



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Taş kolon performanslarının hipoplastik model ile analizi

## *Analysis of stone column performance with hypoplastic model*

*Yazar(lar) (Author(s)): Sacit SARIMURAT<sup>1</sup>, H. Ercan TAŞAN<sup>2</sup>, Nihat S. IŞIK<sup>3</sup>, Seyhan FIRAT<sup>3</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-4572-2448*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8588-5957*

*ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-5104-9504*

*ORCID<sup>4</sup>: 0000-0003-3649-0999*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sarımurat S., Taşan H. E., Işık N. S. ve Fırat S., “Taş kolon performanslarının hipoplastik model ile analizi”, *Politeknik Dergisi*, 24(3): 997-1007, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.762407

# Taş Kolon Performanslarının Hipoplastik Model ile Analizi

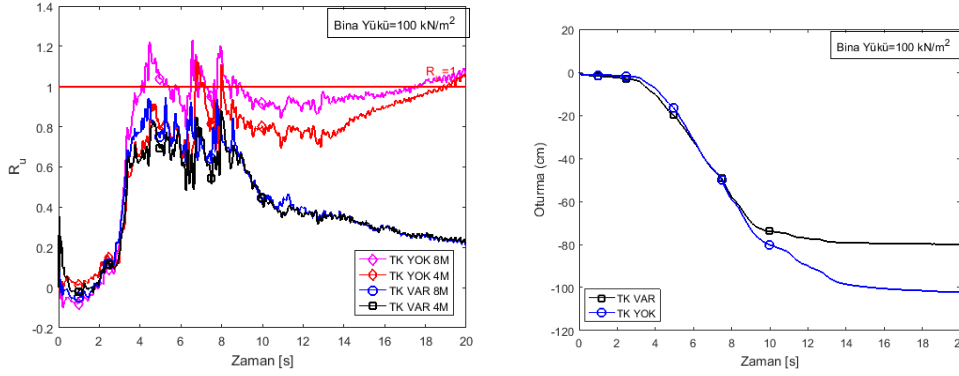
## Analysis of Stone Column Performance with Hypoplastic Model

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Taş kolonlarla iyileştirilmiş suya doymun kumlu zeminlerin hipoplastik malzeme modeli ile dinamik analizi / Dynamic analysis of water-saturated sandy soils improved with stone columns using the hypoplastic material model
- ❖ İki Fazlı Model / Two Phase Model
- ❖ Kozeny-Carman Eşitliği / Kozeny-Carman Equation
- ❖ Sıvılaştırma analizleri / Liquefaction analysis

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Gevşek, suya doymun kumlu zeminlerde taş kolonların performansı üç boyutlu sonlu elemanlar modeliyle incelenmiştir. Analizlerde taş kolonlu ve taş kolonsuz zeminlerdeki boşluk suyu basıncı oranları ve oturmalar karşılaştırılmıştır. / The performance of stone columns in loose, water-saturated sandy soils was investigated by three dimensional finite element model. In the analyzes, both pore water pressure ratios and settlement results were compared for soils with and without stone columns.



**Şekil.** Taş kolonlu ve taş kolonsuz modellerde boşluk suyu basıncı oranlarının ( $R_u$ ) ve oturmaların zamana bağlı değişimi / **Figure.** Time dependent variation of pore pressure ratio ( $R_u$ ) and settlements for soil model with and without stone columns

### Amaç (Aim)

Taş kolonla iyileştirilmiş zeminlerin sayısal analizi / Numerical analysis of stone column improved soils

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

ANSYS sonlu elemanlar programında zemin modelleri oluşturularak dinamik analizler yapılmıştır. / Dynamic analyzes were made by creating soil models in ANSYS finite element program.

### Özgünlük (Originality)

İki fazlı eleman (u20p8) kullanılarak analiz sonuçlarının doğruluk oranı artırılmıştır. / The accuracy of the analysis' results is increased by using the two-phase element (u20p8).

### Bulgular (Findings)

Taş kolon malzemesi seçiminin performans etkileri tespit edilmiştir. / Performance effects of stone column material selection have been determined.

### Sonuç (Conclusion)

Suya doymun kumlu zeminlerde taş kolonla yapılan iyileştirmelerin olumlu etkileri ortaya konulmuştur. / The positive effects of the improvements made with stone columns on sandy soils saturated with water have been demonstrated.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Taş Kolon Performanslarının Hipoplastik Model ile Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Sacit SARIMURAT<sup>1\*</sup>, H. Ercan TAŞAN<sup>2</sup>, Nihat S. IŞIK<sup>3</sup>, Seyhan FIRAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü (ssarimurat@gmail.com), Türkiye  
<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye  
<sup>3</sup>Teknoloji Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received: 01.07.2020; Kabul/Accepted: 29.08.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 12.09.2020)

## ÖZ

Gevşek zeminlerde sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı zemin hareketleri günümüze kadar meydana gelen depremlerde gerçekleşen hasarların büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu hasarların oluşmasının önüne geçmek amacıyla kullanılan yöntemlerden biri, önemi gün geçtikçe daha çok artan, taş kolon yöntemidir. Yapılan çalışmalara rağmen dinamik yüklemeler altında taş kolonların çalışma davranışı karmaşık bir konu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada gevşek, suya doygun kumlu zeminlerde taş kolonların performansı üç boyutlu sonlu elemanlar modeliyle incelenmiştir. Analizlerde taş kolonlu ve taş kolonsuz zeminlerdeki boşluk suyu basıncı oranları ve oturmalar karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda taş kolon parametrelerindeki değişikliklerin taş kolon performansını nasıl etkilediğinin görülebilmesi için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Analizlerde, dinamik yüklemeler altında boşluk suyu basıncı oluşumlarını görebilmek için hipoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Ancak ANSYS sonlu elemanlar programında tanımlı olmayan bu modelin kullanımına olanak sağlanması için programa üç boyutlu iki fazlı bir eleman (u20p8) tanımlanmıştır. Modelin tekrarlı yükleme altında granüler zeminlerin davranışının incelenmesi için uygun olduğu görülmüştür. Çalışma sonunda taş kolonların suya doygun granüler zeminlerde kullanımının faydaları ortaya konulmuştur. Bu çalışma ileriki araştırmaların amacına uygun olarak kumlu zeminlerde sıvılaşmaya karşı taş kolon kullanımının etkisinin görülmesi açısından faydalı olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hipoplastik malzeme modeli, sıvılaşma, taş kolon, ANSYS, iki fazlı model.

## Analysis of Stone Column Performance with Hypoplastic Model

### ABSTRACT

In soft soils, soil liquefaction and related ground changes constitute a large part of the damages occurred due to the earthquakes in past years. One of the methods used to prevent the occurrence of these damages is the stone column method whose importance is increasing every day. Despite the studies, the working behaviour of stone columns under dynamic loading continues to be a complex issue. In this study, the performance of stone columns in loose, saturated sandy soils was investigated with a three dimensional finite element model. In the analysis, both pore water pressure ratios and settlement results were compared for soils with and without stone columns. Also a parametric study is carried out to see how changes in stone column parameters affect stone column performance. A three-dimensional two-phase element (u20p8) implemented to ANSYS program to make the usage of hypoplastic material model possible, in order to obtain pore water pressure accumulations that may occur under dynamic loading in saturated soils. It is seen that the model is well suited for the examination of the behaviour of granular soils under repeated loading. In this study, the advantages of using stone columns in saturated granular soils were discussed. This study is useful for the further studies to see the effect of stone column applications in liquefaction susceptible soils.

**Keywords:** Hypoplastic material model, liquefaction, stone column, ANSYS, two phase model.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gevşek zeminlerin doygun şartlarda, diğer bir deyişle zemindeki tüm boşlukların tamamen su ile dolu olması durumunda, zemindeki su dinamik yükler altında dışarı çıkma yani tahliye olma eğilimindedir. Bununla birlikte, yükleme suyun drenaj süresinden daha hızlıysa veya suyun dışarı çıkması önlenirse, bu durumda zeminde boşluk suyu basıncı oluşur. Boşluk suyu basıncı tanelerin birbirinden ayrılmasına neden olur ve böylece zemin taneleri arasındaki temas yüzeyleri ve temas kuvvetleri azalır. Boşluk suyu basıncı arttıkça, zemin taneleri

arasındaki temas da buna bağlı olarak azalır ve bir süre sonra zemin sıvı gibi davranır. Bu olay, yani zemin taneleri arasındaki gerilme kuvvetlerinin boşluk suyu basıncına eşit veya boşluk suyu basıncından düşük duruma gelme olayı sıvılaşma olarak adlandırılır. Bu durum özellikle tekrarlı yüklemelerde önemli sorun olmaktadır. Sıvılaşma, Erzincan depremi sonrasında ülkemiz literatürüne girmiş olup 1999 depreminde meydana gelen sıvılaşma vakalarından sonra daha çok önem kazanmıştır [1].

