KİLLİ BİR ZEMİNDE DÜZLEMSEL ANİZOTROPİK ELASTİK PARAMETRELERİN SAPTANMASI

Taha TAŞKIRAN M. Arslan TEKİNSOY ve Cafer KAYADELEN

(Ç.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümü Adana Türkiye)

1. GİRİŞ

Zeminlerin birçoğu, yatay yönde çok geniş bir yayılıma sahip alanlar üzerinde birikirler ve birikimi izleyen safhada ise çoğunlukla tek eksenli deformasyon yapmaya başlarlar. Meydana gelen bu tek yönlü konsolidasyon, kil dokularının, danelerin veya her ikisinin de yatay düzlem üzerinde konumlanarak zeminin dispers bir yapı kazanmasına neden olur. Bunun sonucu olarak zeminler, yatay ve düşey yönlerde farklı farklı malzeme özellikleri kazanırlar ve izotrop olarak tanımlanan kabullerden sapma gösteririler. Tek bir simetri eksenine sahip, farklı anizotropi türleri, zemin mekaniği literatüründe "düzlem anizotropi" (transversely isotropic, cross-anisotropy) olarak adlandırılmıştır (1). Zeminlerin düzlemsel anizotropik malzemeler olduğunu gösteren çok sayıda araştırma bulunmaktadır (2, 3, 4)

Zeminlerin izotrop malzemeler kabul edilerek mühendislik problemlerinin ele alınması oldukça yaygın bir yaklaşımdır. Gerek kulanım kolaylıkları ve gerekse daha az parametreye ihtiyaç duymaları nedeni ile bu çözümler, yaygın kabul görmüşlerdir. Oysaki zeminler üzerinde yapılan araştırmalar zeminlerin anizotrop malzeme olarak modellenmelerinin daha gerçekçi ve ekonomik avantaj sağladığını ortaya koymuştur. Bu nedenle zeminlerin anılan şekilde modellenmeleri ile, mühendislik problemlerinin yeniden ele alınması birkaç onyıl dan beri giderek artan bir eğilim olarak ortaya çıkmaktadır.

Öte yandan, zeminlerde düzlemsel anizotropik davranışın tam olarak tanımlanması için beş bağımsız elastik sabite ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerin ölçülmesi ise bu tip zeminler ile ilgilenirken en temel noktayı teşkil etmektedir. Anizotropik parametrelerin elde edilmesine yönelik yeni deneysel süreç ve teknikler ve mevcut tekniklere dayanılarak geliştirilen yeni teorik analizler hala sürmektedir.

Beş bağımsız elastik sabit, laboratuarlarda rutin deneylerde kullanılan deney düzenekleri ile elde edilememekte ve gelişmiş deney düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, zemin numunesi üzerine belirli sabit gerilme izi ($\Delta q / \Delta p = \text{sabit}$) uygulayabilen ve yükün kontrol edilebildiği yeni bir düzenek kullanılarak, yük kontrollü üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve Tarsus/Yenice kiline ait anizotropik elastik sabitler, Graham ve Houlsby, 1983 (5) tarafından önerilen yöntem takip edilerek elde edilmiştir.

2. Zeminlerin Anizotropik Elastik Davranışı ve Anizotropi'nin Ölçülmesi

Bu bölümde; zeminlerin anizotropik elastisitesi hakkında bilgiler verilmiş ve anizotropik elastik parametrelerin elde edilmesine yönelik, farklı deneysel ve kuramsal yöntemler tanıtılmaya çalışılmıştır.

2.1. Anizotropik Elastisite

Düzlemsel anizotropiye sahip, lineer elastik bir malzeme için, efektif gerilme ve deformasyon artımları arasındaki ilişki, Love, 1927 (6) tarafından matris formunda, aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{XX} \\ \delta\varepsilon_{YY} \\ \delta\varepsilon_{ZZ} \\ \delta\varepsilon_{YZ} \\ \delta\varepsilon_{ZX} \\ \delta\varepsilon_{XY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_h & \nu_{hh}/E_h & \nu_{vh}/E_v & & & \\ -\nu_{hh}/E_h & 1/E_h & -\nu_{vh}/E_v & & & \\ -\nu_{vh}/E_h & -\nu_{hv}/E_h & 1/E_v & & & \\ & & & \frac{1}{G_{hv}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{hv}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{hh}} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \delta\sigma'_{xx} \\ \delta\sigma'_{yy} \\ \delta\sigma'_{zz} \\ \delta\tau_{yz} \\ \delta\tau_{zx} \\ \delta\tau_{xy} \end{bmatrix} \qquad (1)$$

Denklem (1)'de yer alan parametreler için; z düşey, x ve y yatay doğrultuları göstermek üzere,

E_v : Düşey elastik modül (z doğrultusu)

E_h :Yatay elastik modül (x ve y doğrultularındaki)

ν_{vh} : Düşey doğrultudaki gerilme nedeniyle yatay doğrultudaki Poisson oranı

ν_{hv} :x-y düzlemindeki gerilme nedeniyle düşey doğrultudaki Poisson oranı

ν_{hh} : x ve 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

Elastik sabitler arasında, simetriden dolayı, aşağıdaki ilişkiler de geçerlidir. Bu ilişkilerden dolayı, bağımsız elastik parametre sayısı beşe indirgenmektedir.

