



Taş kolon tasarım parametrelerinin konsolidasyona etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of stone column design parameters on consolidation

Firdevs Uysal^{1,*} , Abdulazim Yıldız² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
² Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

Öz

Taş kolon, yumuşak zeminin taşıma kapasitesini artırmak, yumuşak zemin konsolidasyonunu hızlandırmak ve zemin oturmasını azaltmak için kullanılan etkili bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu çalışmada, literatürde geçmiş bir laboratuvar çalışmasından alınan doğrulanmış bir sayısal model ve model parametreleri kullanılarak taş kolonun zamana bağlı davranışını değerlendirmek için bir dizi sayısal çalışma yapılmıştır. Taş kolon ile iyileştirilmiş yumuşak zemin birim hücre yaklaşımı kullanılarak Plaxis 2D ile modellenmiştir. Gerilme konsantrasyon oranı, permeabilite oranı ve çap oranının taş kolonun zamana bağlı oturma davranışı üzerindeki etkisini anlamak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, bu tasarım parametrelerinin konsolidasyonun hızlanması ve ortalama konsolidasyon hızının artması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Taş kolon, Yumuşak zemin, konsolidasyon, Sayısal modelleme, Birim hücre

1 Giriş

Problemlili zemin olarak nitelendirilen yumuşak ve gevşek zemin şartlarına sahip bölgelerde, geleneksel temel inşaatı yöntemlerinin ekonomikliğini kaybetmesi ve çevre faktörlerinin oluşturduğu çok sayıda sıkıntı ve bunların aşılmasındaki güçlükler sebebiyle yerinde zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanılması önem kazanan konulardandır. Bu alanda çok sayıda alternatif iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Uygun yöntemin seçiminde amaca ulaşabilme, uygulanabilirlik, zaman ve ekonomi öncelikli tasarım kriterleridir.

Taş kolon, problemlili zeminlerin dayanımının artırılması ve oturmaların azaltılması için yaygın olarak kullanılan ekonomik ve çevre dostu zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Yöntemin uygulama kolaylığı, maliyetinin düşük olması ve performansı ile derin temel uygulamalarına alternatif bir yöntemdir. Taş kolon yönteminde zemin içine sıkıştırılmış granüler malzeme yerleştirilerek zeminin rijitliği artırılır ve dolaylı olarak zeminin kayma dayanımı artar ve sıkışabilirliği azalır [1]. Taş kolonlar düşey drenlere benzer bir şekilde çalışır. Zemin içindeki su yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine doğru akış halindedir. Su, permeabilitesi yüksek taş kolon içinde zemine göre daha rahat hareket ettiği için taş kolon düşük

Abstract

The stone column is an effective ground improvement method that is used to increase the load-bearing capacity of soft soil and speed up the process of soft soil consolidation and decrease the settlement of soil. In this study, a series of numerical studies have been performed to evaluate the time-dependent behavior of stone column by using a validated numerical model and model parameters from a past laboratory study in literature. The soft soil reinforced with a stone column was modeled with Plaxis 2D using the unit cell concept. Parametric studies were conducted to understand the impact of stress concentration ratio, permeability ratio, and diameter ratio on the time-dependent settlement behavior of stone column. The numerical results indicate that these design parameters have a significant influence on the acceleration of the consolidation and increasing the average consolidation rate.

Keywords: Stone column, Soft soil, Consolidation, Numerical modeling, Unit cell

enerji potansiyeline sahiptir. Diğer bir ifade ile kolonların permeabilitesinin yüksek olması zemin içindeki drenaj yolunu kısaltarak ince daneli zeminlerin konsolidasyonunu hızlandırırken, sıvılaştırılabilir zeminlerin de sıvılaşma potansiyelini düşürmektedir [2]. Taş kolonların en etkili olduğu zeminler drenajsız mukavemeti 7-50kPa olan zeminlerdir [3]. Yöntem, özellikle hafif yapılar (çok katlı olmayan yapılar, dolgular vb.) altındaki zayıf zeminlerde tercih edilmektedir [4].

Geoteknik analiz ve tasarımlar çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal araştırmalar ile yapılmaktadır [5]. Özellikle son on yılda, taşıma kapasitesi, oturmalar ve zemin içindeki suyun hareketi gibi birçok konu sonlu elemanlar yöntemli ile araştırılmıştır. Taş kolonların sayısal analizi için iki boyutlu düzlem deformasyon, eksenel simetrik birim hücre ve üç boyutlu modelle yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Bunlardan eksenel simetrik birim hücre, kompozit zeminlerin performansını incelemek için pek çok araştırmacı tarafından kullanılan basitleştirilmiş bir kavramdır [7]. Bu kavramda aynı yüklemeye maruz birçok taş kolon tek bir kolon ile temsil edilir.

