

Antalya Boğaçay bölgesinden alınan killi zeminlerin dane difüzyonu ve dispersiyon özellikleri

Grain diffusion and dispersion properties of clayey soils taken from Boğaçay Antalya

Bariş MAHMUTLUOĞLU^{1*}, Mehmet Arslan TEKİNSOY²

¹İnşaat Teknolojisi Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.
bmahmutluoglu@mersin.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Şırnak Üniversitesi, Şırnak, Türkiye.
mtekinsoy@sirnak.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.09.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 16.02.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.43925
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Killi zeminler konsolidasyon ile sıkışıp yerleşirken ve daha sıkı bir yapı oluştururken, dane difüzyonu ve dispersiyona uğramaktadır. Bu olaylar göz önüne alınarak killi zeminlerin, hem sıkışma özellikleri hem de oturma hızları hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Konsolidasyon başlangıcı ve sonundaki kuru birim hacim ağırlık değişim yüzdeleri ve zeminlerin plastisite özellikleri, dane difüzyonu ve dispersiyonda önem arz eden iki husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, Antalya'nın Boğaçay bölgesindeki killi zeminler, konsolidasyon deneyleri yapılarak dane difüzyonu ve dispersiyon açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları, teorik olarak bulunan sonuçlarla kıyaslanmış ve ilgili yorumlar verilmiştir. Bu şekilde, bölgenin konsolidasyon sürecindeki difüzyon ve dispersiyon karakteristiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Dispersiyon, Dane difüzyonu, Oturma hızları, Kuru birim hacim ağırlık, Plastisite

Abstract

As clayey soils get compressed, settled and reach to a more compact state by means of consolidation, they are subjected to grain diffusion and dispersion. Considering this phenomenon, information can be obtained on both settlement properties and time rates of settlement of soils. Percentages of dry unit weight variations before and after a consolidation process and plasticity properties of soils appear to be two important aspects in dispersion and grain diffusion. In this study, clayey soils obtained from Boğaçay Antalya are evaluated in terms of grain diffusion and dispersion by means of performing consolidation tests. Obtained results of the experiments are compared to theoretical counterparts and related comments are given. By that means, diffusive and dispersive characteristic of the region in a consolidation process is defined.

Keywords: Dispersion, Grain diffusion, Time rates of settlement, Dry unit weight, Plasticity

1 Giriş

Konsolidasyon tanım olarak, yük altındaki bir zeminden boşluk suyunun dışarı akarak zeminin oturmasını ifade eder. Doğan hidrolik eğim nedeni ile de zemin içinde izokorik ve barotropik bir su akımı başlar. Bu akım bir geçiş akımı niteliğine sahiptir [1]. Zemin boşluklarından dışarı akan su, zemin hacminde azalmaya ve zemin oturmalarına neden olur. Bu olayın sonucunda zemine ait porozite ve boşluk oranı değişir. Aynı zamanda konsolidasyon, boşluk suyunun zemin içindeki yayılımını (difüzyonunu) ve buna bağlı oturmaya da ifade eder.

Dispersiyon olayı ise, genel anlamıyla, hıza bağlı olarak maddelerin yönelmesi ve madde taşınmasını ifade eder. Yine, yapılan araştırmalara göre dispersiyon, hızların düşük olması nedeniyle katı-sıvı arasında meydana gelen fiziksel bir olaydır. Hızlardaki değişme, boşluk suyu basıncındaki değişme ile orantılı olmaktadır [2],[3].

Dispersiyon ve difüzyon olayları, poroz bir ortamdan akan sıvının taşınmasıdır. Difüzyon, sıvı moleküllerinin bireysel termal hareketinden kaynaklanmaktadır. Dispersiyon ise poroz ortam içindeki mikroskobik hareket yolu boyunca, düzensiz şekilli boşluklar arasından, sıvı partiküllerinin (parçacıklarının) değişen hızlarından oluşan taşınma işlemidir. Sonuçta konsantrasyon değişimi söz konusudur. Yine dispersiyon için, konsantrasyon gradyanına bağlı olmadan meydana gelen, mikroskobik ölçekteki taşınma olayı olduğu söylenebilir. Ancak, poroz ortamlardaki akımlar için, sınır

koşullarının mikroskobik ölçekte tanımlanması zordur. Bu nedenle makroskobik modeller kullanılmaktadır. Bu koşullar altında, konsantrasyon gradyanının dispersiyon ile orantılı olduğu varsayılmaktadır [4].

