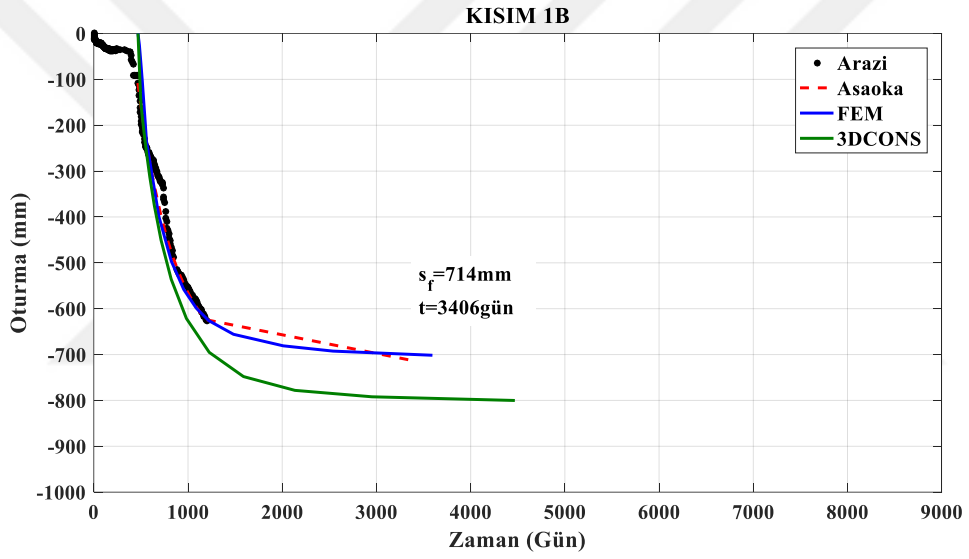
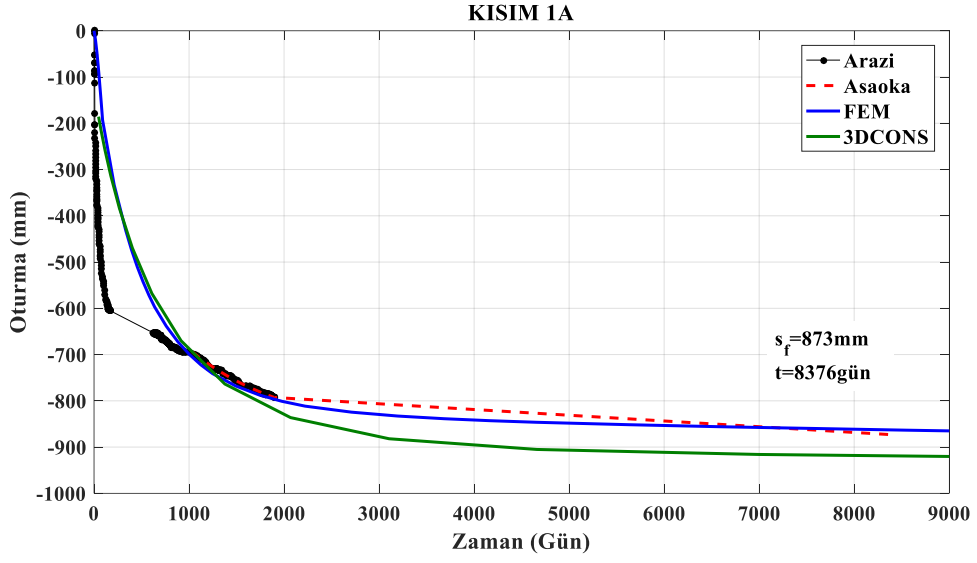
Kısım 5B elde edilen yatay-düşey geçirimsizlik oranı, bu kısımdaki konsolidasyonun planlanan zamanlarda tamamlanabilmesi için yeterli bulunmasına karşın oturmalar devam etmektedir. Bu durum, komşu iki kısımda (Kısım 1A ve 1B) konsolidasyon oturmalarının devam etmesi sonucu Kısım 5B' nin de etkilenmesi ve Kısım 1B' de yapılan ilave(aşırı) yüklemenin etkisi ile açıklanabilir.