Bu çalışmada taş kolonların tasarım parametrelerinden gerilme konsantrasyonu (n), çap oranı ($N=d_o/d_c$) ve

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

Geliş / Received: 18.05.2022 Kabul / Accepted: 17.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1118184

permeabilite oranının (k_v/k_c) konsolidasyon miktarı ve hızına etkisi sayısal analizler ile parametrik olarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde laboratuvarda özel tasarlanan büyük ölçekli bir ödometre hücresi içinde gerçekleştirilen taş kolonlu deneyler modellenmiştir. Silindirik deney hücresi içindeki taş kolon Plaxis bilgisayar yazılımı ile birim hücre esas alınarak iki boyutlu (2D) olarak modellenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan sayısal modelin geometrisi, yükleme koşulları, yumuşak zemin ve rijit temel parametreleri Uysal vd. [8] tarafından taş kolonsuz olarak yapılan laboratuvar deneyleri ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış bilgiler bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle sayısal olarak modellenen laboratuvar çalışması detaylı olarak sunulmuştur. Ardından birim hücre kavramından bahsedilerek, sayısal çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak da laboratuvarda taş kolonlu ve kolonsuz olarak gerçekleştirilen deneyler sayısal olarak modellenerek modelin doğruluğu tespit edilmiş ve parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre gerilme konsantrasyonu, permeabilite oranı ve çap oranının taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerin konsolidasyon hızı ve miktarında oldukça etkili olduğu görülmüştür.

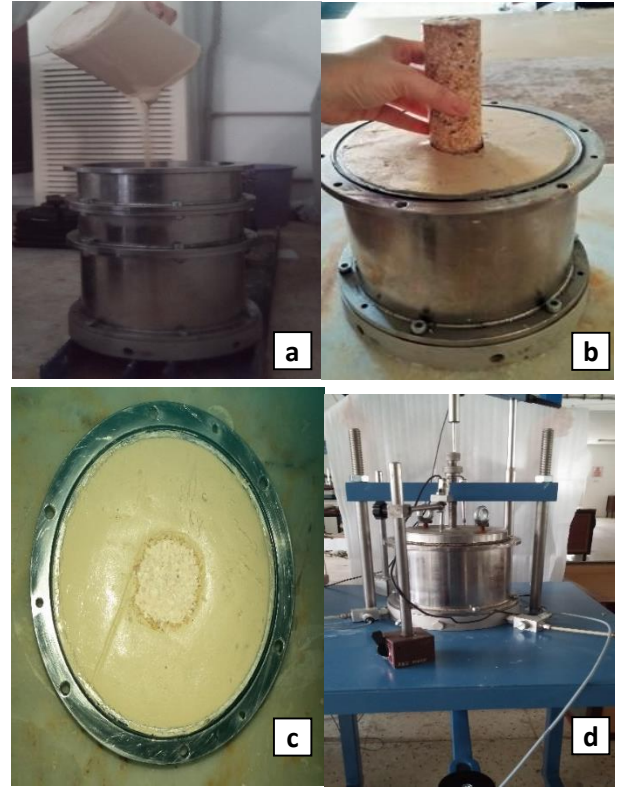
2 Deneysel çalışmalar

Bu bölümde izah edilen deneysel çalışma sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmalarda yumuşak zemin içine inşa edilen tek bir taş kolonun zamana bağlı davranışı araştırılmıştır. Bu deneyler, özel tasarlanan büyük ölçekli bir ödometre hücresinde gerçekleştirilmiştir. Deney hücresi, 20cm çap ve 15cm yüksekliğe sahip silindirik bir hücredir. Deney hücresi standart ödometre yükleme çerçevesine benzer bir yükleme düzeneğine sahip olup, deney süresince kademeli yüklemeler yapılmıştır. Yumuşak zemin, kaolen kilinin yeniden yapılandırılması ile hazırlanmıştır. Bu amaçla etüvde tamamen kurutulmuş kaolen kiline, kaolen kilinin likit limitinin (%38) 1.5 katı olan %57 oranında su ilave edilmiştir. Kil ve su bir karıştırıcı yardımı ile homojen bir şekilde karıştırılarak akışkan bir zemin elde edilmiştir (Şekil 1.a). Yapısı bozulan bu akışkan zemine 30kPa değerinde bir ön yükleme yapılarak yeniden yapı kazanması sağlanmıştır. Bu yöntem literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda da kullanılmıştır [9,10].