Sıvılaşmaya müsait gevşek zeminlerde kullanılan en iyi iyileştirme yöntemlerinden biri taş kolon uygulama yöntemidir. Taş kolonlar uygulanabilirliği ve maliyeti açısından güvenilir bir zemin iyileştirme tekniğidir [2].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ssarimurat@gmail.com

Taş kolon uygulamalarıyla, uygulama yöntemine bağlı olarak, zeminlerde yoğunluk artışı, taş kolon çevresindeki zeminlerde efektif gerilme artışı, kesme dayanımı artışı ve drenaj artışı sağlanmaktadır. Taş kolonlar la ilgili yapılan çalışmalarda, daha çok drenaj etkileri ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında yumuşak bir zeminde daha rijit olan taş kolonlarla yapılan bir iyileştirme tekrarlı yükler altında zeminde daha az gerilme oluşmasına sebep olacaktır. Bu da zeminin sıvılaşmaya karşı dayanımını arttıracaktır.

Adalier ve Elgama [3] sıvılaşma riskine karşı zeminlerde taş kolon uygulamasını incelemiştir. İyileştirilmemiş doymuş silt malzeme ve içerisine yapılan kum kolonla iyileştirilmiş silt malzeme için dört adet santrifüj deneyi yapmışlardır. Her iki modelde sıvılaşma oluşmasına rağmen kum kolonlu örnekte sıvılaşmaya karşı zeminde daha yüksek dayanım oluştuğu görülmüştür.

Sarımurat vd. [4] yaptıkları çalışmada hipoplastik malzeme modelini kullanarak C-CORE tarafından gerçekleştirilen CT4 santrifüj deneyinin ANSYS [5] programıyla doğrulamasını yapmışlardır. ANSYS analiz sonuçları ile deney sonuçları tam bir uyum sağlamıştır. Çalışmayla sıvılaşma için yapılacak sayısal analizlerde hipoplastik malzeme modeli, iki fazlı u20p8 elemanı ve Kozeny-Carman eşitliğinin kullanılmasının analizlerde yüksek derecede güvenilirlik sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Hleibieh ve Herle [6] suya doymuş kohezyonsuz zeminlerin deprem performansı için 3 adet santrifüj testinin sonlu elemanlar programıyla hipoplastik model kullanarak doğrulama çalışmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda hipoplastik model ile yapılan hesaplamaların santrifüj deney sonuçlarıyla uyum içinde olduğunu ve hipoplastik modelin dinamik koşullar altında zemin davranışını doğru bir şekilde yansıttığı sonucuna varmışlardır.

Meshkinghalam vd. [7] taş kolonlarla ilgili yapmış oldukları çalışmada taş kolonların 2,5-3,5 m aralıklarla uygulanması durumunda kolonlarda burkulma oluşmadığı ve oturmaların azaldığı sonucunu elde etmişlerdir.

Badanagki vd. [8] taş kolonların farklı özellikteki katmanlardan oluşan zeminlerdeki sismik performansını incelemek için 6 adet santrifüj testi yapmışlardır. Çalışma sonunda sıvılaşabilir zemin kalınlığının zeminin tamamının sıvılaşma potansiyelini etkilediği, taş kolonlarla iyileştirilen zeminlerde oturmaların ve yanal deformasyonların azaldığı sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada suya doymuş sıvılaşabilir kohezyonsuz zemin davranışı ve sıvılaşabilir zeminlerde iyileştirme yöntemi olarak taş kolon kullanımının zeminin davranışına katkısı incelenmiştir. Çalışmada hipoplastik malzeme modeli ve zeminin çevrimsel yükler altında sıkışma özelliklerini göz önünde bulunduran Kozeny-Carman ilişkisi kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde doymuş zeminlerde tekrarlı yüklem altında oluşabilecek boşluk suyu basınç birikimleri için geliştirilmiş olan bu modelin kullanımı için üç boyutlu

bir eleman (u20p8) ANSYS programına eklenmiştir. Bu eleman için iki fazlı model temel alınmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Taş Kolonlar (Stone Columns)

Zemin sıvılaşmasını önlemek için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri mevcuttur. Son yıllarda kullanımı giderek artan taş kolon sistemi özellikle sıvılaşmaya müsait suya doymuş gevşek kumlu zeminlerde kayda değer iyileştirmeler sağlamaktadır. Taş kolonlar genellikle 1-2 cm boyutlarında temiz taş malzemeler ile imal edilmektedir, fakat çelik çürüğü gibi atık malzemelerin yol temel ve alt temellerinde kullanıldığı gibi [9] taş kolon imalatlarında da kullanılacağı değerlendirilmektedir. Taş kolonların uygulama yapılan zeminlere göre daha yüksek geçirgenliklere sahip olması sebebiyle zemin suyunun kolonlara doğru yönelmesi, taş kolonla çevresindeki zemin arasında bir basınç farkı oluşmasına sebep olur. Bu basınç farkı nedeniyle, suyun kolonlar yönünde bir hareketi ve dolayısıyla zemindeki boşluk suyu basıncında bir azalma oluşur. Kum ve çakıl geçirgenliği yatay yönde dikey yöne göre daha büyük olduğundan, taş kolonların etkileri sadece drenaj yollarının kısılması değil, aynı zamanda su hareketinin yönünün daha etkili akış yönüne doğru değişmesine sebep olur. Ayrıca, taş kolonlar imalat esnasında çevresindeki zeminin sıkışmasına neden olur ve bu da sıvılaşma eğilimini azaltır. Taş kolonlar, çevresindeki zeminde çok daha rijit olduğundan, kolon elemanları zemine göre daha fazla gerilmeye maruz kalarak gevşek zeminde daha az gerilme oluşmasını sağlarlar.

### 2.2. Sayısal Model (Numerical Model)

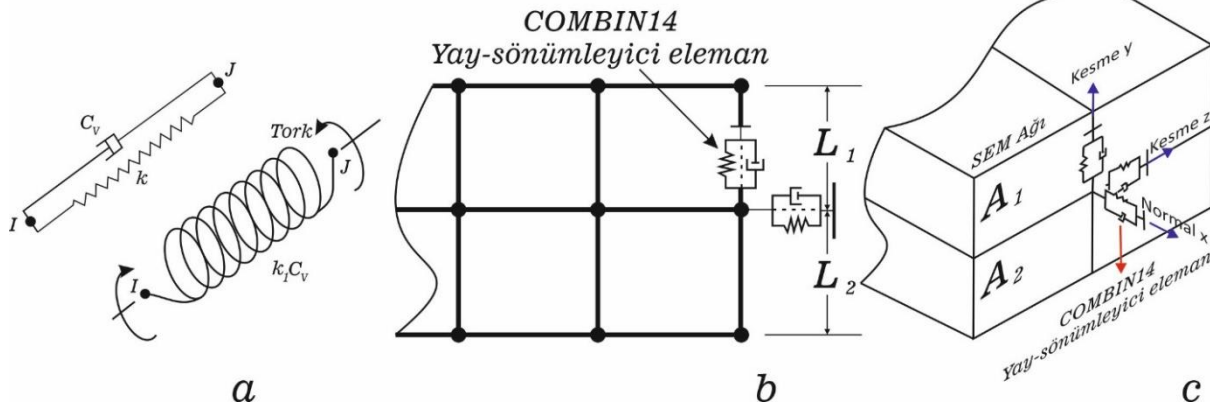
Özellikle porozite ve permeabilite değişimlerinden dolayı, tekrarlı ve dinamik yükler altında kumlu zeminlerdeki davranışın incelenmesi en karmaşık konulardan biridir. Yükleme, boşaltma, ardından tekrar yükleme yapıldığı durumlarda kumlarda gevşeme ve sıkışma gerçekleştiği için zemin boşluk hacminde değişim gerçekleşmekte ve bu olay zeminin geçirgenliğinde değişime yol açmaktadır.