Kısım 1A, 1B ve 5B için, Asaoka çözümüyle elde edilmiş  $c_h$  (Eşitlik 3.3), 3DCONS ve FEM çözümleriyle belirlenen  $k_h/k_v$  karşılaştırılmıştır. Asaoka çözümüyle hesaplanan  $c_h$  değerleri ile her bir kısım için  $k_h$  değeri ve  $k_h/k_v$  elde edilmiştir. Bu oranlar ile her bir kısım için oluşturulan modeller kullanılarak belirlenmiş  $k_h/k_v$  karşılaştırılmış ve Tablo 4.9' de elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 4.9. Asaoka, 3DCONS ve FEM çözümüyle  $k_h/k_v$  karşılaştırması

	$c_v$ (m <sup>2</sup> /gün)	$k_v$ (m/gün)	Asaoka ile $c_h$ (m <sup>2</sup> /gün)	Asaoka $k_h/k_v$	FEM $k_h/k_v$	3DCONS $k_h/k_v$
<b>KISIM 1A</b>	$3.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-4}$	1	1	3
<b>KISIM 1B</b>	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-3}$	5	3	10
<b>KISIM 5B</b>	$2.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$7.2 \times 10^{-4}$	4	5	10

Yapılan analizler sonucunda, Asaoka ve FEM çözümüyle belirlenen  $k_h/k_v$  birbirine eşit veya yakın bulunmuş, bu çözümlerden elde edilen oturma-zaman eğrileri ve arazi ölçümleri birbiriyle uyumlu olarak belirlenmiştir. Her iki çözüme göre, belirlenen  $s_f$  değerlerine erişilmesi için öngörölmüş sürelerden fazla zaman geçmesi gerekmektedir. Ancak, 3DCONS modelleriyle elde edilen oranlar hem Asaoka hem de FEM çözümlerinden oldukça farklı elde edilmiştir. Her iki yöntemle belirlenen  $k_h/k_v$  için tüm kısımlarda oturma-zaman eğrileri arazi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.21). FEM ile elde edilen sonuçların arazi ölçümlerine uyumlu olduğu, 3DCONS sonuçlarının ise daha yüksek sonuç verdiği belirlenmiştir.