Bu çalışmada, konsolidasyon sürecindeki dispersiyon ve dane difüzyonu olayları ele alınmış ve oturma hızlarının konsolidasyona olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, Antalya'nın Boğaçay beldesinden alınan düşük ve yüksek plastisite özelliklerine sahip zemin numuneleriyle yapılmış olan konsolidasyon deney sonuçları, dane difüzyonu ve dispersiyon olgusu içerisinde kuramsal verilerle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaları gerçekleştirebilmek adına, çok sayıda konsolidasyon deney verisi ile istatistiksel regresyon analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizler neticesinde dane difüzyonu ve dispersiyon için denklemler oluşturulmuştur [5]. Bu denklemler ile bulunan kurumsal sonuçlar, Antalya Boğaçay' da yapılmış olan konsolidasyon deney sonuçları ile kıyaslanmış ve kuru birim hacim ağırlık ile plastisitenin konsolidasyonda dane difüzyonu ve dispersiyon sürecini nasıl etkilediği tartışılmıştır [5].

2 Önceki çalışmalar

Buraya kadar söylenen özellikleri içeren ilk kuram Terzaghi tarafından verilmiştir. Bu kurama göre, hidrolik eğim nedeni ile oluşan boşluk suyu basınç değişimleri, aşağıda Denklem (1) olarak verilen diferansiyel denklemle ifade edilmiştir [6].

$$\frac{du}{dt} = c_v \frac{d^2u}{dz^2} \quad (1)$$

Bu diferansiyel denklemin bağımsız değişkenleri z koordinatı ve t zamanıdır. c_v konsolidasyon katsayısını ve u 'da boşluk suyu basıncını göstermektedir.

Konsolidasyon konusunda, yukarıda bahsedilen Terzaghi kuramı ve sonrasında geliştirilen kuramlarda, oturmalar hakkında yeterli bilgi elde edilmiş fakat oturma hızları ile ilgili kesin yargılara ulaşılamamıştır [6],[7]. Konsolidasyon konusunun, hidrodinamik dispersiyon yani dane difüzyonu ve dispersiyon çerçevesinde ele alınması, oturma hızları hakkında daha fazla bilgi edinilebilmesini sağlamıştır.

Zeminlerin konsolidasyon ile sıkışarak daha sıkı (kompakt) bir yapı kazanması, kuru birim hacim ağırlığın zamanla kesitten kesite artması ve sıkışma sonunda, özellikle ince daneli zeminlerin dispersif bir yapı kazanması, konsolidasyon sürecinde dane difüzyonunu gündeme getirmektedir. Oysa bugüne değin, konsolidasyonun neden olduğu dispersiyon ve dane difüzyonu kavramlarını gözönüne alan ve zemin mekaniği çerçevesinde inceleyen bir yaklaşım bulunmamaktadır. Ancak, homojen zeminlerin içindeki eriyiklerin, konsantrasyon gradyanı vasıtası ile taşınması incelenmiş bulunmaktadır [2],[5],[7].

Bugüne kadar elde edilen tüm konsolidasyon denklemlerinde, laminer ve geçiş akımlarının mevcudiyeti ve Darcy Yasası'nın geçerliliği kabul edilmiştir. Konsolidasyon sebebiyle meydana gelen oturma ve drenaj hızlarının azaldığı da bilinmektedir. Böyle koşullar altında meydana gelen düşük hızlar, ince daneli zeminlerin viskoz doğası yanında, hidrodinamik dispersiyon olgusunu da gündeme getirir [5],[8],[9]. Hidrodinamik dispersiyon olgusu, konsolidasyon süresince dane difüzyonu ve dispersiyon olarak kendini gösteren bir olaydır.

Son yıllarda yapılan mikroskop altındaki incelemelere göre, sıkıştırılan zeminlerin yapıları su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Yine su içeriği nedeni ile zemin yapısı yumaklı (flok yapı)'dan dağınık (dispersif) yapıya doğru geçmektedir. Düşük su içeriklerinde yumaklı yapı söz konusu olup zemine makro boşluklar egemen olmaktadır. Belirli su içeriğine ulaşıncaya makro boşluklar ortadan kalkmaktadır. Ayrıca, artan su içeriği ve boşluk suyu hızı nedeniyle, dane konumları rastgele yüz-kenar konumundan düzenli ve paralel konuma gelmektedir. Danelerin yönlendirilmesi, boşluk suyu hızının önemli etkisi olduğu ifade edilmektedir [10].

Terzaghi'nin konsolidasyon kuramında, zemindeki sıkışmanın sadece yüklemeye sonucu oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içindeki sönümlenmesinin sonucu olduğu kabulü yapılmıştır. Boşluk suyu hızına bağlı bir değişim göz önüne alınmamıştır. Buna ek olarak, zemin sıkışabilirliğinin sıkışma katsayıları ile ifade edilebilmesi için, sıkışma eğrisinin doğruya yakın olması gerekir. Oysa lineer olmama durumu nedeni ile hiçbir kilde sıkışma eğrisi doğrusal değildir. Gerilme artışı nedeni ile kil yumaklarının (flokaların) konumu değişir. Boşaltma ve yeniden yüklemeye durumları, yumakların ilk biçimlerini vermezler. Sonuçta, içyapı değişiklikleri konsolidasyon olayının ayrılmaz öğeleridir [10].

