

DÜŞÜK PLASTİSİTELİ SİLTLERİN ENERJİ BAZLI YÖNTEM İLE SIVILAŞMA DİRENCİNİN İNCELENMESİ

ANALYSING THE LIQUEFACTION RESISTANCE OF LOW PLASTICITY SILTS BY ENERGY BASED METHOD

İrem BOZYİĞİT¹, Furkan KUNDUZCU², Selim ALTUN³

ÖZET

Bu çalışmada, farklı plastisite indeksi değerlerine sahip düşük plastisiteli siltlerin sıvılaşma dirençleri enerji bazlı yöntem ile incelenmiştir. Üç farklı plastisite indeksine (PI=6,9,17) sahip düşük plastisiteli silt örnekler 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde nemli tokmaktama yöntemi kullanılarak iki farklı rölatif sıkılıkta (Dr =%40 ve %80) hazırlanmış ve dinamik üç eksenli deneylerine tabi tutulmuştur. Enerji bazlı sıvılaşma yönteminin benimsendiği bu çalışmada, sıvılaşma enerjisinin uygulanan çevrimsel gerilme oranından (CSR) etkilenip etkilenmediğini incelemek amacıyla altı farklı kombinasyonda hazırlanmış zemin örneklerine, sabit çevresel basınç altında (σ_c =100 kPa) dört farklı CSR oranında izotropik yükleme uygulanmış ve toplam 24 adet dinamik üç eksenli deney gerçekleştirilmiştir. Rölatif sıkılık, plastisite indeksi ve çevrimsel gerilme oranı parametreleri kullanılarak düşük plastisiteli siltler için enerji bazlı yöntem ile bir model önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük plastisiteli silt, sıvılaşma direnci, dinamik üç eksenli deney, enerji bazlı sıvılaşma analizi

ABSTRACT

In this study, liquefaction resistance of low plasticity silts with varying plasticity index was investigated by applying an energy-based method. The experimental data consists of cyclic triaxial tests on samples with dimensions of 50 mm diameter and 100 mm height. Three different types of silt samples of low plasticity (PI=6,9,17) were obtained by using the wet tamping method prepared at two different relative densities (40 and 80%). In an implementation of the energy-based liquefaction method, in order to observe how the liquefaction energy is affected by the cyclic stress ratio (CSR), isotropic loading was applied to samples of four different CSR levels consolidated under constant cell pressures of 100 kPa, and finally, results of a total of 24 cyclic triaxial tests were evaluated. Using previously

¹ Arş. Gör.Dr., Ege Üniversitesi, irem.kalipcilar@ege.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Y. Müh., Ege Üniversitesi, furkankunduzcu@gmail.com

³ Prof. Dr., Ege Üniversitesi, selim.altun@ege.edu.tr

obtained test results, a model with the energy-based method is proposed for low plasticity silts using the parameters of relative density, plasticity index and cyclic stress ratio.

Keywords: Low plasticity silt, liquefaction resistance, cyclic triaxial test, energy based liquefaction analysis

1. GİRİŞ

Geçmiş yıllarda; sismik olaylar neticesinde çok sayıda can ve mal kaybı gerçekleşmiş, dolayısıyla zeminlerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesi bir gereklilik haline almıştır. Önceki çalışmalarda genel olarak, zeminlerin tekrarlı yükler altındaki direnci gerilme ve deformasyon esaslı yöntemler kullanılarak değerlendirilmektedir (Green ve Mitchell, 2004; Richard vd., 1970; Yang ve Sato, 2000). Nemat-Nasser ve Shokooh (1979) gevşek kohezyonsuz kumlu zeminlerin tekrarlı yükler altında drenajsız koşullar altında sıkılaştığını ve daha sonra ise sıvılaşmanın meydana geldiğini belirtmişlerdir. Tekrarlı yükler altında zeminde sıkılaşma, zemin danelerinin yeniden kendi içinde düzenlenmesi ile gerçekleşmekte ve danelerin yeniden düzenlenmesi belirli miktarda enerji gerektirmektedir. Tekrarlı yükleme sırasında boşluk oranı azaldıkça zemin sıkılaşmakta ve yoğunlaşmakta dolayısıyla aşırı boşluk suyu basıncı artmaktadır. Gelişen aşırı boşluk suyu basıncı ve harcanan enerji arasında bir ilişkinin olduğu fikrine dayanarak Nemat-Nasser ve Shokooh (1979) bir bağlantı önermiştir. Nemat-Nasser ve Shokooh (1979) tarafından önerilen varsayımlara dayanarak, Berril ve Davis (1982, 1985) enerji bazlı sıvılaşma analizinde boşluk suyu basıncındaki artışın birim hacim zeminde sönmölen enerji ile doğru orantılı olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, Towhata ve Ishihara (1985) burulmalı kesme cihazı ile gerçekleştirdikleri deneyler neticesinde sönmölen enerjinin bir tanımı olan kesme işi ile boşluk suyu basıncı artışı arasında bir ilişki önermiştir. Enerji bazlı yöntemin umut verici bir yöntem olduğu kabulünden sonra bu alandaki araştırmalar, sönmölen enerji ile boşluk suyu basıncı arasında belirli bir denklem kurmak üzerine yoğunlaşmıştır (Law vd., 1990; Figueroa, 1990; Figueroa and Dahisaria, 1991; Figueroa vd., 1994; Liang vd., 1995).