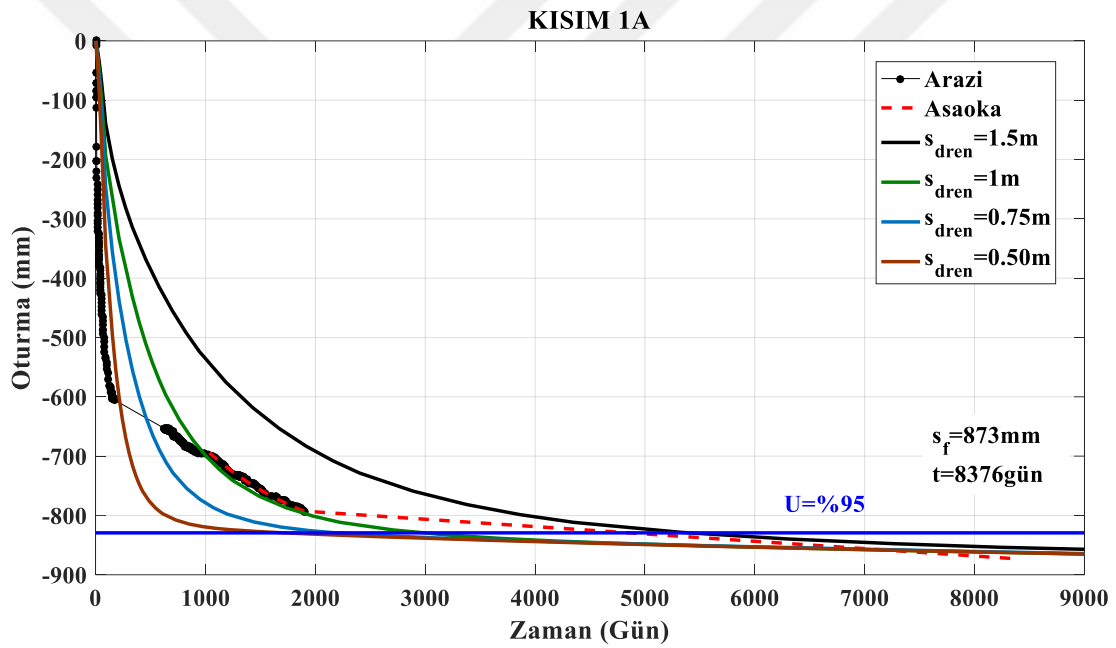


Şekil 4.21. Kısım 1A, 1B ve 5B için arazi, FEM ve 3DCONS oturma-zaman eğrileri



#### 4.6. Dren Yatay Aralıklarının Konsolidasyona Etkisi

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, her bir kısım için belirlenen  $k_h/k_v$  değerleri ve PVD boyları sabit tutularak, dren yatay aralıklarının ( $s_{dren}$ ) değişiminin konsolidasyon oturmalarına etkisi incelenmiştir. Son oturma değerleri ve yatay-düşey geçirimsizlik oranında arazi ölçümlerinden farklı sonuç verdiği belirlenen 3DCONS modelleri,  $s_{dren}$  değişiminin incelenmesinde kullanılmamıştır. FEM modelleriyle, farklı  $s_{dren}$  değerleri için elde edilen eğrilerle, her bir kısımdaki arazi ölçümleri ve Asaoka çözümüyle oluşturulan oturma-zaman eğrisi (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11) karşılaştırılmıştır. FEM modelinde kullanılan  $s_{dren}$  aralıkları, planlanan değerleri kapsayacak şekilde 0.5m artışla 0.5m ile 3m arası değiştirilmiştir. Kısım 1A için yapılan FEM modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’ de verilmiştir.

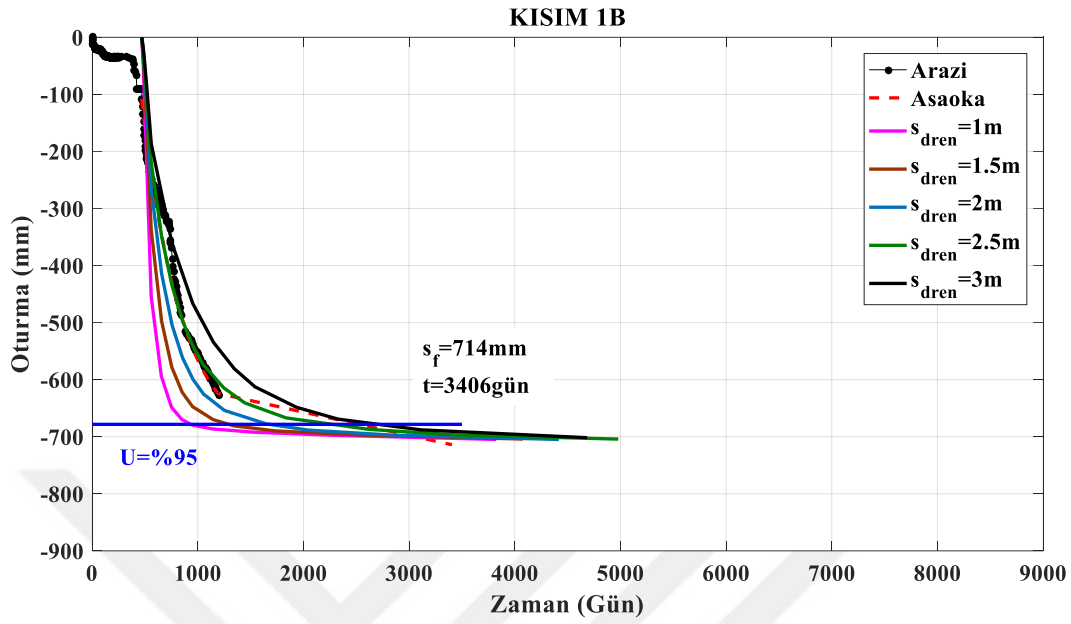


Şekil 4.22. Kısım 1A için  $s_{dren}$  değişiminin etkisi

Arazi ölçümleri ve Asaoka çözümü kullanılarak elde edilen  $s_f$  ile  $U = \%95$ ’ deki oturma değeri belirlenmiştir. Bu değerden geçirilen doğrunun (mavi düz çizgi), farklı dren aralıkları için oluşturulan eğriler ve arazi oturma-zaman eğrisini kestiği zaman değerleri belirlenmiştir. Buna göre Kısım 1A’ da,  $U = \%95$  için gereken süreye ( $t_{95} = 4856$  gün),  $1 < s_{dren} < 1.5m$  olması halinde ulaşılmaktadır.

