

Kumların drenajlı davranışının mikromekanizmaya bağlı olarak endokronik teori kapsamında modellenmesi

Atila SEZEN*, Atilla ANSAL

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Mikroskobik değişkenlerin ve bunların şekil değişimi ile birlikte değişimlerinin belirlenmesi ve tanecikli ortama ait bu değişkenlerle sürekli ortam arasındaki bağlantının sade ve basit bir şekilde kurulması oldukça önemli ve büyük bir sorundur. Bu çalışmada, mikroskobik sürece ait içsel durum değişkenlerine dayalı olması ve sürekli ortamda tanımlanabilen bünye ifadelerine olanak vermesinden dolayı, endokronik teorisinin olanakları geliştirilmeye çalışılmıştır. Zemin davranışının mikro ölçekte gerçekleşen sürecinin anlaşılması amacıyla, ilkin, hangi mikro ölçek değişkenlerinin zemin davranışını izah edebileceği tartışılmıştır. Daha sonra, zeminlerin şekil değiştirmesinin mikromekanizması bir seri sava bağlı olarak izah edilerek, endokronik bünye ifadeleri elde edilmiştir ve önerilen modelin öngörü kapasitesi drenajlı üç eksenli basınç koşulları için irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin modelleri, kum, mikromekanizma, endokronik model.

Micromechanism-based endochronic modeling of sand behavior

Abstract

The observed macroscopic properties of soil behaviour is mainly the manifestation of microscopic mechanism during deformation. Consequently, modeling of soil behaviour should ideally be based on the microscopic process determining the behaviour. But, observation and determination of the related microscopic properties and parameters is a difficult and time consuming process. Besides this problem, the link between the microscopic particulate medium and continuum medium is another problem and usually very complex relations have been proposed. One of the main advantage of endochronic theory is its fundamental philosophy which bases the phenomenology of the soil behaviour on the internal state variables that need not to be observed. The first part of this study focuses on the arguments related with micro variables that are supposed to be controlling macroscopic soil behaviour. It is aimed to determine the important micro variables and consequently to propose a general hypothesis about the micromechanism of deformation process in sands. Regarding to the perspective gained by the proposed hypothesis for the micromechanism of soil deformation, constitutive relations are obtained and the predictive capacity of the proposed model is investigated by modeling of drained triaxial tests conducted on sands. It has been seen that stress-strain behaviour can well be modelled while observed softening phenomena still needs to be more clearly formulated in the model.

Keywords: Soil Models, sand, micromechanism, endochronic model.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Atila SEZEN. asezen@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 65 81.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Kum davranışının mikromekanizmaya dayalı olarak endokronik teori kapsamında modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.12.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.12.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Herhangi bir sürecin modellenmesi, sürecin gelişimini belirleyen yasaların ortaya konması ile sürecin söz konusu yasalara uygun biçimde matematikselleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Bu şekilde, bir seri matematiksel işlem vasıtasıyla fiziksel bir süreç sayısal olarak elde edilebilir. Bir başka deyişle, üzerinde çalışılan sürecin belirli durumlarda nasıl gelişeceği ve ne şekilde sonuçlanacağı öngörülebilir. Bu çalışmanın amacı, kumların davranışlarının modellenmesidir ve çalışmanın ana eksenlerinden birisi, kum davranışını belirleyen yasaları ortaya koymak, bir başka deyişle davranışın mekanizmasını aydınlatmak iken bir diğer ana eksen ise ortaya konan bu mekanizmanın matematiksel dille ifade edilebilmesidir.

Aslında, zeminlerin modellenmesi konusunda yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, zaten bulunduğu ve yeterince izah edilebildiği varsayılan zemin davranışının formüle edilebilmesi noktasında yoğunlaşmaktadır. Ancak, zemin davranışının gerçek fiziksel süreci henüz tam olarak aydınlatılamamış ve zemin davranışı herkesin üzerinde anlaştığı bir mikromekanizma teorisine dayandırılmamıştır. Bunun yanı sıra, uzun yıllar boyunca, plastisite teorisi kapsamında yürütülen modelleme çalışmalarında, belirli bir yerden sonra, plastisite teorisinin gerektirdiği kavramsal ve varsayımsal çerçevenin ötesine geçme zorunluluğu doğmuştur. Günümüze kadar geliştirilmiş olan çok sayıda matematiksel model, zeminlerin gerilme-şekildeğiştirme davranışlarını, görece basit yükleme koşulları için, gerçeğe oldukça yakın bir şekilde öngörebilmektedir. Ancak, çok eksenli gerilme izleri ve çevrimsel yükleme koşulları altında zemin davranışının karmaşıklaşması ve modelleme için gerekli parametre sayısının artması sonucunda, gerçekçi sonuçlar veren ve aynı zamanda uygulama açısından basit olan bünye ifadelerinin elde edilmesi henüz ulaşılamamış bir noktadır.

