



ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLIDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ

Süveyda Merve ORAL¹ , Firdevs UYSAL^{2,*} 

^{1,2} İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada esas olarak taş kolon ve düşey dren yöntemlerinin konsolidasyon oturmalarının azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılması açısından performansları değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında taş kolonlar ve düşey drenlerinin kullanımı ve bu yöntemler için geliştirilmiş sayısal analiz yöntemleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında, düşey drenlerin tasarımı için önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi Plaxis yazılımı kullanılarak sayısal olarak araştırılmıştır. Son olarak, Changi Doğu Islah Projesi analiz edilmiştir. Analizler iki pilot araştırma için yapılmış olup, analizlerde taş kolon ve düşey drenlerin konsolidasyon davranışı modellenmiştir. Sayısal analiz sonuçları, arazi ölçümlerine bakılarak değerlendirilmiş ve bu iki iyileştirme yönteminin konsolidasyon davranışı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma analizleri sonucunda, taş kolonların özellikle konsolidasyon oturmalarının azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılması açısından daha fazla avantaj sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Düşey dren, Taş kolon, Konsolidasyon, Plaxis, Vaka analizi

THE EFFECT OF SOIL IMPROVEMENT METHODS ON SOIL CONSOLIDATION: A CASE STUDY

ABSTRACT

This paper is mainly concerned with performance of the stone column and vertical drain methods in terms of reducing consolidation settlement and speeding up consolidation. In the first stage, usage of stone column and vertical drain and numerical methods which were developed for the methods were investigated. Later, the effect of some design parameters, which are critical for the design of vertical drain were investigated numerically with Plaxis. Lastly, Changi East Reclamation Project was analyzed. The numerical analyses were carried out at two pilot tests and included the modeling of the consolidation behavior of project soils with stone column and vertical drain. The results of the numerical modeling analyses were compared with field observations. A comparison between the two soil improvement methods in terms of the consolidation process. An analysis comparing between the two methods highlighted the stone columns as more advantageous essentially decrease in consolidation settlement and speeding up consolidation.

Keywords: Vertical drain, Stone column, Consolidation, Plaxis, Case study

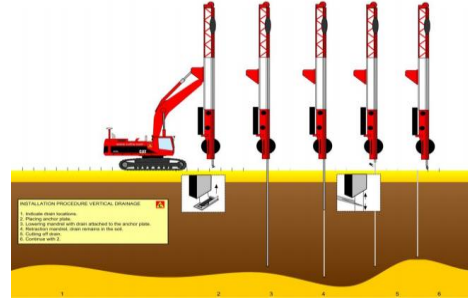
1. GİRİŞ

Yumuşak zeminlerin zamana bağlı oturma problemleri yapılaraya zarar verebilecek ölçüde olabilmektedir. Olası oturmaların tahmin edilip, bu yönde tedbirlerin alınması uygulama mühendisleri için çoğu zaman sorun teşkil etmektedir. Zeminlerdeki toplam oturmanın azaltıp konsolidasyonun hızlandırılması amacıyla çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

Düşey drenler kullanılarak uygulanan ön yükleme yönteminde, zemin konsolidasyonunu hızlandırılarak meydana gelecek olası oturmaların azaltılması, kayma mukavemetinin ve taşıma gücünün artırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntem, zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan diğer uygulamalar içinde ekonomi ve uygulanabilirlik açısından oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Düşey drenler özellikle yüksek su muhtevasına sahip, kohezyonlu, düşük dayanıma sahip yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Düşey drenler, zemin içindeki suyun drenaj yolunu kısaltarak, zemin konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Bu şekilde uzun süreler devam eden konsolidasyon sürecinin daha kısa sürelerde tamamlanmasına olanak sağlanmaktadır. Düşey drenler prefabrike bant drenlerin boş bir mandrel vasıtasıyla zemin içerisine sürülmesi şeklinde inşa edilir (Şekil 1).

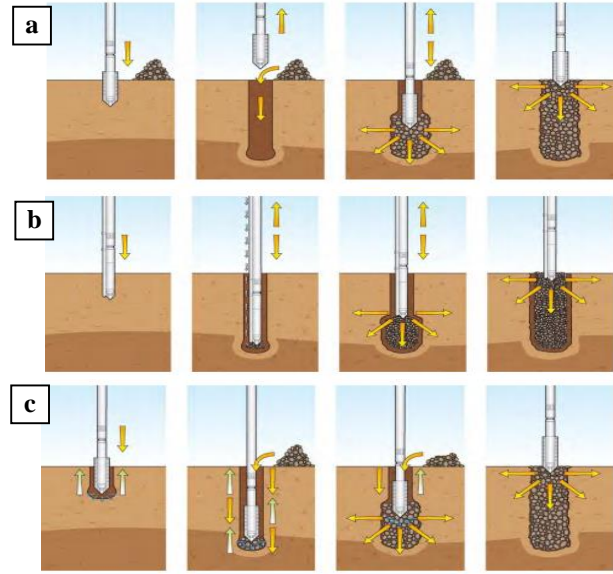
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: firdevsuysal@ohu.edu.tr

Geliş / Recieved: 25.10.2019 Kabul / Accepted: 09.12.2019 doi: 10.28948/ngumuh.638130



Şekil 1. Düşey drenlerin imalatı [1]

Taş kolonlar genellikle sorunlu zemin olarak nitelendirilen yumuşak veya gevşek zeminler üzerine inşa edilecek yapıların temel zeminini iyileştirmek için uygulanan zemin iyileştirme yöntemlerindedir. Taş kolonlar, zemin taşıma gücünün artırılması, ilave boşluk suyu basınçlarının hızlı bir şekilde sönmülerek birincil konsolidasyonun hızlandırılması, oturmaların azaltılması, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve şev stabilitesinin artırılması gibi farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Taş kolon yönteminin en efektif kullanımı drenajsız kayma mukameti 7-50 kPa değerine sahip yumuşak kil zeminlerde görülmektedir [2]. Hem ekonomik olması hem de pratik uygulama kolaylığı nedeniyle taş kolonlar günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Taş kolonların imalatı (a) kuru üstten beslemeli yöntem, (b) kuru alttan beslemeli yöntem, (c) ıslak üstten beslemeli yöntem [3]

