

**DOYGUN VE YARI DOYGUN GRANÜLER ZEMİNLERDE  
GERİLME-ŞEKİL-DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİNİN  
PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Ömer Faruk, ÇAPAR**

Yrd. Doç. Dr.  
Z.K.Ü. İnşaat Müh. Böl.  
Zonguldak, Türkiye

**İbrahim, YİĞİT**

Arş. Gör.  
Z.K.Ü. İnşaat Müh. Böl.  
Zonguldak, Türkiye

**ÖZET**

Bu çalışmada doygun ve yarı doygun kaba daneli zeminlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu araştırma için bir bilgisayar programı (ADOZ-U1) kodlanmıştır. Araştırma materyali olarak kaba daneli, sıkı, lineer elastik bir malzeme seçilmiştir. Değişik doygunluk derecelerinde, malzemenin elastik parametreleri hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak doygunluk derecesi(S) ile gerilme-şekil değiştirme arasındaki etkileşim incelenmiştir. Bunun sonucunda, malzemenin yüksek doygunluk derecelerindeki ufak değişimler, özellikle şekil değiştirmelerde büyük farklılıklar oluşturmuştur. Buna ilaveten malzemenin yapısal anizotropisi göz önüne alınarak elastik parametreler tekrar hesap edilmiş ve yapısal anizotropi ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, literatürde bulunan önceki çalışmalarla uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

## AMAC

Zeminler katı(dane), sıvı(su) ve gaz(hava) olmak üzere üçlü faz içermektedir. Bu kompozit malzemenin doğal ortamda hava ve su gibi poroz bölgede konuşlanan iki fazın herhangi birinin eksik olması, mevsimsel şartlara göre değişebilmektedir. Zeminlerin zamana bağlı değişen bu kompozit yapısı, gerilme-şekil değiştirme problemlerini oldukça kompleks hale getirmektedir. Bu tip bir sistemin çözülebilmesi için radikal kabullerin yapılması ve de yoğun bir hesap yükü gerekir.

Sayısal yaklaşımlarla bu tip problemleri çözme yoluna gitmek, son yıllarda oldukça sık kullanılmaktadır. Bu yöntemler içinde en çok kullanım alanı bulan sonlu elemanlar(FEM) yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi, modellenen fiziksel problemdeki çok sayıda parametrenin birbirine ve problemin çözümüne olan etkilerinin hesaba katılmasına olanak sağlaması sebebi ile geoteknik mühendisliğinde de tercih edilir olmuştur. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan paket programların sayıları ve kullanıcılara verdikleri seçenekler her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada kaba daneli zemin, araştırma materyali olarak seçilmiştir. Bu zemin tipi ağırlıkça %50'inden fazlası çakıl ve %5'den küçük silt ve kil içermektedir(GW,GP). Kaba danelerin oluşturduğu bahsi geçen zemin tipine ait iskelet yapısında absorbe su ve kapiler su olma olasılığı düşüktür [1]. Böylelikle, poroz bölgede sadece serbest suyun mevcut olduğu kabulü yanlış olmaz. Ayrıca kaba daneli zeminlerin basınç gerilmelerine karşı dayanımı, porozitesiyle ters orantılıdır. Literatürde bulunan birçok çalışmada, porozitesi oldukça düşük veya rölatif sıklığı (Dr) %75'den yukarı olan zeminlerin, oldukça sıkı bir dizilime sahip olduğu, düşük basınç gerilmeleri altında gerilme şekil değiştirme ilişkisinin lineer ve elastik olduğu gözlenmiştir.

## YARI DOYGUN VE DOYGUN ELASTİK ZEMİN MODELİ

Kaba daneli zemin katmanları, doğal oluşumlarında yerçekimi kuvvetlerinden dolayı düşey yönde simetrik olan düzlemsel anizotropik deformasyon özelliği gösterirler. Bu tip malzemelere düzlemsel anizotropik malzeme olarak adlandırılır. Düzlemsel anizotropiye sahip lineer elastik bir malzeme için rijitlik matrisi aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(D_{11} - D_{12}) & 0 & 0 \\ \text{simetrik} & & & & D_{55} & 0 \\ & & & & & D_{55} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Malzeme 7 bağımsız elastik sabite sahiptir ve bunlar;