Dispersiyon, kelime anlamı olarak dağılmayı ifade eder. Bir kilin dispersif yapısında daneler arasında yüz yüze dokunma yoktur. Doğal sistemlerde kil daneleri dispersif (dağınık) ve yumaklanmış (floklu) durumda, mikroskobik gruplar halinde bulunurlar. Bu gruplar birleşerek demetleri ve demetlerin birleşmesi ile de görülebilen topakları oluştururlar.

Topaklardan arda kalan hacim makro boşluklardır. Mikro boşluklar, demetler arasında beliren ikincil boşlukları ifade eder [8]. Kompakte edilen ince daneli zeminlerde dispersif bir yapının mevcut olduğu da bilinmektedir [10],[11].

Öte yandan katının sıvı içinde, katının gaz içinde, bir sıvının bir gaz içinde, bir gazın bir sıvı içinde, bir sıvının diğer bir sıvı içinde veya bir katının başka bir katı içinde oldukça ince dağıldığı sistemler mevcuttur. Bu sistemler, homojen dağıtma ortamında bir maddeyi, belli bir dağıtma derecesinde içeren dispersif sistemlerdir. Yine bu sistemler, en az biri homojen dağıtma ortamı, diğeri de parçacıklar şeklinde dağılmış faz olmak üzere genellikle iki fazlı sistemlerdir [12]. Konsolidasyona tabi tutulan doygun killi bir zemin de iki fazlı bir sistem olarak kabul edilebilir. Böyle bir sistemde suyun, uygulanan yük nedeniyle katı içinde yayınıcı veya zemin dokusunun yüklemeye sonucu bozulan yapısı nedeniyle, boşluk suyu hızına bağlı olarak katı içinde katı yayınıcı gündeme gelir. Boşluk suyu akımının, boşluk geometrisinin rastgele olması sonucunda yön ve doğrultusunun değişmesinden dispersif (dağınık) bir hız sistemi oluşur. Boşluk suyu hızının doğrudan görüldüğü bir konsolidasyon kuramı da bulunmamaktadır. Hız kavramı ancak karışım (mixture) kuramı ile konsolidasyon kavramına sokulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen tüm konsolidasyon kuramları, bugünkü haliyle, ancak oturmaların boşluk suyu basınçlarına olan etkilerini içermektedir. Oturma hızlarının konsolidasyona olan etkileri hakkında dolaylı yoldan bilgi edinilebilmektedir. Oturma veya boşluk suyu hızlarını doğrudan içeren bir kuram veya ifade de bulunmamaktadır. Sonuçta, konsolidasyondaki dispersiyonu tanımlayan bir denklem veya eşitlik verilememiş durumdadır [5],[7].

Konsolidasyon ile ilgili dispersiyonu tanımlayan ifadenin, konsolidasyon, lineer olmama durumu ve aynı zamanda kimyasal bir etkileşme içermeyen hidrodinamik dispersiyonun her üçünü birden içermesi gerekir. Bu ise ancak dispersif tipte bir konsolidasyon denklemi ile mümkündür. Oysa böyle bir denklem literatürde mevcut değildir. Ayrıca, konsolidasyondaki hidrodinamik dispersiyonu açıklayan bir kaynak da bulunmamaktadır. Ancak, mikrograflar yolu ile yapısal değişimler incelenerek olaya işaret edilmiştir.

3 Deneysel çalışma

3.1 Materyal

Konsolidasyon deneyleri ince daneli ve plastisiteye sahip zeminlere uygulanan deneylerdir. Bu nedenle, araştırma amacı doğrultusunda, Antalya Boğaçay'dan alınan farklı plastisite ve çok yakın deney başı ile deney sonu kuru birim hacim ağırlık değişimi değerlerine sahip olan zemin örnekleri kullanılmıştır. Bunun sebebi, hem plastisite hem de kuru birim hacim ağırlık değişiminin dane difüzyonu ve dispersiyonu etkilemesidir. Bu olgulardan biri sabit tutulmaya çalışılarak diğerkilerindeki farklılığın süreci nasıl etkilediği tartışılmıştır. CL ve CH grubu olan bu numunelere ait indeks özellikleri ile konsolidasyon deney sonuçlarını gösteren tablolar Ek kısmında verilmiştir [5].

Dane difüzyonu ve dispersiyon olaylarında, süreç başı ile sonu arasında daha fazla kuru birim hacim ağırlık değişimi gösteren zemin daha fazla difüzyon ve dispersiyona uğramaktadır. Bunun yanında, daha yüksek plastisiteye sahip olan zemin yine daha yüksek miktarlarda difüzyon ve dispersiyona uğramaktadır [5],[7]. Bu numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları, kuramın doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermek adına kuramsal sonuçlar ile karşılaştırılmış ve "Bulgular ve Tartışma" bölümünde ilgili yorumlar ve grafiklerle değerlendirilmiştir.