Birçok araştırmacı, zemin davranışının mikromekanizmasının ortaya konması ve zemin modellerinin buna uygun olarak oluşturulması gerektiğini savlamaktadır (Oda vd., 1998; Wan ve Guo, 2001). Zemin davranışının, mikro ölçekte

belirleyici olan mikro değişkenlere bağlı olarak tanımlanabilmesi, bir başka deyişle, zemin davranışını belirleyen fiziksel mekanizmanın belirlenmesi tüm modelleme çalışmalarının nihai hedefidir. Ancak, modelleme çalışmalarında günümüzde gelinen nokta, zeminin ayrık eleman olarak ve sürekli ortam olarak ele alındığı iki temel modelleme yaklaşımı arasındaki bağlantının uygun bir şekilde oluşturulmasıdır. Zemin gibi oldukça heterojen olan bir malzemenin taneler boyutta ifade edilebilmesi birçok kabulü ve varsayımı gerektirmekte, sürekli ortam olarak incelenmesi ise mikro ölçekte gerçekleşen şekil değiştirme mekanizmasını yeterince içermemektedir. Dolayısıyla, her iki yaklaşımın uygun bir şekilde kaynaştırılması zeminlerin modellenmesinde önemli bir açılım sağlayabilecektir. Mikro ölçek ile özsel bir bağlantısı bulunması nedeniyle endokronik teorisin bu yaklaşımı sağlayabilecek bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada, zemin davranışının endokronik bünye denklemleriyle uygun bir şekilde modellenebileceği inancıyla yola çıkılarak, endokronik teorisin ve her türlü modelleme çalışmasının, mikro sürecin gerçek fiziksel gelişimine dayalı olması gerektiği düşüncesiyle hareket edilerek, şekil değiştirmenin mikro mekanizmasına dayalı endokronik bünye denklemleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu hedefe ulaşılması amacıyla, zemin davranışının modellenmesindeki temel sorunlar ortaya konulmuş ve çalışmanın yapısı bu şekilde kurulmuştur. Buna göre;

- (i) Zeminlerde, şekil değiştirme sürecinin mikromekanizmasının izah edilmesi,
- (ii) Buna bağlı olarak, uygun ve doğru mikro ölçek değişkenlerinin belirlenmesi,
- (iii) Mikro süreci yansıtabilecek şekilde, bünye denklemlerinin, uygun form ve matematiğinin ortaya konması.

Şekil değiştirmenin mikromekanizması

Taneler boyutunda uygulanan gerilmeler altında temas noktalarında farklı büyüklüklerde temas kuvvetleri oluşmaktadır. Herhangi bir anda, oluşan kuvvetlerin temas noktalarındaki direnci aştığı temaslarda kaymalar oluşmaktadır. Bunun sonucunda yığın içindeki taneler yeniden düzenlenmekte ve uygulanan gerilmeler kayma gös-

termeyen temaslar tarafından taşınmaktadır. Tokue (1979), verili sabit bir gerilme durumu altında gerilmeleri taşıyan temaslar ve gerilmeleri taşımayan temaslar olarak bir yığın içindeki mevcut temas noktalarını iki ana gruba ayırır ve gerilme taşımayan temasları serbest temas olarak adlandırırken, gerilme taşıyan temasların da sınır dengede olanlar ve kararlı dengede olan temaslar olarak iki farklı durumda olacağını belirtir. Kritik temaslar, gerilmeleri karşılayan en zayıf temaslar olarak genel olarak gerilmeleri destekleyen yük sütunları içinde yer almaktadırlar. Bu durumda, gerilme seviyesinin bir sonraki aşamasında kaymanın bir kısmı dengenin bozulduğu kritik temaslarda oluşurken bir kısmı da serbest temas noktalarında oluşacaktır. Buna göre, herhangi bir taneler yığını içinde, taneler arasındaki görelî hareket kararlı temaslara sahip rijit tanecik grupları tarafından sınırlandırılmaktadır. Serbest temasların bir kısmında oluşan kaymaların kayma şekil değiştirme sürecinde etkisi olmadığı kabul edilir. İlerleyen bir şekil değiştirme sürecinde herhangi bir anda taneler arasındaki kayma temasların çoğunluğunda oluşmaktadır. Şekil değiştirme, herhangi bir anda mevcut rijit tanecik grupları arasındaki görelî hareket sonucunda meydana gelmekte ve bu gruplar sürekli olarak ayrılma ve birleşme yoluyla yeniden oluşmaktadır (Horne, 1965).