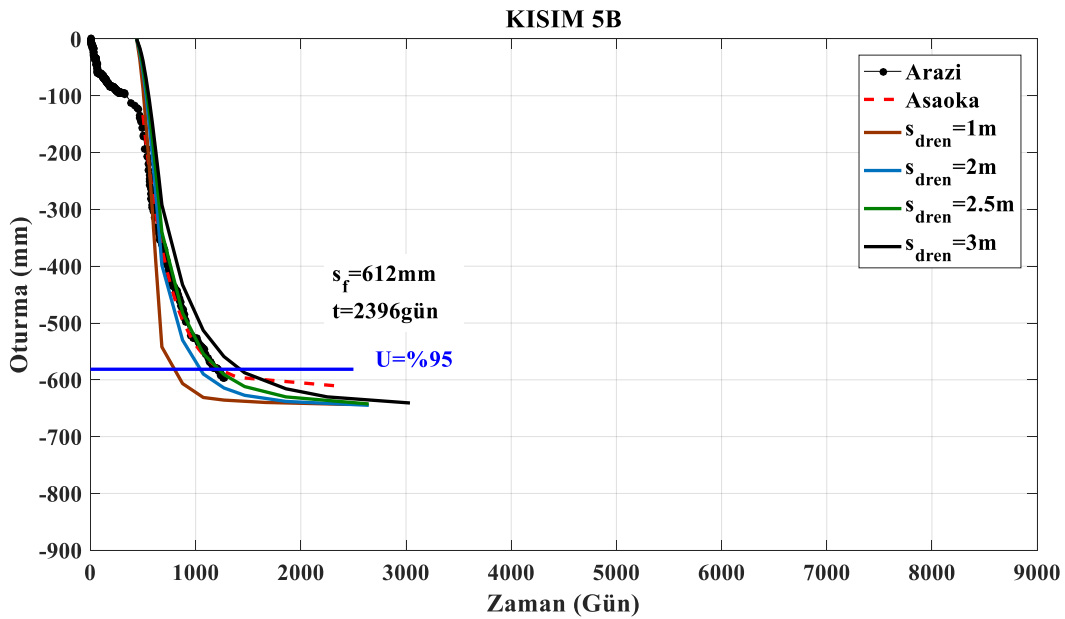
Kısım 1B’ de yüklemenin başlamasından sonraki kısım için farklı  $s_{dren}$  değerleri ve arazi ölçümleriyle oluşturulan oturma-zaman eğrilerinde  $U = \%95$  doğrusunun (mavi düz çizgi)

her bir eğriyi kestiği  $t_{95}$  değeri belirlenmiştir. Asaoka çözümüyle elde edilen  $t_{95}=2519$  güne dren yatay aralıklarının  $2.5 < s_{dren} < 3m$  olması durumunda ulaşılmaktadır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Kısım 1B için  $s_{dren}$  değişiminin etkisi

Kısım 5B için  $s_{dren}$  değişiminin etkisi Şekil 4.19' da verilmiştir. Her bir  $s_{dren}$  değeri ve arazi ölçümleri için oluşturulan oturma-zaman eğrilerinin  $U=\%95$  doğrusunu (mavi düz çizgi) kestiği  $t_{95}$  süreleri elde edilmiştir. Buna göre, Kısım 5B için arazi ölçümleri kullanılarak Asaoka çözümüyle hesaplanan  $t_{95}=1236$  güne,  $s_{dren} \approx 2.5m$ ' de ulaşıldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Kısım 5B için  $s_{dren}$  değişiminin etkisi

Yatay dren aralıklarının her bir kısım için karşılaştırıldığı Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24’ daki eğrilerden elde edilen  $t_{95}$ , arazi ölçümleri ve Asaoka çözümünden hesaplanan süreler Tablo 4.10’ da özetlenmiştir.

Tablo 4.10. Farklı  $s_{dren}$  ve Asaoka çözümü için  $t_{95}$  değerleri

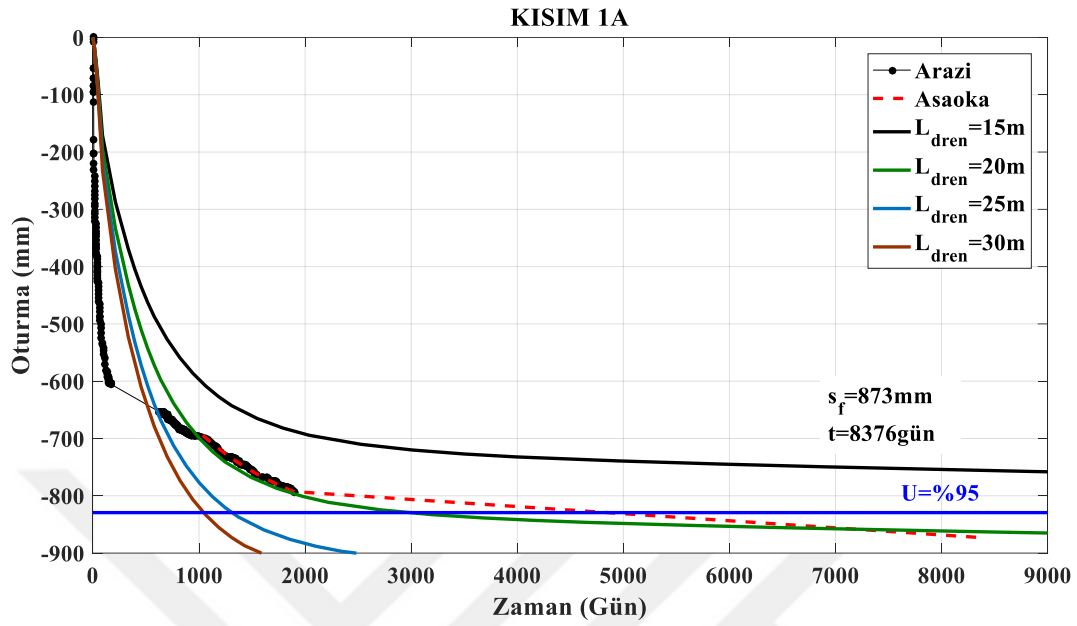
	KISIM 1A	KISIM 1B	KISIM 5B
Arazide Son Ölçüm (mm)	793	627	597
Geçen Zaman (Gün)	1906	1201	1271
	<b><math>t_{95}</math> (Gün)</b>		
Asaoka Çözümü	4856	2519	1236
$s_{dren}=0.5m$	1775	-	-
$s_{dren}=0.75m$	2261	-	-
$s_{dren}=1m$	3012	933	799
$s_{dren}=1.5m$	5414	1305	-
$s_{dren}=2m$	-	1683	1045
$s_{dren}=2.5m$	-	2268	1221
$s_{dren}=3m$	-	2699	1423