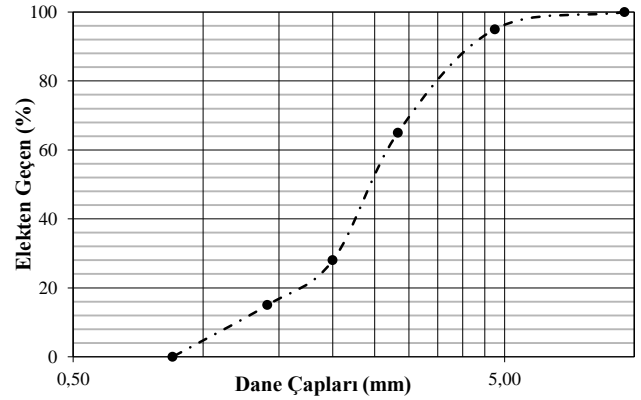
Deneysel çalışmada taş kolon imalatı için kullanılan granüler malzeme Mersin Taşucu Bolacalı taş ocağından getirilmiştir. Bu malzemenin dane büyüklüğü kolon çapı esas alınarak literatür araştırması sonucunda belirlenmiştir. Kolon malzemesinin dane büyüklüğü dağılım eğrisi Şekil 2’de verilmiştir. Taş kolonlar, granüler malzemenin homojen sıkıştırıldığından emin olmak ve yumuşak zeminde taş kolonların sıkıştırılmasıyla oluşacak örselenmeyi ortadan kaldırmak için dondurularak oluşturulmuştur (Şekil 1.b). Dondurulmuş kolon yöntemi literatürde yer alan uygulamalardandır [9,11]. Donmuş kolonların çapı 60mm ve yüksekliği ise 150mm’dir. Yoğunluğu 16.42kN/m^3 olacak şekilde plastik bir boru içine homojen olarak sıkıştırılan granüler malzeme su ile birlikte -15°C sıcaklığa sahip bir soğutucuda dondurulmuştur. Dondurulan bu kolon, deney hücresindeki ön konsolidasyonunu tamamlayarak yeniden yapı kazandırılmış yumuşak zeminin merkezine açılan kolon

ile aynı çaplı boşluk içine serbest olarak bırakılarak kolonun çözülmesi sağlanmıştır (Şekil 1.c). Erimiş kolon ve yumuşak zemine 30kPa değerinde bir günlük ön yükleme daha yapılarak kolon içindeki suyun tahliyesi sağlanmıştır.

Zemin ve kolon imalatı tamamlandıktan sonra üzerine poroz kâğıt yerleştirilmiş ve poroz kâğıt üzerine de zemindeki suyun tahliyesi için 10mm kalınlığında kum tabakası serilmiştir. Kum tabakasının üzerine model temel yerleştirilerek hücreye kademeli artışlarla sabit yüklemeler yapılmıştır (Şekil 1.d). Her bir yükleme aşaması boşluk suyu basıncı sönümlenene kadar sürdürülmüştür. Yükleme esnasında model temel üzerinde meydana gelen deplasmanlar zamana bağlı olarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Deney düzeneğinin oluşturulması



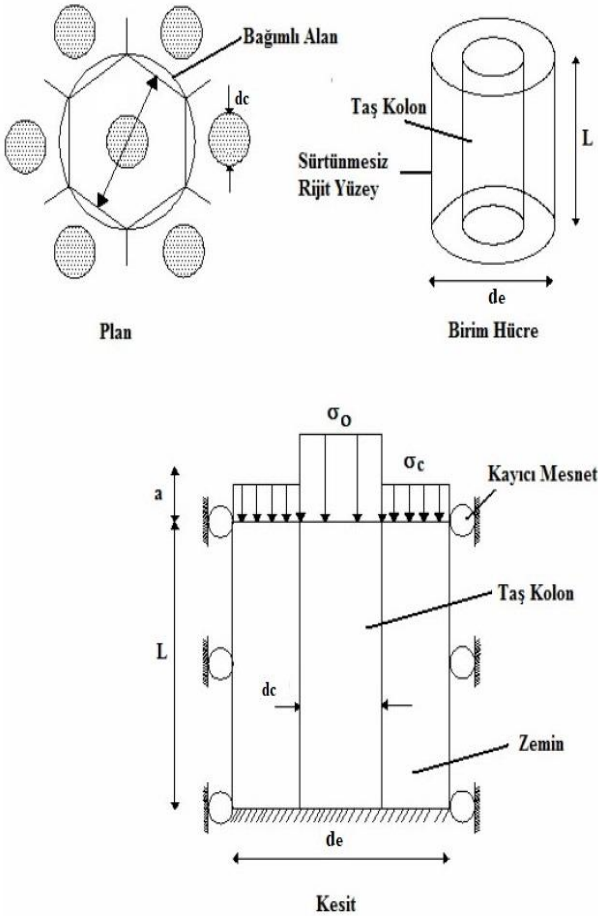
Şekil 2. Taş kolon malzemesinin dane büyüklüğü dağılımı