$E_v$  : düşey (z) doğrultusundaki Elastik modülü

$E_h$  : yatay (x,y) doğrultularındaki Elastik modülü

$\nu_{vh}$  : düşey doğrultudaki gerilme nedeniyle x-y düzlemindeki Poisson oranı

$\nu_{hv}$  : x-y düzlemindeki gerilme nedeniyle düşey doğrultudaki Poisson oranı

$\nu_{hh}$  : x-y düzlemindeki gerilme nedeniyle x-y düzlemindeki Poisson oranı

$G_{hv}$  : z-x ve z-y düzlemindeki kayma modülü

$G_{hh}$  : x-y düzlemindeki kayma modülü

olarak tanımlanmaktadır. Bu elastik sabitler arasında ayrıca simetriden dolayı aşağıdaki ilişkiler geçerlidir. Denklem 2.a ve 2.b sebebi ile elastik parametrelerin sayısının 5 olduğu görülmektedir.[2,3,4]

$$\frac{v_{vh}}{E_v} = \frac{v_{hv}}{E_h} \quad (2.a)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + v_{hh})} \quad (2..b)$$

Malzemenin 5 bağımsız elastik sabiti kullanılarak denklem 1 ile verilen rijitlik matrisi yeniden yazılacak olursa;

$$D = \begin{bmatrix} \Lambda \left( 1 - v_{vh}^2 \frac{E_h}{E_v} \right) E_v & \Lambda \left( v_{hh} - v_{vh}^2 \frac{E_h}{E_v} \right) E_v & \Lambda v_{vh} (1 + v_{hh}) E_v & 0 & 0 & 0 \\ & \Lambda \left( 1 - v_{vh}^2 \frac{E_h}{E_v} \right) E_v & \Lambda v_{vh} (1 + v_{hh}) E_v & 0 & 0 & 0 \\ & & \Lambda \left( 1 - v_{hh}^2 \frac{E_v}{E_h} \right) E_v & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{E_h}{2(1 + v_{hh})} & 0 & 0 \\ & \text{simetrik} & & & G_{hv} & 0 \\ & & & & & G_{hv} \end{bmatrix} \quad (3)$$

elde edilir. Burada A denklem, 4'de verildiği gibi bir sadeleştirme katsayısıdır.

$$A = \frac{1}{(1 + v_{hh}) \left[ \frac{E_v}{E_h} (1 - v_{hh}) - 2v_{vh}^2 \right]} \quad (4)$$

### Tek Parametrelili Anizotropik Malzeme Davranışı

Klasik deneylerle, düzlemsel anizotropik bir malzemeye ait 5 adet bağımsız elastik sabitin değerleri elde edilememektedir. Graham ve Housby(1983)[3,4] düzlemsel anizotropik davranışın temsili için elastik

parametreler arasında bir orantı( $\alpha$ ) olabileceğini öne sürerek tek parametrelili anizotropik davranış için aşağıdaki bağıntıları kurmuşlardır.

$$E_v = E^* \quad (5.a)$$

$$E_h = \alpha^2 E^* \quad (5.b)$$

$$v_{vv} = \frac{v^*}{\alpha} \quad (5.c)$$

$$v_{vh} = v^* \quad (5.d)$$

$$G_v = \frac{\alpha E^* (1 + v^*)}{2} \quad (5.e)$$

Denklem 5 de verilen bağıntılara göre denklem 3 ve 4 tekrar yazılacak olunursa;

$$D = \frac{E^*}{(1 + v^*)(1 - 2v^*)} \begin{bmatrix} \alpha^2(1 - v^*) & \alpha^2 v^* & \alpha v^* & 0 & 0 & 0 \\ & \alpha^2(1 - v^*) & \alpha v^* & 0 & 0 & 0 \\ & & (1 - v^*) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{\alpha^2(1 - 2v^*)}{2} & 0 & 0 \\ & \text{simetrik} & & & \frac{\alpha(1 - 2v^*)}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{\alpha(1 - 2v^*)}{2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Elde edilir. Burada;  $E^*$ ,  $v^*$  sırasıyla değişikliğe uğramış elastik modülü ve Poisson oranını;  $\alpha$  ise anizotropiklik derecesini göstermektedir.  $\alpha$  sıfır ile sonsuz arasında tanımlı olan bir orantı sabitidir.  $\alpha = 1$  değerini aldığıında malzeme izotropik elastik davranış sergiler. Eğer  $\alpha$  sabitine sıfır ile 1 arasında bir değer atanırsa, malzeme düşey yönde daha rijit bir yapıya

kavuşmaktadır. Şayet  $\alpha$  değeri 1 den büyük ise de malzeme yanal yönlerde daha rijit bir yapıya bürünmektedir.