Suya doymuş kumlu zeminlerin dinamik ve tekrarlı yüklemeler sonucu gerçekleşen zemin davranışlarının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için porozitenin doğru bir şekilde dikkate alınması, zemindeki porozite-permeabilite değişiminin analizlere yansıtılabilmesi gerekmektedir. Bunu için hipoplastik malzeme modeli ile Kozeny-Carman eşitliği birlikte kullanılmıştır. Böylece dinamik ve tekrarlı yüklemelere maruz kalan kumlu zeminlerin dayanımının gerilme-şekil değiştirme davranışı ile tanımlanabilmesi mümkün olabilmektedir. Sınır koşulları tüm modellerde aynı şekildedir. Model tabanı tüm yönlerde sabitlenmiş olup kenarlarda ise yay-sönümleyici elemanlar uygulanmıştır.

### 2.2.1. Yay-sönümleyici eleman uygulanması (Application of spring-damper element)

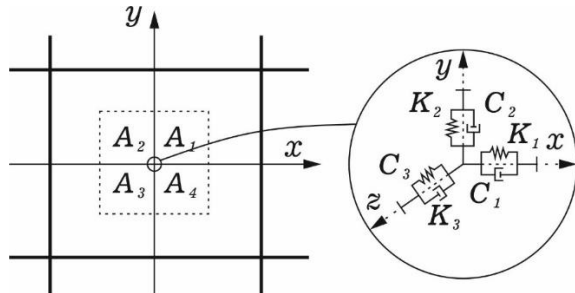
Sonlu eleman analizlerinde sınır koşullarının doğru bir şekilde tanımlanması büyük önem arz etmektedir. Analiz yapılacak yapının sonsuz bir şekilde modellenmesi mümkün olmadığından model ölçüleri uygun bir şekilde tutularak yapay sınırlar tanımlamak gerekmektedir. Ancak bu sınırlandırılmış modelde dinamik analiz esnasında deprem dalgalarının tanımlanan yapay sınırlardan geri saçılarak hesapları yanıltıcı bir şekilde etkilememesi için uygun sınır koşulları tanımlamak

gerekmektedir. Bunun için bu çalışmada Shen vd. [10] ve Jingbo vd. [11] tarafından iyi sonuçlar elde edildiği kanıtlanmış olan viskoz-yay sınırın kullanılmasına karar verilmiştir. Viskoz yay sınır, modelin sınırlarına yay elemanların sönümleyici olarak tanımlanması ve böylece deprem dalgalarının sınırlardan geri yansımalarının önüne geçilmesi düşüncesine dayanmaktadır. Yay elemanlarının tanımlanması için ANSYS programında tanımlanan COMBIN14 elemanı kullanılmıştır. Kullanılan bu eleman ve uygulama detayları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Visköz sınırın yay-sönümleyici elemanı kullanılarak tanımlanması: a) COMBIN14 elemanı b) 2- Boyutlu SEM uygulaması c) 3-Boyutlu SEM uygulaması (Implementation of viscous boundary using spring-damper element: a) COMBIN14 element b) 2-D FEM implementation c) 3-D FEM implementation) [10]

Şekil 1'de görüldüğü gibi model 3 boyutlu elemanlardan oluştuğu zaman 1 adet normal doğrultuda yani yüzeye dik, 2 adet yüzeye teğet diğer iki doğrultuda uygulanmaktadır. Kullanılan her 3 yay elemanının da birer uçları düğüm noktalarına tutturularak diğer uçları sabitlenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Üç boyutlu elemanlarda yay-sönümleyici uygulaması (Application of spring-damper for 3-D elements) [11]

Sınırlardaki reaksiyon kuvvetlerini ifade eden yay-sönümleyici katsayıları  $K_N$ ,  $K_T$ ,  $C_N$  ve  $C_T$  olarak adlandırılmaktadır. Bu ifadeler Denklem 1 ve 2'de tanımlanmaktadır.

$$K_N = 0; \quad C_N = \frac{a}{4} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \rho C_p \quad (1)$$

$$K_T = 0; \quad C_T = \frac{b}{4} (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \rho C_s \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $C_N$  ve  $C_T$  normal ve teğet yönlerdeki yay sönüm katsayılarını,  $K_N$  ve  $K_T$  normal ve teğet yönlerdeki yay katsayılarını ve  $A_1, A_2, A_3$  ve  $A_4$  ise

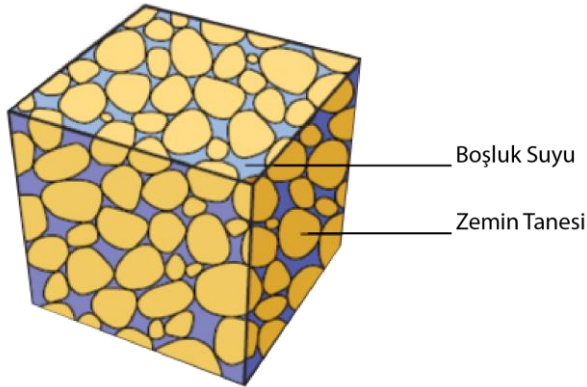
düğüm noktasını çevreleyen elemanların alanlarını ifade etmektedir. Ayrıca  $\rho$  malzeme yoğunluğu,  $C_p$  P dalga hızı ve  $C_s$  ise S dalga hızı için kullanılmıştır. Denklemlerde görülen a ve b katsayıları için düşey kenarlarda mükemmel yakın emilim sağlanması için Lysmer ve Kuhlemeyer [12] tarafından a = b = 1 olarak alınması önerilmektedir. Yatay ve yatayla 30°'den küçük açılar yapan kenarlarda a = b = 1 alınması durumunda küçük yansımalar olacaktır [12].

Şekil 1 ve Şekil 2'deki gösterimler 1 adet düğüm noktasına göre yapılmıştır. Model oluşturulurken sınırlardaki tüm bağlantı noktalarına yay-sönümleyici elemanlar uygulanmıştır.

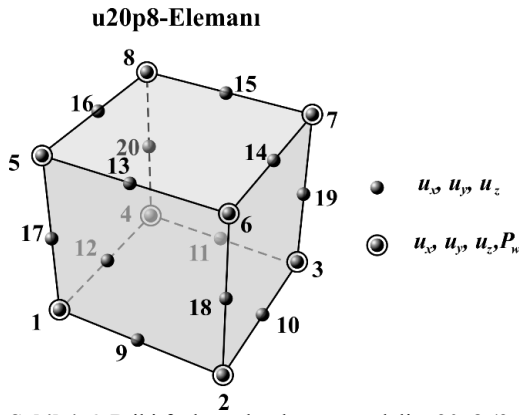
### 2.3. İki Fazlı Model (Two Phase Model)

Zemin yapısı, doğal olarak katı taneler, içerisindeki su ve gaz olarak tabir edebileceğimiz hava boşluklarından oluşmaktadır. Tamamen suya doymuş zeminlerde tüm boşluklar su ile dolu olacağından katı taneler ve sudan oluşan bir yapıyı ifade edebilmek için iki fazlı model tanımlanmıştır (Şekil 3). Tamamen suya doymuş bir sistem göz önüne alındığında, suyun boşluklarda hareketine bağlı olarak taneler arasında temas yüzeyini ve temas kuvvetini azaltacağı daha önce açıklanmıştır. Basınçlı suyun taneler arasındaki boşluklardan hareket ederek dışarı çıkma eğilimini en doğru şekilde ifade edebilmek için iki fazlı modelin kullanımı gerçekleşecek hareketi doğru bir şekilde ifade edebilmek için büyük avantaj sağlamaktadır. Bunun için Taşan (13) tarafından u - p modeli temel alınarak u20p8 olarak adlandırılan

üç boyutlu bir model geliştirilmiştir (Şekil 4). Modelde yer değiştirmeler için yirmi düğüm noktası ve boşluk suyu basınçları için sekiz düğüm noktası kullanılmıştır.