3 Sayısal analizler

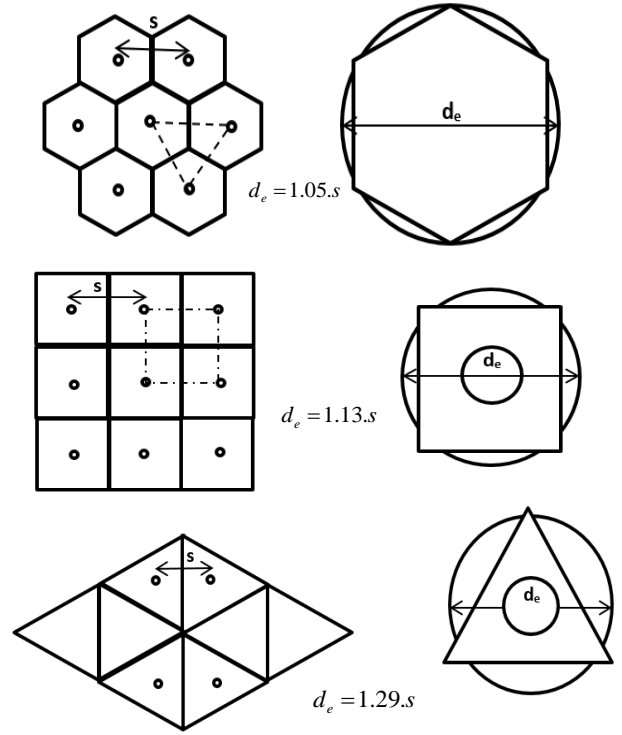
Bu kısımda öncelikle sayısal analizlerin temelini oluşturan birim hücre kavramından bahsedilmiştir. Ardından deneysel çalışmaların sayısal analizi detaylı olarak izah edilmiştir.

3.1 Birim hücre kavramı

Birim hücre, Barksdale ve Bachuc [3] tarafından sonsuz bir alana inşa edilmiş üniform yüklü grup taş kolonların analizi için önerilmiştir (Şekil 3). Bu yaklaşım, taş kolonların ampirik veya yarı ampirik tasarım yöntemlerinin çoğu tarafından esas alınmaktadır [6], [12-14]. Silindirik geometriye sahip birim hücre içinde zemin ve zeminin merkezinde tek bir taş kolon bulunur. Hücre boyutu taş kolonlar arası mesafe (s) ve kolonların yerleşim düzenine bağlıdır. s mesafesi taş kolon çapının 2-3 katı kadar değer alır. Taş kolonların yerleşim düzeni kolonun etkili olduğu bölgenin büyüklüğünü etkilemektedir. Bu etki bölgesi yaklaşık bir daireye benzetilir ve bu dairenin çapına efektif çap adı verilir (d_e) (Şekil 4). Birim hücre kavramında sınır koşulları etkisinin ihmal edilmesi, yükün sadece düşey yönlü tatbiki, kolonlar arası etkileşim ve grup etkisinin ihmal edilmesi gibi çeşitli kabuller yapılmaktadır. Bu kabullere rağmen birim hücrenin karmaşık problemlere basit çözümler getirmesi ve sonuçların makul olması yöntemin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır [15].



Şekil 3. Birim hücre kavramı [3]

