

## JET GROUT KOLONLARI İLE İYİLEŞTİRİLEN ZEMİNLERİN HOMOJENLEŞTİRME YÖNTEMİYLE SAYISAL ANALİZİ

C. Caner KÜSİN, Abdulazim YILDIZ ve Murat ÖRNEK  
Ç.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana / Türkiye

**ÖZET :** Genellikle jet grout kolonlarının analizleri tek bir kolon dikkate alınarak ve klasik kazık taşıma gücü formülleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu durum, güvenlik faktörlerinin yüksek tutulmasına ve ekonomik olmayan bir tasarıma neden olmaktadır. Bu çalışmada, çimento katkılı kolonlar ile iyileştirilmiş zeminler üzerinde homojenleştirme yöntemi kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde göçme yükü değerleri deneyden elde edilen göçme yüküne çok yakın hesaplanmasına rağmen deformasyonlar açısından sonuçlar arasında farklılık görülmüştür.

### NUMERICAL ANALYSES OF SOILS IMPROVED BY JET GROUTING COLUMNS USING HOMOGENIZATION METHOD

**ABSTRACT :** Jet grout columns are generally analysed using pile load bearing formulations. Such calculations are performed for a single column and the soil-structure behaviour cannot be studied in detail. Consecutively, factor of safety is high and thus, the solutions are not economically feasible. In this study, numerical analyses were performed using homogenization method on jet grouted columns. Numerical results were compared with test results. Ultimate bearing capacity values obtained in numerical analyses were agreed well with test results while differences were obtained in deformation values.

## 1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde jet grout yöntemi ile zeminlerin iyileştirilmesi günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Jet grout yöntemi ilk olarak 70'li yılların başında Japonya'da denenmiş ve daha sonraki yıllarda ise tüm dünya ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizdeki ilk uygulaması 1986 yılında Haliç Kolektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında yapılmıştır. Bu yöntemde amaç, zeminin mekanik mukavemet değerlerini arttırmaktır. Bu yöntemin uygulandığı zeminin taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artar, geçirgenliği azalır [1-8]. Jet grout yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi değişik karakterdeki çok geniş ve farklı türdeki zeminlerin ıslahı mümkün olmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajları; istenilen çap ve boyda ve istenilen mukavemette kolonlar imal edilebilmesi, uygulamadan önce gerekli malzeme miktarı, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi, geçirgenlik gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla işin başında maliyetin belirlenmesi olarak sayılabilir.

Genellikle jet grout kolonlarının analizleri tek bir jet kolon ve onun etki bölgesi dikkate alınarak klasik kazık taşıma gücü formülleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu durum, güvenlik faktörlerinin yüksek tutulmasına ve ekonomik olmayan bir tasarıma neden olmaktadır. Son yıllarda geoteknik mühendisliğinde bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sonlu elemanlar yöntemine (SEY) dayalı sayısal modellemeler oldukça önem kazanmıştır. Genellikle jet grout kolonlarının dayanma yapısı olarak kullanıldığı problemlerin analizlerinde sonlu elemanlar yönteminin yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir [9-13]. Jet grout kolonları, klasik kazık veya kazıklı radye temellere alternatif olarak temel mühendisliğinde de ekonomik bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Fakat, temel altına çok sayıda jet grout kolonları inşa edildiği için sayısal olarak SEY ile modellenmesi çok zordur. Tüm jet kolonların arazi şartlarındaki gibi tanımlandığı üç boyutlu modellemeler ise oldukça karmaşık ve pratik değildir. Son yıllarda, bu tür problemlerin SEY ile analiz edilebilmesi için farklı sayısal yöntemler önerilmektedir [14-17]. Bu çalışmada, Omine vd. tarafından geliştirilen homojenleştirme yöntemi araştırılmış ve jet grout kolonların sayısal analizlerde kullanımı irdelenmiştir [10]. Sayısal analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayanan iki boyutlu PLAXIS yazılımı kullanılmıştır [18].