Plastisite teorisinde şekil değiştirme artımının gerilmelerle ifade edilen plastik potansiyel eğrisine dik olmasına benzer şekilde mikro ölçekte de şekil değiştirme artımı yönünün taneler arası temas yüzeyine teğet olduğu söylenebilir. Bu üç boyutlu izah, klasik üç eksenli basınç durumuna uyarlanacak olunursa, σ_1/σ_3 gerilme oranı artıkça temas normalleri σ_1 yönüne (büyük asal gerilme yönü) doğru evrilirken, temas teğetleri σ_3 yönüne (küçük asal gerilme yönü) doğru evrilerek şekil değiştirme yönü σ_3 yönüne dönmekte, yani, bir başka deyişle genişleme artmaktadır. Dolayısıyla, genişleme davranışı gösteren sıkı bir zemin doruk mukavemetine ulaştığında, genişlemenin de maksimum değerini göstermesi de bu perspektifle izah edilebilir; doruk noktada, temas normallerinin büyük asal gerilme yönünde yoğunlaşacak şekilde dönmeleri ve bu mekanizma sonucunda bu yönde oluşan yük

sütunları sayesinde zeminin doruk mukavemet göstermesi gerçekleşirken, kayma şekil değiştirme yönünü ifade eden temas teğetleri de küçük asal gerilme yönüne doğru evrilmekte ve bu yöndeki maksimum değerine ulaşarak genişlemenin maksimum değerine ulaşmasına neden olmaktadır.

Zemin yeterince sıkı değilse, büyük asal gerilme yönünde oluşan yük sütunlarına paralel olarak yer alan boşluk sütunun varlığı ile belirginleşen bu yapı, büyük asal gerilme yönünde oluşacak bir yükleme ya da küçük veya orta asal gerilme yönünde oluşacak bir yükleme boşaltması sonucunda aniden değişecektir. Yumuşama olarak da adlandırılabilir olan söz konusu olayın aniden meydana gelmesi de yumuşamanın şekil değiştirmeden ziyade, temasların dağılması sonucunda meydana gelen gerilme düşmesi nedeniyle oluştuğunu göstermektedir. Bu mekanizma doruk sonrası ani mukavemet yitimini izah edebilmektedir. Öte yandan, zeminin yeterince sıkı olması durumunda, ani bir göçmeye neden olacak boyutta belirgin bir boşluk sütunu oluşmayacağından doruk sonrası mukavemet yitimi söz konusu olmayacaktır. Bu durumda, bu noktaya kadar oluşan ve giderek pekleşmiş bulunan yapı bozulmadan, şekil değiştirme yönü küçük asal gerilme yönünde olacak ve dolayısıyla zemin genişleme davranışını sürdürecektir. Ayrıca, sıkı kumlarda gerek temas normalleri ve gerekse de boşluk oranı açısından asal gerilme yönlerinde belirgin bir eğilim olmadığı için belirgin bir doruk mukavemeti ve sonrasında yumuşama gözlenmemektedir.

Bu çalışma kapsamında incelenen araştırmaların, deneysel verilerin ve gözlemlerin sonucunda, granüler bir malzeme olarak kumlarda şekil değiştirmenin mikromekanizması şu şekilde tasvir edilmiştir;

- (i) Temas normallerinin büyük asal gerilme yönüne doğru dönmeleri,
- (ii) Büyük asal gerilme yönünde yük sütunu oluşumu ve temas alanlarının artması: pekleşme,
- (iii) Küçük asal gerilme yönündeki hareketin giderek artması:

- (iv) Boşluk oranı heterojenliğinin giderek artması,
- (v) Kaymaların gerçekleştiği tanelerin (mikro-ölçek) belirli bir mikro düzlem oluşturacak şekilde öbekleşmesi (mezo-ölçek) ve bu öbekleri giderek gözlemlenebilir kayma düzlemleri oluşturması (makro-ölçek),
- (vi) Yük sütunlarının bükülmesi, dağılması, kayma bantlarının oluşumu,
- (vii) Sabit hacim ve sabit şekil değişme hızına (kritik durum) ulaşılması,

Yukarıda tasvir edilen mikromekanizmanın, özellikle pekleşme ve genişleme davranışının bünye denklemlerinde ifade edilmesi aşamasında nasıl dikkate alınabileceği bu çalışmanın önemli bir boyutunu oluşturmaktadır. Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucunda, gerek zemin yapısının tanımlanmasında ve gerekse de bu yapının şekil değişimi ile birlikte değişimini yansıtmada temas normali ve temas normallerinin dağılımı, temas sayısı (koordinasyon sayısı) ve boşluk oranının anizotropik dağılımı, bir başka deyişle boşluk oranının yön bağımlı özellikleri gibi mikro ölçek değişkenlerinin önemli bir yere sahip oldukları belirlenmiştir. Ancak bu kez de sorun, mikro ölçeğe ait değişkenlerin sayısal değerlerinin ve bunların şekil değişimi ile değişimlerinin belirlenmesi ve bu mikro değişkenlerin hangi makroskobik ve gözlemlenebilir değişkenlerle ve nasıl ilişkilendirilebileceğinin ortaya konmasıdır. Bu noktada ayrıca, deney esnasında ölçülebilen gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin dışında, ölçülebilen değişkenlerin çeşitli kombinasyonlarının ortaya konması da oldukça önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, örneğin mobilize olmuş içsel sürtünme açısı, gerilme oranı, plastik şekil değiştirme, ölçülebilen değişkenlerin değişim hızları vb. veriler de önem kazanmaktadır.