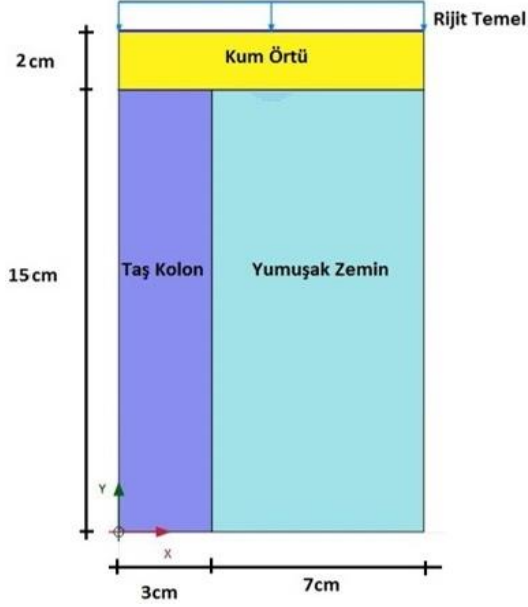


Şekil 4. Taş kolonların yerleşim düzeni ve eşdeğer daire

3.2 Model deneyin sayısal analizi

Bu bölümde, deneysel çalışmalar başlığı altında detayları verilen ve taş kolonlu olarak laboratuvarda gerçekleştirilen deneyler sayısal olarak modellenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan sayısal modelin geometrisi, yükleme koşulları, yumuşak zemin ve rijit temel parametreleri Uysal vd. [8] tarafından taş kolonsuz olarak yapılan laboratuvar deneyleri ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış model parametreleri ve zemin özellikleri bu araştırmada da kullanılmıştır (Tablo 1-2). Bu şekilde diğer tasarım parametreleri sayısal olarak doğrulanmış kolonsuz deney hücrelerinde sonradan inşa edilen taş kolonun bireysel etkisi değerlendirilmiştir. Sayısal analizler Plaxis bilgisayar yazılımı ile 2D olarak yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri, silindirik deney hücresi içinde bulunan yumuşak zemin ve zeminin merkezinde yer alan tek bir taş kolon ile yapıldığı için sayısal analizlerde birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. Geometrik olarak deney hücresinin yarısı alınarak eksenel simetrik analizler yapılmıştır (Şekil 5). Drenajlı olarak yapılan analizlerin ilk aşaması yükün tatbik edilmesi olup, bu aşama plastik analizler ile, ikinci aşama olan yükün bekletilmesi de konsolidasyon analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Analiz süreleri laboratuvar deneylerine paralel olarak seçilmiştir. Deney yüklemesi yayılı yüklemeye benzer şekilde ve 20mm kalınlığındaki rijit temel yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Rijit temel için kullanılan model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Yumuşak zemini temsil eden kaolenin davranışını modellemek için Soft Soil Model kullanılmıştır (Tablo 2). Ayrıca, taş kolon ve rijit temel altına yerleştirilen kum için ise Mohr Coulomb zemin modeli kullanılarak model parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur.

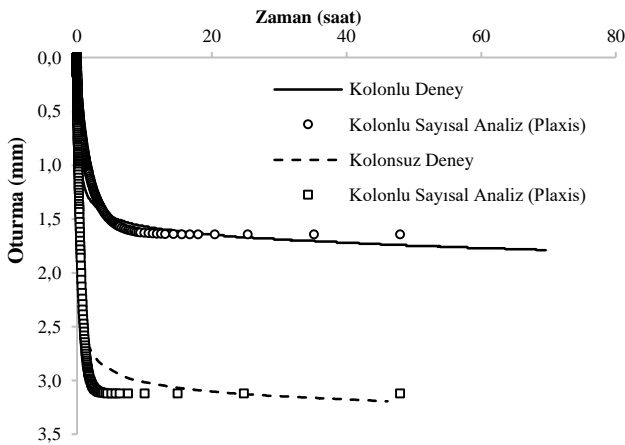
Sayısal analizlerde taş kolon tasarımında önem arz eden gerilme konsantrasyonu (n), permeabilite oranı (k_s/k_c) ve çap oranı ($N=d_e/d_c$) kavramları ve bu kavramların konsolidasyon miktarı ve hızına etkisi sayısal analizler ile parametrik olarak araştırılmıştır.



Şekil 5. Taş kolonlu aksenal simetrik deney modeli

4 Sayısal analiz sonuçları

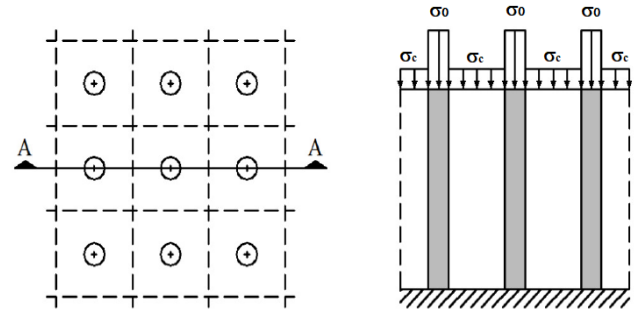
Bu kısımda öncelikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kolonlu ve kolonsuz laboratuvar deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada yoğunluk olmaması için 50-100kPa basınç kademesinde gerçekleştirilen karşılaştırma verilmiştir (Şekil 6). Deney ve sayısal model doğrulaması yapıldıktan sonra taş kolonların tasarım parametrelerinden gerilme konsantrasyonu (n), permeabilite oranı (k_s/k_c) ve çap oranının ($N=d_e/d_c$) konsolidasyon miktarına etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Parametrik çalışma sonuçları ilgili başlıklar altında sunulmuştur.



Şekil 6. Kolonlu ve kolonsuz deney sonuçlarının sayısal analizlerle karşılaştırılması (50-100kPa)

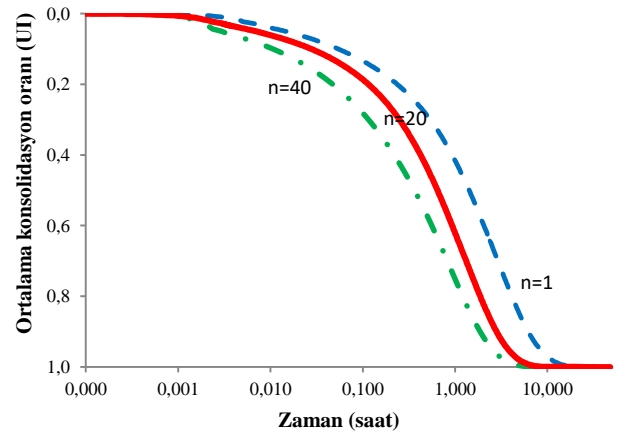
4.1 Gerilme konsantrasyonu (n)