Kokusho (2013); bir dizi drenajsız dinamik üç eksenli deney verisini değerlendirerek, enerji bazlı metot ve gerilme bazlı metodun sıvılaşma potansiyeli analizinde oldukça tutarlı olduklarını belirtmiştir. Baziar vd. (2011), zeminin sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek için enerji bazlı yöntemi başarı ile uygulamışlardır. Aynı şekilde; Zhang vd. (2015), enerji bazlı yöntemi ile zemin sıvılaşmasını tetiklemek için gerekli enerjiyi değerlendirmek üzere çok değişkenli regresyon eğrileri sunmuştur. Okur ve Umu (2013)'da kısmi doygun kumların tekrarlı yükler altındaki davranışlarını araştırmak için enerji tabanlı yöntemi kullanmışlardır. Ke vd. (2019) ise ince taneli cevher atıkları için tekrarlı yükler altındaki mukavemetini sönmölen enerji oranı ile belirlemiştir.

Gerilme veya deformasyon temelli yöntemlerle karşılaştırıldığında enerji bazlı yöntemin bazı belirgin avantajları bulunmaktadır (Liang vd.,1995; Baziar ve Sharafi, 2011; Shariatmadari vd., 2019). Öncelikle, sönmölen enerji zeminin hem deformasyonu hem de zemindeki gerilme ile ilişkili olmakla beraber sönmölen enerji depremin büyüklüğü, merkez uzaklığı ile ilişkili skaler bir niceliktir. Dolayısıyla, enerji bazlı yöntemde deprem kaynaklı yüklemeler için eşdeğer kayma gerilmesinin ve kayma deformasyonunun belirlenmesine gerek kalmadan oldukça farklı zaman geçmişine sahip depremler için

uygulanabilmektedir. Enerji tabanlı yöntemin uygulamasında en önemli adım, tekrarlı yükler altında harcanan enerjinin hesaplanmasıdır. Sivilaşmanın başlangıcında sönmömlenen enerji miktarı birçok faktörden etkilenmektedir. Towhata ve Ishihara (1985), Baziar ve Sharafi (2011), Azeiteiro vd. (2017); çevresel basınç, çevrimsel gerilme oranı (CSR), rölâtif sıklık ve kumun içerdği ince yüzdesi gibi bazı kilit faktörlerin sönmömlenen enerji üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, sivilaşmanın başlaması için gereken enerji miktarının, çevrimsel gerilme oranı ile nadiren ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Towhata ve Ishihara, 1985; Figueroa vd., 1994; Baziar ve Sharafi, 2011; Azeiteiro vd., 2017). Ancak, Polito vd. (2013) ve Yang ve Pan (2018), sivilaşmanın başlaması için gereken enerjinin çevrimsel gerilme oranına bağlı olduğunu ve çevrimsel gerilme oranı arttıkça sönmömlenen enerji değeriinde azalma eğilimi olduğunu bildirmiştir. Literatürde belirtilen bu çelişkili bulgular, çevrimsel gerilme oranının sönmömlenen enerji üzerindeki etkisinin genel olarak düşünömlenden daha karmaşık olduğunu ve daha fazla araştırmanın gerekli olduğunu göstermektedir.