Endokronik teori

1970'lerin başında, plastisite teorisi, sürekli ortam mekaniği, termodinamik ve içsel değişkenler teorisi bağlamında ulaşılan teorik birikim üzerine inşa edilen endokronik teorisinin en çekiçi yanı, zemin davranışını belirleyen sayısız parametrenin gözlemlenebilir olması gerektiği noktasından yola çıkması ve klasik plastisitede olduğu gibi herhangi bir akma yüzeyinin tanım-

lanmasının gerekmemesidir (Valanis, 1971). Hatta, teorisinin kuramsal temeli geliştirilerek, plastisite teorisinin endokronik teorisinin özel bir hali olduğu gösterilmiştir (Valanis, 1980). Endokronik teorisinin dayandığı temel noktalardan birisi, malzemenin içsel enerjisini yansıtan bir grup içsel durum değişkeninin varlığı ve bunların hızının diferansiyel ifadelerle belirlenebilir olmasıdır. İçsel durum değişkenlerinin sayısal olarak ifade edilmesi amacıyla malzeme için bir entropi fonksiyonu tanımlanır ve bu fonksiyonun içsel durum değişkenleriyle ilişkisi tanımlanarak, malzemenin şekil değiştirme sürecini ifade eden bünye denklemlerine ulaşılabilir. Dolayısıyla sorun, gözlemlenebilir olması gerekmeyen bir seri içsel durum değişkeninin yükleme ve şekil değiştirme sürecindeki gelişimini veren matematiksel ifadelerin elde edilmesine dönüşmektedir. İçsel durum değişkenlerinin gelişim süreci ise, söz konusu malzemeye özgü bir tür zaman skalasına bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Öte yandan, gelişimi içinde iki ana ekol altında toplanabilecek olan endokronik teori uygulamasında, bu çalışmada Bazant-Ansal-Cuellar (Ansal v.d., 1979; Bazant ve Krizek, 1976; Cuellar, 1974) ekolu olarak tanımlanan grubun yaklaşımı benimsenmiştir.

Zemin davranış özellikleri ile reel ilişkiler kurulmadan optimizasyon ile elde edilen model parametreleri nedeniyle endokronik teori sık sık basit bir eğri geçirme yöntemi olmakla eleştirilmiştir. Aslında, örneğin normal konsolide kiler üzerinde yapılan modelleme çalışmalarını başlatan Ansal (1977)'de yer aldığı gibi, model parametrelerinin büyük bir kısmı, başlangıç boşluk oranı, likitlik indisi vb. zemin özelliklerine bağlı olarak tanımlansa da, kayda değer sayıda model parametresi, bu tür bir fiziksel belirlemeden yoksun kalmıştır. Bu nedenle, Ansal, endokronik teorisinin gelişiminin, bünye ifadelerinde yer alan model parametrelerinin kesin fiziksel kökenlerinin belirlenmesi doğrultusunda sürdürülmesi gerektiğini dile getirmiştir. Endokronik teoride karşılaşılan bir diğer önemli sorun ise, malzeme parametrelerinin başlangıç değerlerinin kesin fiziksel esaslara oturtulamaması nedeniyle, birden fazla optimum sonuç elde edilmesi ve bu durumun da modelleme teorisini-

nin temel prensiplerinden biri olan biriciklik prensibine uymamasıdır. Ancak bu çalışmada belirlenen hedeflere ulaşılması, endokronik teoriye getirilen bu tür eleştirilerin geçerliliğini de ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir.

Bünye denklemlerinin elde edilmesi

Modelleme çalışmalarında günümüzde gelinen nokta, zeminin ayırık eleman olarak ve sürekli ortam olarak ele alındığı iki temel modelleme yaklaşımı arasındaki bağlantının uygun bir şekilde oluşturulmasıdır. Örneğin, sürekli ortama ait ve gözlemlenebilir gerilme ile ayırık ortamda tanesal boyutta bu gerilmenin neden olacağı temas kuvvetleri ve bu kuvvetlerin şekil değiştirme süreciyle birlikte değişiminin belirlenebilmesi başlı başına bir çalışma konusudur.