#### 4.7. Konsolidasyon Oturmalarına Dren Boyunun Etkisi

PVD ile iyileştirmede dren yatay aralıklarının yanı sıra dren boyları da önem taşımaktadır. Uygulanan dren boyunca suyun radyal yönde drenajın sağlanması için dren boyları genellikle sıkışabilir tabakayı geçmelidir. Drenlerin kısa kalması durumunda, tabakanın iyileştirilmemiş kısmında radyal drenaj sağlanmadığından konsolidasyon hızı düşmektedir. Çalışmanın bu bölümünde, dren boyları ( $L_{dren}$ ) değişiminin konsolidasyon oturmalarına etkisi irdelenmiştir.  $L_{dren}$  değişiminin incelenmesinde, arazi ölçümlerine 3DCONS’ dan daha yakın sonuç verdiği belirlenen FEM modelleri kullanılmıştır. İncelenen her kısım için  $k_h/k_v$  değeri ve dren aralıkları sabit tutularak farklı  $L_{dren}$  değerleri için FEM modelinden oturma-zaman eğrileri elde edilmiştir. Arazi ölçümleri ve Asaoka çözümü ile hesaplanan oturma-zaman ile bu eğriler karşılaştırılarak dren boyu değişiminin etkisi incelenmiştir. Dren boyları, planlanan değerleri kapsayacak şekilde 5m artışla 15-30m arası değiştirilmiştir.

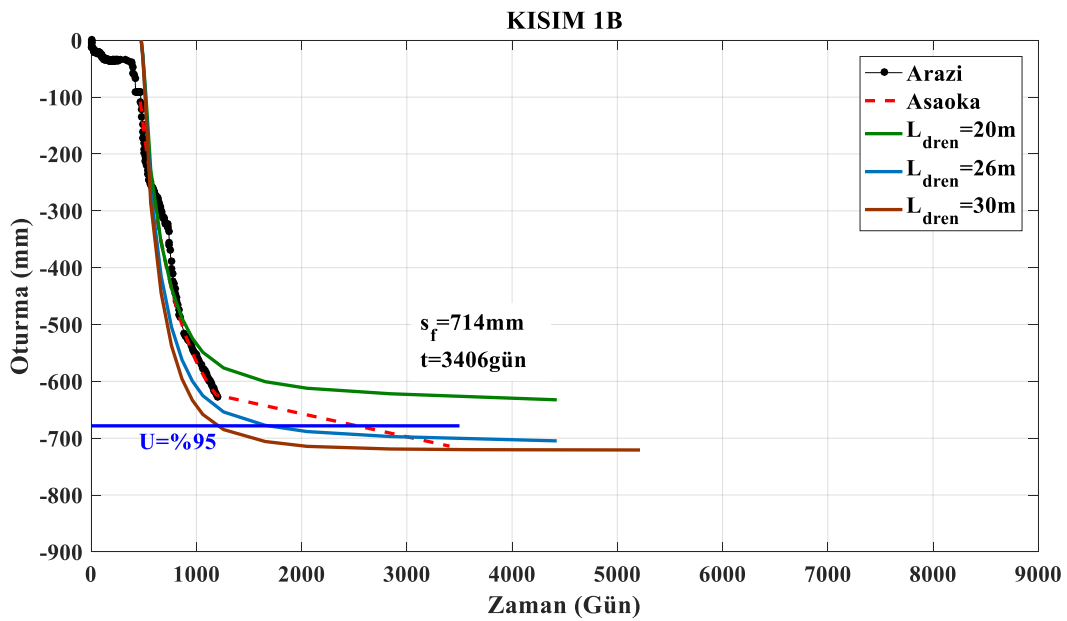
Kısım 1A için FEM modelinden ve arazi ölçümünden elde edilmiş oturma-zaman eğrileri Şekil 4.25’ te verilmiştir. Farklı  $L_{dren}$  değerleri ve arazi ölçümü ile Asaoka çözümünden