$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \qquad (2)$$

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hh})} \qquad (3)$$

2.2. Anizotropi'nin Üç Eksenli Deneyler İle Araştırılması

Üç eksenli basınç deneyleri ile; beş bağımsız elastik sabitin, doğrudan bulunması imkansızdır. Düzlem anizotrop malzeme kabul edilecek bir zemin örneği üzerinde, üç eksenli basınç deneyinin gerçekleştirilmesi halinde, örnek üzerinde herhangi bir kayma gerilmesi

($\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$) uygulanamayacağı için, herhangi bir kayma deformasyonu da ($\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$) ölçülemez. Bu nedenle; Denklem (1)' de verilen uygunluk matrisi ve bu bölüme ait parametreler, işin içine katılamayacaklarından, elde edilemezler. Üç eksenli deney koşullarında, denklem (1) aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (1). Burada, x, y ve h sembolleri, yatay yönü ifade etmektedirler.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_v \\ \delta\varepsilon_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\varepsilon_v} & \frac{-2\nu_{hh}}{\varepsilon_v} \\ \frac{-\nu_{hh}}{E_v} & \frac{1-\nu_{hh}}{E_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_v \\ \delta\sigma'_h \end{bmatrix} \qquad (4)$$

ε_v = Düşey deformasyon

ε_h =Yatay deformasyon

σ'_v = Efektif düşey gerilme

σ'_h =Efektif yatay gerilme

Özel birtakım üç eksenli deneyler gerçekleştirilerek, beş elastik bağımsız sabitten bazıları, elde edilebilir. Drenajlı koşullarda yapılacak olan, sabit çevre basınçlı ($\delta\sigma'_h = 0$) ve eksenel yüklemeli üç eksenli basınç deneyi ile, E_v ve ν_{vh} elastik parametreleri elde edilebilirler. Ancak ilave bir bilgi olmadan ν_{hv}, ν_{hh} ve E_h sabitlerinin elde edilmesi mümkün değildir (1).

2.3. Bender Elemanlar Kullanarak Anizotropi'nin Araştırılması

Düzlem anizotropik elastik parametrelerin elde edilmesi için diğer bir yol da, üç eksenli basınç deney düzeneklerinde, bender elemanların kullanılması ile sabitlerin bir kısmının doğrudan ve bir kısmının da dolaylı olarak hesap edilmesidir.

Sismik dalga kütle hızları ve modüller arasındaki ilişki; zeminin homojen ve elastik bir ortam olduğu kabulü ile, aşağıdaki gibi verilebilir.

$$M = \rho V_p^2 \qquad \text{ve} \qquad G_0 = \rho V_s^2 \qquad (5)$$

burada ρ ortamın yoğunluğunu, V_p basınç dalga hızını ve V_S ise, kayma dalgası hızını temsil etmektedir. Bellotti vd. (7) tarafından yapılan çalışmada, anizotropik elastik parametreleri elde etmeye yönelik, kullanılan yöntem şu şekilde açıklanmıştır:

Yatay simetri düzlemine sahip, anizotrop elastik bir malzeme için, bünye denklemi Love, 1959 (8) tarafından verildiği şekliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix}\sigma_X\\ \sigma_Y\\ \sigma_Z\\ \tau_{ZX}\\ \tau_{ZY}\\ \tau_{XY}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66}\end{bmatrix} \text{x} \begin{bmatrix}\varepsilon_X\\ \varepsilon_Y\\ \varepsilon_Z\\ \gamma_{ZX}\\ \gamma_{ZY}\\ \gamma_{XY}\end{bmatrix} \quad (6)$$

Burada;

$C_{11} = M_h$ (Yatay yönde sınırlandırılmış(constrained) modül)

$C_{13} = M_v$ (Düşey yönde sınırlandırılmış(constrained) modül)

$C_{44} = G_{vh}$ (Simetri düzlemini de içeren düşey kayma modülü)

$C_{66} = G_{hh}$ (Yatay düzleme ait kayma modülü)

$C_{12} = M_h^2 - 2G_{hh}$

Bağımsız malzeme sabitleri olan C_{11}, C_{33}, C_{44}, C_{66} ve C_{13} ün bilinmesi halinde anizotropik parametreler, aynı araştırmacılar tarafından, aşağıda verilmiştir (Not: sismik dalgalar ile modüller arasındaki ilişki için Fioravante ve Capoferri, 2001 (9) çalışmasına bakılabilir).