Bu çalışmada ise bir tür orta yol bulunmaya çalışılmıştır. Bu tür bir yaklaşımın benimsenmesindeki gerekçeler şunlardır:

Endokronik teoride malzemenin şekil değiştirme sürecinin formüle edilmesinde ifadeler içsel olarak dahil olan içsel durum değişkenlerinin gözlemlenebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle, içsel durum değişkenlerinin malzemenin içsel zamanıyla birlikte değişimlerini veren ifadelerde yer alan malzeme katsayıları ve malzeme değişkenleri deneysel olarak saptanmaktadır. Dolayısıyla, aslında gözlemlenebilir olması gerekmeyen içsel durum değişkenlerinin gözlemlenebilir etkileri vasıtasıyla bünye ifadelerinde yer alan malzeme değişkenleri belirlenebilmektedir ve bu nedenle bir kez şekil değiştirme süreci doğru olarak izah edilip, bu süreci belirleyen mikro ölçek değişkenleri ve içsel durum değişkenleri belirlendikten sonra bu çerçeveye uygun gözlemlenebilir değişkenler ve bunların çeşitli olası kombinasyonları kullanılarak mikroskobik süreç sayısallaştırılabilecektir.

Zemin gibi oldukça heterojen olan bir malzemenin tanesal boyutta ifade edilebilmesi birçok kabulü ve varsayımı gerektirmekte, sürekli ortam olarak incelenmesi ise mikro ölçekte gerçekleşen şekil değiştirme mekanizmasını yeterince içerememektedir. Dolayısıyla, her iki yaklaşımın uygun bir şekilde kaynaştırılması ze-

minlerin modellenmesinde önemli bir açılım sağlayabilecektir.

Endokronik teoride şekil değiştirme sürecinde tanelerin yeniden düzenlenmesi ile şekil değiştirmeler arasında deviyatör gerilmelerin neden olduğu değişimi yansıtmak üzere,

$$d\zeta = F(\epsilon, \sigma, \zeta) d\xi \quad (1)$$

ilişkisi önerilmiştir. Bu çalışmada da benzer bir format ele alınmıştır. Ancak, daha önceki çalışmalardan farklı olarak, içsel değişkenler mikroskobik şekil değiştirme mekanizması göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Bir başka deyişle (1) ifadesinde yer alan F fonksiyoneli yapı değişimi etkisinin daha çok vurgulandığı bir şekilde,

$$d\zeta = F(\text{yapı}) d\xi \quad (2)$$

olarak düşünülmüştür. F (yapı) olarak adlandırılan ve zeminin tüm yapısal özelliklerinin teorik olarak dahil edilebileceği tansörel bir fonksiyonel olup, bu fonksiyonelin içeriği olarak zeminin yapısal özelliklerinin ortaya konması, bu özelliklerin şekildeğişimi ile birlikte değişimi ve şekildeğişimini belirleyen mikro değişkenlere bağlı olarak tanımlanabilmesi ya da en azından bunun yolunun açılması, bu çalışmanın nihai hedefidir. Bu bağlamda ilk girişim, granüler bir yapının en önemli özelliğinin temas düzlemlerinin yönelimi olduğu (Oda ve Konishi, 1974) ve bunun da gerilme oranlarına bağlı olduğu ile ilgili birçok araştırmanın ve deneysel verinin dikkate alınmasıdır. Temas normallerinin dağılımı Oda (1978) tarafından yapı elipsoidi ile tanımlanır ve bu elipsoidin sayısal değeri eksenel simetri durumunda iki asal eksen için S_1/S_3 şeklinde ifade edilir. Oda (1978) ve Oda ve diğerleri (1985) bu değişkenle zemine uygulanan asal gerilme oranı ve genişleme arasında doğrusal ilişkiler elde etmiştir. Bu çalışmalara dayanarak, F(yapı) fonksiyonelinin ilk önemli bileşeni, eksenel simetri durumu için ortaya konmuştur. F fonksiyoneli, BAC ekolünde elde edildiği gibi, bir seri bileşenden oluşmuş bir şekilde ele alınabilir;

$$F = F_1.F_2.F_3... \quad (3)$$

F_1 : Gerilme durumunun neden olacağı yapısal değişimi ifade eder;

$$F_1 = \frac{S_1}{S_3} = a_0 + \frac{(\sigma_1/\sigma_3)a_1}{(1+\xi)a_{21}} \quad (4)$$