Lineer elastik anizotropik malzeme için bulk modülü(K) ve kayma modülü(G) ile elastik modülü ve Poisson oranı arasındaki ilişki tek parametrelili anizotropik model için aşağıdaki gibi oluşmaktadır .

$$K^* = \frac{E^*(1 - \nu^* + 4\alpha\nu^* + 2\alpha)}{9(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)} \quad (7)$$

$$G^* = \frac{E^*(2 - 2\nu^* + 4\alpha\nu^* + \alpha^2)}{6(1 + \nu^*)(1 - 2\nu^*)} \quad (8)$$

Ayrıca bilindiği üzere bir lineer elastik malzemeye ait hacimsel şekil değiştirme ve bulk modülü arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\sigma_T}{K} \quad (9)$$

Burada  $\Delta V$  hacimsel değişimi,  $V$  toplam hacmi ve  $\sigma_T$  malzemeye etkileyen toplam gerilmeyi göstermektedir. Ishihara(1968) ve Çapar(2000) çalışmalarında, kaba daneli zemini oluşturan dane, su ve hava elemanlarının sıkışma katsayıları ile bulk modülünün arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmeye çalışılmıştır.[5,6]

$$K = \frac{\sigma_T}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{1}{A} + \frac{1}{C_b} \quad (10)$$

$$A = [(1 - n)C_s + nSC_w + (1 - S)nC_a] \quad (11)$$

Burada  $C_s$ ,  $C_w$ ,  $C_a$  sırasıyla danelerin, suyun ve havanın sıkışma katsayısını göstermektedir. Kaba daneli zeminler için  $C_s$  değeri  $0.028 \cdot 10^{-6}$  (1/kPa) değerini almaktadır.  $C_w$  havasız suyun atmosferik basıncındaki sıkışabilirliğidir

ve  $0.45 \cdot 10^{-6}$  (1/kPa) ile  $0.49 \cdot 10^{-6}$  (1/kPa) arasında değer almaktadır.  $C_a$  ise atmosferik basınç altında havanın sıkışabilirliğidir ve yaklaşık 0.00494 (1/kPa) değerindedir [5,6,7]. Ayrıca denklem 10 da verilen  $C_b$  zemin iskeletinin sıkışabilirliği diğer bir ifade ile efektif gerilmenin etkiğiği zemin danelerinin oluşturduğu yapının sıkışma katsayısıdır.  $C_b$  sıkı ve gevşek daneli malzemeler için sırasıyla  $18 \cdot 10^{-6}$  ve  $92 \cdot 10^{-6}$  (1/kPa) değerini almaktadır [5,6].

Çizelge 1 Yarı doygun sıkı kaba daneli zeminin elastik sabitleri.

$C_b$ (1/kPa)	1.80E-05	N	0.3	
$C_s$ (1/kPa)	2.80E-08	G	26923.1	kPa
$C_a$ (1/kPa)	4.94E-03	E	7.00E+04	kPa
$C_w$ (1/kPa)	4.90E-07	Y	0.3	
S	K(kPa)	A	E*(kPa)	$\nu^*$
1	6.06E+06	1.0	8.06E+04	4.98E-01
9.90E-01	1.22E+05	1.0	7.52E+04	3.97E-01
9.80E-01	8.91E+04	1.0	7.34E+04	3.63E-01
9.50E-01	6.90E+04	1.0	7.15E+04	3.27E-01
9.00E-01	6.23E+04	1.0	7.06E+04	3.11E-01
5.00E-01	5.69E+04	1.0	6.98E+04	2.96E-01
2.00E-01	5.64E+04	1.0	6.97E+04	2.94E-01
0	5.62E+04	1.0	6.97E+04	2.94E-01