Taş kolonlar ve prefabrik düşey drenler çalışma prensibi olarak benzerdir. Her iki yöntemde de zemin içindeki drenaj yolu kısalmakta ve zamana bağlı meydana gelen oturmalar hızlandırılmaktadır [4]; [5]; [6]. Bu iki yöntemin zemin konsolidasyonu üzerindeki etkisi için geliştirilen birçok analitik çözüm yöntemi ortaktır. Barron, konsolidasyon konusunu radyal akış ile inceleyen ilk araştırmacılardan biridir. Barron [7], çalışmasında düşey dren bulunan iyi derecelenmiş bir zeminin konsolidasyonunu incelemiştir. Düşey drenler için geliştirilen bu basit yaklaşım taş kolonlar için geliştirilen birçok yöntemin temeli olmuştur. Han ve Ye [8], düşey dren teorisini esas alarak taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerin konsolidasyon oranı için basitleştirilmiş kapalı form çözüm yöntemi geliştirmiştir. Yöntemin düşey ve radyal akış kabulleri Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisi ve Barron [7] çözüm yöntemlerine benzerdir. Taş kolonlar düşey drenlere benzer bir şekilde çalışsa da temel olarak farklı özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden ilki taş kolonların rijitliğinin etrafındaki zemine göre oldukça fazla olmasıdır [9]. Barksdale ve Bachus [2], kolon ve etrafındaki zeminin rijitlik oranlarının 10-20 değerleri arasında değiştiğini belirtmiştir. Rijitlik farkı nedeni ile zeminin taşıdığı düşey gerilme kolonlara aktarılmaktadır ve bu aktarım "gerilme konsantrasyonu" olarak adlandırılmaktadır. Barksdale ve Bachus [2], gerilme konsantrasyonunu taş kolonların iyileştirme etkisini gösteren bir parametre olarak tanımlamıştır. Gerilme aktarımının düşey drenlerde oluşmadığı düşünülürse, taş kolonların bu özelliği taşıma gücünün

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ

arttırılmasında düşey drenlere göre oldukça efektiftir. Taş kolonların düşey drenlerden farklı olan ikinci özelliği, taş kolonların drenlere göre çok küçük çap oranlarına ($N = d_o/d_c$, etki bölgesi çapının kolon çapına oranı) sahip olmasıdır. Bu çap oranının genellikle 1.5-5 arasında değer almaktadır. Barron [7] bu oranı 5-100 aralığında vermiştir. Taş kolon ve prefabrik düşey dren yöntemleri gerek ekonomi gerek ise de uygulama kolaylığı ile alternatif uygulama yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır [10].

Bu çalışma kapsamında öncelikle taş kolon ve düşey dren yöntemlerinin özellikle zamana bağlı oturmaların azaltılması üzerindeki etkisi ve bu yöntemlerin sayısal analizleri hakkında bilgi verilmiştir. Ardından düşey drenlerin tasarım için önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin uzun süreli oturmalar üzerindeki etkisi Plaxis bilgisayar yazılımı ile parametrik olarak araştırılmıştır. Bu iki yöntemin oturmaların azaltılması yönünden karşılaştırılması için literatürde yer alan Changi Doğu Islah Projesi çalışılmıştır. Bu kapsamda taş kolonlu sayısal analizler, düşey drenli arazi ölçümleri ve drenli sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT**2.1. Sayısal Analiz Yöntemleri**

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık bir problemi basitleştirerek problemin doğru sonucunu ya da yaklaşık sonucunu elde etmeyi sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, 1970 yıllarından itibaren Geoteknik mühendisliğinde de kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemini esas alan birçok bilgisayar yazılımı (Plaxis, Crisp, Abaqus vb.) geliştirilmiştir. Plaxis bilgisayar yazılımı da bunlardan biri olup, karmaşık zemin problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm sayısal analizler Plaxis yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

2.2. Taş Kolon ve Düşey Drenlerin Sayısal Analizleri

Sayısal modelleme çalışmaları mühendislik problemlerinin gerçek boyutları ile değerlendirilmesi açısından pratik, hızlı ve kapsamlı sonuçlara ulaşmayı sağlar. Sayısal modelleme yapılırken problemin doğru sonucuna ulaşmak için model geometrisinin doğru bir şekilde oluşturulması ve zemin parametrelerinin doğru seçilmesi önem arz etmektedir. Problemlerin sayısal olarak en gerçekçi şekilde analiz edilebilmesi için sistemin üç boyutlu (3B) analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekir. Fakat 3B sayısal modelde model elemanlarının sayısı artmakta ve analizlerin çözüm süresi artmaktadır. Bu gibi zorluklar nedeni ile sayısal çözümlemenin kolaylaştırılabilmesi için iki boyutlu bazı yaklaşımlar (birim hücre, iki boyutlu düzlem deformasyon yaklaşımı, homojenleştirme tekniği vb.) geliştirilmiştir.

Taş kolonların sayısal analizi literatürde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır [11]; [12]. Ambily ve Gandhi [13], taş kolon analizleri yapılırken yaşanan zorluklardan ötürü bu problemlerin sonlu elemanlar yöntemi gibi ileri düzey sayısal yöntemlerle analiz edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Taş kolonların sayısal analizinde eksenel simetrik birim hücre yaklaşımı sıkça kullanılmaktadır.

Düşey drenlerin sayısal analizi ile ilgili literatürde geliştirilmiş birçok yaklaşım bulunmaktadır [14]; [15]; [16]; [17]; [18]; [19]. Düşey drenlerin 3B analizleri problemin geometrisi ve dren sayısı göz önüne alındığı zaman oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle problemin iki boyutlu analizi daha hızlı bir çözüm sunmaktadır. Ancak, düşey drenlerin sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu olarak analiz edilmesi mümkün değildir. Düşey dren ve etrafındaki zemin eksenel simetrik bir problem iken, ön yüklemeyi temsil eden dolgular iki boyutlu düzlem şekil değiştirme koşullarına sahip bir problemdir. Bu sebeple, dolgu altındaki eksenel silindirik geometriye sahip düşey drenlerin analizi yapılırken eşdeğer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme (eşleme) işlemini gerçekleştirebilmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir [20]; [21]. Bu eşleme yöntemlerinde dren aralığı ve/veya dren etrafındaki zeminin permeabilitesinde değişiklikler yapılmaktadır. Düşey drenlerin sayısal analizinde taş kolonlar için de kullanılan birim hücre yaklaşımı kullanılmaktadır [22]; [23]. Bu çalışma kapsamında taş kolon ve düşey drenlerin sayısal analizleri için eksenel simetrik birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır.