Şimdi, Antalya Boğaçay'dan alınmış olan CL ve CH grubu iki adet zemin türünün, dane difüzyonu ve dispersiyon bakımından karşılaştırılması sunulacaktır. Birinci grup zemin olan CL grubu zeminin deney başı ve deney sonu kuru birim hacim ağırlık değişim oranı %5.73, ikinci grup olan CH grubu zemininki ise %5.37'dir [5]. Bu sebeple, çok yakın deney başı ve deney sonu kuru birim hacim ağırlık değişimi değerlerine sahip olan bu zemin örneklerinin difüzyon ve dispersiyon özellikleri ilişkilileri çoğunlukla plastisite farklarından kaynaklanacaktır. Birinci zemin olan CL grubu zeminin plastisite indisi değeri %17 iken, CH grubu ikinci zeminde bu değer %34'tür [5].

CL ve CH grubu numuneler için, kuru birim hacim ağırlıklarına bağlı efektif gerilme değişimi değerleri sırasıyla Tablo 1 ve

Tablo 3'te, dane difüzyonu ve dispersiyon parametreleri ise yine sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 4'te sunulmuştur [2].

3.2 Metod

Önce, olay istatistik olarak incelenmiş ve kuru birim hacim ağırlığın dispersiyon olayında temel değişken olduğu saptanmıştır. İstatistik çalışma sonunda, en iyi uyumu gösteren denklemler bulunmuş ve sonrasında ise dispersiyon denklemi olarak Denklem (2) elde edilmiştir [5],[7].

$$\frac{du}{dt} = v_z \frac{du}{dz} + c_v \frac{d^2u}{dz^2} \quad (2)$$

Tablo 1: CL grubu numunenin kuru birim hacim ağırlıklarına bağlı efektif gerilme değişimi değerleri.

Toplam Basınç p (kg/cm ²)	Num. Yük. H (mm)	Boşluk Oranı e (-)	Basınç Farkı Δp (kg/cm ²)	Yoğunluk γ_k (g/cm ³)	Hac. Sık. Kat. m_v (cm ² /kg)	Efektif Ger. Farkı σ' (kg/cm ²)
0.00	20.000	0.52446	-	1.745	-	-
0.25	19.660	0.49854	0.25	1.775	0.0692	0.25
0.50	19.345	0.47453	0.25	1.804	0.0651	0.25
1.00	19.092	0.45524	0.50	1.828	0.0265	0.50
2.00	18.772	0.43085	1.00	1.859	0.0171	0.98
4.00	18.428	0.40463	2.00	1.894	0.0093	2.01
2.00	18.462	0.40722	2.00	1.890	0.0009	2.30
1.00	18.552	0.41408	1.00	1.881	0.0049	0.97
0.50	18.622	0.41942	0.50	1.874	0.0075	0.50
0.25	18.685	0.42422	0.25	1.868	0.0135	0.24
0.00	18.912	0.44152	0.25	1.845	0.0480	0.26

Tablo 2: CL grubu numunenin dispersiyon değerleri.

Toplam Basınç p (kg/cm ²)	Yoğunluk γ_k (g/cm ³)	Difüzyon Katsayısı $D_s \times 10^{-5}$ (cm ² /dk)	Dispersiyon Değişkeni x (-)	Dispersiyon Akısı J_s (g/cm ² dk)	Dispersiyon Mik. ΔW_s (g)	Toplam Sıkışan Zemin Mik. ΔW_t (g)
0.00	1.745	-	-	-	-	-
0.25	1.775	1.151	7.635	7.3×10 ⁻³²	2.1×10 ⁻²⁷	0.02003
0.50	1.804	2.163	5.481	3.7×10 ⁻¹⁹	1.1×10 ⁻¹⁴	0.07588
1.00	1.828	2.940	4.639	3.0×10 ⁻¹⁵	8.5×10 ⁻¹¹	0.14798
2.00	1.859	3.877	3.972	1.5×10 ⁻¹²	4.2×10 ⁻⁸	0.27487
4.00	1.894	4.826	3.495	7.6×10 ⁻¹¹	2.1×10 ⁻⁶	0.45991
2.00	1.890	4.735	3.535	5.5×10 ⁻¹¹	1.6×10 ⁻⁶	0.43788
1.00	1.881	4.491	3.648	2.3×10 ⁻¹¹	0.7×10 ⁻⁶	0.38667
0.50	1.874	4.298	3.743	1.0×10 ⁻¹¹	0.3×10 ⁻⁶	0.34903
0.25	1.868	4.122	3.835	0.5×10 ⁻¹¹	0.14×10 ⁻⁶	0.31759
0.00	1.845	3.473	4.228	0.02×10 ⁻¹¹	0.06×10 ⁻⁷	0.21363

Tablo 3: CH grubu numuneye ait kuru birim hacim ağırlıklarına bağlı efektif gerilme değişimi değerleri.