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, enerji bazlı yöntem ile ilgili yapılan çalışmaların genellikle kum zeminler üzerine yoğunlaştığı ve silt zeminlere enerji bazlı yöntemin uygulanmadığı görölmektedir. Bu çalışmada, enerji bazlı yöntemi içerdği belirgin avantajlar neticesinde siltli zeminlerin sivilaşma analizinde tutarlı olarak kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir. Ayrıca, siltli zeminlerin sivilaşma davranışı üzerine literatürde hali hazırda bir fikir birliğine de varılamaması neticesinde konunun farklı bir bakış açısından da değeriendirilerek siltlerin sivilaşma davranışı üzerine literatüre katkı sağlayacağı düşünömlmektedir.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Çalışma kapsamında, düşük plastisiteli siltler üzerinde JGS 0542-2000 standartlarına uygun olarak yapılan dinamik üç eksenli deneylerden elde edilen veriler kullanılarak enerji temelli sivilaşma metodu ile sivilaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, İzmir’den alınan farklı plastisite değeriine sahip 3 farklı silt zemin kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri ASTM standartlarına göre belirlenmiştir ve fiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan silt zeminlerin özellikleri

Özellik	S1	S2	S3
Likit limit, LL	30	33	49
Plastik limit, PL	24	24	32
Plastisite indeksi, PI	6	9	17
Maksimum boşluk oranı, e_{max}	2.15	1.91	1.93
Minimum boşluk oranı, e_{min}	0.72	1.28	0.88
Özgöl ağırlık (G_s)	2.77	2.74	2.67
Zemin sınıfı (USCS)	ML	ML	ML

Elde edilen zemin örnekleri, No.200 elek yardımıyla elenmiş ve ıslak tokmıklama yöntemi ile 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde, iki farklı rölâtif sıklıkta ($Dr=40\%$ ve 80%) hazırlanmıştır. Tüm örnekler normal olarak 100 kPa’lık efektif konsolidasyon basıncında

(σ'_c) izotropik olarak konsolide edilmiştir. Dinamik üç eksenli deneyler gerilme kontrollü olarak 0.1 Hz yükleme frekansında simetrik sinüs fonksiyonu ile yüklenmiştir.

2.2. Enerji Temelli Sıvılaşma Analizi

Mükemmel bir elastik malzemede, uygulanan dış kuvvetler sabit olduğunda malzemenin içsel enerji seviyesi de sabit kalmaktadır. Öte yandan, bir akışkan malzemeye herhangi bir dış kuvvet uygulandığında kuvvetin oluşturduğu enerji doğrudan viskoz deformasyon yoluyla harcanır ve kuvvet kaldırıldığında şekil değiştirme enerjisi oluşmaz. Zeminler tamamen Hooke yasasına uygun bir ideal viskoelastik malzeme özelliği göstermemekle beraber, visko-elastik doğası sebebiyle hem geri döndürülebilir hem de geri döndürülemez şekil değiştirmeler sergilemektedir (Okur ve Umu, 2013).

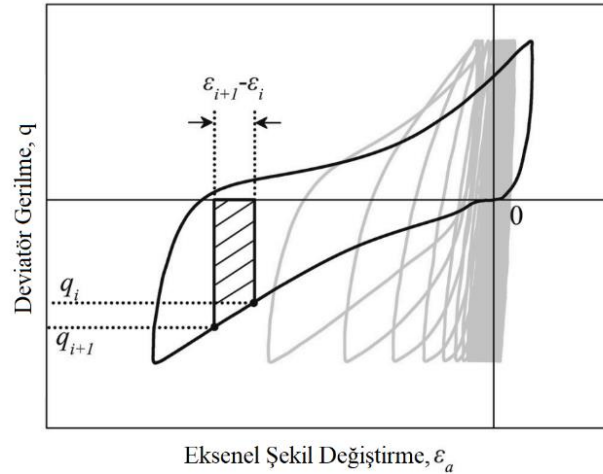
Zeminde birim hacimde harcanan enerji, bir çevrimlik yükleme sırasında gerilme-şekil değiştirme histerezis döngüsünün alanı ile hesaplanabilir. Bir dizi yükleme verisi ile Şekil 1'de görüldüğü üzere gerilme-şekil değiştirme histerezis eğrisi oluşturulur. Harcanan enerji kümülatif olarak, Denklem 1 kullanılarak belirlenmektedir (Polito et al., 2013; Azeiteiro et al., 2015; Yang and Pan, 2018):

$$\delta W = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} (q^{(i)} + q^{(i+1)}) (\varepsilon_a^{(i+1)} - \varepsilon_a^{(i)}) \quad (1)$$