## 2. HOMOJENLEŞTİRME YÖNTEMİ

Omine vd. tarafından iki fazlı karışımlar için homojenleştirme yöntemi önerilmiştir [10]. Bu yöntemde, karışımlar matriks ve katkı olarak iki farklı malzemedan oluşmaktadır. İki fazlı karışımların gerilme-deformasyon ilişkisi karışımdaki gerilme dağılımı esas alınarak araştırılmıştır. İlk olarak karışımdaki ortalama gerilme  $\bar{\sigma}$  ve ortalama deformasyon  $\bar{\epsilon}$  için aşağıdaki bağıntılar tanımlanmıştır.

$$\bar{\sigma} = f_s \bar{\sigma}_s + (1 - f_s) \bar{\sigma}^* \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon} = f_s \bar{\epsilon}_s + (1 - f_s) \bar{\epsilon}^* \quad (2)$$

Burada,  $f_s$  karışım içerisinde katkının hacimsel oranını, alt indis "s" ve üst indis "\*" ise, sırasıyla ortalama katkı ve matriksi göstermektedir. Katkının ve matriksin gerilme-deformasyon ilişkisi ise,

$$\bar{\varepsilon}_s = C_s \bar{\sigma}_s \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon}^* = C^* \bar{\sigma}^* \quad (4)$$

Burada,  $C_s$  ve  $C^*$  sırasıyla katkı ve matrisin uygunluk matrisleridir. Karışımdaki gerilme dağılımını hesaplamak için katkı ve matris gerilmeleri arasındaki aşağıdaki ilişki kullanılır:

$$\bar{\sigma}_s = b \bar{\sigma}^* \quad (5)$$

Buradaki  $b$  parametresi gerilme dağılım tensörüdür ve katkının geometrik şekline bağlıdır. Eğer  $b$  parametresi bilinirse karışımdaki gerilme-deformasyon ilişkisi Eşitlik 1 ve Eşitlik 5 kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir

$$\bar{\varepsilon} = \left\{ f_s C_s b + (1-f_s) C^* \right\} \left\{ f_s b + (1-f_s) I \right\}^{-1} \bar{\sigma} \quad (6)$$

Bu bağıntıdaki  $I$  birim tensördür. Farklı karışımlarda gerilme dağıtım parametresinin belirlenmesi için gerilme dağıtım parametresi ile Eshelby tensörü arasındaki ilişki Omine vd. [10] tarafından Şekil 1'de tanımlanmıştır. Tabakalı veya küresel katkılı karışımlar için gerilme dağıtım parametresi; katkı ve matrisin elastisite modülleri oranının  $(E_s / E^*)$  kuvvet fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Sayısal analiz sonuçlarından kazık şeklindeki katkılar için  $n$  değerinin 1/3 ile 1/6 aralığında olduğu bulunmuştur [19, 20].

Karışım tipi	Yatay tabakalı karışım	Küresel katkılı karışım	Kazık şeklinde katkı içermesi	Düsey tabakalı karışım
Yapılan kabul	Sabit gerilme	Sabit deformasyon enerjisi	Nümerik analize dayalı yaklaşım	Sabit deformasyon
Gerilme dağıtım parametresi $b$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^0 = 1$ $n=0$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{2}}$ $n=1/2$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}}$ $n=1/3-1/6$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^1$ $n=1$
Eshelby's tensörü $S_{ij}$	1	7/15 ~ 9/15 $\nu^*=0-0.5$	5/8 ~ 3/4 $\nu^*=0-0.5$	0
$1-S_{ij}$	0	Yaklaşık 1/2	3/8 ~ 1/4	1

Şekil 1. Farklı Geometriler için Gerilme Dağıtım Parametreleri [10]

Yukarıda temel bağıntıları verilen homojenleştirme yöntemi, kazık şeklindeki katkılar ile iyileştirilmiş zemin kütesine uygulanmıştır (Şekil 3). Kazık şeklindeki katkılar için Eshelby Tensörü ve  $n$  parametresi aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmaktadır.