2.3 Birim Hücre Kavramı

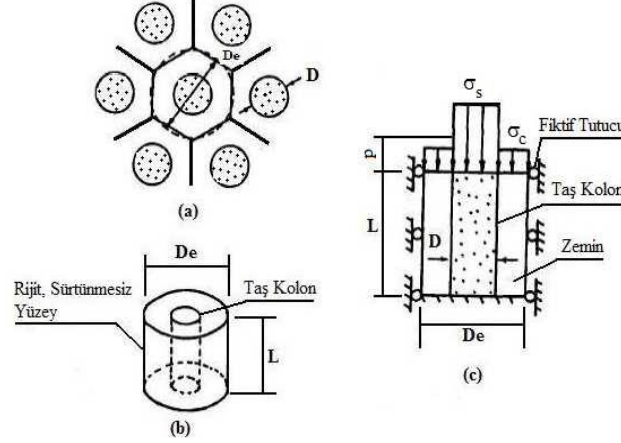
Birim hücre yaklaşımında iki boyutlu koşullarda tek bir taş kolon veya düşey dren ve etrafını çevreleyen zemin dikkate alınır (Şekil 3). Bu yaklaşım birçok analitik yöntemin temelini oluşturmakla birlikte birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [24]; [13]; [25]. Deformasyonların yalnızca düşey yönde olduğu kabulü yapılır ve yanal yöndeki deformasyonlara izin verilmez. Yöntemin en belirgin dezavantajı uygulanan yükün sadece düşey yönde olmasıdır. Taş kolon veya düşey drenlerin yerleşim düzenine göre etki bölgesinin büyüklüğü değişmektedir ve bu etki bölgesi yaklaşık daireye benzetilir. Kolon veya dren aralıkları üçgen yerleşim düzeni olduğunda kolon etrafında altıgen bir alan oluşur ve bu altıgen bölge aynı alana sahip eşdeğer bir daireye dönüşür (Şekil 3.a ve 3.b). Eşkenar üçgen ve kare dizilimli kolonların veya drenlerin eşdeğer daire çapı (D_e) Barksdale ve Bachus,

S. M. Oral, F. Uysal

[2] tarafından farklı eşitlikler ile tanımlanmıştır (Eşitlik 1 ve Eşitlik 2). D_e eşdeğer çapına sahip tek bir adet kolon veya dren ile bu kolonu çevreleyen zeminin oluşturduğu silindirik biçimli hacim 'birim hücre' olarak adlandırılmaktadır.

$$D_e = 1.05s \quad (1)$$

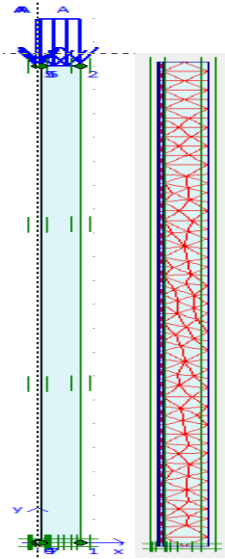
$$D_e = 1.13s \quad (2)$$



Şekil 3. Birim hücre yaklaşımı; (a) plan (b) birim hücre (c) kesit görünüşü [2]

3. DÜŞEY DRENLERİN TASARIM PARAMETRELERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde düşey drenlerin tasarımı için önem arz eden bazı parametrelerin (permeabilite, dren boyu, drenler arası mesafe ve örselenmiş bölgenin büyüklüğü) zamana bağlı oturmalar üzerindeki etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Sayısal modellemede birim hücre kavramı kullanılmıştır (Şekil 4). Sayısal modelleme Lin ve diğ. [26] esas alınarak yapılmıştır. Analizler iki boyutlu eksenel simetrik koşullarda ve 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları belirlenirken yan yüzeylerde yatay hareketin tutulu olduğu kabul edilmiş ve zeminin sadece düşey yönde hareketine izin verilmiştir ($u_x=0$, $u_y \neq 0$). Su seviyesinin zeminin üst yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir. Analizlerde düşey dren, örselenmiş bölge ve doğal zemin için Soft Soil (SS) zemin modeli kullanılarak zamana bağlı drenajsız analizler yapılmıştır. Modelde kullanılan zemin ve dren parametreleri literatürden seçilmiştir (Çizelge 1 ve Çizelge 2). Parametrik çalışmalarda etkisi araştırılan tasarım parametresi değiştirilerek diğer model parametreleri sabit tutulmuştur.



Şekil 4. Düşey drenin birim hücre modeli

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ

Tablo 1. Zemin parametreleri (k_h/k_s etkisi)

Parametreler	Doğal Zemin	Örselenmiş Bölge
λ^*	0.15	0.15
κ^*	0.018	0.018
γ (kN/m ³)	17	17
$k_h=k_v$ (m/gün)	2,740E-04	Değişken
c (kN/m ²)	1	1
ϕ	27	27

Tablo 2. Düşey dren parametreleri (k_h/k_s etkisi) [26]