Daha sonra Denklem 2 kullanılarak zemin tarafından sıvılaşma başlangıcına kadar sönmümlenen ve birim hacimde biriken toplam enerji (ΔW) elde edilmiştir.

$$\Delta W = \sum_{i=1}^N \delta W \quad (2)$$

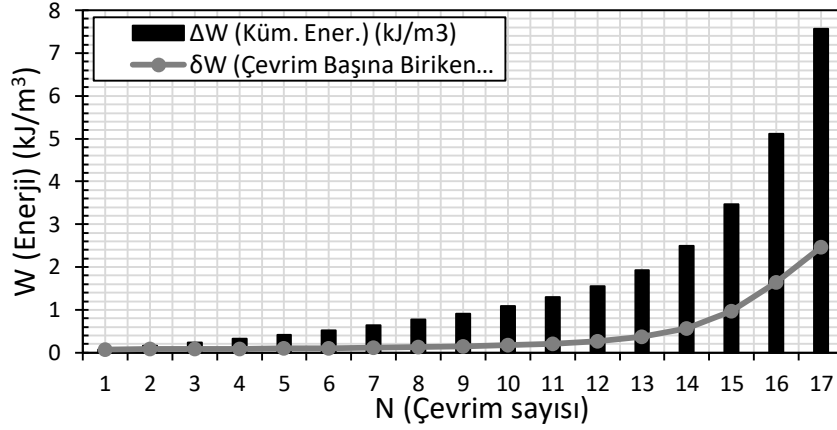
Burada, q : Deviatör gerilme, ε_a : Eksenel birim deformasyon, k : Her döngü için kaydedilen veri sayısı ve N : Sıvılaşma için kaydedilen çevrim sayısıdır.



Şekil 1. Gerilme-birim deformasyon histerezis döngüsünde yamuk alan teorisi (Ni vd., 2020).

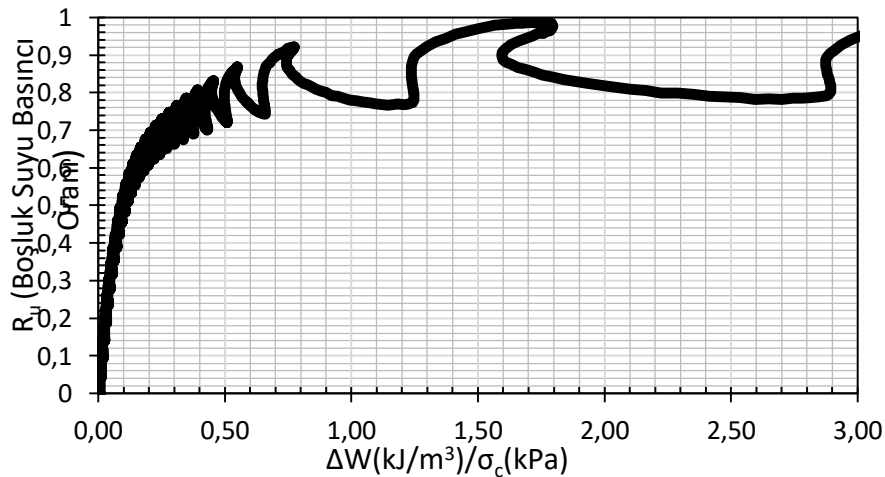
Şekil 2'de %80 rölatif sıklıkta hazırlanmış ve plastisite indeksi 17 olan siltin, CSR 0.135 değerindeki yükleme sırasında her bir çevrimde elde edilmiş enerji değerleri ve birim hacimde biriken toplam enerji değerlerinin çevrim sayısı ile ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere, çevrim sayısının artması ile her bir çevrim başına biriken enerji değeri de

artış göstermiştir. Sabit genlikli yükleme değerlerinde çevrim sayısı artış gösterdikçe deformasyon veya birim şekil değiştirme değerleri de artış göstermektedir. Dolayısıyla enerji bazlı sıvılaşma hesabında da gerilme ve deformasyon değerleri kullanıldığı için deformasyon artışı ile birlikte enerji değerinde de artış gözlemlenmektedir.



Şekil 2. Birim hacimde biriken enerji değerlerinin çevrim sayısı ile değişimi.