hesaplanan  $t_{95}$  zamanları karşılaştırılmıştır. Buna göre, Kısım 1A için hesaplanan  $t_{95}=4856$  günlük zamana,  $15 < L_{dren} < 20m$  olması durumunda ulaşılmaktadır.



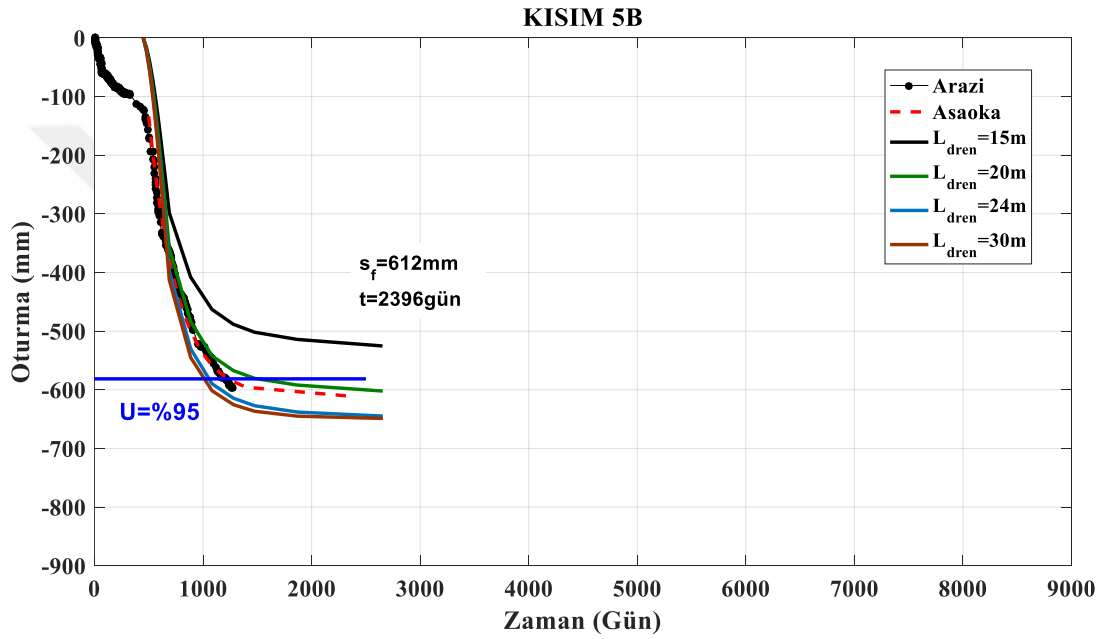
Şekil 4.25. Kısım 1A için  $L_{dren}$  değişiminin etkisi

Kısım 1B için yapılan karşılaştırmada, FEM modelinden farklı  $L_{dren}$  değerleriyle elde edilen oturma-zaman eğrileri ve arazi ölçümlerinden hesaplanan  $t_{95}$  süreleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.26). Asaoka çözümü ve arazi ölçümleri kullanılarak hesaplanan  $t_{95}=2519$  güne ulaşılması için  $20 < L_{dren} < 25m$  olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.26. Kısım 1B için  $L_{dren}$  değişiminin etkisi

Kısım 5B için farklı  $L_{dren}$  değerleri ile oluşturulan oturma-zaman eğrileri ve arazi ölçümleri ile  $U=95\%$  doğrusunun (mavi düz çizgi) kestiği  $t_{95}$  zamanları hesaplanmıştır (Şekil 4.27). Arazi ölçümünden elde edilen sürenin, farklı dren boyları için hesaplanan  $t_{95}$  değer aralıklarının hangisinde kaldığı belirlenmiştir. Buna göre Kısım 5B’ de, dren boylarının 20-25m arasında olması durumunda Asaoka çözümüyle hesaplanan  $t_{95}=1236$  güne ulaşıldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.27. Kısım 5B için  $L_{dren}$  değişiminin etkisi

Dren boylarının, modelde kullanılan sıkışabilir tabaka kalınlıklarına göre kısa kaldığı durumda, %95 konsolidasyonun Asaoka çözümüyle elde edilen  $s_f$  için gerekli sürenin ötesinde tamamlanmadığı görülmüştür. Her bir kısım için farklı dren boyları ve arazi ölçümleri kullanılarak oluşturulan oturma-zaman eğrilerinden (Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27) elde edilen sonuçlar Tablo 4.11’ de özetlenmiştir.