Yükseklik (m)	r_e	r_s	r_m	r_w
20	0.75	0.06	0.03	0.025

r_e : Birim hücrenin yarıçapı

r_s : Örselenmiş bölgenin yarıçapı

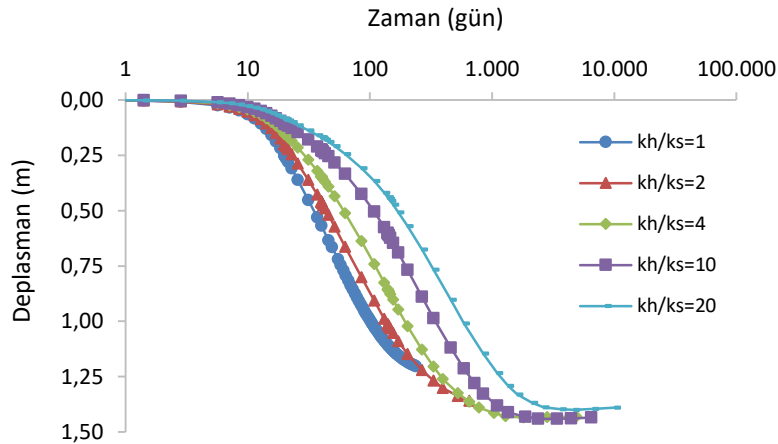
r_m : Eş değer mandrel yarıçapı

r_w : Eş değer dren yarı çapı

3.1. k_h/k_s Etkisi

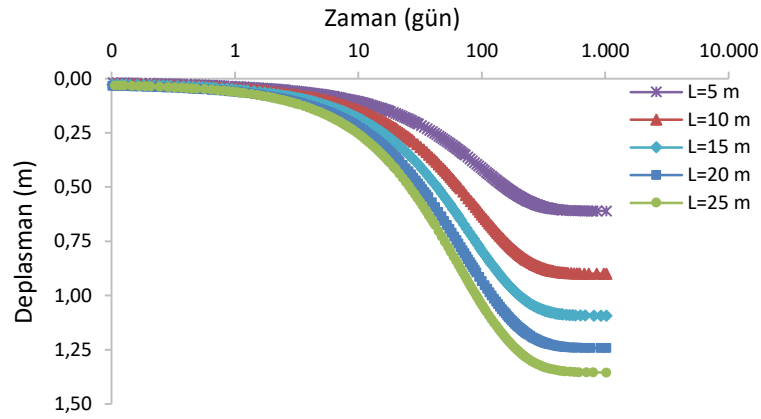
Düşey drenler zemine çelik bir mandrel kullanılarak yerleştirilirler. Bu imalat yapılırken dren çevresinde yer alan zeminde bozulmalar (*smear zone*) meydana gelmektedir. Başka bir ifade ile dren etrafında örselenmiş bir bölge oluşmaktadır. Bu örselenme, zemin yapısına, drenlerin yapım şekline, muhafazanın boyutlarına ve şekline bağlıdır. Örselenen bölgedeki yatay permeabilite örselenmemiş zemine göre oldukça düşük bir değer almakta ve zeminin konsolidasyon sürecini azaltmaktadır. Örselenmiş bölge genişliği (r_s) Bergado ve diğ. [27]; [28]' da önerildiği gibi eşdeğer mandrel çapının (r_m) iki katı olarak alınmıştır ($r_s=2r_m$).

Bu serideki analizlerde örselenmiş bölgenin yatay permeabilitesinin (k_s) zemin konsolidasyonuna etkisini araştırmak için parametrik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu etki için doğal zeminin yatay permeabilitesi (k_h) ile k_s oranı kullanılmıştır. Sayısal analizlerde düşey drenin boyu 20m ve dren permeabilitesi $k=1$ olarak sabit tutulup, değişen k_h/k_s oranları ile toplamda 10,000 günlük konsolidasyon analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda örselenmiş bölgenin permeabilitesinin azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5).

**Şekil 5.** k_h/k_s oranının zamana bağlı oturmaya etkisi

3.2. L Etkisi

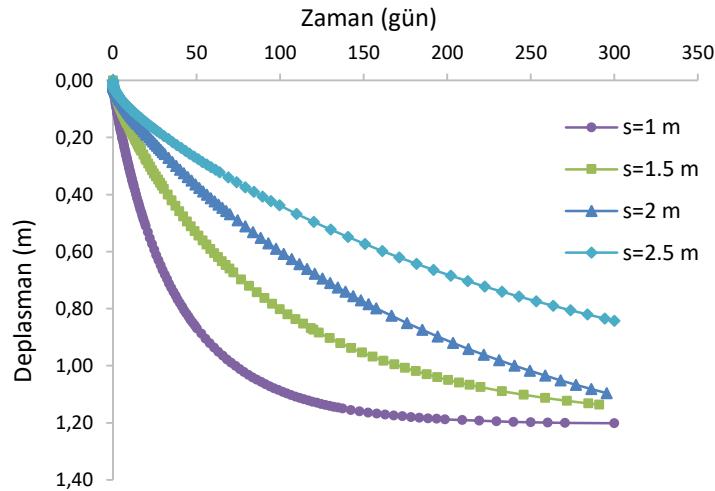
Düşey drenlerin boyu (L) önemli tasarım parametrelerindedir. Dren boyu seçilirken genellikle dren boyları sıkışabilen birimleri geçmesi istenir. Bu şekilde suyun dren boyunca radyal yönde tahliyesi sağlanacaktır. Bu seri analizlerde değişen dren boylarının (5m, 10m, 15m, 20m ve 25m) zamana bağlı oturmaya etkisi araştırılmıştır. Analizlerde k_h/k_s oranı ve düşey dren mesafesi sabit tutularak 10,000 günlük konsolidasyon analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda dren boyunun azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6). Dren boyunun artması ile konsolidasyonun hızlandığı görülmektedir. Ancak, dren uzunluğu arttıkça kuyu direncinde artışlar meydana gelmekte ve drenlerin deşarj kapasitesi azalmaktadır. Mert [29], drenlerin kısa kalması durumunda, doğal zeminde radyal drenaj sağlanmadığından konsolidasyon hızının düşeceğini belirtmiştir. Bu nedenle dren tasarımında dren boyu seçimi dikkatli yapılmalıdır.



Şekil 6. Düşey dren boyunun zamana bağlı oturmaya etkisi

3.3. S Etkisi

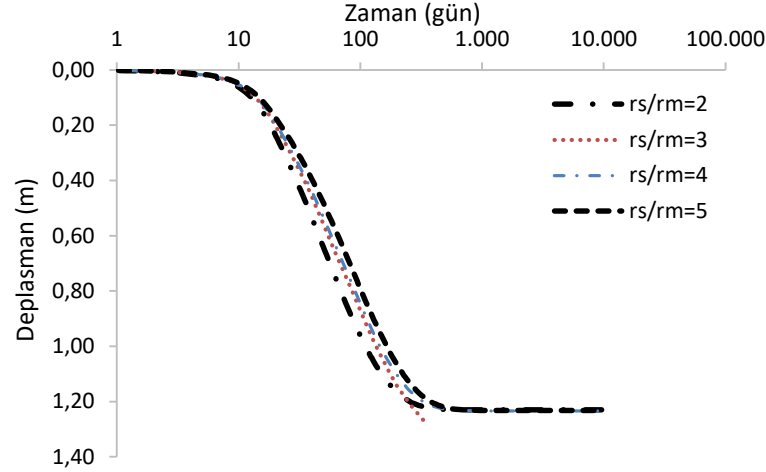
Bu serideki analizlerde düşey drenlerin arasındaki mesafenin (s) konsolidasyona olan etkisi araştırılmıştır. Drenler arasındaki mesafe (s) 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 m olarak modellenmiştir. Analizlerde k_h/k_s oranı ve dren boyu sabit tutulmuş, birim hücrenin genişliği değiştirilerek konsolidasyon analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda drenler arasındaki mesafe azaldıkça zamana bağlı oturmaların arttığı, konsolidasyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 7). Al-Soud [30], düşük aralıklara sahip drenlerin dolgu zeminini daha rijit hale getirdiğini belirtmiştir.