Sıvılaşma deneyleri; sabit genlikli gerilme ve sabit genlikli deformasyon olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilebilir. Sabit genlikli gerilme ve sabit genlikli deformasyon deneylerinden elde edilen enerji değerleri kıyaslandığında, sabit genlikli deformasyon deneylerinde çevrim başına biriken enerji ilk çevrimlerde daha yüksek olmakla beraber sabit genlikli gerilme deneylerinden elde edilen enerji değerlerinde ise Şekil 2'deki duruma benzer olarak ilk çevrimlerde daha düşük enerji değerleri elde edilmiştir (Sönmezer, 2020). Ancak, deney sonucunda birim hacimde biriken toplam enerji değerleri ise birbirine oldukça yakın olmakla beraber deney yönteminin değişmesi enerji bazlı yöntemde sonuçları etkilememiştir. Bu nedenle, enerji bazlı yöntem analizinde sabit genlikli deformasyon deneylerini yanı sıra sabit genlikli gerilme altında gerçekleştirilen sıvılaşma deneyleri de kullanılabilir. Ek olarak, boşluk suyu basıncı gelişimi ve boşluk suyu basıncı ile birim hacimde biriken enerji ilişkisi de irdelenmiştir. Şekil 3'te %80 rölatif sıkılıkta hazırlanan ve plastisite indeksi 6 olan siltin, CSR 0.113 değerinde yüklenen örneğin boşluk suyu basıncı ve birim hacimde biriken enerji değişimi verilmiştir.



Şekil 3. Boşluk suyu basıncı ile birim hacimde biriken enerji ilişkisi.

JGS 0542-2000 standartlarında belirtildiği üzere sıvılaşma kriteri olarak, %95 aşırı boşluk suyu basıncı ve %5 çift genlikli eksenel deformasyon ($\epsilon_{DA},\%$) kriterleri benimsenmiştir. Ancak, deneysel çalışmada kullanılan siltlerin plastisite değerlerinin değişkenli sebebiyle boşluk suyu basıncı oluşumları birbirinden oldukça farklı olmakla birlikte plastisite indeksi 17 olan silt örneklerin %95 aşırı boşluk suyu basıncı değerine ulaşmadan %5 çift genlikli eksenel deformasyon değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Boulanger ve Idriss (2006) tarafından da belirtildiği üzere, ince taneli zeminlerde tekrarlı yükler altında zeminin kum benzeri davranış mı kil benzeri davranışı mı göstereceğini belirleyen bir sınır bulunmaktadır. Boulanger ve Idriss (2006, 2007), plastisite indeksi 7'den büyük olan ince daneli zeminlerin kil benzeri davranış göstermesinin beklendiğini öne sürmüştür (aşırı boşluk suyu basıncı oranının 0.95 değerine ulaşmadan önce zeminin göçmesi) (Bozyiğit, 2022). Dolayısıyla, farklı plastisite değerlerine sahip silt örnekleri aynı kriterde mukayese edebilmek üzere sıvılaşma kriteri olarak %5 çift genlikli eksenel deformasyon ($\epsilon_{DA},\%$) kriteri göz önüne alınmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Enerji bazlı sıvılaşma yönteminin uygulandığı çalışmada; altı farklı kombinasyonda (PI: 6, 9, 17; D_r : % 40, 80) hazırlanan örnekler sabit çevresel basınç altında ($\sigma_c=100$ kPa) ve dört farklı CSR oranında izotropik yükleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Deneye tabi tutulan örnekler ve elde edilen birim hacim enerjileri.

Deney no	Plastisite indeksi (PI)	Rölatif sıklık ($D_r, \%$)	Çevrimsel gerilme oranı (CSR)	Çevrim sayısı (N)	Birim hacim sıvılaşma enerjisi ($\Delta W, \text{kJ/m}^3$)
1	6	40	0.082	53.17	1.4327
2	6	40	0.110	11.76	1.3512
3	6	40	0.136	4.19	1.4071
4	6	40	0.138	1.17	1.2989
5	6	80	0.084	93.58	1.5898
6	6	80	0.109	35.67	1.5524
7	6	80	0.113	29.27	1.7865
8	6	80	0.181	1.67	1.4043
9	9	40	0.068	37.02	0.6959
10	9	40	0.072	31.79	0.7421
11	9	40	0.084	11.00	0.7607
12	9	40	0.085	9.00	0.6117
13	9	80	0.067	190.10	1.4757
14	9	80	0.079	99.19	1.4341
15	9	80	0.105	11.96	1.1301
16	9	80	0.119	4.25	1.3675
17	17	40	0.078	57.79	2.3464
18	17	40	0.105	8.73	1.2901
19	17	40	0.138	0.80	1.2400
20	17	40	0.153	0.69	1.1966
21	17	80	0.087	140.75	2.9606
22	17	80	0.102	83.76	4.0212
23	17	80	0.135	15.23	4.1706
24	17	80	0.144	16.62	3.9354