Tablo 4.11. Farklı  $L_{dren}$  ve Asaoka çözümü için  $t_{95}$  değerleri

	KISIM 1A	KISIM 1B	KISIM 5B
Arazide Son Ölçüm (mm)	793	627	597
Geçen Zaman (Gün)	1906	1201	1271
	<b><math>t_{95}</math> (Gün)</b>		
Asaoka Çözümü	4856	2519	1236
$L_{dren}=15m$	>9000	-	>2500
$L_{dren}=20m$	3012	>3500	1508
$L_{dren}=25m$	1316	1690	1055
$L_{dren}=30m$	1047	1213	1012

Tüm kısımlarda dren boylarının 20m' den kısa olması durumunda konsolidasyonun tamamlanma süreleri büyük ölçüde uzamakta, hesaplanan  $s_f$  için gerekli sürelerin ötesine geçmektedir.

## 5. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Oturmaların incelenmiş olduğu bölgede, konsolidasyonun devam ettiği Kısım 1A, 1B ve 5B' de oturma analizi için modeller; sonlu elemanlar yöntemi FEM ve üç boyutlu konsolidasyon analizi 3DCONS ile oluşturulmuştur. FEM analizlerinden elde edilen son oturmalar ve Asaoka çözümü %5' in altında hata ile birbirine yakın bulunmuş, ancak 3DCONS modellerinden hesaplanan sonuçlarda %5-20 hata ile bunlardan daha yüksek oturmalar elde edilmiştir. FEM modelinden belirlenen  $k_h/k_v$ , Asaoka yöntemiyle hesaplanan değere eşit veya yakın bulunmuştur. 3DCONS ile belirlenen oranlar, diğer yöntemlerle hesaplanan oranlardan iki kat yüksek çıkmıştır.

Kısım 1A için Asaoka ile hesaplanan  $s_f = 873$  mm oturma için 8000 günden fazla süre geçeceği belirlenmiştir. Kısım 1B' de yapılan analizlere göre, Asaoka ile hesaplanan 714 mm son oturma için 3000 günün ötesinde süre geçmesi gerektiği bulunmuştur. Her iki kısım için de edinilen son oturmalar ve süreler, arazi ölçümlerinden yüksektir. Kısım 1A ve 1B' de,  $k_h/k_v$  sırasıyla 1 ve 3 hesaplanmıştır. Bu durumda, PVD uygulamasının başlıca nedeni olan yatay yöndeki drenaj, verimli olarak sağlanamamış oturmaların tamamlanması uzun sürmüştür.

Kısım 5B' de  $k_h/k_v=5$  olarak elde edilmiş ve PVD uygulaması diğer kısımlara göre daha verimli olmuştur. Arazi oturma ölçümlerinden 467 gün sonra önyükleme başlatılmış ve son arazi ölçümüyle 597 mm oturma olduğu belirlenmiştir. Asaoka çözümü ile elde edilen 612 mm son oturma değerine göre konsolidasyonun %95' inin (584 mm) tamamlandığı arazi ölçümlerinde gözlemlenmiştir. Ancak, komşu Kısım 1B' de uygulanan ilave yüklemenin etkisiyle, Kısım 5B için oturmalar 1200 günün ötesinde ve 180 gün olarak öngörülen süreden uzun devam etmiştir.

Bölgedeki zeminlerin yatay geçirimsizliklerinin yanında, uygulanan PVD yatay aralıkları ve boyları da oturmaların tamamlanma sürelerinde etkili diğer parametrelerdir. Buna göre; Kısım 1A' da dren aralığı  $s_{dren}=1m$  ve dren boyu  $L_{dren}=20m$  tasarlanmış, ancak yapılan analizlere göre  $t_{95}=4856$ gün için  $1<s_{dren}<1.5m$  ve  $15<L_{dren}<20m$  olduğu belirlenmiştir. Kısım 1B için tasarlanan  $s_{dren}=2m$  ve  $L_{dren}=26m$  iken  $t_{95}=2519$ gün için  $2.5<s_{dren}<3m$  ve  $20<L_{dren}<25m$  olduğu bulunmuştur. Kısım 5B' de  $s_{dren}=2m$   $L_{dren}=24m$  olarak tasarlanmıştır. Ancak, yapılan analizlerde  $t_{95}=1236$ gün için  $2.5<s_{dren}<3m$  ve  $20<L_{dren}<25m$  olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerdeki değişimin yanı sıra zeminin  $10^{-6}$  m/gün düzeyindeki geçirimsizliği konsolidasyonun devam etmesinde etkili bir diğer unsurdur.