$$S_{iiii} = \frac{5-4\nu^*}{8(1-\nu^*)} \quad (7)$$

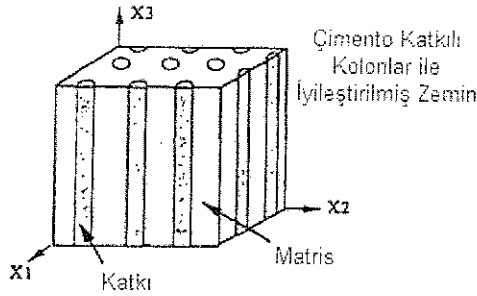
$S_{iiii}$  : Eshelby Tensörü  
 $\nu^*$  : Matriks'in Poisson oranı

$$n = 1 - S_{iiii} \quad (8)$$

Gerilme dağıtım parametresi ise aşağıdaki bağıntı ile elde edilmektedir.

$$b = \left( \frac{E^*}{E_s} \right)^{-n} = \left( \frac{E^*}{E_s} \right)^{-1-S_{iiii}} \quad (9)$$

$b$  : Gerilme dağıtım parametresi  
 $E^*$  : Matriksin elastisite modülü  
 $E_s$  : Katkının elastisite modülü



Şekil 3. Kazık Şeklinde Kolonlar ile İyileştirilmiş Zemin Kütesi

Homojenleştirme yöntemi ile elde edilen kompozit malzemenin ortalama elastisite modülü, Poisson oranı ve kayma modülü için aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

$$E_1 = \frac{(b_1 - 1) f_1 + 1}{\frac{f_1 b_1}{E_1} - \frac{(1-f_1)}{E^*}} \quad (10)$$

$$\nu_0 = \frac{f_1 b_1 \frac{\nu_1}{E_1} - (1-f_1) \frac{\nu^*}{E^*}}{\frac{f_1 b_1}{E_1} - \frac{(1-f_1)}{E^*}} \quad (11)$$

$$G_1 = \frac{(b_0 - 1) f_1 - 1}{\frac{f_1 b_0}{G_1} - \frac{(1-f_1)}{G^*}} \quad (12)$$

*JET GROUT KOLONLARI İLE İYİLEŞTİRİLEN ZEMİNLERİN  
HOMOJENLEŞTİRME YÖNTEMİYLE SAYISAL ANALİZİ*

- $f_s$  : Katkının hacimsel oranı  
 $E_i$  : Homojenleştirilmiş malzemenin elastisite modülü  
 $\nu_{ij}$  : Homojenleştirilmiş malzemenin Poisson oranı  
 $\nu_s$  : Katkının Poisson oranı  
 $\nu^*$  : Matriksin Poisson oranı  
 $G_{ij}$  : Homojenleştirilmiş malzemenin kayma modülü  
 $G_s$  : Katkının kayma modülü  
 $G^*$  : Matriksin kayma modülü

Gerilme dağıtım parametresi,

$$b_{ij} = \left( \frac{E_i}{E^*} \right)^{1 - S_{ij}} \quad (13)$$

$$b_{ij} = \left( \frac{G_i}{G^*} \right)^{1 - S_{ij}} \quad (14)$$

Kazık şeklinde katkıları içeren karışımlar için Eshelby tensörleri;  $S_{1111} = S_{2222} = 3/4$ ,  $S_{3333} = 0$ ,  $S_{1212} = S_{1313} = S_{2323} = 1/4$  olarak alınmaktadır. Homojenleştirme yönteminde doğal ve iyileştirilen zeminin lineer elastik-tam plastik malzeme olduğu kabul edilmiştir (Şekil 4). Doğal ve çimento katkılı zeminin drenajsız koşullarda kayma mukavemeti açısı sıfır olduğu için akma gerilmeleri aşağıdaki bağıntılar ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_{yz} = 2 c_{uz} \quad (15)$$

$$\sigma^* = 2 c^* \quad (16)$$

$c_{uz}$  ve  $c^*$  sırasıyla, çimento katkılı ve doğal zeminin kohezyonudur. Yük etkisinde öncelikle doğal zeminin yenildiği kabul edilir. Bu durumda, doğal zeminin ortalama akma gerilmesi aşağıda gösterilmektedir.

