

İÇME SUYU ARITMA TESİSİ ÇAMURU İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE CBR DEĞERLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Esra Deniz GÜNER¹, Baki BAĞRIAÇIK^{2*}

¹Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Balcalı 01330, Adana, Türkiye

²Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balcalı 01330, Adana, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 01.07.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 14.09.2021 DOI:10.54365/adyumbd.960741

ÖZET

Temiz ve güvenilir içme suyuna olan küresel talep katlanarak artmaktadır. Bu talebi karşılamak için, yüzey suyunun arıtılması sırasında su arıtma tesislerinde büyük miktarda çamur oluşur. İçme suyu arıtma tesislerinden gelen çamur (İSAÇ), genellikle tehlikeli olmayan atık olarak düzenli depolama sahalarında bertaraf edilir. Ancak İSAÇ'ın ekonomik olarak sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde yönetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda atıkların bertaraf yöntemlerinden biri, zemin iyileştirmede kullanılmasıdır. İSAÇ'ın bu kapsamda değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygun olmaktadır. Çalışmada, İSAÇ'ın zemin iyileştirmede kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kil zemine sırasıyla %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında İSAÇ ilave edilerek karışımın Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) belirlenmiştir. Kil zemine ilave edilen İSAÇ oranına bağlı olarak CBR değerlerinde %75'e varan iyileşmeler gözlenmiştir. Ayrıca, kil bir zeminin iyileştirmesinde CBR bakımından İSAÇ'ın optimum oranı %12.5 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, İSAÇ'ın geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirmede kullanılacak alternatif bir atık olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelime: Kaliforniya taşıma oranı (CBR), İçme suyu arıtma çamuru, Kil zemin, Zemin iyileştirme

INVESTIGATION OF CBR VALUES AT SOIL IMPROVEMENT BY USING DRINKING WATER TREATMENT SLUDGE

ABSTRACT

The global demand for clean and safe drinking water is growing exponentially. To meet this demand, a large amount of sludge is formed in water treatment plants during the treatment of surface water. Sludge from these drinking water treatment plants (DWTS) is generally disposed of as non-hazardous waste in landfills. However, DWTS needs to be managed in an economically sustainable and environmentally friendly manner. In line with this need, one of the disposal methods of waste is its use in soil improvement. Evaluation of DWTS, in this context, is appropriate both economically and environmentally. For this purpose, in this study, the usability of DWTS in soil improvement was investigated. The California Bearing Ratio (CBR) of the mixture was determined by adding 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15% DWTS to the clay soil, respectively. Depending on the rate of DWTS added to the clay soil, up to 75% improvements were observed in CBR values. In addition, the optimum ratio of DWTS in terms of CBR in the improvement of a clay soil was determined as 12.5%. As a result, DWTS is considered to be an alternative waste that can be used for soil improvement in geotechnical engineering.

Keywords: California Bearing Ratio (CBR), Drinking water treatment sludge, Clay soil, Soil improvement

*2 e-mail: bbagriacik@cu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1860-2881> (Sorumlu Yazar),

1 e-mail: eguner@cu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0492-2999> (Sorumlu Yazar),