Burada, a_0 ; zeminin başlangıçtaki yapısal durumunu yansıtan ve numune hazırlama yöntemi, zeminin oluşum özellikleri ve tanelerin şekline bağlı olarak değişen bir malzeme değişkenidir (bu çalışmada yapılan hesaplamalara dahil edilmemiştir). a_1 , zeminin başlangıç durumunu yansıtan ve rölatif sıklık ile çevre basıncı etkisini de içerecek bir malzeme değişkeni olup, zemine uygulanan deviyatör gerilme ile birlikte değişecek şekilde bir süreç değişkeni olarak düşünülmüş ve şu şekilde ifade edilmiştir;

$$a_1 = 1+(a_{11}D_r)(q/\sigma_3) \quad (5)$$

Uygulanan deviyatör gerilmenin çevre basıncına göre normalize edilmesinin amacı, çevre basıncı arttıkça temas normallerinin dönme eğiliminin azalımının sağlanmasıdır. Öte yandan, zeminin sıklığı ve çevre basıncı (ya da ortalama efektif basınç) arttıkça, zemine uygulanan dışsal iş, öncelikle temas normallerinin dönmesine ve temas alanının artmasına yol açacaktır. Ancak, burada q/σ_3 bileşeni ile hedeflenen şey, deviyatör gerilmenin etkisinin çevre basıncıyla birlikte azalmasını sağlamaktır. a_{21} ; malzeme katsayısı olup, şekil değiştirmeye birlikte, belirli bir noktadan sonra temas normaleri azaltmak üzere düşünülmüştür. ξ , ise kayma (deviyatör) şekil değiştirme olup, kayma şekil değiştirmesi uzayında alınan yolun uzunluğunu ifade etmektedir. Bu şekilde birinci aşama ifade edilmiş olmaktadır. Daha önce, zeminlerin mikro mekanizmasının izahında en önemli parametrelerden biri olduğu deneysel çalışmalarla da ortaya konan yapı değişimi, üç eksenli basınç deneyinde geçerli olan aksel simetri durumunda elde edilebilecek en basit yapı tansörü ile ifade edilmiş olmaktadır.

F_2 : Zemin yapısı içinde oluşan sürtünme direncinin, mobilize olan sürtünme açısı ile ifade edilmesinin uygun olduğu görülmüş ve şu bileşen önerilmiştir ;

$$F_2 = a_2 \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (6)$$

Burada, a_2 , zemin yapısının sıklığını ifade eden ve boşluk oranı ile efektif ortalama gerilmenin fonksiyonu olarak içsel kilitleme etkisini yansıtan bir malzeme katsayısıdır.

Bir diğer malzeme değişkeni, z_1 ise aslen zemin yapısının sönümlenme karakterini yansıttığı için, z_{11} bir diğer malzeme değişkeni olarak düşünüülüp, şekil değişimi yığılmasına bağlı olarak şu şekilde tanımlanmıştır;

$$z_1 = \zeta_{z_{11}} \quad (7)$$

Bu çalışmada, şekil değiştirmenin mikro mekanizması göz önüne alınarak ulaşılabilen sıkışma/genişleme ifadesi şu şekildedir;

$$1 - \frac{dv}{d\varepsilon_1} = b_1 + b_2 \frac{S_1}{S_3} \quad (8)$$

Burada, dv , hacimsel şekil değiştirme hızı; $d\varepsilon_1$, düşey eksen (asal eksen) yönündeki şekil değiştirme hızı; b_1 ve b_2 ise malzeme değişkenleridir. Bu şekilde, sıkışma/genişleme miktarı, bir önceki kısımda elde edilen ve yapının kendini gerilme durumuna adapte edişini yansıtan iki boyutlu yapı tansörü olan S_1/S_3 ile ilişkilendirilmiş olmaktadır.

Bünye ifadeleri elde edilirken, aşağıda verilen davranış özellikleri kabul edilmiştir;

- (i) Zemin homojendir ve başlangıç izotropisine sahiptir.
- (ii) Şekil değiştirmeler, elastik ve plastik şekil değiştirmeler olarak ikiye ayrılabilir. Her bir bileşen, kayma (deviyatör) gerilmelerinin neden olduğu kayma şekil değiştirmeleri ile kayma gerilmelerin neden olduğu hacimsel şekil değiştirme (sıkışma/genişleme) ve hacimsel (ortalama) gerilmelerin neden olduğu hacimsel şekil değiştirmelerden oluşmaktadır.
- (iii) Zemin iki fazlıdır. Kuru ve suya doygun olmak üzere iki farklı durum ele alınmıştır.

- (iv) Zemin davranışı yüklenme hızından bağımsızdır.
 (v) Hacimsel şekil değiştirmelerin elastik bileşeni ihmal edilmiştir.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin deviyatör bileşeni;

$$de_{ij} = \frac{ds_{ij}}{2G} + \frac{s_{ij}}{2G} dz \quad (9)$$

$$dz = d\zeta/z_1 \quad (10a)$$

$$d\zeta = F d\xi \quad (10b)$$

$$F = F_1.F_2 \quad (10c)$$

Hacimsel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi;

$$d\varepsilon = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p \quad (11)$$

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma}{3K} + \varepsilon_v^p \quad (12)$$

Elastik bileşen ihmal edilerek,

$$d\varepsilon = d\lambda_1 = \left[1 - \left(b_1 + b_2 \frac{S_1}{S_3} \right) \right] d\varepsilon_1 \quad (13)$$