$$\sigma_{y11}^* = \sigma_y^* = 2 c_u^* \quad (17)$$

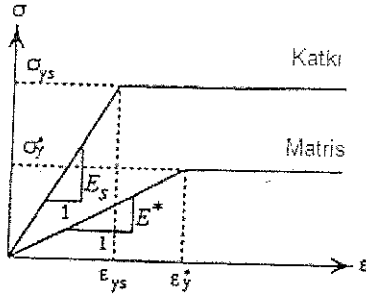
Doğal zeminin akma noktasında ulaştığı anda çimento katkılı zeminin ortalama akma gerilmesi ise, gerilme dağıtım tensörü  $b_{ij}$  kullanılarak aşağıda bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{y11} = b_{ij} \sigma_{y11}^* = 2 b_{ij} c_u^* \quad (18)$$

Sonuç olarak, iyileştirilen zeminin akma gerilmesi çimento katkılı ve doğal zeminin ortalama gerilemeleridir (Eşitlik 17 ve 18). Bu durumda, iyileştirilen zeminin yatay ve düşey doğrultudaki akma gerilmeleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$\sigma_{yz} = 2 (f_1 b_{ij} - 1 - f_2) c_{uz} \quad (19)$$

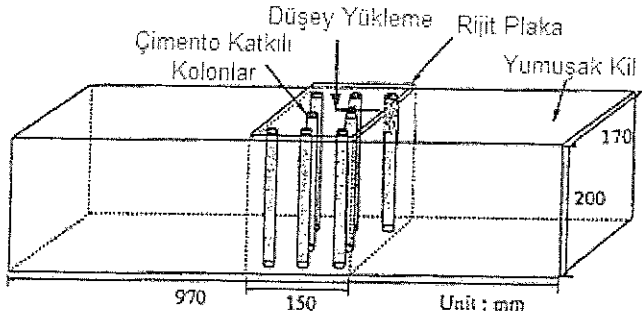
$$\sigma_{yz} = 2 \{ f_1 - (1 - f_2) b_{ij} \} c_{uz} \quad (20)$$



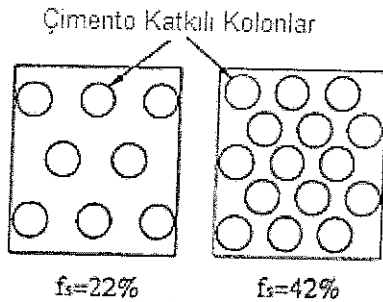
Şekil 4. Katkı ve Matris Gerilme - Deformasyon Eğrileri [10]

### 3. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada, Omine vd. tarafından önerilen homojenleştirme yöntemi çimento katkılı kazıklar ile iyileştirilen zeminlerin analizinde uygulanmıştır [10]. Bu amaçla, Şekil 5'te genel görüntüsü ve kolon yerleşim düzeni verilen model deneyler Omine vd. tarafından önerilen homojenleştirme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [10]. Çimento katkılı kazıklar; kaolin kili bulamacı ve portland çimentosu karışımından elde edilmiş olup, çapları 30mm ve yükseklikleri ise 200mm'dir. Deneylerde kullanılan malzeme ile ilgili veriler Tablo 1'de sunulmaktadır. Analizlerde, Şekil 6'da görülen iki farklı kolon yerleşim düzeni dikkate alınmıştır ( $f_s = \%22$  ve  $\%42$ ).



Şekil 5. Deney Düzenegi [10]



Şekil 6. Deney Düzeneginde Kolonların Yerleşimi

**Tablo 1.** Model Deney Verileri [10]

	Çimento İçeriği [kg/m <sup>3</sup> ]	Kolon Sayısı	İyileştirme Oranı f <sub>s</sub> [%]
Örnek 1	90	8	22
Örnek 2	90	15	42

Sayısal analizlerde Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmış ve ilgili malzeme parametreleri, Tablo 2 ve Tablo 3’de verilmektedir.