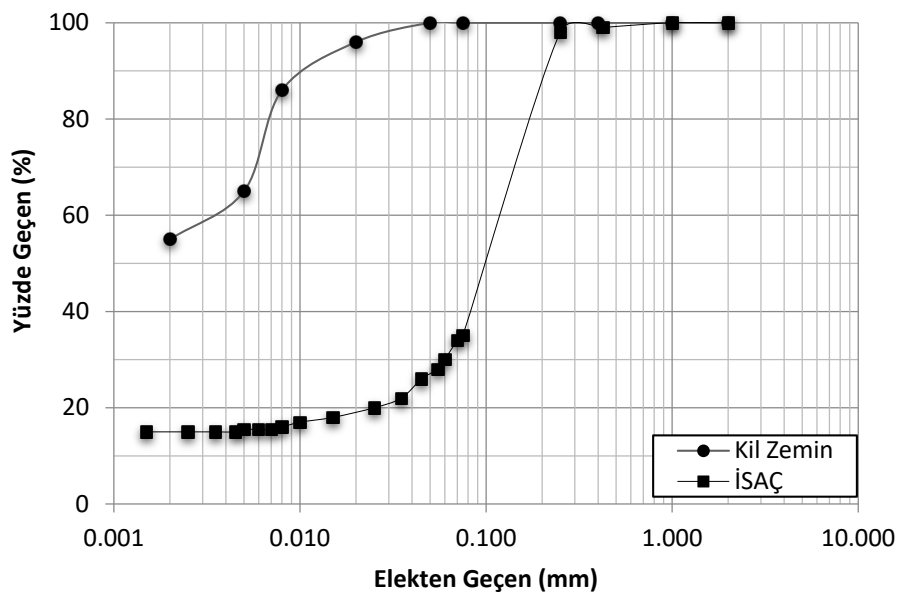
1. Giriş

İçilebilir su için yüzey suyunun arıtılması sırasında su arıtma tesisleri büyük önem taşır. İçme suyu arıtma tesisleri fiziksel, bakteriyolojik ve kimyasal açıdan istenilen içme ve kullanma standartlarında su ihtiyacını karşılamak için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. İçme suyu arıtma yöntemleri suyun bileşimine ve kalitesine büyük ölçüde bağlılık gösterse bile, genel olarak, arıtma birkaç önemli adım içerir. Geleneksel içme suyu arıtma tesisi, koagülasyon (hızlı karıştırma), flokülasyon (yavaş karıştırma), çökeltme, filtrasyon ve dezenfeksiyon ünitelerinden oluşur. Bazı parçacıklar kendiliğinden durgun sudan çökeltme denilen süreç ile çökeltmekle sudan ayrılır. Kendi ağırlığı ile çökelemeyen partikül maddeler ise, koagülasyon, flokülasyon işlemi ile giderilir. Koagülasyon işleminde, suya alüminyum sülfat, demir sülfat, demir klorür veya polimerler gibi demir veya alüminyum tuzları eklenir [1]. Flokülasyon işleminde ise koagülasyon işlemine suya ilave edilen pozitif yüklü kimyasal maddeler, suda çözünmüş ve asılı parçacıkların negatif yükünü nötralize eder. Bu reaksiyon oluştuğunda, parçacıklar birbirine bağlanır veya pıhtılaşır (bu işleme pıhtılaştırma da denir). Bu proseste kendi ağırlığı ile çökelebilen daha büyük parçacıklar (floc) yumakları oluşturulur[2]. Bu yumaklar çöktürme sürecinde dibe çökler ve dipte oluşan bu kaçınılmaz atık malzemeye içme suyu arıtma çamuru (İSAÇ) denir. Elde edilen bu atık İSAÇ çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik teknolojilerle kalınlaştırma, yumuşatma, susuzlaştırma, stabilizasyon ve kurutma proseslerinden [3, 4] geçerek bertarafa hazır hale getirilir. İSAÇ, genellikle sıvı ya da yarı sıvı halde olup su arıtımı işlemi sırasında askıya alınmış veya çözünmüş organik/inorganik maddelerden oluşmaktadır [5]. İSAÇ'ın katı madde içeriği işletmeye göre değişim gösterse de %0.25-12 oranında katı içermektedir [6]. İSAÇ içeriğine göre, yakma, kompost ve gübre malzemesi olarak tarımda [7], kurak arazilerde zemin iyileştirici olarak[8], deponi tesislerinde örtü malzemesi olarak [9], ek yakıt olarak [10], tuğla, fayans ve diğer seramik gibi inşaat malzemesi üretimi [5, 11-13] gibi pek çok farklı alanda ekonomik değerlere sahip yeniden kullanılabilir bir materyaldir. Ancak içme ve kullanma su ihtiyacının sürekli olduğu ve artarak devam ettiği göz önüne alınırsa oluşan İSAÇ'ın da kayda değer orandan artacağı aşikardır. İçme suyu arıtma proseslerinden kaynaklanan çamur üretiminin genellikle arıtma prosesi sırasında kullanılan ham suyun hacminin %1-3'ünü temsil ettiği tahmin edilmektedir [14]. Küresel ölçekte çamur üretiminin 10.000 ton/gün aştığı ve tipik bir arıtma tesisinde yaklaşık 100.000 ton/yıl çamur ürettiği tahmin edilmektedir [15, 16]. Üretilen İSAÇ miktarının sürekli artması ve sürdürülebilir kalkınmaya göre hareket etmenin önemi ile yerel idareler için hem çevresel hem de ekonomik problem olarak İSAÇ'ların bertarafı karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden İSAÇ'ların verimli ve faydalı olacak şekilde yeniden kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi oldukça önemlidir. Zemin iyileştirme, "mühendislik özellikleri bakımından yetersiz olan zeminler temelden gelen yükü güvenilir bir şekilde taşıyabilmesi yapılan çalışmalar" olarak tanımlanabilir [17]. Bu amaçla iyileştirme, zemin parçacıklarının fiziksel olarak kimyasaldan daha fazla yapıştırılmasıyla sağlanır. Zemin iyileştirmenin temel amacı, belirli bir projenin mühendislik özellikleri bakımından yeterli kriterleri sağlamayan zayıf zeminlerin mühendislik kriterleri bakımından uygun hale getirilmesidir. Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi inşaat endüstrisindeki en büyük zorluklardan biridir [18, 19]. Özellikle karayolu ve demiryolu gibi ulaşım yapılarında [19, 20] bu tür iyileştirmeler sıklıkla yapılmaktadır. Zemin stabilizasyonu, sadece yumuşak zeminin basınç dayanımının artırılmasından değil [21, 22], aynı zamanda kayma mukavemeti, filtre, drenaj sisteminin iyileştirilmesinde [22], trafik yüklerine karşı zemin direncinin artırılması gibi proje gereksinimlerini karşılamak için [23] kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme teknikleri, dünyanın her yerinde zemin taşıma kapasitesini ve dengesini artırmak, setler, istinat duvarları ve köprüleri gibi çok uzun tasarım ömrüne sahip projelerin inşasını mümkün kılmak için kullanılmaktadır [24]. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi yol yapımında temel ve alt temel zeminlerin kontrolünün sağlanmasında kullanılan önemli bir geoteknik mühendisliği deneyidir. CBR bakımından yeterli kriterleri sağlamayan zeminlerin çeşitli atıklarla kullanılarak hem zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilmekte hem de atık malzemelerin bir taraf edilmesi sağlanmaktadır. Literatürde bu çerçevede atık kullanımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Öğütülmüş atık lastik katkısının (%1 ve %2 oranlarında) zemin numunesi üzerindeki etkisini belirleyebilmek için farklı su

muhtevalarında CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Atık lastik karıştırılarak en yüksek CBR değeri %8 ile %8.5 su muhtevası değerlerinde elde edilmiştir. Kumlu zeminde atık lastiklerin karışım oranlarının artmasıyla CBR değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir[25]. Başka bir çalışmada ise, uçucu kül ve inşaat atıklarından olan mermer tozu kullanarak otoyol alt temel yapısında değerlendirilmesi için doğal zemine %5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilmiş ve CBR deneyleri yapılmıştır. Atık malzemeler ile elde edilen yeni zemin numunelerinde CBR değerlerinde iyileşmeler görülmüştür [26]. Zemine ilave edilen atık seramik tozlarının CBR ve dayanım parametreleri hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda, atık seramik tozlarının %30 oranına kadar zemin iyileştirilmesinde kullanılabileceği açıklanmıştır [27]. Yine farklı bir çalışmada, inşaat yıkıntı atıkları ile iyileştirilen zeminlerin CBR değerleri araştırılmıştır. Çalışmada, İnşaat yıkıntı atığı kullanımı ile zeminlerin iyileştirilebileceği anlaşılmış ve en yüksek CBR değeri %23 oranında kullanılan yıkıntı atığı katkısında tespit edilmiştir [28]. Literatüre bakıldığında İSAÇ kullanımı ile zemin iyileştirmeye yönelik çalışmalar çok kısıtlıdır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, mühendislik özelliği bakımından yeterli kriterleri sağlamayan bir kil zeminde İSAÇ'ın kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla farklı oranlarda hazırlanan numuneler üzerinde CBR testleri yapılmıştır.