Tablo 2’de deney koşulları ve elde edilen birim hacim enerjileri özetlenen deneylerden elde edilen sonuçlara göre çoklu regresyon analizi yapılmış ve düşük plastisiteli siltler için modeller oluşturulmuştur. Çevrimsel gerilme oranının etkisini inceleyebilmek amacıyla, çevrimsel gerilme oranının dâhil edilerek ve edilmeyerek iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Literatürde enerji bazlı yöntem için elde edilmiş benzeri modeller göz önünde bulundurulduğunda, rölatif sıkılık (D_r), çevresel efektif gerilme (σ'_c), çevrimsel gerilme oranı (CSR), ince dane içeriği (F_c), eğrilik katsayısı (C_c) ve ortalama dane çapı (D_{50}) parametrelerinin kullanılmış olduğu görülmektedir. Ancak, literatürde oluşturulan bu modellerin kum zemin özelinde oluşturulduğu dolayısıyla oluşturulacak yeni modelin siltleri temsil etmesi açısından silt zeminlere uygun parametreler ile oluşturulması planlanmıştır. Bu nedenle, oluşturulacak yeni modele literatürde daha önce kullanılmayan plastisite indeksi (PI) de dâhil edilmiştir. Analizde kullanılan diğer parametreler ise rölatif sıkılık (D_r) ve çevrimsel gerilme oranı (CSR) değeridir. Deneyler aynı çevresel efektif gerilme (σ'_c) altında gerçekleştirildiği için analizlere dâhil edilmemiştir.

Plastisite indisinin doğrudan artışı ile sıvılaşma direncinin doğrudan artış göstermediği, silt zeminlerin içerdiği kilin minerolojisi gibi parametrelerin de etkili olduğu yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir (Bozyiğit, 2022). Deneysel çalışmada kullanılan örneklerin plastisite indeksi değerleri de 6 ile 17 olmak üzere oldukça dar bir aralıkta değişmekte ve plastisite indisinin neden olduğu değişimin birinci dereceden bir denklem ile ifade edilemeyeceği düşünülmüştür. Bu nedenle, plastisite indeksi regresyon analizinde için birinci ve ikinci dereceden ifade edilmiştir. Çevrimsel gerilme oranı ve rölatif sıkılık ise daha önce yapılan çalışmalar göz önüne alınarak birinci dereceden ifade ile regresyon analizine dâhil edilmiştir.

Regresyon analizinde kullanılması planlanan parametrelere göre parabolü ifade eden genel regresyon denklemi Denklem 1’de görülmektedir. Denklem 1’e regresyon analizi için gerekli görülen parametreler dâhil ederek Denklem 2 elde edilmiştir.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^2 + \beta_2 x_i + \beta_3 x_i + \beta_4 x_i \quad (1)$$

$$\Delta W = \beta_0 + \beta_1 PI^2 + \beta_2 PI + \beta_3 D_r + \beta_4 CSR \quad (2)$$

Burada; β_i Parametre katsayısı, x_i Genel parametre ifadesi, Y_i Analizde kullanılacak gözlem, $\Delta W(\text{kJ/m}^3)$ birim hacim sıvılaşma enerjisi, PI Plastisite indeksi, D_r Rölatif sıkılık(%), CSR çevrimsel gerilme oranıdır.

Regresyon analizinde farklı tabanlar ile analiz yapılmış ve en başarılı sonuç logaritmik tabanda elde edilmiştir. Analizde kullanılan deney verileri ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir. Tablo 3’de %5 çift genlikli aksenal deformasyona karşılık gelen birim hacim enerji değerleri ile Denklem 3 ve Denklem 4’e göre hesaplanan tahmini değerler sunulmuştur.

$$\log(\Delta W) = 0.957 + 0.0113 PI^2 - 0.243 PI + 0.0064 D_r - 1.081 CSR \quad (R^2= 0.831) \quad (3)$$

$$\log(\Delta W) = 0.681 + 0.0098 PI^2 - 0.207 PI + 0.0063 D_r \quad (R^2= 0.816) \quad (4)$$

Tablo 3. Birim hacim enerji değerleri ve oluşturulan modellerin öngördüğü değerler.