Şekil 7. Düşey drenler arasındaki mesafenin zamana bağlı oturmaya etkisi

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ**3.4. Örselenmiş Bölgenin Büyüklüğü**

Bu bölümde, düşey dren imalatı esnasında dren etrafında oluşan örselenmiş bölgenin büyüklüğünün zamana bağlı oturmaya etkisi araştırılmıştır. Analizlerde k_h/k_s oranı, dren boyu ve birim hücre genişliği sabit tutularak örselenmiş bölgenin yarıçapı (r_s) değiştirilmiştir. Değişen örselenmiş bölgenin yarıçapı (r_s) ve eş değer mandrel yarıçapı (r_m) oranları ile 1000 günlük konsolidasyon analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda örselenmiş bölgenin büyüklüğü kullanılan oranlarda büyük bir fark yaratmazken, örselenmiş bölge büyüklüğünün artması ile konsolidasyon hızı azalmaktadır (Şekil 8). Bu durum örselenmiş bölgedeki zemin permeabilitenin doğal zemine göre oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. Örselenmiş bölge büyüklüğünün zamana bağlı oturmaya etkisi

4. VAKA ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında seçilen arazi, Malezya yarımadasının güney ucunda bulunan Singapur Cumhuriyeti'nin başkenti olan Singapur şehrinin Changi bölgesinde yer almaktadır (Şekil 9). Bu bölgede Changi Doğu Islah Projesi gerçekleştirilmiştir. Proje, 1991-2005 yılları arasında beş aşamada gerçekleştirilerek, Changi Uluslararası Hava Limanı ve altyapı tesisleri için yaklaşık 2000 hektarlık bölge iyileştirilmiştir. Proje kapsamında, 272 milyon ton kum hidrolik yer değiştirme yöntemi ile sıkıştırılarak 15m derinliğe kadar dolgu yapılmıştır. Dolguda kullanılan malzeme denizden çıkarılarak elde edilmiş olup ortalama dane büyüklüğü 0.4 ile 0.8mm arasında değişmektedir. İyileştirme çalışmaları kapsamında, konsolidasyon sürecini hızlandırmak için ön yükleme yapılarak prefabrik düşey drenler kullanılmıştır. Araziye yaklaşık 18 aylık bir ön yükleme uygulanmıştır. Tüm projede 170 milyon metre prefabrik düşey dren kullanılmış olup, bu rakam bu uygulamaya dünyadaki en büyük projelerden biri olma özelliği kazandırmıştır.



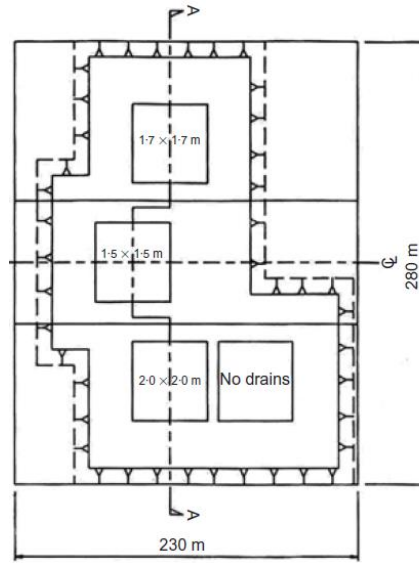
Şekil 9. Deney sahası

Changi Singapur deniz kili altıvyon ile kesilen vadilerin içinde uzanmaktadır. Arazi üst deniz kili (*upper marine clay*) ve alt deniz kili (*lower marine clay*) katmanı olmak üzere iki ayrı deniz kili katmanından oluşmaktadır. Orta sert kil (*intermediate marine clay*) katmanı ise bu iki tabakayı birbirinden ayıran farklı bir deniz kili tabakasıdır (Çizelge 3). Bölge zemin profilinin değişiklik göstermesi nedeni ile yapılan düşey dren uygulamalarının performansının değerlendirilmesi için proje süresince farklı dren aralıklarına (1.5, 1.7, 2, 2.5 ve 3m) sahip pilot çalışmalar yapılmıştır (Şekil 10).

Tablo 3. Zeminin fiziksel ve mekanik parametreleri [31]

	Deniz Üst Kili (Upper Marine Clay)	Deniz Orta Kili (Intermediate Marine Clay)	Deniz Alt kili (Lower Marine Clay)
γ (kN/m ³)	14.2 - 15.7	18.6 - 19.6	15.7-16.7
Su içeriği (%)	50 - 85	10 - 40	40 - 66
Likit limit (%)	70 - 95	30 - 70	60 - 90
Plastik limit (%)	20 - 28	18 - 20	20 - 30
e_0	1.8 - 2.2	0.5 - 0.9	1.1 - 1.7
G_s	2.60 - 2.72	2.68 - 2.76	2.70 - 2.75
C_c	0.6 - 1.5	0.2 - 0.3	0.4 - 1.0
C_r	0.1 - 0.2	0.02 - 0.15	0.05 - 0.2
C_α	0.012 - 0.025	0.004 - 0.023	0.012 - 0.023
OCR	1.5 - 7.0	3.0 - 4.0	1.8 - 2.0
C_v (m ² /yıl)	0.5 - 1.7	-	0.5-2.3
C_h (m ² /yıl)	2.0 - 4.0	-	3.0-6.0
k (m/s)	10^{-8} - 10^{-9}	-	10^{-9} - 10^{-10}

Pilot çalışmalarda ön yüklemeye maruz drenli ve drensiz bölgeler oluşturularak zemindeki zamana bağlı oturmalar incelenmiştir. Yapılan ölçümler ile yaklaşık 1350 gün sonunda 2m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 1.7m oturma, 2.5m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 1.25m oturma ve 3m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 0.9m oturma gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca iyileştirme sonucunda, düşey dren kullanılan bölge konsolidasyonunun %70-80 arasında olduğu ancak kontrol bölgesinde bu oranın % 30-40 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir [32]; [33]; [31].