$$\nu_{hh} = \frac{C_{12}M_V - C_{13}^2}{M_H M_V - C_{13}} \quad (7)$$

$$\nu_{vh} = \frac{C_{13}M_H - C_{12}C_{13}}{M_H^2 - C_{12}^2} \quad (8)$$

$$\nu_{hv} = \frac{C_{13}M_H - C_{12}C_{13}}{M_V M_H - C_{13}^2} \quad (9)$$

$$E_v = \frac{|C|}{M_H^2 - C_{13}^2} \quad (10)$$

$$E_h = \frac{|C|}{M_V M_H - C_{13}^2} \quad (11)$$

$|C|$ teriminin değeri, aşağıdaki ifadeden elde edilebilir.

$$|C| = \begin{vmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13}\\ C_{12} & C_{11} & C_{13}\\ C_{13} & C_{13} & C_{33}\end{vmatrix} \quad (12)$$

2.4. Graham ve Houlsby Yöntemi ile Anizotrop Elastik Parametrelerin Elde Edilmesi

Düzlem anizotrop bir malzeme için gerilme ve deformasyonlar arasındaki ilişki için aşağıda verilen eşitlik yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^* & J \\ J & 3G^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} \tag{13}$$

Denklem (13)'deki ifadenin tersi alınarak, uygunluk matrisi cinsinden bir tanımlama yapılabilir.

$$\begin{bmatrix} \delta v \\ \delta \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C1 & C2 \\ C2 & C3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{bmatrix} \tag{14}$$

Bir üç eksenli basınç deneyinde $\delta\sigma'_{11}, \delta\sigma'_{33}, \delta\varepsilon_{11}$ ve $\delta\varepsilon_{33}$ ölçümlerinden yararlanarak $\delta p', \delta q, \delta v$ ve $\delta\varepsilon$ artımları hesaplanabilir. Bu artımların, denklem (13) de yerine konulması ile, üç bilinmeyenli iki denklem elde edilir. Bu durumda, bilinmeyenler elde edilemezler. Farklı $\delta q / \delta p'$ oranına sahip, en az iki deney yapılması, anizotropik parametrelerin bulunması için asgari koşuldur. Deney sayısının ikinin üzerine çıkması durumunda, gereğinden fazla bilgi söz konusu olacaktır. Öte yandan kilin gerçek davranışının ideal koşullardan bir miktar farklı olması, deneye maruz kalan örneklerin tamamen aynı olmamaları ve deneysel ölçümlerdeki hatalar nedeniyle, deney verileri kullanılarak oluşturulan denklemlerin bir ölçüde uyumsuz olmaları söz konusu olacaktır. Bu amaçla, benzer denklem takımları kullanılarak, amaçlanan parametrelerin en olası değerlerinin elde edilmesi için, kabul gören yöntemlerden birisi de " en küçük kareler" yöntemidir.

Bu yöntemde, gerilmeler bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Üç eksenli basınç deneyinden $\delta p'$ ve δq ölçüm değerlerinin elde edilmesi ile, (14) numaralı denklem kullanılarak, buna karşılık gelen "hesaplanmış" hacimsel deformasyonların elde edilmesi mümkündür.

$$\delta v_c = C_1 \delta p' + C_2 \delta q \tag{15}$$

Öte yandan $\delta p'$ ve δq gerilme artımlarına karşılık gelen, hacimsel deformasyon δv değeri ise, gerçekte deney sırasında ölçülmüştür. Hacimsel deformasyondaki bu hata δv_e olarak ifade edilirse, hata miktarı, aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\delta v_e = \delta v_c - \delta v = C_1 \delta p' + C_2 \delta q - \delta v \tag{16}$$

Benzer şekilde, hesaplanan kayma deformasyonu hatası ise, aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\delta \varepsilon_e = \delta \varepsilon_c - \delta \varepsilon = C_2 \delta p' + C_3 \delta q - \delta \varepsilon \tag{17}$$

Yapılan deneylerden bulunan deformasyon hatalarının kareleri toplamı, şu şekilde yazılabilir.

$$e = \left(C_1\delta p' + C_2\delta q - \delta v\right)^2 + \left(C_2\delta p' + C_3\delta q - \delta\varepsilon\right)^2 \quad (18)$$

Burada, C_1, C_2, C_3 parametrelerinin elde edilmesi için, hataların kareleri toplamının, bilinmeyenlere göre türevlenip sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir.

$$\partial e / \partial C_1 = \sum 2\left(C_1\delta p' + C_2\delta q - \delta v\right)\delta p = 0 \quad (19)$$

$$\partial e / \partial C_2 = \sum 2\left(C_1\delta p' + C_2\delta q - \delta v\right)\delta q + 2\left(C_2\delta p' + C_3\delta q - \delta\varepsilon\right)\delta p = 0 \quad (20)$$

$$\partial e / \partial C_3 = \sum 2\left(C_2\delta p' + C_3\delta q - \delta\varepsilon\right)\delta p = 0 \quad (21)$$