Şekil 3. İki fazlı model (Two phase model) [13]



Şekil 4. 3-B iki fazlı sonlu eleman modeli, u20p8 (3-D coupled two phase element, u20p8) [13]

İki fazlı bir modeli tanımlayan teori başlangıçta Biot (14) tarafından formüle edilmiştir. Daha sonra Zienkewicz [15] tarafından BIOT teorisi kapsamını genişletmek ve sayısal uygulamayı kolaylaştırmak için basitleştirilmiştir.

#### 2.4. Hipoplastik Malzeme Modeli (Hypoplastic Material Model)

Bu çalışmada hipoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Hipoplastik malzeme modeli Kolymbas [16] tarafından geliştirilen ve özellikle granüler zeminlerin sonlu elemanlarla analizinde kullanılan bir modeldir. Gittikçe kullanımı daha fazla tercih edilen bu model daha sonra, Bauer [17], Herle [18], Gudehus [19], Von Wolffersdorff [20] ve Kolymbas vd. [21] gibi farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Bu modelin öne çıkan özelliği, bir durum değişkeni olarak boşluk oranının kullanılmasıdır. Hipoplastik model akma yüzeyi veya plastik potansiyel gibi ek kavramlar kullanmadan anelastik deformasyonu tanımlar [21]. Hipoplastik modelde rijitlik, pik sürtünme açısı, zemin gerilme durumu, genişleme, deformasyon yönü, büzülme temel parametreler ve kavramlardır. Tekrarlı yükler altında

granüler zeminlerin davranışının incelenmesi açısından kullanılan bir modeldir.

Kolymbas [16] tarafından geliştirilen temel hipoplastik model, tekil yükler altında granüler zemin davranışını iyi yansıtır, fakat dinamik yük altında iyi sonuç vermez. Ayrıca bu modelde boşluk miktarı değişiklikleri dikkate alınsa da dinamik yüklemeler altında yüklenme yönünde gerçekleşen değişiklikler sonuçlara çok iyi yansıtılamaz, bazı alanlarda boşluk suyu birikimi ve deformasyon meydana gelir. Bu ve benzeri eksikliklerden dolayı Niemenus ve Herle [22] tarafından geliştirilen genişletilmiş hipoplastik model ile bu sıkıntılar giderilmiştir.

Temel hipoplastik model sekiz parametre kullanılarak tanımlanmaktadır. Granüler zeminlerde en gevşek durumda içsel sürtünme açısının kritik durumunu ifade etmek için  $\phi_c$  parametresi tanımlanmıştır. Tanelerin sıkışabilirliği için tanımlanan  $h_s$  değişkeni tanelerin sertlik, tane çapı dağılımı ve şekline bağlıdır. Oransal sıkışma tanımında üstel bir parametre olan  $n$  parametresi  $h_s$  parametresiyle doğrudan ilişkilidir ve tane çapı dağılımı ile tane büyüklüğüne bağlıdır. Tanımlanan üç sınır boşluk oranı gerilmeye bağlıdır. Bunlardan  $e_{d0}$  minimum boşluk oranını,  $e_{c0}$  kritik boşluk oranını ve  $e_{i0}$  maksimum boşluk oranını temsil eder. Sıklığın pik sürtünme açısı üzerindeki etkisini tanımlayan  $\alpha$ , taneli zeminler için kullanılan üstel bir parametredir. Başka bir üstel parametre olan  $\beta$ , sabit ortalama basınç ve sabit birim deformasyon koşullarında artan sıklığa bağlı olarak artan gerilme oranını ifade eden bir parametredir [22].

Temel hipoplastik modele Niemunis ve Herle [22] tarafından dinamik yüklemeye altındaki malzeme davranışını incelemek için 5 parametre daha eklenmiştir. Eklenen bu parametreler: taneler arası birim deformasyonu ifade eden  $R$ , rijitlik faktörleri  $m_R$  ve  $m_T$ , taneler arası birim deformasyonların gelişiminin etkisini ifade eden  $\beta_r$  ve rijitliğin azalma durumunu ifade eden  $\chi$  üstel parametresidir [23]. Tüm parametrelerin fiziksel anlamı ve elde edilme yöntemleri Çizelge 1'de gösterilmektedir.

#### 2.5. Kozeny-Carman Eşitliği (Kozeny-Carman Equation)

Granüler suya doygun zeminlerin geçirgenliği dinamik yüklemeler altında zemin davranışını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Kozeny-Carman (KC) eşitliği, bu tip zeminlerin geçirgenliğinin tahmin edilebilmesi için geliştirilmiş, yarı-deneysel, yarı-teorik bir formüldür. Modelin teorisi, basitçe, medya özellikleri ve gözenek kanallarındaki akış direnci arasındaki doğrudan ilişkiye dayanmaktadır. KC sabiti aşağıdaki formülle tanımlanabilir:

$$C_{KC} = \frac{k_d \cdot (1+e)}{e^3} \quad (3)$$

$C_{KC}$  = KC sabiti.

$e$  = boşluk oranı

$k_d$  = Permeabilite



**KC** ilişkisi kumlu zeminlerin hidrolik iletkenliğinin değerlendirilmesi için tatmin edici sonuçlar sağlar [24]. Bu eşitliğe göre her yüklemeye değişen zemin boşluk

değerlerine bağlı olarak zemin geçirgenliği de her adımda değişmektedir [25].

**Çizelge 1.** Hipoplastik model parametreleri ve elde edilme yöntemleri (Hypoplastic model parameters and obtaining methods)

Parametre	Fiziksel Anlamı	Yöntem
$\varphi_c$	Kritik içsel sürtünme açısı	Yaslanma açısı deneyi, üç eksenli, direk kesme ve halka kesme deneyleri
$h_s$	Granüle malzeme rijitliği	Konsolidasyon (basınç) deneyi
$n$	Tanelerin basınç değişimine hassasiyetini ifade eden üstel parametre	Konsolidasyon (basınç) deneyi
$e_{d0}, e_{i0}, e_{c0}$	Sıfır basınç altındaki sırasıyla minimum, maksimum ve kritik limit boşluk oranları	İndeks deneyleri
$\alpha$	Pik içsel sürtünme açısı ile rölatif sıklık arasındaki ilişkiyi kontrol eden parametre, genleşmeyi kontrol eder	Üç eksenli deney
$\beta$	Yoğunluk ve rijitlik arasındaki ilişkiyi kontrol eden parametre	Konsolidasyon (basınç) deneyi
$R$	Elastik oranın açısı	Dinamik üç eksenli deney
$m_R$	180°'lik birim deformasyon yönü değişimini ifade eder	Dinamik üç eksenli deney
$m_T$	90°'lik birim deformasyon yönü değişimi sonrası oluşan rijitlik artışını ifade eder	Dinamik kesme deneyi
$\beta_r$	Taneler arası birim deformasyon gelişimini ( $h$ ) kontrol eden parametre	Dinamik üç eksenli deney
$\chi$	Rijitlik azalmasını kontrol eden parametre	Dinamik üç eksenli deney

### 3. SAYISAL ANALİZLER (NUMERICAL ANALYSIS)

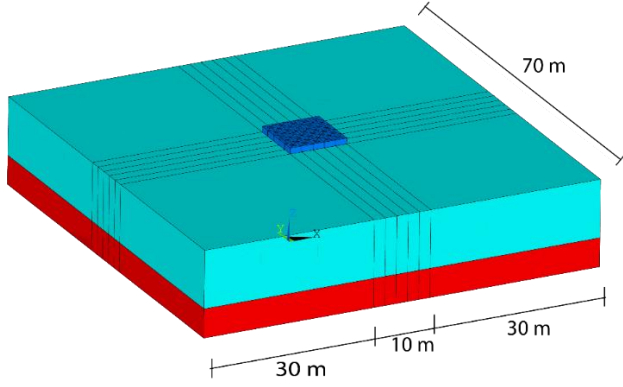
Eğer doymuş bir gevşek kum numunesi dinamik yüklemeye maruz bırakılırsa, drenajın tamamen serbest olması durumunda sıkılaşıma durumu oluşacaktır. Numunenin drenaja kapalı olması durumunda da içerisindeki boşluk suyunun artmasına bağlı olarak zemin efektif stres kaybına uğrayacak ve bazı durumlarda sıvılaşma gerçekleşecektir. Eğer  $r_u = \frac{\Delta p_w}{\sigma'_{v0}} = 1$  olursa,

aşırı boşluk suyu basıncı  $\Delta p_w$  ile efektif stres  $\sigma'_{v0}$  birbirine eşit hale gelmiş demektir. Bu da zeminin efektif stres yönünden yenildiği ve sıvılaşmanın olduğu anlamına gelir. Taş kolonların kumlu zeminlerde kullanımının asıl amacı boşluk suyu basıncının kum zeminden taş kolonlara doğru yönlendirilerek zeminde efektif gerilmenin boşluk suyu basıncına karşı yenilmesini dolayısıyla sıvılaşmanın gerçekleşmesini önlemektir. Bunun yanında taş kolonlar zeminde oturmaların azaltılmasına da büyük katkı sağlamaktadır.