Bu çalışmada zemin örneğine ait  $C_b$  ve  $C_s$  değerleri ile suyun sıkışma katsayısı  $C_w$  [6]'den,  $C_a$  değeri ise [5,6]'den alınmıştır. Öncelikle kayma modülünün hesaplanabilmesi için literatürde verilen aralıkta sıkı kaba daneli zemine ait bir Elastik modülü (7E+04kPa) ve Poisson oranı (0.3) olarak seçilmiştir [7]. Bu  $E^*$  ve  $\nu^*$  değerleri kullanılarak 2.b eşitliği ile hesaplanan kayma modülü, suyun kayma gerilmesi almaması nedeniyle analiz boyunca

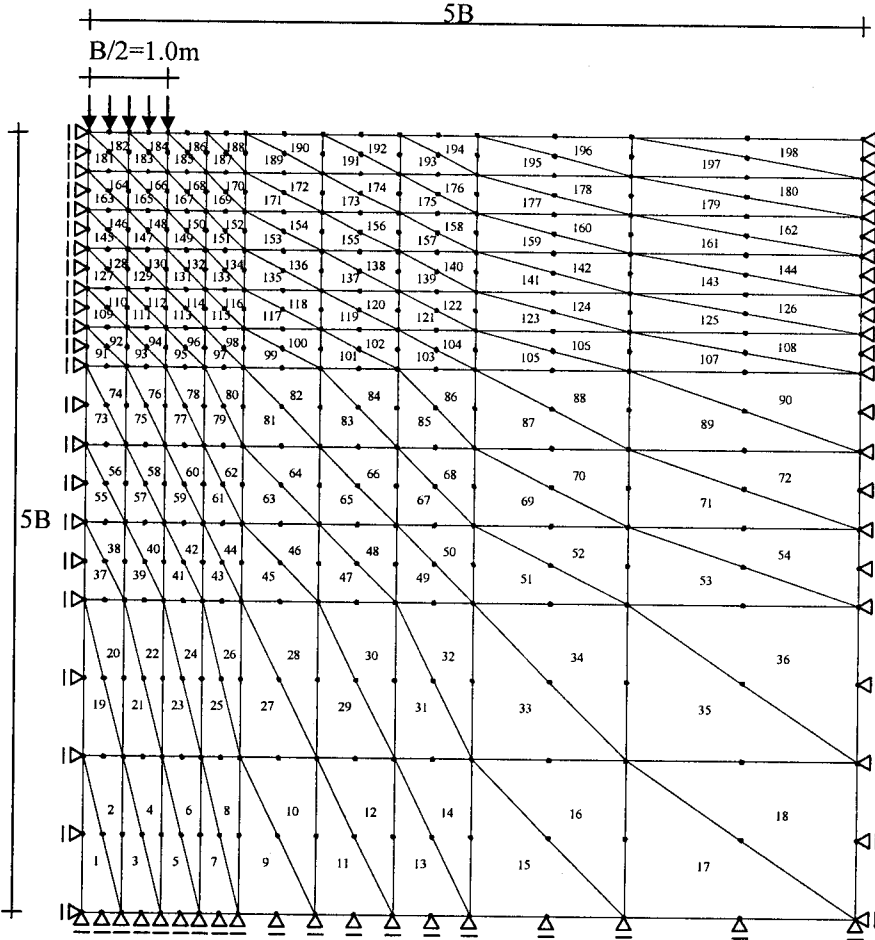
değişik suya doygunluk dereceleri için sabit kabul edilmiştir. Önceki çalışmalarda doygunluk derecesinin artmasıyla kayma modülünde çok az bir düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi daneler arasında kontak noktalarında sürtünmenin azalmasıdır [5,6,8,9].

Bu elde edilen parametreler kullanılarak Graham ve Houlsby (1983) tarafından geliştirilmiş anizotropik modele çevrilmiştir. [3,4]. Bu modelde ( $\alpha$ ) anizotropiklik derecesinin değişik değerleri ile nümerik analiz için giriş dataları oluşturulmuştur.

## NUMERİK UYGULAMA

Nümerik uygulamada 0.1 MPa'lık bir taban basıncı oluşturan 2 m genişliğindeki şerit temel altındaki zemin seçilmiştir. Problem geometrisi ve yükleme durumunun simetrisinden faydalanılarak geometri ve yüklemenin yarısı göz önüne alınmıştır. İncelenen düzlemin, lineer şekil değiştirebilen üçgen(LST) elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sonlu düğüm noktaları soldan sağa doğru numaralandırılmıştır.