Elde edilen sisteminin çözümü, aşağıda verilen matrisin çözümü olarak ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sum \delta v\delta p \\ \sum \delta v\delta q + \delta\varepsilon\delta p \\ \sum \delta\varepsilon\delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \delta p^2 & \sum \delta q\delta p & 0 \\ \sum \delta p\delta q & \sum \delta q^2 + \delta p^2 & \sum \delta q\delta p \\ 0 & \sum \delta p\delta q & \sum \delta q^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Daha genel bir çözüm ise, Denklem (23) olarak verilen ve $\delta v, \delta\varepsilon$ ölçümlerine sırası ile uygulanan w_1 ve w_2 ağırlık katsayılarını içeren, matris çözümüdür.

$$\begin{bmatrix} \sum w_1\delta v\delta p \\ \sum w_1\delta v\delta q + w_2\delta\varepsilon\delta p \\ \sum w_2\delta\varepsilon\delta q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_1\delta p^2 & \sum w_1\delta q\delta p & 0 \\ \sum w_1\delta p\delta q & \sum w_1\delta q^2 + w_2\delta p^p & \sum w_2\delta q\delta p \\ 0 & \sum w_2\delta p\delta q & \sum w_2\delta q^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Denklem (23)kullanılarak C_1, C_2, C_3 değerleri saptanabilir. Daha sonra K^*, G^* ve J, parametreleri, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

$$K^* = C_3 / \left(C_1C_3 - C_2^2\right) \quad (24)$$

$$G^* = C_1 / \left(C_1C_3 - C_2^2\right) \quad (25)$$

$$J^* = -C_2 / \left(C_1C_3 - C_2^2\right) \quad (26)$$

Daha genel bir karşılaştırma için, A^*, B^* ve α parametrelerine dönüşüm yapılabilir. Bu durumda, aşağıda verilen ifadeler yazılabilir.

$$A^* = K^* + \frac{4}{3}G^* + \frac{4}{3}J \quad (27)$$

$$\alpha = \left[\sqrt{9\left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right)^2 + 8\left(3K^*G^* - J^2\right)} - \left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right)\right] \Big/ 2A \qquad (28)$$

$$B^* = \left(K^* - \frac{2}{3}G^* + \frac{1}{3}J\right) \Big/ \alpha \qquad (29)$$

İzotrop bir malzemede $\nu = B/(A+B)$ olduğu için benzer şekilde anizotrop bir malzemede $\nu^* = B^*/(A^* + B^*)$ büyüklüğü tanımlanabilir. Son olarak, Denklem (30) ile verilen E^*, aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$E^* = \frac{(1+\nu^*)(1-2\nu^*)}{(1-\nu^*)} \qquad (30)$$

Öte yandan Lings ve ark (1) tarafından, Graham ve Houlsby (1983) yöntemi ile, yukarıda elde edilen α, ν^* ve E^* parametrelerinin, anizotropik beş elastik parametre ile ilişkisi, kaynaklarda yaygın kullanılan gösterimle, aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
E_v &= E^* \\
E_h &= \alpha^2 E^* \\
\nu_{vh} &= \nu^*/\alpha \\
\nu_{hh} &= \nu^* \\
G_{hv} &= \alpha E^*/2(1+\nu^*) \\
G_{hv} &= \alpha^2 E^*/2(1+\nu^*)
\end{aligned} \qquad (31)$$

3. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma için, Tarsus ili Yenice ilçesinden temin edilen, örselenmemiş killi zemin örnekleri kullanılmıştır. Söz konusu kilin seçiminde, yumuşak kıvamda bulunması, hafifçe konsolide olma özelliğini içermesi ile anizotropik elastik sabitlerinin, "Graham ve Houlsby (1983)" tarafından önerilen yönteme daha uygun bulunması, önemli rol oynamıştır. Aşağıda; söz konusu kilin endeks özellikleri ve gerekli üç eksenli basınç deneyleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çizelge 1. Zemin parametrelerine ait değişim aralıkları

Zemin Özellikleri	**Değişim Aralığı**
Doğal Su İçeriği, %	24.4-28.2
Likit Limit, %	41.3-67.3
Plastik Limit, %	13.7-22.5

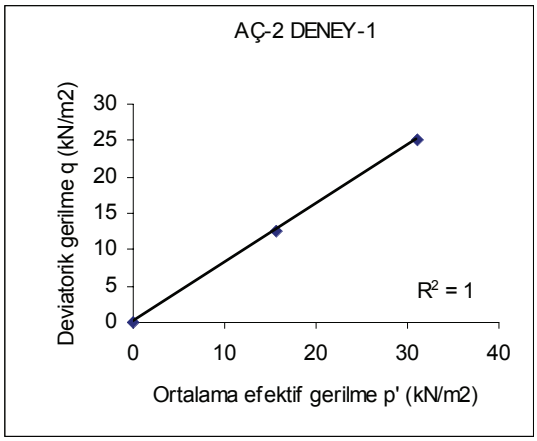
Plastisite Indisi, %	27.6-44.8
# 4 Elekten Geçen, %	99.5-100
# 200 Elekten Geçen, %	78.3-99.7
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, q_u (kN/m^2)	94.9-140.9
Doğal Birim Hacim Ağırlığı,(gr/cm^3)	1.90-1.96
Özgül Ağırlık, G_s	2.61-2.63
Grup Sembolü	CL-CH