Şekil 10. Pilot araştırma sahaları [31]

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ**5. VAKA SAYISAL ANALİZİ**

Changi Doğu Islah Projesinde zeminin iyileştirilmesi amacı ile farklı aralıklara sahip düşey drenlerin arazi uygulamaları yapılmıştır. Bu yayın çalışmasında taş kolonlar ve düşey drenlerin performanslarının karşılaştırılması amaçlandığı için öncelikle bu proje arazisine taş kolon imalatı yapılması durumunda nasıl bir iyileştirme sağlanacağı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar drenli arazi ölçümleri ve drenli sayısal analizler ile karşılaştırılarak iki yöntemin performansı değerlendirilmiştir.

5.1. Taş Kolon Çapının Tespit Edilmesi

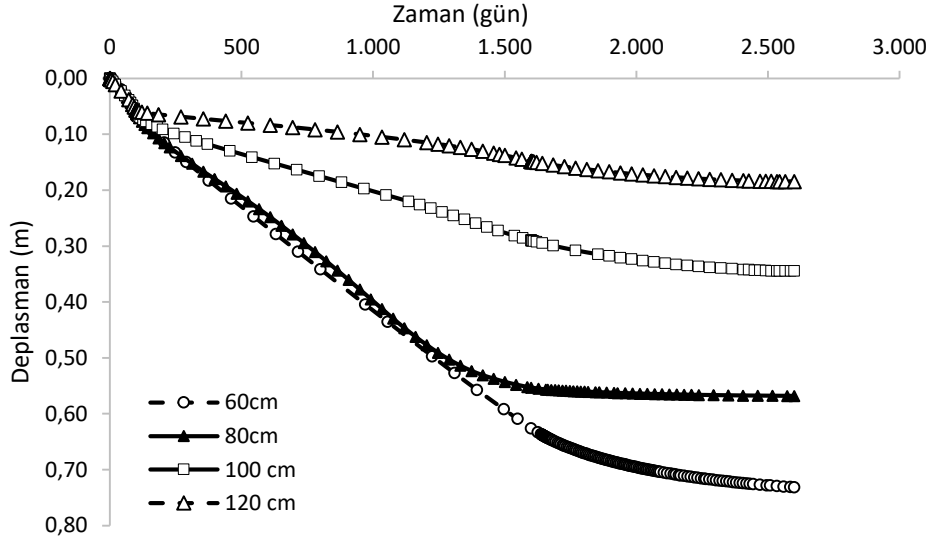
Taş kolonların iyileştirme etkisinde kolon çapı oldukça önemli bir parametredir. Bu bölümde proje arazinde taş kolon uygulaması durumunda uygun taş kolon çapının seçilmesi için parametrik sayısal çalışmalar yapılmıştır. Taş kolonların sayısal analizi için eksenel simetrik birim hücre modeli kullanılmıştır. Analizlerde taş kolon parametreleri literatürden seçilirken, zemin parametreleri de proje arazisinden elde edilmiştir (Çizelge 4 ve Çizelge 5). Bu çalışmada 1.5m kolon aralığına sahip farklı çaplardaki taş kolonların zamana bağlı oturma davranışı analiz edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiği zaman kolon çapının artması ile oturmaların hızlandığı, en düşük kolon çapının (60cm çap) maksimum 0.732m oturma değerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 11).

Tablo 4. Taş kolon parametreleri [34]

Parametreler	Taş Kolon
γ (kN/m ³)	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	1
E (kN/m ²)	30,000
ν	0.3
c (kN/m ²)	0
ϕ	30

Tablo 5. Taş kolonların analizi için kullanılan zemin parametreleri [33]

Mohr-Coulomb Modeli	İyileştirme Dolgusu	Soft Soil Model	Deniz Üst Kili (Upper Marine Clay)	Deniz Orta Kili (Intermediate Marine Clay)	Deniz Alt kili (Lower Marine Clay)
Analiz Türü	Drenajlı	Analiz Türü	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız
γ_{unsat} (kN/m ³)	17.00	γ_{unsat} (kN/m ³)	15.00	15.00	15.00
γ_{sat} (kN/m ³)	20.00	γ_{sat} (kN/m ³)	15.50	15.50	16.00
k_h (m/gün)	1.000	k_h (m/gün)	$3.67 \cdot 10^{-5}$	$8.64 \cdot 10^{-5}$	$3.89 \cdot 10^{-5}$
k_v (m/gün)	1.000	k_v (m/gün)	$1.84 \cdot 10^{-5}$	$4.32 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$
E_{ref} (kN/m ²)	13000.000	λ	0.150	0.060	0.170
ν	0.300	K	0.018	0.011	0.025
G_{ref} (kN/m ²)	5000.000	c (kN/m ²)	1.00	1.00	1.00
E_{oed} (kN/m ²)	17500.000	ϕ	27.00	32.00	27.00
c_{ref} (kN/m ²)	1.00	ψ	0.00	0.00	0.00
ϕ	31.00	V_{ur}	0.150	0.150	0.150
ψ	0.00	k_o^{nc}	0.55	0.47	0.55



Şekil 11. Taş kolon çapının zamana bağlı oturmadaki etkisi

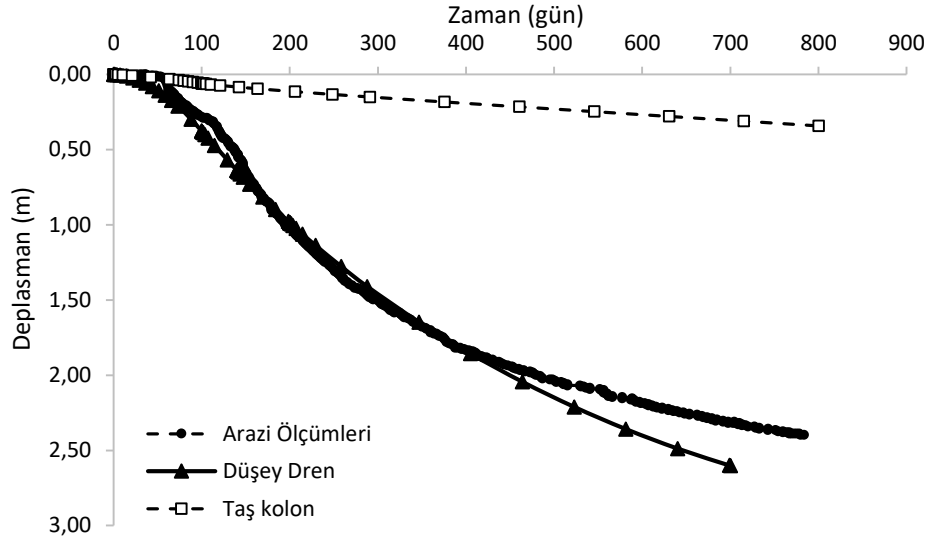
5.2. Taş Kolon ve Düşey Drenlerin Performanslarının Karşılaştırılması