## 6. SONUÇLAR

İstanbul Halkalı bölgesinde PVD ile iyileştirme uygulanan bir proje kapsamında, konsolidasyonun öngörülenden daha uzun sürelerde devam ettiği belirlenen Kısım 1A, 1B ve 5B için oturma analizi yapılmış, PVD tasarımında kullanılan parametrelerin ( $k_h$ ,  $s_{dren}$  ve  $L_{dren}$ ) konsolidasyona olan etkisi incelenmiştir:

1. FEM ile oluşturulan modeller, 3DCONS' a kıyasla arazi ölçümlerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Sonlu eleman yönteminde, analizin her aşamasında gerilme kademelerine göre boşluk suyu basınçları yeniden hesaplanarak çözüme gidilmiş, böylece zemin davranışı arazi oturma ölçümlerine daha yakın biçimde yansımıştır.
2. Çalışma alanındaki konsolidasyon oturmaları planlanan sürelerin ötesinde devam etmiştir. Bunun başlıca etkenlerinden biri, bölgedeki zeminlerin yatay-düşey geçirimsizlik katsayılarının

birbirine eşit düzeyde ve düşük olmasıdır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre,  $k_h/k_v=1$  veya yakın olan zeminlerde PVD uygulamasının verimli olmadığı saptanmıştır.

3. Yapılan çalışma ile farklı dren yatay aralıkları ve dren boylarının değişimi incelenip sonuçların arazi oturma ölçümleriyle karşılaştırılmasıyla, PVD uygulamasının mevcut konsolidasyon süresine karşılık gelen  $s_{dren}$  ve  $L_{dren}$  değerleri belirlenmiştir. Uygulanan iyileştirme yöntemine karşın konsolidasyonun öngörülen sürelerin ötesinde devam ettiği belirlenen bölge için bu çalışmada uygulanan analizler ile PVD tasarımı kontrol edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, incelenen bölgedeki oturmaların öngörülen sürelerden uzun devam etmesi iki açıdan sorgulanmıştır;  $k_h/k_v$  değeri düşük zeminlerde PVD'nin uygulanabilir iyileştirme yöntemi olması ve PVD uygulamasında tasarım parametrelerinin (dren yatay aralığı  $s_{dren}$  ve dren boyunun  $L_{dren}$ ) optimize edilmesi gerekliliğidir.

Ancak, göz ardı edilmemesi gereken diğer bir husus da CH kilde oluşması olası ikincil konsolidasyondur. Oturmaların beklenenin çok ötesinde tamamlanacağıının bulunması, laboratuvar deney bulgularında belirmemesine karşın, ikincil konsolidasyon veya sünmenin olası etkinliği olarak değerlendirilmiştir.

## KAYNAKLAR

Asaoka, A. "Observational Procedure of Settlement Prediction." *Soils and Foundations* 18 (1978): 87-101.

Barron, R. A. "Consolidation of fine-grained soils by drain wells." *Transactions of ASCE* 113 (1948): 718-754.

Biot, M. A. "General Theory of Three-Dimensional Consolidation." *Journal of Applied Physics* 12 (1941): 155-164.

Carillo, N. "Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils." *Journal of Mathematics and Physics* 21 (1942): 1-5.

Hansbo, S., Jamiolkowski, M., ve Kok, L. "Consolidation by vertical drains." *Géotechnique* 31 (1981): 45-66.

Hausmann, M. R. *Engineering Principles of Ground Modification*. Singapore: McGraw-Hill, (1990).

Kjellman, W. "Consolidation of fine-grained soils by drain wells." *Transactions of ASCE* 113 (1948), Contribution to the discussion.



Önalp, A., ve Arel, E. *Geoteknik Bilgisi I: Zeminler ve Mekanığı*. İstanbul: Birsen Yayınevi, (2013).

Önalp, A. ve Sert, S. *Geoteknik bilgisi III: Bina Temelleri*. İstanbul: Birsen Yayınevi, (2010).

Rendulic, L. “Der hydrodinamische Spannungsausgleich in zentral entwässerten Tonzylindern.” *Wasserwirtsch. u. Technik* 2 (1935): 250-253, 269-273.

Terzaghi, K. *Erdbaumechanik*. Leipzig and Vienna: Franz Deuticke, (1925).

Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley, (1943).

*TS1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması*. Türk Standartları Enstitüsü, (2000), Ankara.