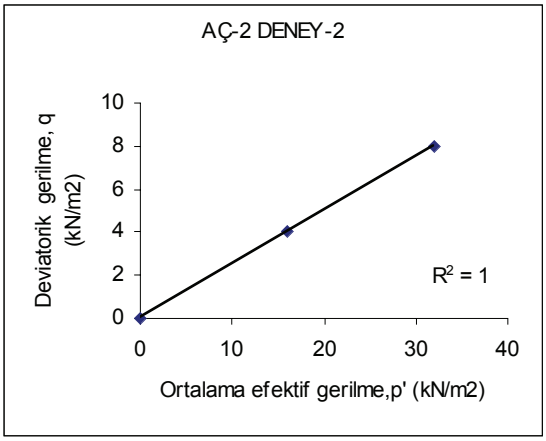
Deneysel çalışma, açılan, AÇ-1 ve AÇ-2 araştırma çukurlarından temin edilen örselenmemiş örnekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma, her araştırma çukuru için iki adet, belirli sabit gerilme izli ($\Delta q / \Delta p = \text{sabit}$) ve yük kontrollü üç eksenli basınç deneylerini içermektedir. Numuneler başlangıçta doyurma işlemine tabi tutulmuşlardır. Doyurma işleminin bitiminde örnekler, yerinde tahmin edilen (in-situ) gerilmelere, K_0 koşulunda, konsolide edilmiştir. Bu işlem, Japon Standardı, JGS-0525-2000, izlenerek gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırasında zemin örneğine uygulanacak olan nihai düşey ve yatay gerilme düzeylerine, yatay deformasyonun 0.005 düzeyinin altında kalması koşulu ile, gerilmelerin kademeli olarak artırılması ile ulaşılmıştır. Uygulanan K_0 değeri için, 0.65 değeri seçilmiştir.

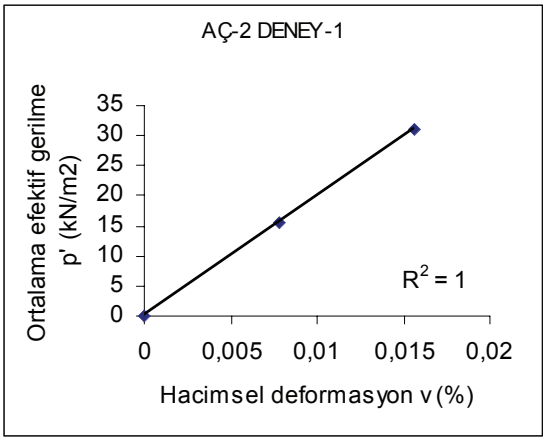
Toplam iki takım sabit yük kontrollü üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiş ve her takım da iki adet zemin örneği, p'-q düzleminde, farklı gerilme izi eğimlerine sahip olacak şekilde yüklenmişlerdir. Birinci deney takımında uygulanan gerilme izi eğimleri ($\Delta q/\Delta p$), sırası ile 0,25 ve 0,80 olarak, ikinci deney setinde ise 0,77 ve 0,30 olarak seçilmişlerdir. (Deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için tasarlanan "yük kontrolü üç eksenli basınç düzeneği" ve deneylere ait detaylar, yazarların, bir diğer makalesinde detaylı olarak verilmiştir (10). Bu işlemin gerçekleştirilmesi için şu işlem sırası takip edilmiştir: İlk aşamada zemin örneğine uygulanacak olan gerilme izi, $\Delta q/\Delta p$ oranı, seçilmiştir. Daha sonra bu oranı gerçekleştirecek Δq artım miktarı seçilerek, buradan Δp artım miktarı hesaplanmıştır. Sonra $\Delta q=1/3(\sigma_1+2\sigma_3)$ ilişkisinden yararlanılarak zemine uygulanması gereken çevre basıncı, σ_3, eksenel basınç σ_1 değerleri hesaplanmıştır. Deney örneğine uygulanması gereken deviatorik gerilme, $(\sigma_1-\sigma_3)$, çevre basıncı, σ_3, artım miktarları, en az üç kademeye bölünerek örnek üzerine uygulanmışlardır. Ayrıca her kademede boşluk suyu basınçlarının artımları izlenmiş ve boşluk suyu basıncının yükselme eğilimi durduğunda, diğer kademeye geçilmiştir. Anizotropik konsolidasyonu izleyen safhada, gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan (p-q), (p-v) ve (q-ε) ilişkileri Şekil 1.a, Şekil 1.b, Şekil 1.c, Şekil 1.d de verilmiştir.