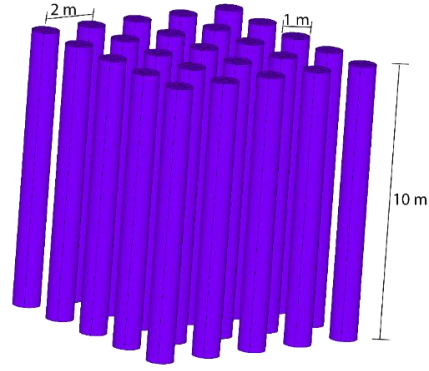
Yapılan sayısal analizlerde taş kolonlu ve taş kolonsuz zeminler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aynı şartlarda dinamik etkiye maruz bırakılmış ve taş kolonların hem sıvılaşma hem de oturmalar açısından zemine olan katkısı incelenmiştir. Analizlerde, sıvılaşmaya müsait olduğu öngörülen bir zemin üzerine 10m x 10m ebatlarında radye temel uygulaması ve üzerine 100 kN'luk bina yükü yüklenmesi planlanmıştır. Modelde yay-sönümleyici kullanıldığı için sınırlarda deprem dalgalarının sönümlenme oranı %98.5 olarak

bulunmuştur [12]. Yansıma yaşanacak olan sınırların analiz sonuçlarının değerlendirildiği taş kolon bölgelerinden uzak tutulması için model kenar uzunlukları 70 m olarak seçilmiştir (Şekil 5). Taş kolonlar sıvılaşabilir zemin ortamında analiz edildiğinden modelde 2 tabakalı zemin uygulanmıştır. Birinci tabakada 10 m derinliğinde sıvılaşmaya müsait gevşek zemin, altındaki ikinci tabakada ise sıvılaşmayacağı öngörülen 5 m derinliğindeki sıkı zemin bulunmaktadır. Taş kolonlar sıvılaşabilir zemin tabakası içerisinde 25 adet 10 m uzunluğunda ve 1 m çapında dairesel olarak modellenmiştir (Şekil 6).

Analizler için ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Zemin için CCORE tarafından yapılmış olan CT4 deneyinde kullanılan zemin parametreleri kullanılmıştır. Bu deneyin sayısal doğrulaması bu çalışmada anlatılan malzeme modeline göre Sarımurat vd. [4] tarafından yapılmıştır. Fraser Nehri kumunun zemin özellikleri Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir. Kolon malzemesi için Hochstetten çakılının hipoplastik parametreleri kullanılmıştır. Hochstetten çakılının hipoplastik parametreleri Çizelge 4'te verilmiştir. Analizlerde iki fazlı u20p8 elemanı kullanılmıştır. Tüm model suya doygundur.



Şekil 5. Model ölçüleri (Model dimensions)



Şekil 6. Modeldeki taş kolonlar (Stone columns in the model)

Çizelge 2. Malzeme parametreleri (Material parameters) [26]

Parametreler	Sıkı Fraser Nehri Kumu	Gevşek Fraser Nehri Kumu	Drenaj Malzemesi
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	27.10	27.10	26.70
$e_{max}$	1.00	1.00	0.81
$e_{min}$	0.68	0.68	0.62
$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	78300	45000	45000
$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	203580	117000	117000
$\mu$	0.30	0.30	117000
$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.00	0.00	117000
$k$ (m/s)	$6.2 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	117000
$n$	0.406	0.448	117000
$D_r$	0.80	0.40	117000
$C$ (m/s)	$3.27 \cdot 10^{-3}$	$2.84 \cdot 10^{-3}$	117000

Çizelge 3. Fraser Nehri kumu için Hipoplastik malzeme özellikleri (Hypoplastic material parameters for Fraser River sand) [27]

$\varphi_c$ (°)	hs(MPa)	n	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$
35	1600	0.39	0.62	0.94	1.08	0.2	1
	R	$m_R$	$m_r$	$\beta_r$	$\chi$		
	$1 \cdot 10^{-4}$	2.5	9	0.25	9		

Çizelge 4. Hochstetten çakılı için Hipoplastik malzeme özellikleri (Hypoplastic material parameters for Hochstetten gravel) [6]

$\varphi_c$ (°)	hs(MPa)	n	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$
36	32000	0.18	0.26	0.45	0.5	0.1	1.9
	R	$m_R$	$m_r$	$\beta_r$	$\chi$		
	$1 \cdot 10^{-4}$	5	2	0.5	6		

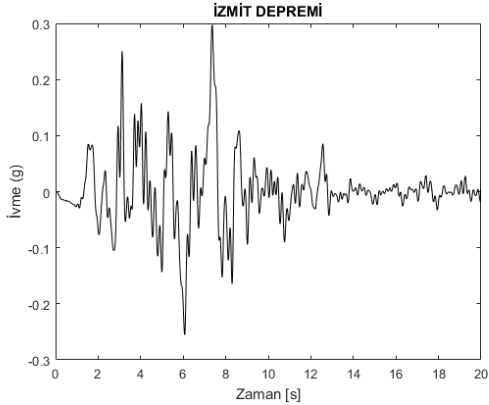
Dinamik yükleme esnasında suyun drene edilebilmesi için drenaja açık olan model üstü hariç tüm kenarlar drenaja kapalıdır. Model oluşturulduktan sonra yapılan analizlerde ilk önce zeminin kendi ağırlığı altındaki, ardından da bina yükü yüklendikten sonraki statik çözümleri gerçekleştirilmiş, ardından deprem yükü uygulanarak dinamik çözüm yapılmıştır. Bina yüklemesi altında yapılan çözümlerde ise yine kendi ağırlığı

altındaki çözümün ardından bina yükü yüklenerek ikinci kez statik çözüm yapılmış ve bina yüklemesi bittikten sonra deprem yükü uygulanarak dinamik yükleme adımına geçilmiştir.

Türkiye, dünyanın büyük deprem bölgelerinden birinde yer almaktadır. Özellikle ülkenin kuzeybatısında yer alan, yoğun nüfuslu ve en büyük sanayi alanlarına sahip olan Marmara bölgesi yıkıcı depremlere maruz



kalmaktadır. 17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri son zamanlardaki yıkıcı depremlere örnektir. Özellikle 17 Ağustos 1999 İzmit depremi Marmara bölgesinin büyük bir bölümünü etkilemiştir [28]. Bu çalışmada İzmit depreminin SKR(Sakarya) istasyonu verileri kullanılmıştır. SKR istasyonu verilerinin modelde kullanılan zemin özelliklerine göre dekonvolüsyon işlemleri yapılarak elde edilen mühendislik ana kayası verileri Şekil 7’de gösterilmektedir. Bu değerler kullanılarak modelin taş kolonsuz ve taş kolonlu durumları için çeşitli analizler yapılmıştır.



Şekil 7. İzmit Depremi (SKR İstasyonu) filtrelenmiş ivme-zaman verileri (İzmit Earthquake (SKR Station) filtered acceleration-time data)

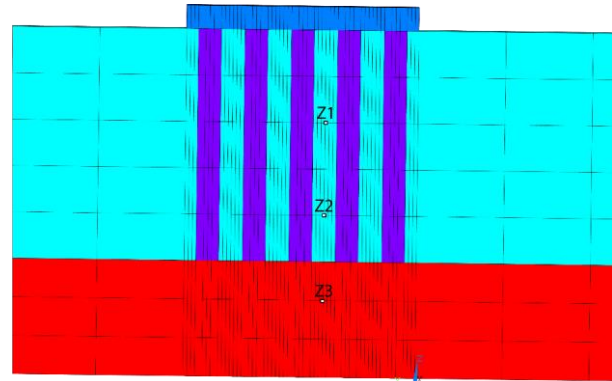
Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar şekillerle gösterilmiştir. Sonuçlar, taş kolonların etki çapının en düşük olduğu iki kolon arası mesafenin ortasından alınmıştır. Böylece analiz sonuçlarının en kritik durumlar için değerlendirilebilmesi sağlanmıştır. Farklı derinliklerdeki boşluk suyu basınçlarının gelişiminin gözlenebilmesi için 3 farklı derinlik seçilmiştir. Şekildeki Z1, Z2 ve Z3 noktaları sırasıyla 4 m, 8 m ve 11.7 m derinliklerindedir (Şekil 8). Taş kolon altındaki zeminde sıvılaşma oluşup oluşmadığının da görülebilmesi için taş kolonlu modellerde alttaki sıvılaşma öngörülme zeminden elde edilen sonuçlar da karşılaştırılmıştır.