Toplam Basınç p (kg/cm ²)	Num. Yük. H (mm)	Boşluk Oranı e (-)	Basınç Farkı Δp (kg/cm ²)	Yoğunluk γ_k (g/cm ³)	Hac. Sık. Kat. m_v (cm ² /kg)	Efektif Ger. Farkı σ' (kg/cm ²)
0.00	20.000	0.73925	-	1.489	-	-
0.25	19.778	0.71994	0.25	1.506	0.0449	0.25
0.50	19.502	0.69594	0.25	1.527	0.0566	0.25
1.00	19.188	0.66864	0.50	1.552	0.0327	0.50
2.00	18.754	0.63089	1.00	1.588	0.0231	1.00
4.00	18.222	0.58463	2.00	1.634	0.0146	1.96
2.00	18.322	0.59333	2.00	1.626	0.0034	1.44
1.00	18.492	0.60811	1.00	1.611	0.0092	1.01
0.50	18.672	0.62376	0.50	1.595	0.0193	0.52
0.25	18.742	0.62985	0.25	1.589	0.0150	0.25
0.00	18.988	0.65124	0.25	1.569	0.0518	0.25

Tablo 4: CH grubu numunenin dispersiyon değerleri.

Toplam Basınç σ' (kg/cm ²)	Yoğunluk γ_k (g/cm ³)	Difüzivite Katsayısı $D_s \times 10^{-5}$ (cm ² /dk)	Dispersif Değişken x -	Dispersiyon Akısı J_s (g/cm ² dk)	Dispersif Zem. Mik. ΔW_s (g)	Toplam Sıkışan Zemin Mik. ΔW_t (g)
0.00	1.489	-	-	-	-	-
0.25	1.506	0.758	9.465	8.6×10^{-46}	2.4×10^{-41}	0.00741
0.50	1.527	1.665	6.297	1.4×10^{-23}	4.0×10^{-19}	0.03716
1.00	1.552	2.650	4.911	1.6×10^{-16}	4.5×10^{-12}	0.10044
2.00	1.588	3.928	3.943	1.6×10^{-12}	4.5×10^{-8}	0.24221
4.00	1.634	5.367	3.277	34×10^{-11}	9.6×10^{-6}	0.50621
2.00	1.626	5.107	3.378	16×10^{-11}	4.5×10^{-6}	0.45138
1.00	1.611	4.654	3.572	3.6×10^{-11}	1.0×10^{-6}	0.36124
0.50	1.595	4.159	3.815	0.5×10^{-11}	0.14×10^{-6}	0.27640
0.25	1.589	3.962	3.923	0.2×10^{-11}	0.06×10^{-6}	0.24701
0.00	1.569	3.250	4.389	0.3×10^{-13}	0.08×10^{-8}	0.15897

Denklem (2)'de u boşluk suyu basıncını, t zamanı, z düşey koordinatı, v_z oturma hızlarını ve c_v konsolidasyon katsayısını göstermektedir. Bu denklemin analitik çözümleri, deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Denklem, bilinen konsolidasyon terimi yanında, hıza bağlı konvektif akımı da içeren bir denklemdir. Kuru birim hacim ağırlık, hidrodinamik dispersiyonda en etkili parametre olduğu için, Denklem (2) olarak verilen diferansiyel denklem, kuru birim hacim ağırlıklar cinsinden, aşağıda Denklem (3) de gösterildiği gibi verilebilir [5],[7].

$$\frac{d\gamma_k}{dt} = v_z \frac{d\gamma_k}{dz} + D_s \frac{d^2\gamma_k}{dz^2} \quad (3)$$

Bu denklemde, t zamanı, z düşey koordinat eksenini, γ_k kuru birim hacim ağırlığı, v_z oturma hızını, D_s ise difüzivite katsayısını temsil etmektedir. Difüzivite katsayısı, difüzyona uğrayan ve sıkışan zemin miktarları gibi dane difüzyonu ve dispersiyon parametreleri, Denklem (3)'te verilen diferansiyel denklemin çözümlerinden elde edilmiştir.

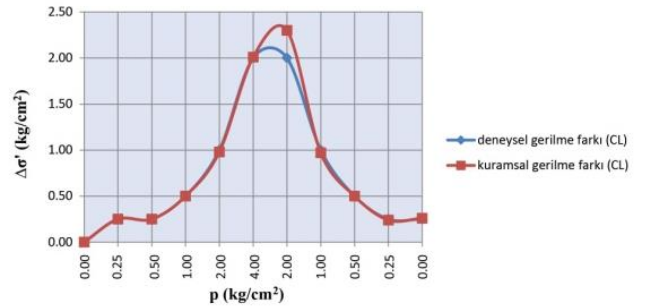
4 Bulgular ve tartışma

CL grubu zemin için verilmiş olan Tablo 1' in ve CH grubu zemin için verilmiş olan Tablo 3'ün ilk ve son sütunları karşılaştırılırsa, deneysel gerilme farkı değerlerinin (p) kuramsal olarak bulunan efektif gerilme farklarına (σ') çok yakın olduğu görülebilir. Son sütunda verilen kuramsal efektif gerilme farkı değerleri (σ'), aşağıda verilmiş olan Denklem (4) ile bulunmuştur [5],[7].