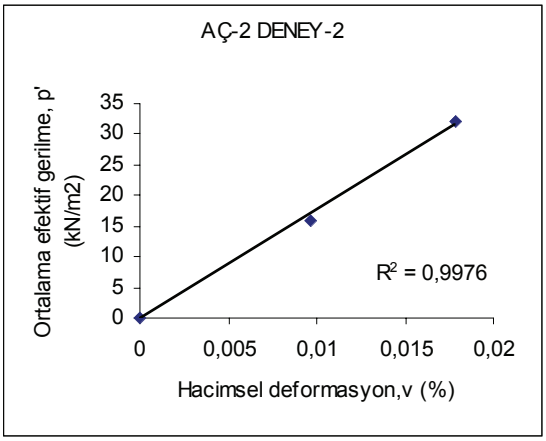
Deneysel çalışmanın farklı aşamalarında kullanılmak üzere, üç eksenli basınç hücresi tabanında bulunan kanallardan birine, 700 kPa kapasiteli basınç transduser'i bir diğerine ise zemin örneğine ait hacim değişimlerini ölçebilen "hacim değiştirme transduseri" monte edilmiştir. Bu çalışmada, ELE firmasından temin edilen ve hacim değişimlerini elektriksel yolla ölçebilen, 0.01cm3 hassasiyetli, bir hacim değiştirme transduser'i kullanılmıştır. Yükleme sonucunda zemin örneğinde meydana gelen eksenel boy değişimlerini ölçmek amacıyla, bir adet LVDT deplasman transduser'i kullanılmıştır.

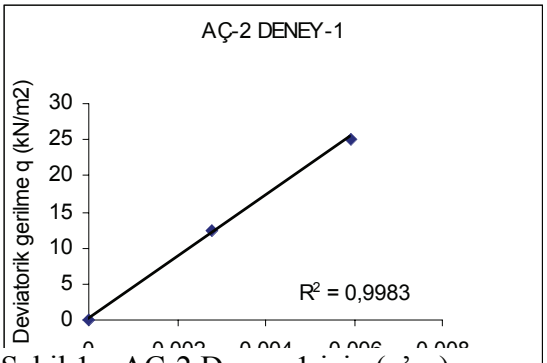
Deney süresince sonuçların okunması ve kaydedilmesi için, EL27-1495 seri numaralı ve 8 kanal girişli ADU (Autonomous Data Acquisition) veri kayıt (data logger) cihazı kullanılmıştır.