Şekil 1 Eleman numaraları ve sınır koşulları.

Temel altında gerilme yığılması olacağı düşünülerek bu bölgede eleman sıklaştırılmasına gidilmiş ve temelden uzaklaştıkça eleman boyutları arttırılmıştır.[10,11,12,13] Eleman boyutları orijinden başlayarak yatay eksen boyunca sırası ile  $0.5m \times 4$ ,  $1.0m \times 3$ ,  $2.0m \times 1$ ,  $3.0m \times 1$  iken dikey eksen boyunca sırası ile  $2.0m \times 2$ ,  $1.0m \times 3$  ve  $0.5m \times 6$  olarak seçilmiştir. Eleman numaraları, sınır koşulları ve yüzey kuvvetine eşdeğer yükleme şekil 1’de gösterilmiştir.

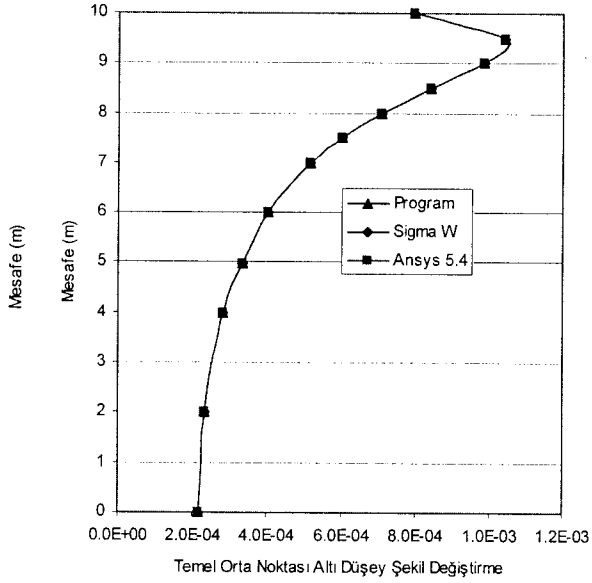
## SONUÇLAR

Bu araştırma için Mathematica programı kullanılarak ADOZ-U1 (Anizotropik Doygun Olmayan Zemin ) kodlanmıştır. Hazırlanan bilgisayar programı ile yapılan çözümlerin sonuçları ANSYS, SIGMA/W gibi paket programlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların bir birine çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 2)

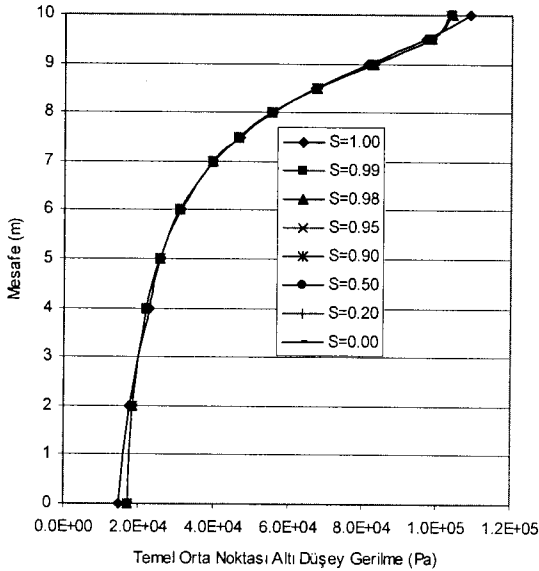
ADOZ-U1 programına, sayısal olarak elde edilen malzeme parametreleri girilerek doyunluk derecesi değişimi ile şekil değiştirmelerin ve gerilmelerin derinlikle değişimi incelenmiştir. Analizin bu kısmında anizotropiklik derecesi ( $\alpha=1$ ) sabit tutulmuştur. Doygunluk derecesinin azalması gerilme değerlerinde düşük miktarlarda artımlara sebep olurken şekil değiştirmelerde büyük farklar gözlenmiştir(Şekil 3 ve 4). Özellikle doyunluk derecesi %100 den %99 değerine indiğinde gerilmede çok değişme olmazken, şekil değiştirme değerlerinde temel orta noktası altında yaklaşık %35'lik bir artış gözlenmiştir. Zemin üstüne gelen gerilme değerinin sabit tutulması ve incelenen zeminin geometrisinde değişim olmaması gerilmelerdeki değişimin çok az olmasının sebebidir. Fakat sistemde doyunluk derecesinin azalması ile şekil değiştirmeye karşı hassasiyetini artırmış ve doyunluk derecesinin azalması ile şekil değiştirmeler çok büyük artımlar gözlenmiştir.