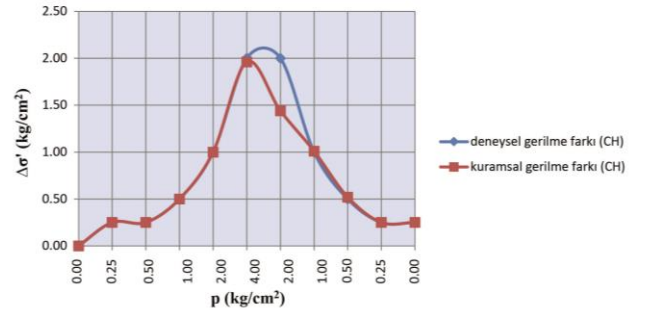
$$\sigma' = \frac{1}{m_v} \ln \frac{\gamma_{k2}}{\gamma_{k1}} \quad (4)$$

Burada, σ' efektif gerilmeyi, γ_{k1} ve γ_{k2} herhangi bir basınç kademesi için sırasıyla ilk ve son kuru birim hacim ağırlık değerlerini ve m_v hacimsel sıkışma katsayısını göstermektedir. Bulunan değer ve grafikler, kuru birim hacim ağırlıkların efektif gerilme değişimleri üzerinde ne denli etkili olduğunu göstermektedir. CL grubu zemin için deneysel ve kuramsal olarak bulunmuş olan gerilme farkları arasındaki ilişki, Şekil 1'deki grafikte gösterilmiştir [5].

CH grubu zemin için aşağıda Şekil 2'de verilmiş olan grafikte, deneysel ve kuramsal gerilme farkları arasındaki ilişki görülmektedir [5]. Bu ilişkide, değerlerin birbirlerine ne kadar yakın çıktığı grafikte açıkça gözlemlenebilmektedir.



Şekil 1: CL grubu zemin için deneysel (p) ve kuramsal ($\Delta\sigma'$) gerilme farkları ilişkisi.



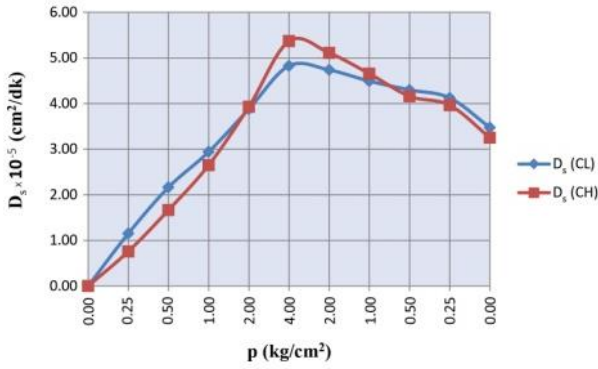
Şekil 2: CH Grubu zemin için deneysel (p) ve kuramsal ($\Delta\sigma'$) gerilme farkları ilişkisi.

Yine, CL grubu plastisitesi düşük olan kile ait difüzivite katsayılarının CH grubu killi zemindekilerden daha küçük olduğu görülür. Difüzivite katsayıları (D_s), Denklem (3)'ün çözümünden elde edilmiş olup aşağıda Denklem (5) olarak sunulmuştur [5],[7].

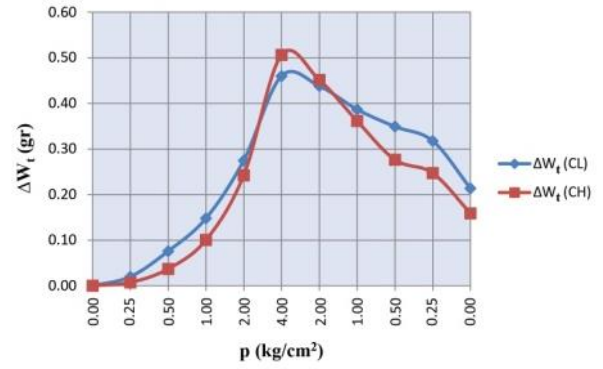
$$D_s = \frac{z^2}{4t} \ln \frac{z_1}{z} \quad (5)$$

Denklem (5)'te z_1 ilk numune boyunu, z herhangi bir andaki numune boyunu, t zamanı göstermektedir.

Difüzivite katsayısı değerleri Denklem (5) ile bulunmuş; CL grubu zemin için Tablo 2'nin, CH grubu zemin için ise Tablo 4'ün üçüncü sütunlarında verilmiştir. Bu ilişki Şekil 3'teki grafikte de açıkça görülebilmektedir [5].