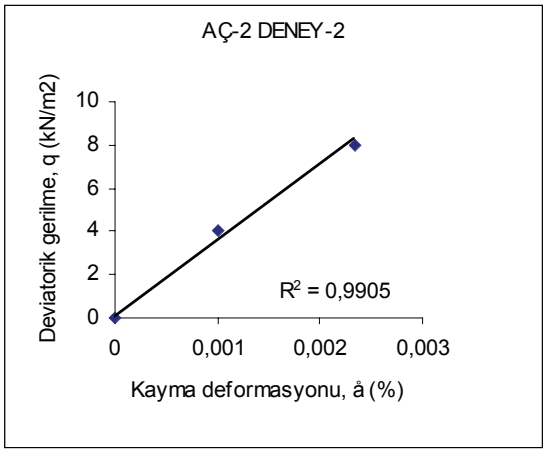




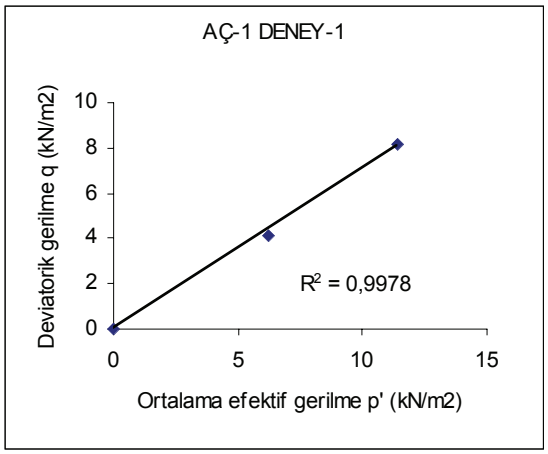


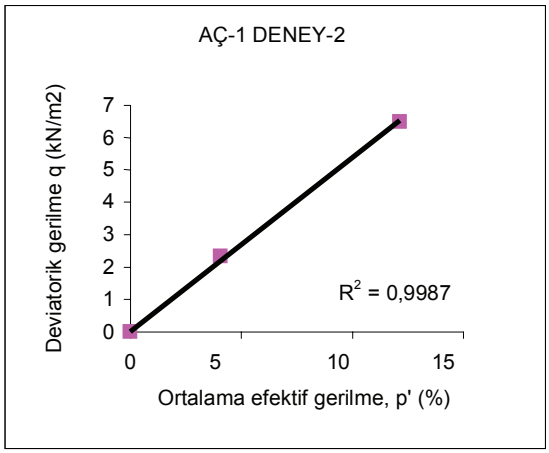


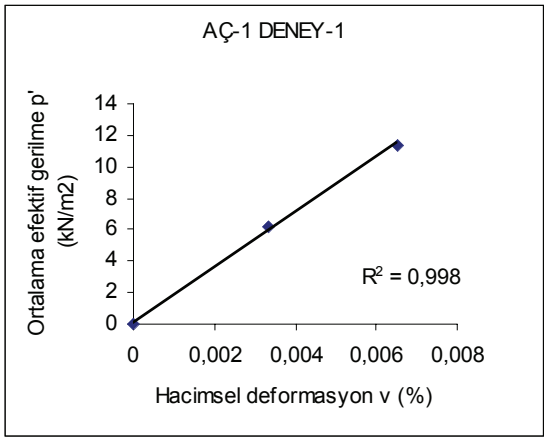


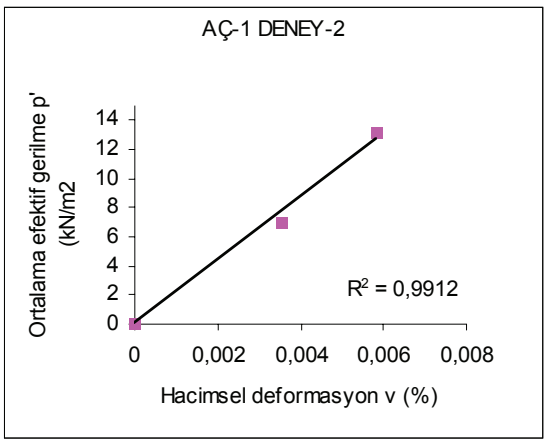


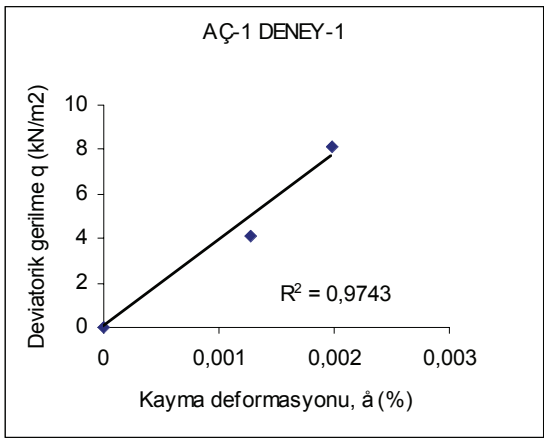
Şekil 1.a AÇ-2 Deney-1 için (p'-q), (p'-v) ve (q-ε) ilişkileri

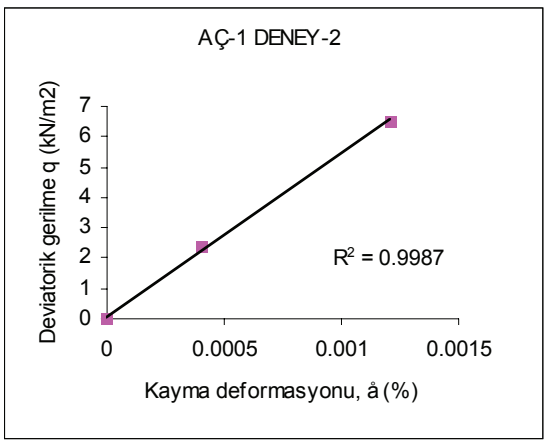












Şekil 1.c. AÇ-1 Deney-1 için (p'-q), (p'-v) ve (q-ε) ilişkileri

Şekil 1.d. AÇ-1 Deney-2 için (p'-q), (p'-v) ve (q-ε) ilişkileri

4. Yenice Kilinde Düzlem Anizotropik Elastik Parametrelerin elde edilmesi

(1) numaralı şekillerden elde edilen deneysel veriler kullanılarak, anizotropik elastik parametreler hesaplanabilir. Bu amaçla, yukarıda verilen (p-q), (p-v) ve (q-ε) ilişkilerinden alınan ve hesaplamalara girecek olan ham veri değerleri Çizelge 2 de verilmiştir.

Çizelge 2 Anizotropik parametreler için en küçük kareler çözümüne giren ham veri değerleri

Test No	σ_{vc} (kPa)	δp' (kPa)	δq (kPa)	δv (%)	δε (%)
AÇ-2 DENEY1	110	31.04	25	1.5579	0.5954
AÇ-2 DENEY2	110	32.06	8	1.7821	0.2352
AÇ-1 DENEY1	110	6.18	4.75	0.3323	0.1273
AÇ-1 DENEY2	110	7.4	2.330	0.3547	0.04053