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE RESULTS)

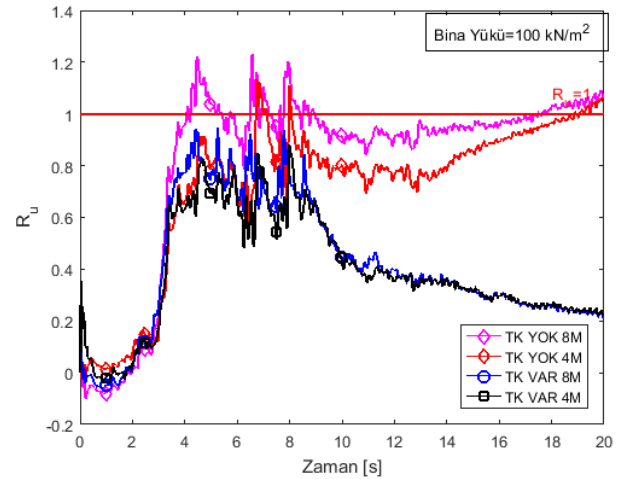
##### 4.1. Boşluk Suyu Basıncı Karşılaştırmaları (Pore Water Pressure Comparisons)

Gevşek kumlu zeminler, uygulanan yük altında sıkışma eğilimindedir. Eğer yük uygulanan kumlu zemin suya doygunsa, drenajsız durumda dinamik yükleme altındaki ilk tepkisi boşluk suyu basıncının hızlı bir şekilde artması olacaktır. Dinamik yükleme altında oluşan bu boşluk suyu basıncının miktarı ve hızı zeminin geçirgenlik, sıklık vb. gibi fiziksel özellikleri ile drenaj yolunun uzunluğuna bağlıdır. Şekil 9’daki sonuçlardan da görüleceği gibi modelde oluşturulan taş kolonların varlığı hem geçirgenlik etkisi sebebiyle hem de zeminde drenaj yolunun yatay yönden daha etkili olan düşey yöne çevrilerek drenaj yolu uzunluğunun düşürülmesi

sebebiyle boşluk suyu basıncı oranında ciddi bir azalma olmasına sebebiyet vermiştir.

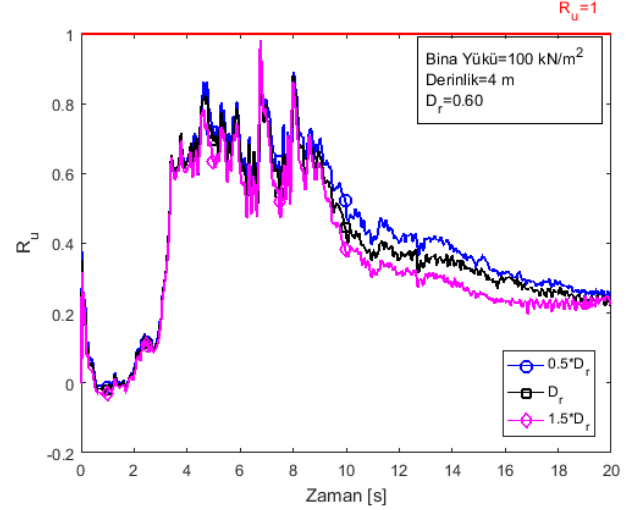
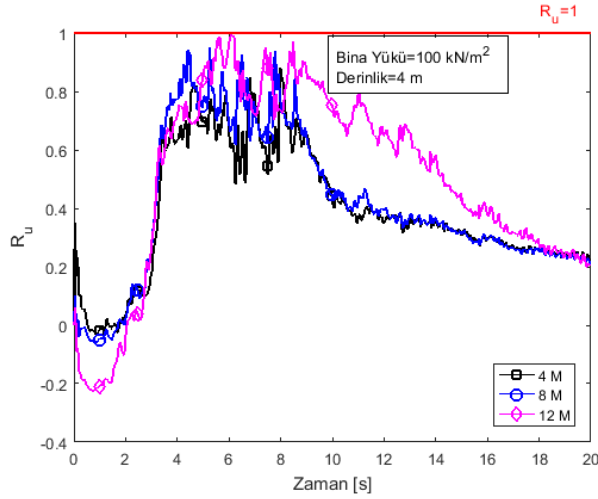


Şekil 8. Analiz sonuçlarının değerlendirildiği noktalar (Points where analysis results are evaluated)

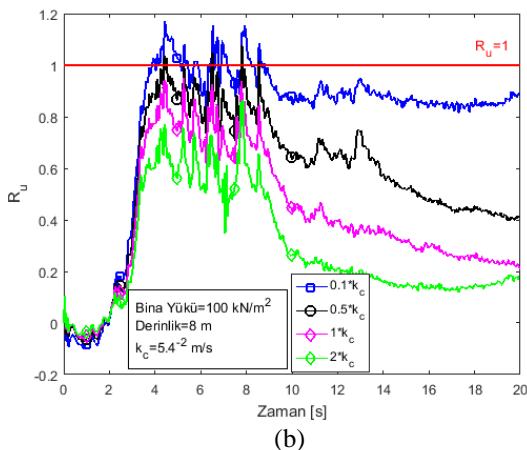
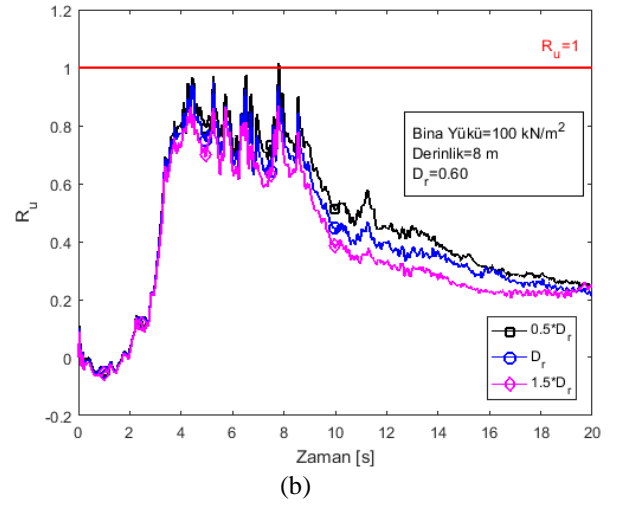
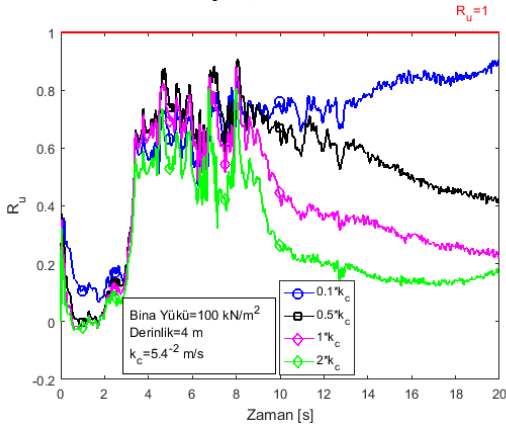


Şekil 9. Taş kolonlu ve taş kolonsuz modellerde boşluk suyu basıncının ( $R_u$ ) zamana bağlı değişimi (Time dependent variation of pore water pressure ( $R_u$ ) for soil model with and without stone columns)

Taş kolonlu modelde boşluk suyu basıncının sönümlendiği görülürken taş kolonsuz modelde giderek artan boşluk suyu basıncı nedeniyle zemin sıvılaşmıştır. Bu sonuçlar sıvılaşabilir zeminlerde taş kolonlarla yapılan iyileştirmelerin olumlu etkisinin görülebilmesi için önemlidir. Şekil 10’da gösterilen bu etkinin zeminin alt tarafından yukarıya doğru çıkıldıkça nispeten artması düşey drenaj yolunun alt taraftan yukarıya çıkıldıkça azalması olarak açıklanabilir. Aynı şekilde taş kolon uygulamasının sonlandırıldığı 10 m derinliğin altındaki zeminde de sıvılaşma gerçekleşmediği görülmektedir.