Şekil 3: CL ve CH grubu zeminlerin basınç kademesine (p) göre difüzyon katsayıları ($D_s \times 10^{-5}$) ilişkisi.



Şekil 4: CL ve CH grubu zeminlerde basınç kademesine (p) göre toplam sıkışan zemin miktarları (ΔW_t) ilişkisi.

5 Sonuçlar

Dispersiyon değerleri ile ilgili olarak verilen Tablo 2 ve Tablo 4'ün altıncı sütunlarında gösterilen, makro boşluklar içine giren ve zemin bünyesi içinde yayınım yapan difüzyon miktarı olan ΔW_s 'i bulmak için, 5. sütunda verilen J_s akısı, A kesit alanı ve Δt zamanının çarpılması gerekir [5],[7]. J_s akısını bulmak için ise dispersif değişken olarak isimlendirilen x 'in bulunması gerekir. Önceden de belirtildiği gibi, bu parametrelerin hepsi, Denklem (3) olarak verilen dispersiyon diferansiyel denkleminin çözümlerinden elde edilmiş olup dispersif değişken x Denklem (6), J_s akısı Denklem (7) ve difüzyon dane miktarı ΔW_s Denklem (8) olarak sunulmuştur [5],[7].

$$x = \frac{z + v_z t}{2\sqrt{D_s t}} \quad (6)$$

$$J_s = \sqrt{\frac{D_s}{\pi t}} (\gamma_{kf} - \gamma_{ki}) e^{-x^2} \quad (7)$$

$$\Delta W_s = J_s A \Delta t \quad (8)$$

Burada, z numune boyu, v_z oturma hızı, t zaman, D_s difüzyon katsayısı, γ_{ki} ve γ_{kf} sırasıyla ilk ve son kuru birim hacim ağırlık değerleri, A numune kesit alanıdır. Denklem (6), Denklem (7) ve Denklem (8)'de, v_z oturma hızlarının mevcudiyeti, konsolidasyon sürecinin oturma hızları açısından da rahatça irdelenebilmesini sağlamaktadır [5],[7]. Yine, Tablo 2 ve Tablo 4'ün son sütunlarında, toplam sıkışan zemin miktarları verilmiştir. Bu değerler, aşağıda verilen Denklem (9) ile hesaplanmıştır ve bu denklem zeminde meydana gelen toplam sıkışmayı göstermektedir [5],[7].

$$\Delta W_t = A \Delta z \Delta \gamma_k \quad (9)$$

Burada, ΔW_t sıkışmaya uğrayan toplam zemin miktarını, A kesit alanını, Δz boy değişimini ve $\Delta \gamma_k$ kuru birim hacim ağırlık değişimini ifade etmektedir.

CL ve CH grubu zeminlerin toplam sıkışan zemin miktarları karşılaştırılırsa, yine ön-konsolidasyon basıncının etkili olduğu ilk yüklenme değeri dışındaki tüm toplam sıkışma değerlerinin, CH türü zeminde daha fazla olduğu görülebilir. Bu ilişki Şekil 4'te verilmiştir [5].

Bu grafiksel ilişkiden yine açıkça görülebileceği gibi, CH grubu zemine ait, her basınç kademesindeki toplam sıkışma miktarları, CL grubu zemindekilerden yüksektir. Bu nedenle, CH grubu zemin daha fazla sıkışmaya uğrayacak, dane difüzyonu ve dispersiyon ile daha fazla zemin danesi taşınacak ve yönlendirilerek sıkışacaktır.

Bu çalışma, bir konsolidasyon olayında meydana gelen dane difüzyonu ve dispersiyon hakkında bilgi sahibi olma imkanı sağlamaktadır. Bu çerçevede, Denklem (3) olarak verilen, kuru birim hacim ağırlıklar cinsinden dane difüzyonu ve dispersiyon diferansiyel denkleminin çözülmesi sonucunda elde edilen Denklem (4) ile efektif gerilme değişimleri, Denklem (5) ile difüzyon katsayıları, Denklem (8) ile difüzyona uğrayan dane ağırlıkları ve Denklem (9) ile de toplam sıkışan zemin miktarları saptanabilmektedir. Kuramsal yönden elde edilen bu eşitlikler, deneysel yönden bulunanlara çok yakın değerler vermektedir.

Bilinen kuramlar, oturmalar hakkında bilgi verebilmesine rağmen, oturma hızları hakkında yeteri kadar açıklayıcı olamamaktadır [5],[7]. Konunun dispersiyon denklemi çerçevesinde ele alınması, oturma hızı ve boşluk suyu hızları hakkında bilgi elde edilebilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, zeminin viskoz etkileri de göz önüne alınma olanağına kavuşmuş olmaktadır.