Gerilme konsantrasyonu (n), taş kolonların iyileştirme performansını değerlendirmek için önem arz eden parametrelerden biridir. n , uygulanan üniform düşey gerilmenin kolon ve zemine dağılım oranıdır ($n = \sigma_{kolon} / \sigma_{zemin}$) (Şekil 7). Bu oran, kolon ve zemin üzerinde yapılan gerilme ölçümleri ile tespit edilebilir. Barksdale ve Bachus [3], arazi araştırmaları ile gerilme konsantrasyonun tipik değerinin 2.5-5.0 arasında olduğunu tespit etmiştir. n birçok araştırmacı tarafından arazi, laboratuvar ve sayısal çalışmalar ile araştırılmıştır [16]. Taş kolon ve etrafındaki zemin yüksek dayanıma sahip kompozit bir yapı oluşturur. Üniform bir yükleme altında kolon ve etrafındaki zeminin rijitlik farkından dolayı kolon ve zemin farklı büyüklükte gerilmeler taşır. Rijitliği yüksek taş kolonların üzerindeki gerilmeler zemine göre daha fazladır ve bu durum zemine gelecek düşey gerilmeleri azaltacağı için zemindeki oturmaları da azaltılır.



Şekil 7. Kolon ve zemindeki gerilme dağılımı [17]

Bu çalışmada n parametresinin taş kolonların zamana bağlı davranışına etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımını görmek için rijitlik farkının tanımlanması gerekir. Bu amaçla zemin rijitliği sabit tutulurken, taş kolon rijitliği artırılmıştır. Bu amaçla $n=1, 20$ ve 40 değerleri için analizler yapılmıştır. Sayısal analizler sonucunda gerilme konsantrasyonunun artmasıyla hücre içindeki zeminin konsolidasyon hızının ve konsolidasyon miktarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. n parametresinin zamana bağlı değişimi

Tablo 1. Rijit temel model parametreleri, Uysal vd. [8]

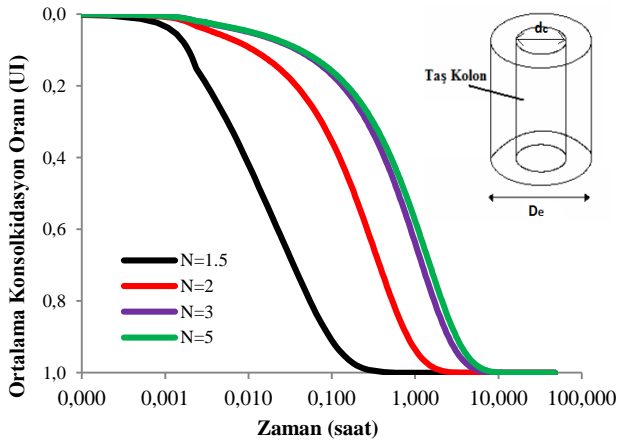
	Model	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
Rijit Temel	Elastik	20x10 ⁷	8500

Tablo 2. Malzeme parametreleri, Uysal vd. [8]

	Kaolen	Kolon Malzemesi	Kum
Model	Soft Soil Model	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
γ_{unsat} (kN/m ³)	16.5	20	19
γ_{sat} (kN/m ³)	17.3	22	20
E' (kN/m ²)	-	40000	20000
ν'	-	0.35	0.35
c' (kN/m ²)	20	0	0.1
ϕ'	35	43	32
ψ	0	13	2
λ^*	0.04	-	-
κ^*	0.004	-	-
POP	52	-	-
c_k	0.5	-	-
K_0	-	0.7	0.5

4.2 Çap oranı ($N=d_e/d_c$)

Çap oranı kolon etki bölgesinin çapının (d_e), kolon çapına (d_c) oranıdır. Bu parametre kolon merkezleri mesafesi ve kolon yerleşim düzeni ile ilgilidir. N etkisini araştırmak için taş kolon çapı (60mm) sabit tutulup, silindirik deney hücresinin çapı değiştirilmiştir. N etkisi deney hücre büyüklüğü sabit tutularak kolon çapının değiştirilmesi ile de araştırılabilir. Bu kısımdaki analizlerde $N=1.5, 2, 3$ ve 5 seçilmiş ve bu değerlerin etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak N oranının azalması ile kolon etrafındaki drenaj yolu kısalmış, bunun sonucunda konsolidasyon hızı ve oranı artmıştır (Şekil 9). Bu durum taş kolon çapının artması veya kolonlar arası mesafenin azalmasının konsolidasyon süresini azaltıp konsolidasyon miktarını azalttığı şeklinde de yorumlanabilir. Çalışma ile taş kolon büyüklüğü ve diziliminin taş kolonların zamana bağlı performansında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