Anizotropiklik derecesi ( $\alpha$ )'nın, değişik doyunluk derecelerinde düşey gerilme ve şekil değiştirmeye olan etkisi Şekil 5 ve 6'da sunulmuştur. Anizotropiklik derecesi ( $\alpha$ )'nın birden büyük olması durumunda zeminin yatay yönde rijitliği artarken birden küçük olması durumunda ise düşey yönde yataya göre daha rijit bir yapı oluşturduğu bilinmektedir. Düşey gerilmeler anizotropiklik derecesinin artması ile azalmaktadır. Ayrıca anizotropiklik derecesinin değişimi ile düşey şekil değiştirmelerin gerilmelerle aynı yönde değiştiği sonucu elde edilmiştir. Anizotropiklik

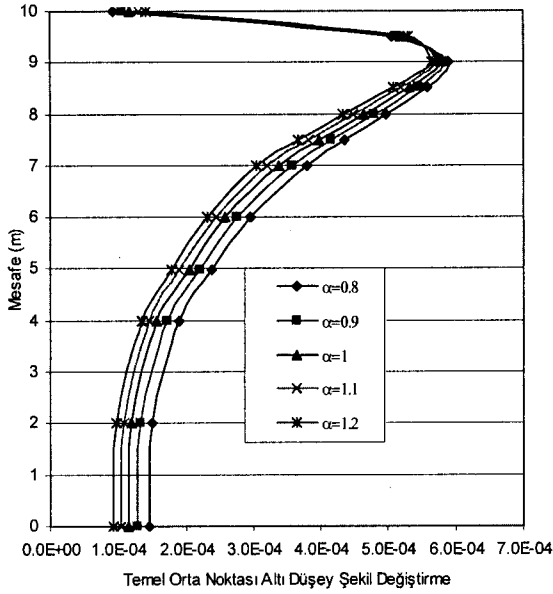
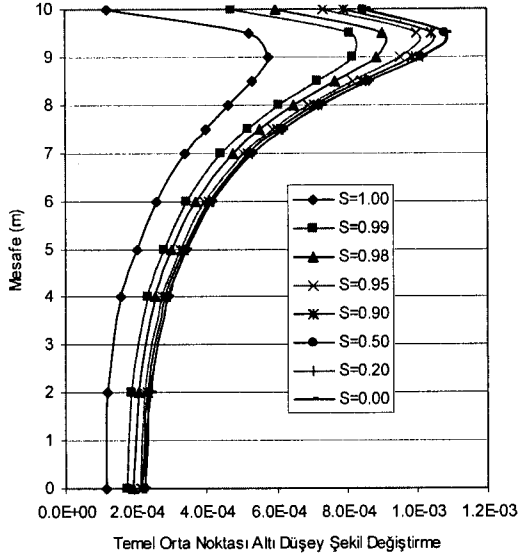
dercesi ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi arasında beklenen lineer bir ilişki elde edilmiştir.