Taş kolon ve düşey drenlerin performanslarının karşılaştırılması için, önceki seri analizlerde yer alan en küçük kolon çapı ile drenli arazi ölçüm sonuçları ve drenli sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki sayısal analizde birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. En küçük kolon çapının seçilme nedeni ise, arazi ölçüm verileri göz önüne alındığı zaman en küçük kolon çapına (60cm) sahip taş kolonun bile oldukça iyi performans göstermesidir. İlk karşılaştırmada düşey dren ve taş kolonlar arasındaki mesafe 1.5m'dir. Dren ve taş kolon boyu arazi uygulaması ile aynı olup, 20m'dir. Analizlerde arazi zemin parametreleri kullanılmıştır (Çizelge 5). Farklı olarak düşey dren analizlerinde örselenme etkisi hesaba katılmıştır (Çizelge 6). Her iki iyileştirme yönteminin performansı değerlendirildiği zaman, aynı mesafeye sahip taş kolonların düşey drenlere göre oturmalarının azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılmasında oldukça iyi performans gösterdiği görülmektedir (Şekil 12). Benzer karşılaştırma 2m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ve 2m aralıklı dren arazi ölçümleri ile de yapılmıştır (Şekil 13). Bu karşılaştırmada yine en düşük çapa sahip taş kolonlar kullanılmıştır. Karşılaştırma ile taş kolonların düşey drenlere göre oldukça iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bouassida ve Hazzar [35], taş kolonların düşey drenlere göre konsolidasyonun hızlandırılması ve oturmalarının azaltılmasında oldukça başarılı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, maliyet açısından yapılan değerlendirmede taş kolonların yaklaşık %16,6 daha ekonomik olduğu ve proje süresinde sekiz aylık kazanç sağladığını da vurgulamıştır.

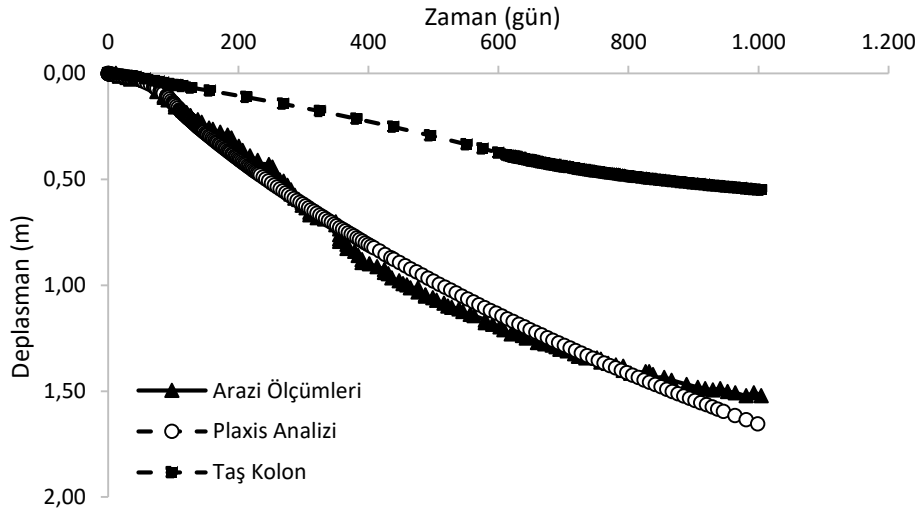
Tablo 6. Düşey dren analizi için kullanılan zemin parametreleri [33]

Soft soil	Deniz Üst Kili (Upper Marine Clay)	Deniz Orta Kili (Intermediate Marine Clay)	Deniz Alt kili (Lower Marine Clay)
Analiz Türü	Drenajsız	Drenajlı	Drenajlı
γ_{unsat} (kN/m ³)	15.00	15.00	15.00
γ_{sat} (kN/m ³)	15.00	15.50	16.00
k_e (m/day)	$2.66 \cdot 10^{-5}$	$6.25 \cdot 10^{-5}$	$2.81 \cdot 10^{-5}$
k_v (m/day)	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$3.13 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$
λ^*	0.150	0.060	0.170
k^*	0.018	0.011	0.025
c (kN/m ²)	1.00	1.00	1.00
Φ	27.00	32.00	27.00
ψ	0.00	0.00	0.00
v_{ur}	0.150	0.150	0.150
k_0^{ne}	0.55	0.47	0.55

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ



Şekil 12. 1.5m aralıklı dren ve taş kolonların sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması



Şekil 13. 2m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması

6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında taş kolon ve düşey dren uygulamalarının zamana bağlı oturma davranışını karşılaştırmak üzere Singapur şehrinin Changi bölgesinde uygulanan Changi Doğu Islah Projesi çalışılmıştır. Vaka incelemesinin öncesinde taş kolon ve düşey dren uygulamaları hakkında bilgi verilip, düşey dren tasarım parametrelerinin zamana bağlı oturmadaki etkisi parametrik olarak analiz edilmiştir. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Düşey drenlerin imalatı ile oluşan örselenmiş bölgenin (*smear zone*) permeabilitesindeki azalma ile zamana bağlı oturmalar azalmaktadır.
- Örselenmiş bölge büyüklüğünün artması ile konsolidasyon hızı azalmaktadır.
- Düşey dren boyunun azalması ile zamana bağlı oturmalar azalmaktadır. Ancak, dren uzunlunun artması ile de kuyu direncinde artışlar meydana gelecek ve drenlerin deşarj kapasitesi azalacaktır. Bu nedenle dren boyunun seçiminde dikkatli olunmalıdır.