Modelin öngörülleri

Yukarıda verilen bünye denklemlerinin sayısal olarak çözülmesi ve zeminin şekil değiştirme sürecinin elde edilmesi için, MS Excel programı kullanılarak bir sayısal analiz programı hazırlanmıştır. Diferansiyel forma sahip bünye denklemleri, adımsal iterasyon ile entegrasyona tabi tutulmuş ve denklemler bu şekilde çözülmüştür. Adımsal iterasyonda, diferansiyel form artım olarak ele alınmaktadır. Belirli bir şekil değiştirme artımı ile başlayan iterasyon sürecinde, diğer tüm denklemler bu artıma göre çözümlenerek, diğer değişkenlerin artımları hesaplanmaktadır. Bu iterasyon işlemi ise, Excel içinde bulunan Solver işlemi ile tanımlanan bir optimizasyon kuralına göre yapılmaktadır. Solver işlemi, GRG2 (Genelleştirilmiş Azaltılmış Gradyan) doğrusal-olmayan optimizasyon kodunu kullanmaktadır. Optimizasyon işlemi ise, bünye denklemlerinde yer alan malzeme değişkenleri-

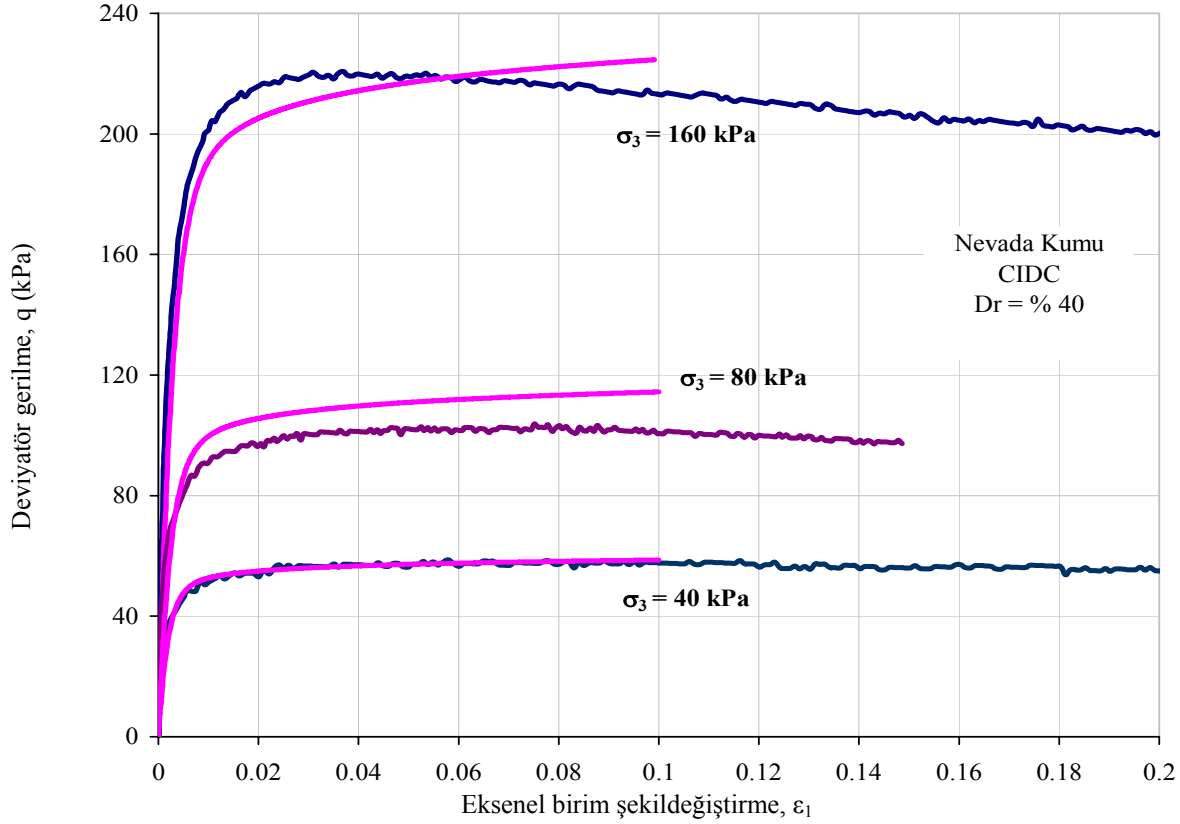
nin değerleri değiştirilerek yapılmakta ve bu şekilde malzeme değişkenlerinin optimum değerleri elde edilmektedir. Modelleme çalışmasında kullanılan veri seti, VELACS projesi kapsamında araştırmacıların kullanımına sunulan ve Nevada kumu üzerinde yapılmış olan drenajlı üç eksenli basınç deneylerinin sonuçlarından oluşmaktadır. Tablo 1’de, %40 rölatif sıkılıkta ve 40 kPa çevre basıncı altında yapılmış deneyler ile elde edilen malzeme değişkenleri yer almaktadır. Bu değişkenler, yukarıda bahsedilen optimizasyon işlemi ile belirlenmiştir. Daha sonra aynı malzeme değişkenleri kullanılarak, yine %40 başlangıç rölatif sıkılığında ancak 80 kPa ve 160 kPa çevre basıncında konsolide edilen numuneler için modelleme yapılmış ve sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir.