Deney no	Plastisite indeksi (PI)	Rölatif sıkılık (D_r , %)	Çevrimsel gerilme oranı (CSR)	Birim hacim sıvılaşma enerjisi (ΔW , kJ/m ³)	Ön Görülen Değerler (ΔW , kJ/m ³) Denklem 3	Ön Görülen Değerler (ΔW , kJ/m ³) Denklem 4
1	6	40	0.082	1.4327	1.1999	1.1014
2	6	40	0.110	1.3512	1.1181	1.1014
3	6	40	0.136	1.4071	1.0472	1.1014
4	6	40	0.138	1.2989	1.0417	1.1014
5	6	80	0.084	1.5898	2.1602	1.9643
6	6	80	0.109	1.5524	2.0326	1.9643
7	6	80	0.113	1.7865	2.0093	1.9643
8	6	80	0.181	1.4043	1.6967	1.9643
9	9	40	0.068	0.6959	0.7524	0.7266
10	9	40	0.072	0.7421	0.7449	0.7266
11	9	40	0.084	0.7607	0.7222	0.7266
12	9	40	0.085	0.6117	0.7208	0.7266
13	9	80	0.067	1.4757	1.3650	1.2959
14	9	80	0.079	1.4341	1.3243	1.2959
15	9	80	0.105	1.1301	1.2419	1.2959
16	9	80	0.119	1.3675	1.2000	1.2959
17	17	40	0.078	2.3464	1.9106	1.7469
18	17	40	0.105	1.2901	1.7897	1.7469
19	17	40	0.138	1.2400	1.6478	1.7469
20	17	40	0.153	1.1966	1.5873	1.7469
21	17	80	0.087	2.9606	3.3919	3.1157
22	17	80	0.102	4.0212	3.2670	3.1157
23	17	80	0.135	4.1706	3.0089	3.1157
24	17	80	0.144	3.9354	2.9431	3.1157

Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak elde edilen regresyon katsayılarının, rölatif sıkılık ve plastisite indeksi gibi parametrelerin az sayıda deney içermesinden dolayı beklenenden daha düşük olduğu kanısına varılmıştır. Daha tutarlı sonuçlar elde etmek için daha fazla parametre ve deneysel sonuç içeren bir veri sistemi oluşturulmalıdır. Ek olarak, CSR değerlerinin regresyon katsayıları üzerindeki etkisi de incelendiğinde, CSR değerlerinin enerji değerleri üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı ve bu durumun, Figueroa vd. (1994) tarafından yapılmış olan çalışmayla örtüştüğü görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada; enerji bazlı sıvılaşma analizinin düşük plastisiteli silt zeminlere uygulanabilirliği incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Plastisite indeksinden bağımsız olarak rölatif sıkılığın artışı ile birlikte birim hacimde biriken enerji miktarı artış göstermiş, dolayısıyla sıvılaşma direncinde artış görülmüştür.

Beklenildiği üzere, rölatif sıkılık ve plastisite indeksinden bağımsız olarak örneklere uygulanan CSR değerinin azalması ile birlikte sıvılaşma için gerekli çevrim sayısı artış göstermiştir. Ancak bu duruma karşın, birim hacimde biriken toplam enerji değerlerinde