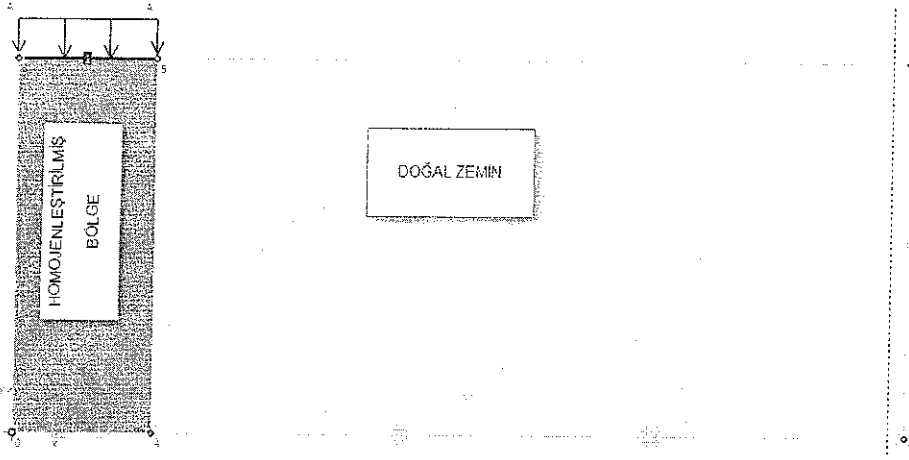
**Tablo 2.** Katkı ve Matriks Parametreleri

	Elastik Modülü [kPa]		Poisson Oranı [-]		Kohezyon [kPa]	
	E <sub>s</sub>	E*	v <sub>s</sub>	v*	c <sub>us</sub>	c <sub>u</sub> *
	Uygulama 1	17262	4171	0,4	0,49	29,96
Uygulama 2	17262	4171	0,4	0,49	29,96	2,66

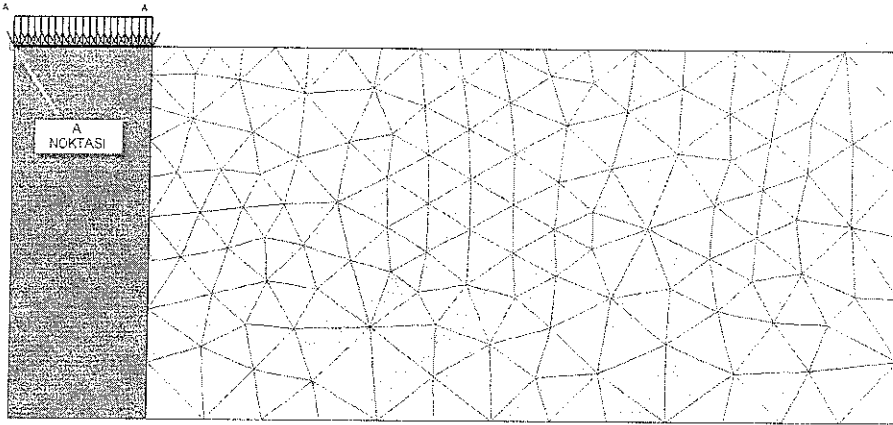
**Tablo 3.** Homojenleştirilmiş Zemin Parametreleri

	Elastik Modülü [kPa]		Poisson Oranı [-]		Akma Gerilmesi [kPa]	
	E <sub>v</sub>	E <sub>h</sub>	v <sub>vh</sub>	v <sub>hh</sub>	σ <sub>yv</sub>	σ <sub>yh</sub>
	Uygulama 1	7051	5331	0,47	0,48	17,32
Uygulama 2	9669	6786	0,45	0,47	28,24	6,26

Sayısal analizlerde, model deney düzeneği ve yükleme koşulları deneydekine eş değer olarak modellenmiştir. Şekil 7’de analizlerde kullanılan model ve sonlu elemanlar ağı görülmektedir. Sonlu elemanlar ağında 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanılmış ve problem düzlem deformasyon koşullarda analiz edilmiştir.