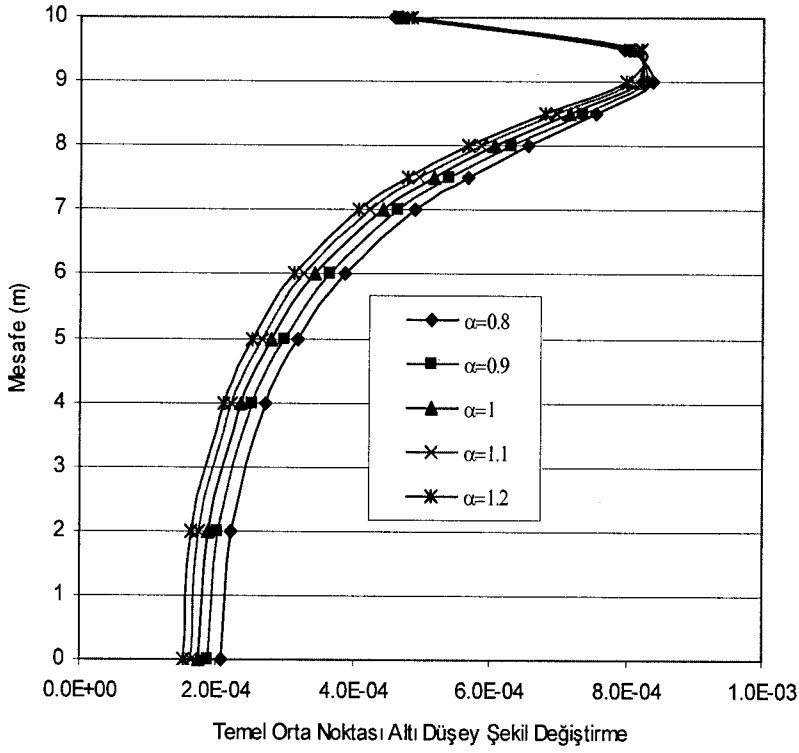


Şekil 2 Temel altında düşey şekil değiştirme ( $S=0.90, \alpha=1$ ).



Şekil 3 Temel merkezi altı düşey gerilmenin doğunluk derecesi ile değişimi ( $\alpha=1$ )





Şekil 5 Aynı doygunluk derecesinde temel orta noktası altında düşey şekil değiştirmenin anizotropiklik derecesi ile değişimi. (S=0.99)

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma (Proje Kod: 2002-45-05-01), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı, ZKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- [1] **Fredlund, D.G. and Rohardjo, H.** (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Willey & Sons Inc, pp.517.
- [2] **Davis, R.O. and Selvaduri, A.P.S.** (1996) Elasticity in Geomechanics, Cambridge University Pres, pp.201.
- [3] **Wood, D.M.** (1990) Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Pres, pp.462.
- [4] **Graham, J. and Houlby, G.T.** (1983) "Anisotropic elasticity of a natural clay", *Geotechnique* Vol.33, No. 2, pp.165-180.
- [5] **Ishihara, K.** (1968) "Propagation of Compressional Waves in a Saturated Soil", *Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic properties of Earth Materials*, University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 195-206.
- [6] **Çapar, Ö.F.** (2000) Determination of Anizotropy of Granular Materials and Its Relation to Liquefaction Resistance Under Cyclic Loading, PhD. Thesis, Old Dominion University, pp.239.
- [7] **Mitchell, J.K.** (1993) Fundamentals of Soil Behavior, Second Edition, John Willey & Sons Inc, pp.437
- [8] **Nakagawa, K., Soga, K. and Mitchell J.K.** (1996) "Pulse transmission system for measurement of wave propagation characteristics of soils", *J. Geotech. Eng., Div. Am. Soc. Civ. Engrs.*, Vol.122, No. 4, pp.302-308.
- [9] **Nakagawa, K., Soga, K. and Mitchell J.K.** (1997) "Observation of Biot compressional wave of the second kind in granular soils", *Geotechnique* Vol.47, No. 1, pp.133-147.
- [10] **Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L.** (2000) The Finite Element Method, Fifth Edition, Volume 1, The Basis, Butterworth Heinemann Publishing, pp.787.

[11] **Cook, R.D.** (1994) Finite Element Modelling for Stress Analysis, John Willey & Sons Inc, pp.320.

[12] **Felippa, C.A.** (2004) Introduction to Finite Element Methods, Course Notes. University of Colorado..

[13] **Potts, D.M. and Zdravkovic L.** (1999) Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Theory, Thomas Telford Publishing, pp.440.

## SUMMARY

In this study, stress-strain analysis of saturated and partially saturated granular materials is investigated using finite element method (FEM). A computer program (ADOZ-U1) is coded for this research. Dense, coarse and linear elastic granular-material is chosen as research material. Elastic parameters of the material are computed at different degrees of water-saturation conditions. Using the parameters, relationship between stress-strain and saturation degree is investigated. As a result of this research, it is shown that the magnitudes of strain values are greatly affected by saturation degrees which are very close to fully saturation degree. In addition, elastic parameters of the material are again computed with changing fabric-anisotropy degree and relations between stress-strain and fabric-anisotropy are investigated. It is observed that the results of the research and early works in the literature have a good agreement.