Şekil 10. Taş kolonlu modelde boşluk suyu basıncının ( $R_u$ ) farklı derinliklerde zamana bağlı değişimi (Time dependent variation of pore water pressure ( $R_u$ ) for soil model with and without stone columns at different depths)



Şekil 11. Z1 (a) ve Z2 (b) noktalarındaki boşluk suyu basıncının ( $R_u$ ) farklı kolon geçirgenliklerinde zamana bağlı değişimi (Time dependent variation of pore water pressure ( $R_u$ ) in different column permeabilities at points Z1 (a) and Z2 (b))

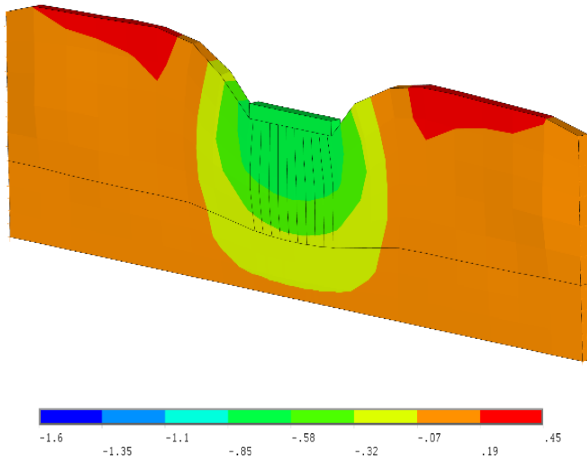
Şekil 12. Z1 (a) ve Z2 (b) noktalarındaki boşluk suyu basıncının ( $R_u$ ) farklı rölatif sıklıktaki ( $D_r$ ) taş kolon elemanları için zamana bağlı değişimi (Time-dependent variation of pore water pressure ( $R_u$ ) at points Z1 (a) and Z2 (b) for different relative densities ( $D_r$ ) of stone column elements)

Geçirgenlik ve sıklık özelliklerinin taş kolon performansını nasıl etkilediğinin görülebilmesi için, önce taş kolon malzemesi olarak seçilen Hochstetten çakılının literatürde verilmiş olan permeabilite değeri daha sonra da rölatif sıklık değeri değiştirilerek parametrik analizler yapılmıştır. Şekil 11'deki sonuçlardan görüldüğü gibi taş kolon permeabilite değerlerinde yapılacak değişiklikler taş kolon performansını önemli bir şekilde etkilemektedir. Taş kolon imalatları her ne kadar drenaj yolunun kılmasını sağlasa da geçirgenliği düşük drenaj yolları içerisindeki suyun hareketi yavaş olacağından dolayı zemindeki suyun taş kolonlara doğru hareketini de yavaşlatmaktadır. Bu nedenle kısa bir süre içinde, örneğin dinamik yükleme büyüklüğünün ani artışı sırasında, neredeyse hiç su hareketi ve dolayısıyla drenaj olmayacaktır. Böylece taş kolonlarla sıvılaşmaya karşı iyileştirilmiş bir zemin, yüksek geçirgenlikteki taş

kolonlar kullanılırsa sıvılaşmayacakken düşük geçirgenlikteki taş kolonlarla sıvılaşabilecektir. Şekil 11 (b)'deki sonuçlarda da görüldüğü gibi taş kolonların varlığı bunu engelleyememiştir. Elde edilen sonuçlardan, taş kolon imalatında geçirgenliği yüksek malzemelerin seçilmesinin sıvılaşmaya karşı taş kolon performanslarında ne kadar büyük bir öneme sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 12'de farklı rölatif sıklık değerlerinde aynı özelliklerde taş kolon kullanılması durumunda gerçekleşen boşluk suyu basınçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan taş kolonların rölatif sıklığı arttıkça yine sıvılaşmaya karşı daha iyi performanslar gösterdiği görülmektedir. Bu analizler yapılırken taş kolon ve zeminin bahsedilen özellikleri dışında tüm özelliklerinin aynı olduğunu belirtmekte fayda vardır.

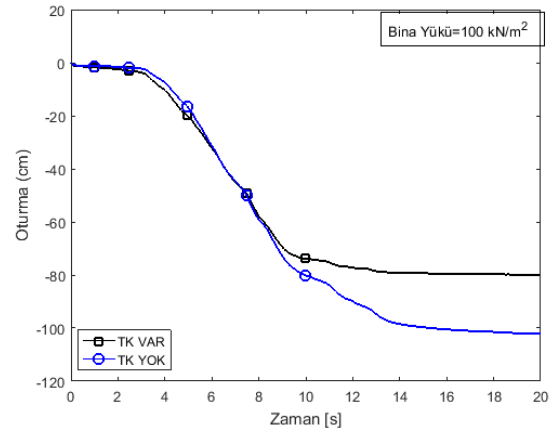
#### 4.2. Oturma Karşılaştırmaları (Settlement Comparisons)

Dinamik yükleme sonrası oturmalar boşluk suyu basıncının artmasının sonuçlarından biridir. Hareket esnasında doygun kum zeminin boşluklarının azalması dolayısıyla daha yoğun hale gelmesi, hareket sonrasında ise boşluk suyu basıncının dağılması sonucu konsolidasyon gerçekleşmesi nedeniyle zeminde oturma gerçekleşir (Şekil 13).

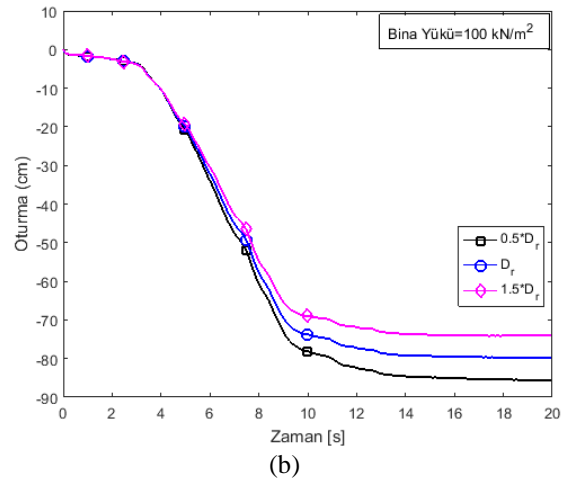
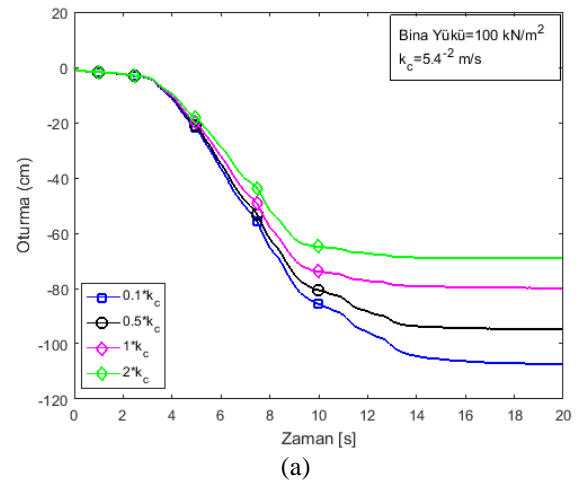


Şekil 13. Taş kolonlu model orta kesitinin toplam oturma değerleri (Total settlement values for the middle of stone column model)

Şekil 14'te oturma zamanına bağlı oluşumu görülmektedir. Sıvılaşabilir zeminde meydana gelen oturma 102 cm kadar gerçekleşmiştir. Sıvılaşabilir zeminin %40 sıklıkta gevşek kumlu zemin olması, uygulanan yükün 100 kN gibi yüksek bir değer seçilmesi ve kullanılan hipoplastik malzeme modelinin uygulanan dinamik yüklemeler altında zemindeki boşluk oranı değişimini gerçekçi bir şekilde yansıtmasının bir sonucu olarak oturmalar yüksek çıkmıştır. Örnek olarak 1999



Şekil 14. Taş kolonlu ve taş kolonsuz modellerde oturma zamanına bağlı değişimi (Time-dependent change of settlement for the models with and without stone columns)



Şekil 15. Taş kolonlu modelde oturmaların, farklı kolon geçirgenliklerinde (a) ve farklı rölatif sıklıktaki ( $D_r$ ) (b) taş kolon elemanları için, zamana bağlı değişimi (Time-dependent variation of settlements in stone column model for (a) different column permeabilities and (b) different relative densities of stone column elements)

İzmit depreminde Sakarya bölgesinde yoğun zemin sıvılaşmaları gözlenmiş ve bu sıvılaşmalara bağlı olarak da 0-150 cm arasında değişen sıvılaşma oturumları gözlenmiştir [29]. Taş kolonla iyileştirilmiş modelde oturumlar 79 cm civarında gerçekleşmiştir. Sonuçlarda taş kolonlu zeminle taş kolonsuz zemin arasında oturma oranları bakımından yaklaşık %28 civarında iyileşme görülmektedir.