(a) Model Geometrisi

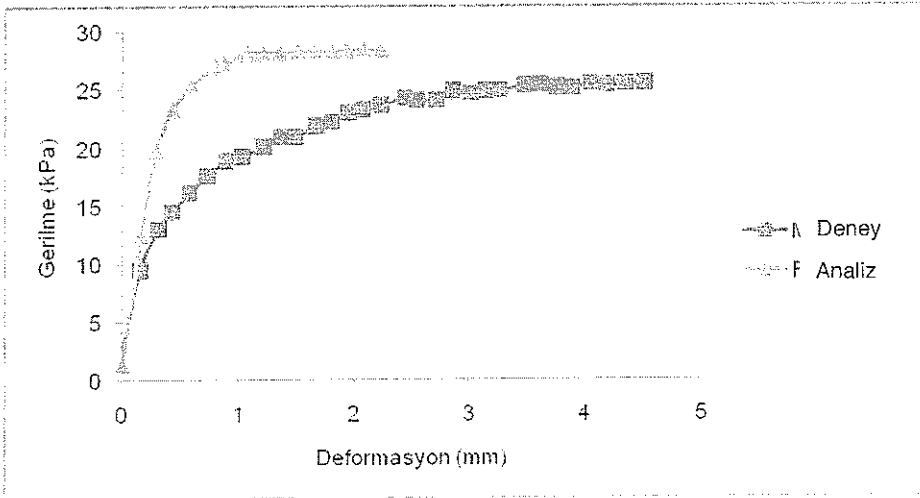


(b) Sonlu elemanlar ağı

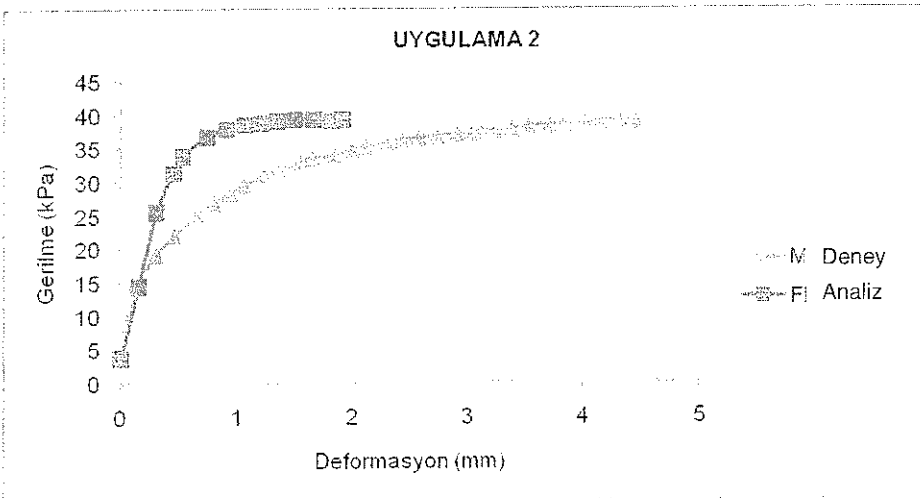
Şekil 7. Analizlerde kullanılan modelin geometrisi ve sonlu elemanlar ağı

Şekil 11 ve Şekil 12'de sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki grafikten görüldüğü gibi homojenleştirme yöntemi ile elde edilen göçme yükleri deneydekine çok yakın olarak hesaplanmaktadır. Fakat analizlerden elde edilen deformasyon değerlerinin deneyle çok iyi uyum göstermediği görülmektedir. Analizlerden hesaplanan deplasman değerleri deneyden elde edilen değerlerden daha düşük hesaplanmıştır.





Şekil 11. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ( $f_s=22\%$ )



Şekil 12. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ( $f_s=42\%$ )

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapı temeli altına inşa edilecek jet kolonların sayısal olarak analiz edilebilmesi için Omine vd. tarafından önerilen homojenleştirme yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır [10]. Bu yöntem sayesinde jet kolonların inşa edildiği bölge kompozit bir malzemeye dönüştürülmekte ve sonlu elemanlar yöntemi ile daha pratik şekilde analiz edilebilmektedir. Sayısal analizlerde göçme yükü değerleri deneyden elde edilen göçme yüküne çok yakın hesaplanmasına rağmen deformasyonlar açısından sonuçlar arasında farklılık görülmektedir. Bunun nedeni, homojenleştirme yönteminde zeminin lineer elastik malzeme olarak kabul edilmesidir. Homojenleştirme