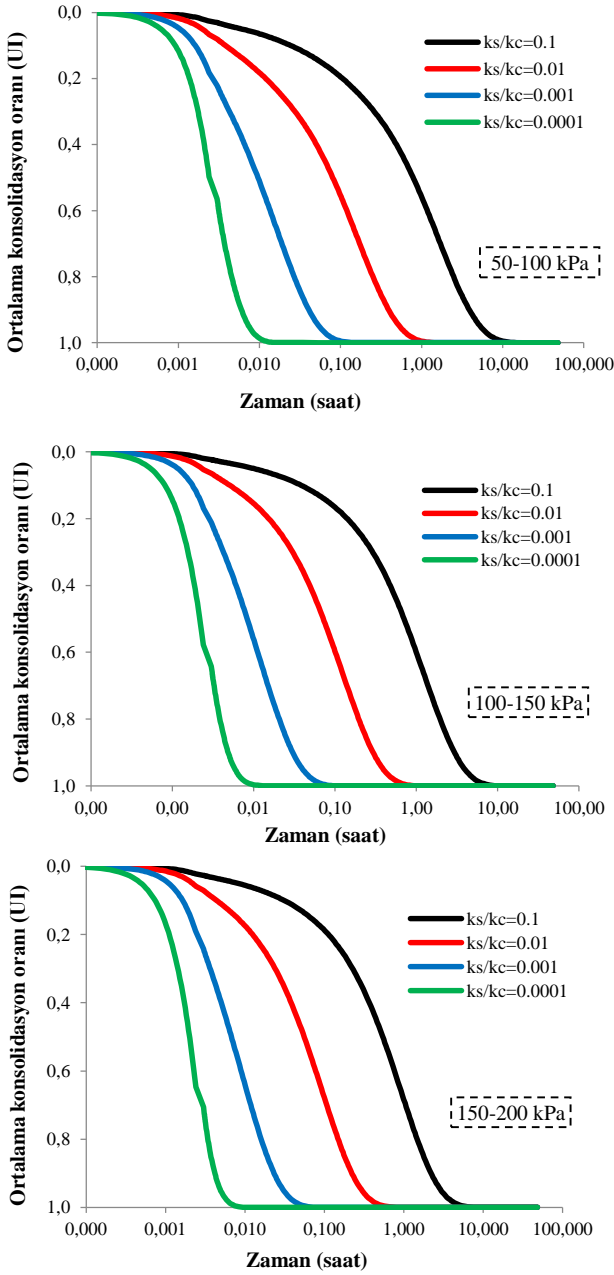
Şekil 9. Çap oranının zaman bağlı değişimi

4.3 Permeabilite oranı (k_s/k_c)

Taş kolonların kullanılmasındaki temel amaçlardan biri iki farklı mekanizma ile zeminin birincil konsolidasyonunu hızlandırmaktır. Bunlardan ilki, taş kolonun yüksek permeabilitesinin radyal drenajı sağlayarak aşırı boşluk suyu basınçlarının daha hızlı sönmülmesi sağlamak, ikincisi ise taş kolonun yüksek rijitliği ile zemine daha az düşey yük gelmesini sağlayarak aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu azaltmaktır [18].

Taş kolon permeabilitesinin arazide doğru bir şekilde tespiti, sahada ölçülmesi en zor parametrelerden biridir [19]. Bu nedenle bu çalışmada taş kolon permeabilitesinin (k_c) iyileştirmeye olan etkisi laboratuvar deneyinin farklı basınç kademeleri için parametrik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla analizlerde zemin permeabilitesi (k_s) ve k_c oranı değiştirilerek kolon ve zemin arasında permeabilite farkı oluşturulmuştur. Bu oran 0.1-0.0001 aralığında seçilmiştir. Bu aralığın geniş tutulmasındaki amaç arazide olası tüm durumların sağlanmasıdır. Permeabilite oranının (k_s/k_c) artması başka bir ifade ile taş kolon permeabilitesinin azalması, kompozit zeminin permeabilitesini azaltarak tüm basınç kademelerinde konsolidasyon hızını ve miktarını azaltmıştır (Şekil 10). Her bir basınç kademesindeki k_s/k_c oranları incelendiği zaman basınç kademesi değeri gözetmeksizin benzer bir eğilim görülmektedir. Sonuç olarak, taş kolon permeabilitesi iyileştirme süresi ve miktarına önemli katkı sağlamaktadır.

Taş kolon imalatı sırasında kil ve taş kolon malzemesi kısa bir süre içinde karıştığından kolon malzemesinde bir miktar tıkanmaya neden olacaktır. Tıkanmış kolon malzemesinin özellikleri kolon iskeletine giren kil miktarına bağlıdır. Kil zeminin kolon boşluklarını doldurması kolonun permeabilitesini azaltacaktır [20]. Kolon permeabilitesinin kolon imalatından doğrudan etkilendiği düşünülürse, kolon imalatı sırasında kolon permeabilitesini azaltabilecek etkilere dikkat etmek gereklidir.