Taş kolonlu modellerde farklı geçirgenlik değerleri için oturma değişimleri göz önüne alındığında, taş kolon geçirgenliğinin artmasının oturumların daha az oluşmasını sağladığı görülmektedir (Şekil 15a). Aynı şekilde yüksek rölatif sıklığın ( $D_r$ ), düşük boşluk hacmi demek olduğu düşünüldüğünde, beklenildiği gibi oturumlarda azalmaya sebep olduğu görülmektedir (Şekil 15b).

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma kapsamında sıvılaşabilir suya doygun kumlu zeminlerdeki bir iyileştirme yöntemi olarak taş kolonların kullanımının sayısal analizlerle incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Taş kolonlu zeminlerde boşluk suyu basıncı artışlarının taş kolonsuz zeminlere göre daha fazla olduğu ve sıvılaşmayı önlediği gözlemlenmiştir.
- Aynı koşullarda taş kolonlu zeminlerdeki oturma miktarları taş kolonsuz zeminlere göre % 28 daha az çıkmıştır.
- Taş kolonların geçirgenliklerindeki artış hem boşluk suyu basınçları açısından hem de oturumlar açısından taş kolonların performansını önemli ölçüde etkilemektedir.
- Taş kolonların rölatif sıklıkları artırdıkça performanslarında da artış gözlenmiştir.
- Sıvılaşma için yapılacak ileriki çalışmalarda Hipoplastik Bünye modeli, iki fazlı eleman u20p8 ve Kozeny-Carman eşitliğinin birlikte kullanılmasının yüksek derecede doğruluk sağlayacağı söylenebilir.

Taş kolon imalatlarında genellikle doğal veya kırma taş malzemeler kullanılmaktadır. Fakat uygulama için sahada bulunabilecek malzemelere göre tasarımlar yapılabildiği bilinmektedir. İlerleyen çalışmalarda doğaya atıl olarak bırakılmış olan malzemelerin kullanılabilmesi için çalışmalar yapıp çelik cürufu gibi granüler malzemelerin taş kolonlarda kullanımının yolu açılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ateş A., “Gölyaka (Düzce) imara esas yerleşim alanındaki zeminlerin SPT ve sismik hız verileriyle sıvılaşma riskinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 20: 753-763, (2017).
- [2] Arman H., Fırat S., Vural I. ve Gündüz Z., “Soil and foundation stability improvement by stone column: A case study in Adapazari city, Turkey”, *Scientific Research and Essay – Academic Journals*, 4: 972 – 983, (2009).
- [3] Adalier K., Elgamal A., Meneses J. ve Baez I.J., “Stone columns as liquefaction counter-measure in non-plastic silty soils”, *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23: 571-584, (2003).
- [4] Sarımurat S., Fırat S, Işık N. S. ve Taşan H. E., “Bir santrifüj testinin hipoplastik model kullanılarak sayısal analizi”, *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, 3: 79-86, (2019).
- [5] ANSYS INC., “Programmer’s manual for ANSYS”, Release 18.0., (2016).
- [6] Hleibieh J. ve Herle I., “The performance of a hypoplastic constitutive model in predictions of centrifuge experiments under earthquake conditions”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122: 310–317, (2019).
- [7] Meshkinghalam H., Hajjalilue-Bonab M. ve Azar A. K., “Numerical investigation of stone columns system for liquefaction and settlement diminution potential”, *International Journal of Geo-Engineering*, 8: 1-24, (2017).
- [8] Badanagki M., Dashti S., Paramasivam B. ve Tiznado J.C., “How do granular columns affect the seismic performance of non-uniform liquefiable sites and their overlying structures?”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125:42-60, (2019).
- [9] Karadağ H., Fırat S. ve Işık N., “Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması”, *Politeknik Dergisi*, 23: 799-812, (2020).
- [10] Shen Y. ve Giurgiutiu V., “Effective non-reflective boundary for Lamb waves: theory, finite element implementation, and applications”, *Wave Motion*, 58: 22-41, (2015).
- [11] Jingbo L., Yixin D., Xiuli D., Zhengyu W. ve Jun W., “3D viscous-spring artificial boundary in time domain”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 5: 93–102, (2006).
- [12] Lysmer J. ve Kuhlemeyer R., “Finite dynamic model for infinite media”, *J. Eng. Mech. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 4: 859–877, (1969).
- [13] Tasan H.E., “Zur dimensionierung der monopile-gründungen von offshore-windenergieanlagen”, *Doktora Tezi*, Faculty VI: Planning-Building-Environment, Technical University of Berlin, (2011).

- [14] Biot M.A., "General theory of three-dimensional consolidation", *Journal of Applied Physics*, 12: 155-164, (1941).
- [15] Zienkiewicz O.C., "Constitutive laws and numerical analysis for soil foundations under static, transient or cyclic loads", *Appl. Ocean Res.*, 2: 23-31, (1980).
- [16] Kolymbas D., "A generalized hypoplastic constitutive law", *Proceedings of the 11th International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering*, San Francisco, 5: 2626, (1993).
- [17] Bauer E., "Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials", *Soils and Foundations*, 36: 13-26, (1996).
- [18] Herle I., "Hypoplastizität und granulometrie einfacher korngerüste", *Doktora Tezi*, Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, (1997).
- [19] Gudehus G., "A comprehensive constitutive equation for granular materials", *Soils and Foundations*, 36: 1-12, (1996).
- [20] Wolffersdorff, P-A. von, "A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface", *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1: 251-271. (1996).
- [21] Kolymbas D., Herle I. ve Wolffersdorf P. von, "Hypoplastic constitutive equation with internal variables", *Int. J. for Numer. and Anal. Methods in Geomechanics*, 19: 415-436, (1995).
- [22] Niemenus A. ve Herle I., "Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range", *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 2: 279-299, (1997).
- [23] Taşan H.E., Rackwitz F. ve Savidis S., "Behaviour of cyclic laterally loaded large diameter monopiles in saturated sand", *7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE*, Trondheim, 7: 889-894, (2010).
- [24] Di Y. ve Sato T., "Liquefaction analysis of saturated soils taking into account variation in porosity and permeability with large deformation", *Computers and Geotechnics*, 30: 623-635. (2003).
- [25] Carrier W.D., "Goodbye, Hazen; hello, Kozeny-Carman", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129: 1054- 1056, (2003).
- [26] Mahrabadi J.A. ve Popescu R., "Solutions for mitigating soil liquefaction effects: a numerical study", *13th World Conf. on Earthq. Engr.*, on CD-ROM, (2004)
- [27] Holler,S., "Dynamisches mehrphasenmodell mit hypoplastischer materialformulierung der feststoffphase", *Promotionsschrift, Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Baustatik und Baudynamik der RWTH Aachen*, 06: 2, (2006).
- [28] Fırat S., Işık N.S., Arman H., Demir M. ve Vural I., "Investigation of the soil amplification factor in the Adapazarı region", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75: 141-152, (2016).
- [29] Fırat S., Arman H. ve Kutanis M., "Assessment of liquefaction susceptibility of Adapazarı City after 17th August, 1999 Marmara earthquake", *Scientific Research and Essay*, 4: 1012-1023, (2009).