Her grup için, $\alpha\sqrt{\delta p'^2 + \delta q^2} = 0.1\sigma_{vc}$ ilişkisi sağlanacak şekilde, bir α katsayısı belirlenmiş ve her grubun ham verilerine ait, her dört elemanı, α katsayısı ile çarpılarak küçültülmüştür.. Bu işlemin amacı, her veri grubunun en küçük kareler yöntemine eşit ağırlıklı olarak girmesini sağlamaktır. Burada σ_{vc} bu zemine ait ön konsolidasyon basıncını göstermektedir

Anizotropik elastik parametrelerin hesabında, yukarıda verilen, hesaplama yöntemi kullanılmıştır. İşlemleri hızlı ve kolaylıkla yapabilecek özellikte bir program, "mathematica" ile oluşturulmuştur Anizotropik elastik parametreler, bu program yardımı ile elde edilmiştir. Söz konusu program kullanılarak, AÇ-1 ve AÇ-2 muayene çukurlarından alınan zemin örneklerine ait, çıktı parametreleri hesaplanmıştır. Bulunan bu parametreler, (31) eşitliklerinde yerlerine konularak, altı elastik parametre bulunmuştur. Söz konusu değerler Çizelge 3 de verilmiştir. Aynı çizelgede görülen, ν_{HV} parametresi ise, (2) numaralı eşitlik yardımıyla saptanmıştır.

Çizelge 3. Yenice kilinde deneysel ölçülen anizotropik elastik modüller

Örnek adı	K^*/P_c	G^*/P_c	J^*/P_c	ν^*	α^2	E_V (kPa)	E_H (kPa)	ν_{VH}	ν_{HH}	G_{VH} kPa)	G_{HH} (kPa)
AÇ-1	17.92	11.45	0,620	0.215	1.27	3303	4211	0.19	0.21	1535	1733
AÇ-2	16.91	11.86	0.419	0.197	1.25	3307	4134	0.18	0.20	1533	1701

Çizelgede verilen, anizotropik elastik modüller incelendiğinde, her iki muayene çukuruna ait, deneylerden elde edilen değerlerin, birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sonuçların birbirini desteklemesi, deneysel çalışmadan elde edilen parametrelerin güvenirliğini artırmaktadır.

SONUÇ

Zeminlerin oluşum sırasında ve sonrasındaki evreler anizotrop karakter kazanmalarına neden olmaktadır. Zemin özelliklerinin yatay yönde pek değişmemesi nedeni ile zeminler düzlemsel anizotrop malzemeler olarak kabul edilebilirler. Ne varki zemine ait anizotropik özelliklerin tespit edilmesi oldukça güçtür ve gelişmiş deney düzeneklerini gerekmektedir.

Graham ve Houlsby (1983) tarafından, bilinmeyenlerin sayısını üçe indirgeyen ve E^* ,ν^* ve α dan oluşan, üç parametreli bir çözüm önerilmiştir. Söz konusu çözüm yöntemi kullanılarak normal konsolide Yenice kiline ait, beş bağımsız düzlemsel anizotropik malzeme sabitleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1) *Lings, M.L., Pennington, D.S. and Nash, D.F.T, 2000. "Anisotropic Stiffness Parameters and Their Measurements in a Stiff Natural Clay", Geotechnique 50, No.2, , P109-195*

2) *Gerrard, C.M., 1977. "Background to Mathematical Modelling in Geomechanics": The Roles Of Fabric And Stress-History. Finite Elements İn Geomechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., pp. 33-120*

3) *Yong, R.N., and Silvestri, V.,1979. "Anisotropic Behaviour of a Sensitive Clay". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, pp. 335-350.*

4) *Kırkgard, M.M. and Lade, P.V., 1991. "Anisotropy of Normally Consolidated San Francisco Bay Mud". GTJODJ, Vol. 14 No. 3, Sept., pp. 231-246*

5) *Graham, J. and Houlsby, G.T., 1983 "Anisotropic Elasticity of a Natural Clay," Geotecnique Vol. 33, No.2, pp. 165-180.Love, A.E.H., 1927. "Atreatise on Mathematical Theory of Elasticity". Dover Publicatios, New York)*

6) *Love, A.E.H., 1927. A Treatise on Mathematical Theory of Elasticity. Dover Publicatios, New York)*

7) *Bellotti, R., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.C.F. And O'neill, D.A. 1996. "Anisotropy Of Small Strain Stiffness İn Ticino Sand." Geotechniqu, Vol. 46, no.1, pp. 115-131*

8) *Love, A.E.H., 1959. A Treatise on Mathematical Theory of Elasticity. Cambridge University Press, 4th ed., 1 st ed. In 1982*

9) *Fioravente, V. And Capoferri, R., 2001. "On The Use of Multi-Directional Piezoelectric Transducers İn Triaxial Testing." Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 24 No. 3, September, pp. 243-255*

10) *Tekinsoy M. A., Taşkıran T., Yeni Bir Yük Kontrollü Üç Eksenli Deney Düzeneği İle Gerilme İzli Üç Eksenli Basınç Deneyleri, Çukurova Üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt 21, sayı 1-2, 2006*