Şekil 10. Permeabilite oranının konsolidasyona etkisi

5 Sonuçlar

Laboratuvar ortamında büyük ölçekli bir ödometre deney hücresinde yeniden yapılandırılarak oluşturulan yumuşak bir zemine tek bir taş kolon imal edilerek oluşturulan kompozit zeminin zamana bağlı davranışı sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda tasarımda önem arz eden parametrelerden gerilme konsantrasyonu, çap oranı ve permeabilite oranının kompozit malzemenin zamana bağlı davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Gerilme konsantrasyonunun artmasıyla deney hücresi içindeki yumuşak zeminin konsolidasyon hızı ve konsolidasyon miktarı artmıştır.

- Taş kolon çapının artması veya kolonlar arası mesafenin azalmasının konsolidasyon süresini azaltıp konsolidasyon miktarını azaltmıştır.
- Taş kolon permeabilitesinin artması ile konsolidasyon hızı ve miktarı artmaktadır. Kolon permeabilitesinin kolon imalatından önemli derecede etkilendiği göz önüne alınırsa imalat esnasında kolon permeabilitesini azaltabilecek faktörlerden kaçınılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] S. Rajesh and P. Jain, Influence of permeability of soft clay on the efficiency of stone columns and geosynthetic-encased stone columns—a numerical study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9 (5), 483-493, 2015. <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000088>.
- [2] M. Ghazavi, A. E. Yamchi, and J. N. Afsar, Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*. 46 (3), 312–318, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.01.002>.
- [3] 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.
- [4] A. Cimentada and A. Da Costa, Laboratory experimental analysis of radial consolidation around a stone column. In *Geotechnics of soft soils: Focus on ground improvement*, 213–217, London: Taylor and Francis, 2008.
- [5] B. G. Sexton, B. A. McCabe, M. Karstunen, and N. Sivasithamparam, Stone column settlement performance in structured anisotropic clays: The Influence of Creep. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (5), 672–688, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.004>
- [6] A. Hamzh, H. Mohamad and M. F. Bin Yusof, The effect of stone column geometry on soft soil bearing capacity. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16 (2), 200-210, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1666557>
- [7] K. S. Ng and S. A. Tan, Simplified homogenization method in stone column designs. *Soils and Foundations*, 55 (1), 154-165, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.012>
- [8] F. Uysal, B. Bağrıaçık ve A. Yıldız, Yumuşak zemin model parametrelerinin zemin davranışına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (1), 97-106, 2018. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.420681>
- [9] A. Cimentada, A. Da Costa, J. Cañizal and C. Sagasetta, Laboratory study on radial consolidation and deformation in clay reinforced with stone columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (1), 36–52, 2011. <https://doi.org/10.1139/T10-043>

- [10] W. Frikha, M. Bouassida, and J. Canou, Parametric study of a clayey specimen reinforced by a granular column. *International Journal of Geomechanics*, 15 (15), 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000419)
- [11] J. W. Choi, D. Y. Lee, and C. S. Yoo, Undrained characteristics of geogrid-encased stone column under cyclic load using reduced-scale model tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 29 (1), 109-120. 2013. <https://doi.org/10.7843/kgs.2013.29.1.109>
- [12] N. P. Balaam, J. R. Booker, Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 9, John Wiley and Sons, Inc., 331-351. 1985.
- [13] H. J. Priebe, Design of vibro replacement, the application of Priebe's method to extremely soft soils 'floating' foundations and proof against slope or embankment failure. *Ground Engineering*, 38 (1) 2005.
- [14] J. Castro and M. Karstunen, Numerical simulations of stone column installation. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 1127-1138. 2010. <https://doi.org/10.1139/T10-019>
- [15] L. A. Dar and M. Y. Shah, Three dimensional numerical study on behavior of geosynthetic encased stone column placed in soft soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 1901-1922, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01594-x>
- [16] M. Yıldız, Determination of stress concentration factor in stone columns by numerical modelling. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2013.
- [17] M. Killeen, Numerical modelling of small groups of stone columns. Ph.D. Thesis, National University of Ireland, Galway, 2012.
- [18] B. S. Tan and S. Tjahyono, Practical modelling of stone-column reinforced ground. In *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, 291-311, Korean Geotechnical Society, 2006.
- [19] K. Adalier and A. Elgamal, Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns. *Engineering Geology*, 72 (3-4), 275-291, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.001>
- [20] P. Tai, B. Indraratna and C. Rujikiatkamjorn, Experimental simulation and mathematical modelling of clogging in stone column. *Canadian Geotechnical Journal*, 55 (3), 427-436, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0271>