İleri sürülen kuram sayesinde, zeminin oturma hızları ve boşluk suyu hızları hakkında fikir edinebilme olanağı olduğuna göre, zeminlerin viskoz özellikleri hakkında da bilgi sahibi olunabilir. Zeminlere ait viskoz özellik, özellikle şev stabilitesi problemlerinde önemlidir. Bu nedenle, zeminlerin daha sağlıklı ve ayrıntılı değerlendirilebileceği söylenebilir.

6 Kaynaklar

- [1] Şuhubi ES. *Akışkanlar Mekaniği*. İstanbul, Türkiye, İTÜ Matbaası, 1968.
- [2] Nielsen DR, Jackson RD, Cary JW, Evans DD. *Soil Water*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1972.
- [3] Tekinsoy MA. *Index and Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Isparta, Türkiye, SDÜ, 2002.
- [4] Reddell DI, Sunada DK. *Numerical Simulation of Dispersion in Ground Water Aquifers*. Fort Collins, Colorado State University, 1970.
- [5] Mahmutluoğlu B. Hidrodinamik Dispersiyon'un Konsolidasyona Olan Etkisi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2014.
- [6] Capper PL, Cassie WF. *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği*. İkinci baskı. İstanbul, Türkiye, Arı Yayınevi, 1984.
- [7] Tekinsoy MA. *Theoretical Soil Mechanics, Soil Behavior in Ko Condition*. İstanbul, Türkiye, Daisy Science, 2013.

- [8] Lancellotta R. *Geotechnical Engineering*. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, 1995.
- [9] Lekha KR, Krishnaswamy NR, Basak P. "Consolidation of clays for variable permeability and compressibility". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11), 1001-1009, 2003.
- [10] Önalp A. *Geoteknik Bilgisi 1*. İstanbul, Türkiye, Birsen Yayınevi, 1997.
- [11] Özaydın K. *Zemin Mekaniği*. İstanbul, Türkiye, Birsen Yayınevi, 1995.
- [12] Üneri S. *Asıltılar Kimyası, Kolloit Kimya*. Ankara, Türkiye, Ankara Üniversitesi, 1968.

Ek:

Tablo Ek 1: Zemin örneklerine ait indeks özellikleri.

Numune	CL	CH
Sondaj Derinliği (m)	1.9	3.4
Likit Limit (w_L) (%)	36	59
Plastik Limit (w_P) (%)	19	25
Doğal Su İçeriği (w_n) (%)	18	24
Kuru Bir. Hac. Ağ. (γ_k) (g/cm ³)	1.745	1.489
Dane Bir. Hac. Ağ. (γ_s) (g/cm ³)	2.60	2.56
Plast. İndisi (I_P) (%)	17	34

Tablo Ek 2: CL grubu numune için konsolidasyon değer ve parametreleri.

σ (kg/cm ²)	$\Delta\sigma$ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe (-)	e (-)	a_v (cm ² /kg)	m_v (cm ² /kg)
0	-	0	20.000	-	0.52446	-	-
0.25	0.25	0.340	19.660	0.02592	0.49854	0.10368	0.0692
0.50	0.25	0.655	19.345	0.02401	0.47453	0.09604	0.0651
1.00	0.50	0.908	19.092	0.01928	0.45524	0.03856	0.0265
2.00	1.00	1.228	18.772	0.02439	0.43085	0.02439	0.0171
4.00	2.00	1.572	18.428	0.02622	0.40463	0.01311	0.0093
2.00	2.00	1.538	18.462	0.00259	0.40722	0.00130	0.0009
1.00	1.00	1.448	18.552	0.00686	0.41408	0.00686	0.0049
0.50	0.50	1.378	18.622	0.00534	0.41942	0.01068	0.0075
0.25	0.25	1.315	18.685	0.00480	0.42422	0.01920	0.0135
0.00	0.25	1.088	18.912	0.01730	0.44152	0.06920	0.0480

Tablo Ek 3: CH grubu numune için konsolidasyon değer ve parametreleri.

σ (kg/cm ²)	$\Delta\sigma$ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	H (mm)	Δe (-)	e (-)	a_v (cm ² /kg)	m_v (cm ² /kg)
0	-	0	20.000	-	0.73925	-	-
0.25	0.25	0.222	19.778	0.01931	0.71994	0.07724	0.0449
0.50	0.25	0.498	19.502	0.02400	0.69594	0.09600	0.0566
1.00	0.50	0.812	19.188	0.02731	0.66864	0.05462	0.0327
2.00	1.00	1.246	18.754	0.03774	0.63089	0.03774	0.0231
4.00	2.00	1.778	18.222	0.04626	0.58463	0.02313	0.0146
2.00	2.00	1.678	18.322	0.01070	0.59333	0.00535	0.0034
1.00	1.00	1.508	18.492	0.01478	0.60811	0.01478	0.0092
0.50	0.50	1.328	18.672	0.01565	0.62376	0.03130	0.0193
0.25	0.25	1.258	18.742	0.00609	0.62985	0.02436	0.0150
0.00	0.25	1.012	18.988	0.02139	0.65124	0.08556	0.0518