benzer sonuçlar elde edilmemiştir. Dolayısıyla, örneklere uygulanan CSR değerinin birim enerji üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Silt zeminler için regresyon katsayısı yüksek modeller için analize farklı parametreler ile birlikte daha fazla deney sonucunun ilave edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Azeiteiro, R.J.N., Coelho, P.A.L.F., Taborda, D.M.G., Grazina, J.C. (2017), "Energy-Based Evaluation of Liquefaction Potential Under Non-Uniform Cyclic Loading", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 92, 650-665.
- Baziar, M.H., Jafarian, Y., Shahnazari, H., Movahed, V., Tutunchian, M.A. (2011), "Prediction of Strain Energy-Based Liquefaction Resistance of Sand-Silt Mixtures: An Evolutionary Approach", Computer Geoscience Journal, Vol 37(11), 1883-93.
- Baziar, M.H., Sharafi, H. (2011), "Assessment of Silty Sand Liquefaction Potential Using Hollow Torsional Tests—An Energy Approach", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 31, 857-865.
- Berrill, J., Davis, R. (1982), "Energy Dissipation and Seismic Liquefaction in Sands", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol 10(1), 59-68.
- Berrill, J., Davis, R. (1985), "Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands: Revised Model", Soils and Foundations, Vol 25(2), 106-118.
- Boulanger, R.W., Idriss, I. (2006), "Liquefaction Susceptibility Criteria For Silt Sand Clays", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132(11), 1413-1426.
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2007), "Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 133(6), 641-652.
- Bozyiğit, İ. (2022), "Siltli Zeminlerin Tekrarlı Yükler Altındaki ve Yükleme Sonrasındaki Davranışlarının Belirlenmesi", Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Figueroa, J. (1990), "A Method for Evaluating Soil Liquefaction by Energy Principles", Fourth US National Conference On Earthquake Engineering, Palm Springs, California.
- Figueroa, J.L., Dahisaria, N. (1991), "An Energy Approach in Defining Soil Liquefaction", Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, The University of Missouri-Rolla, Missouri, 11-15.
- Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., Dahisaria, N.M. (1994), "Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 120(9), 1554-1569.
- Green, R.A., Mitchell, J.K. (2004), "Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils", In: Geotechnical engineering for transportation projects, 1961-1970.
- Ke, X.Q., Chen, J.S., Shan, Y. (2019), "A New Failure Criterion for Determining The Cyclic Resistance of Low-Plasticity Fine-Grained Tailings", Engineering Geology, Vol 261, 105273.
- Kokusho, T. (2013), "Liquefaction Potential Evaluations: Energy-Based Method versus Stress Based Method", Canadian Geotechnical Journal, Vol 50(10), 1088-99.
- Law, K.T., Cao, Y., He, G. (1990), "An energy approach for assessing seismic liquefaction potential", Canadian Geotechnical Journal, Vol 27(3), 320-329.
- Liang, L., Figueroa, J.L., Saada, A.S. (1995), "Liquefaction under Random Loading: Unit Energy Approach", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 121(11), 776-781.

- Nemat-Nasser, S., Shokooh, A. (1979), “A unified approach to densification and liquefaction of cohesionless sand in cyclic shearing”, Canadian Geotechnical Journal, Vol 16(4):659–678.
- Ni, X., Ye, B., Cheng, Z., Ye, G. (2020), “Evaluation Of The Effects of Initial Deviatoric Stress and Cyclic Stress Amplitude on Liquefaction Potential of Loose and Medium-Dense Sands: An Energy-Based Method”, Soil Dynamics and Earthquake Engineerig, Vol 136, 106236.
- Okur, V., Umu, S.U. (2013), “Energy Approach to Unsaturated Cyclic Strength of Sand”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 11(2), 503–19.
- Polito, C., Green, R.A., Dillon, E., Sohn, C. (2013), “Effect of Load Shape on Relationship Between Dissipated Energy and Residual Excess Pore Pressure Generation in Cyclic Triaxial Tests”, Canadian Geotechnical Journal, Vol 50(11), 1118-1128.
- Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. (1970), “Vibrations of Soils and Foundations”, Prentice Hall.
- Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M., Shargh, A. (2019), “Evaluation of Liquefaction Potential in Sand–Tire Crumb Mixtures Using the Energy Approach”, International Journal of Civil Engineering, Vol 17, 181–191.
- Towhata, I., Ishihara, K. (1985), “Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear”, Soils and Foundations, Vol 25(3), 73–84.
- Yang, Z.X. and Pan, K. (2018), “Energy-Based Approach to Quantify Cyclic Resistance and Pore Pressure Generation in Anisotropically Consolidated Sand”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 30(9), 04018203.
- Yang, J., Sato, T. (2000), “Interpretation of Seismic Vertical Amplification Observed at an Array Site”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 90(2), 275–285.
- Zhang, W., Goh, A., Zhang, Y.M., Chen, Y.M., Xiao, Y. (2015), “Assessment Of Soil Liquefaction Based on Capacity Energy Concept and Multivariate Adaptive Regression Splines”, Engineering Geology, Vol 188, 29–37.