yönteminde deformasyon davranışının lineer elastik model yerine zemin davranışını gerçeğe daha yakın bir şekilde modelleyebilen ileri zemin modellerinin kullanılması sonuçların daha güvenilir olmasını sağlayacaktır. Ayrıca, önerilen yöntemde jet kolonların inşası sırasında yüksek basınç nedeniyle kolon etrafındaki zeminde meydana gelen etkilerin dikkate alınması sonuçların güvenilirliği açısından gereklidir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Lunardi,P., "Ground Improvement by Means of Jet-Grouting", *Ground Improvement, Issmfe Thomas Telford*, 1 (2), 65-86, 1977.
2. Baumann,V., "Das Soilcrete-Verfahren in der Baupraxis", *Vortrage der Baugrundtagung, Dusseldorf*, 49-83, 1984.
3. Trevi,K., "Columnar Treatment", *Illustrative Report, Cesena*, 1994.
4. Sağlamer,A., Düzceer,R., Gökalp,A. and Yılmaz,E., "Ground Improvement by Jet Grout Columns for the Foundations of an Automobile Plant in Turkey", *Deep Foundations 2002, Proc. of the Int. Deep Foundations Congress, Orlando, Florida, Gsp No. 116*, 2002.
5. Durgunoğlu,H.T., Kulaç,H.F., Oruç,K., Yıldız,R., Altuğu,T. ve Emrem,C.A., "Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi ile Zemin Islahuna Ait Bir Vaka Analizi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, Anadolu Üniv., Eskişehir*, 2002.
6. Bell,Kenneth,R., Clemente,Jose,L.M., Gularte,Francis,B., Lopez,T. and Roberto,A., "Superjet Grouting Reduces Foundation Settlement for La Rosita Power Plant in Mexicalli, Mexico, New Orleans", 354-364, 2003.
7. Durgunoğlu,H.T., "Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, İ.T.Ü., İstanbul*, 2004.
8. Doğu,O., Yıldırım,H. ve Durgunoğlu,A.T., "Zeminin İnce Dane Oranı ve SPT Vuruş Sayısının Jet Grout Kolonların Mukavemetine Etkisi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, K.T.Ü., Trabzon*, 2006.
9. Omine,K. and Ohno,S., "Deformation Analysis of Composite Ground by Homogenization Method", *Proc. of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 719-722, 1997.
10. Omine,K., Ochiai,H. and Bolton,M.D., "Homogenization Method for Numerical Analysis of Improved Ground with Cement-Treated Soil Columns", *Dry Mix Methods For Deep Soil Stabilization, Bredenberg, Balkema, Rotterdam*, 1999.
11. Racansky,V., Schweiger,H.F., and Thurner,R., "FE-Analysis of the Behaviour of Buttressed Jet Grouted Retaining Walls", *Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 3984-3992, 2008.
12. Ou,C.Y., Teng,F.C. and Wang,I.W., "Analysis and Design of Partial Ground Improvement in Deep Excavations", *Computers and Geotechnics*, 35, 576-584, 2007.
13. Racansky,V., Thurner,R., and Kummerer,C., "Design of a Deep Building Pit with Numerical and Limit Equilibrium Methods", *Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Taylor & Francis Group, London*, 2006.
14. Omine,K., Yoshida,N. and Ochiai,H., "Stress - Strain Behavior of Mixtures with Two Different Elastic Materials", *Fukuoka University Review of Thechnological Sciences*. 51, 83-93, 1993.

15. Kirsch,F. and Sondermann,W., “Ground Improvement and Its Numerical Analysis”, *Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Istanbul, A.A. Balkema, 1775-1778, 2001.*
16. Bzowka,J., “Computational Model for Jet Grouting Pile-Soil Interaction”, *Studia Geotechnica Et Mechanica, 26, 3–4, 2004.*
17. Tschuchnigg,F. and Schweiger,H.F., “Comparison of Different Models for Analysing Foundations on Jet Grout Columns” *Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3149–3157, 2008.*
18. Brinkgreve,R.B.J. “*PLAXIS: Finite Element Code For Soil and Rock Analyses, Balkema, 2002.*”
19. Adams,D.F. and Doner,D.R., “Transverse Normal Loading of a Unidirectional Composite”, *Journal. of Composite Materials, 1, 152-164, 1967.*
20. Omine,K., Ochiai,H. and Yoshida,N., “Estimation of In-Situ Strength of Cement-Treated Soils Based on a Two-Phase Mixture Model”, *Soils and Foundations, 38 (4), 17–29, 1998.*