Sonuçlar ve tartışma

Modelleme konusundaki en büyük açmaz, modelin basit olması gerekliliği karşısında, heterojen bir malzeme olan zeminin çok parametreliliği davranış özellikleri sergilemesidir. Bu çalışmada, endokronik bünye ifadelerine ait malzeme değişkenleri, zemin davranışının mikromekanizması ortaya konarak gerçek fiziksel anlamlarına kavuşturulmaya çalışılmış ve davranışı tanımlayan değişken sayısı azaltılmıştır. Eksenel simetri koşulları için elde edilen bünye denklemleri drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarına uygulanarak, farklı çevre basınçları altında kesilen numunelerin gerilme-şekildeğiştirme davranışları modellenmiştir. Yüksek şekil değiştirme mertebelerinde oluşan yumuşamanın yeterince öngörülebilmesi dışında, model ile deney sonuçları arasındaki ilişkinin oldukça iyi olduğu ve modelin öngörü kapasitesinin yüksek olduğu düşünülmektedir. Yumuşama olayının malzemenin mikromekanizması ile henüz ilişkilendirilip formüle edilmeyişi ile açıklanabilecek olan model-deney sonucu farklılığı, önerilen bünye ifadelerinin eklenik yapısı sayesinde aşılabilecek bir sorundur. Bu çalışmada, kumların hacimsel şekildeğiştirme davranışı üzerinde durulmamışsa da, bu davranış için önerilen bünye ifadesinin henüz doğrusal bir formda olduğu ve bu haliyle ilerleyen şekildeğiştirme mertebelerinde hacimsel şekildeğişimini öngörü kapasitesinin düşük olacağı ifade edilebilir.

Tablo 1. Malzeme değişkenleri

| a_{11} | a_{21} | a_2 | b_1 | b_2 | z_{11} | m_1 | E_0 (MPa) |
|----------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------------|
| 2.967 | 1.557 | 1.634 | 5.21 | 9.21 | 0.33 | -1.86 | 13 |



Şekil 1. Gerilme şekil değiştirme ilişkisinin modellenmesi

Kaynaklar

- Ansal, A.M., (1977). An endochronic constitutive law for normally consolidated cohesive soils, *PhD Thesis*, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Ansal, A.M., Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J., (1979). Viscoplasticity of normally consolidated clays, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **105**, 4, 519-537.
- Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J., (1976). Endochronic constitutive law for liquefaction of sand, *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, **102**, EM2, 225-238.
- Cuellar, V., (1974). Rearrangement measure theory applied to dynamic behavior of sand, *PhD Dissertation*, Dept. of Civ.Eng., Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Horne, M.R., (1965). The behaviour of an assembly of round, Rigid, Cohesionless Particles, Part I and II, *Proc. Royal Soc. London, Ser. A*, **286**, 62-97.
- Oda, M. ve Konishi, J., (1974). Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear, *Soils and Foundations*, **14**, 4, 25-38.
- Oda, M., (1978). Significance of Fabric in Granular mechanics, *Proc. U.S.-Japan Seminar on Continuum-Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials*, Tokyo, Japonya.
- Oda, M., Nemat-Nasser, S. ve Konishi, J., (1985). Stress induced anisotropy in granular masses, *Soils and Foundations*, **21**, 3, 85-97.
- Oda, M., Kazama H. ve Konishi, J., (1998). Effects of induced anisotropy on the development of shear bands in granular materials, *Mechanics of Materials*, **28**, 103-111.
- Tokue, T., (1979). Deformation behaviour of dry sand under cyclic loading and a stress-dilatancy model, *Soils and Foundations*, **19**, 2, 63-78.
- Valanis, K.C., (1971). A Theory of viscoplasticity without a yield surface: Part I ve II, *Archives of Mechanics*, **23**, 6, 517-551.
- Valanis, K.C., (1980). Fundamental consequences of a new intrinsic time measure-plasticity as a limit of endochronic theory, *Archives of Mechanics*, **32**, 171.
- Wan, R.G. ve Guo, P.J., (2001). Drained cyclic behaviour of sand with fabric dependence, *Journal of Engineering Mechanics*, **127**, 11, 1106-1116.