- Drenler arasındaki mesafe azaldıkça zamana bağlı oturmaların artmakta ve konsolidasyon süresi azalmaktadır.
- Vaka arazisinde yapılan drenli arazi ölçümleri, sayısal taş kolon ve düşey dren analizleri ile yapılan karşılaştırma ile taş kolonların düşey drenlere göre oturmaların azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılmasında oldukça iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
- Çalışma sonucunda olası iyileştirme yöntemlerinden uygun olanın seçimi için yöntemlerin arazi koşullarındaki performanslarının detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. Dijkstra and C. Vestering, “The advantages of the use of GPS based logging systems for vertical drain installation projects,” International Conference on Soft Ground Engineering, 2015, 3, 4
- [2] R. D. Barksdale and R.C. Bachus, “Design and Construction of Stone Columns,” Vol. I, FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1983.
- [3] M. G. Taube and J. R. Herridge, “Stone columns for industrial fills,” Nicholson Construction Company, Cuddy, Pennsylvania. vol. 18, 2002.
- [4] R. K. Rowe and A. L. Li, “Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations,” Geosynthetics International, vol. 12, no. 1, pp. 50-85, 2005.
- [5] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn, J. Ameratunga and P. Boyle, “Performance and prediction of vacuum combined surcharge consolidation at Port of Brisbane,” Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 137, no. 11, pp. 1009-1018, 2011.
- [6] M. S. S. Almeida, I. Hosseinpour, M. Riccio and D. Alexiew, “Behavior of geotextileencased granular columns supporting test embankment on soft deposit,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 141, no. 3, 2014.
- [7] R. A. Barron, “Consolidation of fine-grained soils by drain wells,” Proceedings, ASCE, vol. 73, no. 6, pp. 811–835, 1948.
- [8] J. Han and S. L. Ye, “Simplified solution for the consolidation rate of stone column reinforced foundations,” ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, no. 7, pp. 597–603, 2001.
- [9] J. Han, and S. L. Ye, “A theoretical solution for consolidation rates for stone column reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects,” International Journal of Geomechanics, vol. 2, no. 2, pp. 135-151, 2002.
- [10] C. A. Eldho, A. Jose, V. Balamurugan, P. J. Parackal and K. L. Priya, “Ground Improvement Using Stone Columns and PVD,” Indian Geotechnical Conference. GEO Trendz, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, 2010.
- [11] N. P. Balaam and J. R. Booker, “Analysis of rigid rafts supported by granular piles,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 5 pp. 379–403, 1981.
- [12] H. B. Poorooshasb and G. G. Meyerhof “Analysis of behavior of stone columns and lime columns,” Computers and Geotechnics, vol. 20, no. 1, pp. 47-70, 1997.
- [13] A. P. Ambily and S. R. Gandhi, “Behaviour of stone columns based on experimental and fem analysis,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 133, pp. 405-415, 2007.
- [14] G. Mesri, D. O. K. Lo and T. W. Feng, “Settlement of embankments on soft clays,” In Proc. Settlement, vol. 94, pp. 8-56, 1994.
- [15] G. Zhu and J. H. Yin, “Finite element consolidation analysis of soils with vertical drain,” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 24, pp. 337-366, 2000.
- [16] B. Indraratna and I. W. Redana, “Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay,” Canadian Geotechnical Journal, vol. 37, no. 1, pp. 132-145, 2000.
- [17] B., Indraratna, C. Rujikiatkamjorn and I. Sathananthan, “Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading,” Canadian Geotechnical Journal, vol. 42, no. 4, pp. 994-1014, 2005a.
- [18] B., Indraratna, I. Sathananthan, C. Rujikiatkamjorn and A. S. Balasubramaniam, “Analytical and numerical modeling of soft soil stabilized by prefabricated vertical drains incorporating vacuum preloading,” International Journal of Geomechanics, vol. 5, no. 2, pp. 114-124, 2005b.
- [19] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn and V. Wijeyakulasuriya, “Soft clay stabilisation using prefabricated vertical drains and the role of viscous creep at the site of Sunshine Motorway,” Proceedings of the 10th Australia New Zealand conference on Geomechanics, pp. 96-101, 2007.
- [20] C. C. Hird, I. C. Pyrah and D. Russell, “Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground,” Géotechnique, vol. 42, pp. 499-511, 1992.
- [21] B. Indraratna, and I. W. Redana, “Laboratory determination of smear zone due tovertical drain installation,” J. Geotech. and Geoenvironmental Engineering, vol. 124, pp. 180-184, 1998.

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN ZEMİN KONSOLİDASYONUNA ETKİSİ: VAKA ANALİZİ

- [22] B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn and I. Sathananthan, “Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, no. 4, pp. 994-1014, 2005.
- [23] X. Guo, K. H. Xie, Y. and B. Deng, “Consolidation by prefabricated vertical drains with threshold gradient,” *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-4, 2014.
- [24] H. J. Priebe, “The Design of Vibro Replacement,” *Ground Engineering*, vol. 28, no. 10, pp. 1-13, 1995.
- [25] S. Mirsalehi and H. Bilsel, “Finite element modeling of stone columns in alluvial soils under an embankment,” 3th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2012.
- [26] D. G. Lin, H. K. Kim and A. Balasubrammaniam, “Numerical modeling of prefabricated vertical drain,” *Geotechnical Engineering*, vol. 31, no. 2, 2000.
- [27] D. T. Bergado, J. C. Chai, H.O. Abiera, M. C. Alfaro and A. S. Balasubrammaniam, “Improvement of soft Bangkok clay using vertical drains,” *Geotextiles and Geomembranes* vol. 12, no. 4, pp. 327-349, 1993a.
- [28] D. T. Bergado, K. Mukherjee, M. C. Alfaro, and A. S. Balasubrammaniam, “Prediction of vertical-band-drain performance by finite element method,” *Geotextiles and Geomembranes* vol. 12, no. 6, pp. 567-586, 1993b.
- [29] A. C. Mert, “Düşey Drenlerle (PVD) İyileştirilmiş Kilde Konsolidasyon Oturmalarının Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [30] M. S. Al-Soud, “Numerical analysis of prefabricated vertical drains improved soft soil beneath an embankment during staged construction,” *Journal of Engineering and Development*, vol. 20, no. 1, pp. 151-163, 2016.
- [31] J. Chu, M. W. Bo and A. Arulrajah, “Soil improvement works for an offshore land reclamation,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, vol. 162, no. 1, pp. 21-32, 2009.
- [32] M. W. Bo, J. Chu, B. K. Low and V. Choa, “Soil Improvement: Prefabricated Vertical Drain Technique,” ISBN 981-243-044-X, Thomson Learning, Singapore, p. 341, 2003.
- [33] A. Arulrajah, H. Nikraz and M. W. Bo, “Finite Element Modeling of Marine Clay Deformation under Reclamation Fills Ground Improvement,” *Journal of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 105-118, 2005.
- [34] E. Kırnak, “Taş Kolon Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2017.
- [35] M. Bouassida and L. Hazzar, “Comparison between Stone Columns and Vertical Geodrains with Preloading Embankment Techniques,” 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, p. 11-18, 2008.