2. Materyal ve Metod

Deneylerde, 0.074 mm elek aralığının (No.200) altında kalan kohezyonlu zemin kullanılmıştır. Deneylerden kullanılan numunelere ait gradasyon eğrisi Şekil 1'de sunulmuştur. Kohezyonlu zemine ait endeks ve mukavemet parametrelerinin belirlenmesi amacıyla bir seri deney gerçekleştirilmiş ve sonuçlara göre, zeminin sınıfı [29] orta plastisiteli kil (CI) olarak belirlenmiştir. Orta plastisiteli kil zeminin likit limit değeri yaklaşık olarak %42, plastik limit değeri yaklaşık olarak %24, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 17.4 kN/m^3 , optimum su muhtevası ise %18.10 [30] olarak yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. İSAÇ ise, Adana ilindeki Çatalan barajında toplanan suyu arıtma "Çatalan İçme Suyu Arıtma" ($37^{\circ}18'84.5''\text{K}$, $35^{\circ}26'27.3''\text{E}$) yüzey suyu arıtma tesisinden temin edilmiştir. Bu arıtma tesisi $500.000 \text{ m}^3/\text{gün}$ kapasiteye sahip olup, yaklaşık 4 ton/gün İSAÇ üreterek yılda yaklaşık 1460 ton üretim yapmaktadır. Sudaki kolloidal organik ve inorganik safsızlıkları gidermek için pıhtılaştırıcı olarak demir III klorür kullanılır. Tesisde oluşan İSAÇ susuzlaştırma işlemi sonrası depolama sahasına iletilir. Susuzlaştırma işlemi sırasında dekantörde oluşan İSAÇ Şekil 2'de görülmektedir. Dekantör prosesinden toplananıp laboratuvar da kullanılan İSAÇ yığın resimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. İSAÇ'a ve kil zemine ait kimyasal içerikler Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Numunelere ait gradasyon eğrileri

Tablo 1. Numunelere ait kimyasal içerikler [30]

Bileşik	İSAÇ (%)	Kil Zemin (%)	Bileşik	İSAÇ (%)	Kil Zemin (%)
SiO ₂	16.02	50.6	NaO ₂	0.3	-
Al ₂ O ₃	48.23	18.4	TiO ₂	0.53	1.65
CaO	2.62	3.2	P ₂ O ₅	0.13	0.65
K ₂ O	8.10	3.1	MnO	0.38	3.1
MgO	0.31	6.1	ZnO	1.12	-
Fe ₂ O ₃	1.15	-	Fe ₂ O		8.7
Na ₂ O		2.5			

**Şekil 2.** Dekantörde oluşan İSAÇ**Şekil 3.** Dekantör prosesinden toplanıp deneylerde kullanılan İSAÇ resimleri

Karayolları temel zeminlerinde kullanımında problem çıkarabilecek orta plastisiteli kil zeminlerin stabilizasyonunun kontrolünü yapmak amacıyla CBR deneyleri yapılmıştır (Şekil 4). CBR deneyi aşağıdaki prosedürlerde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen bir su içeriğinde ve yoğunluğunda hazırlanan zemin numunesinin üzerine belli bir hızla batırılan penetrasyon pistonunun istenen derinliğe kadar batması için uygulanan gerilmenin, kırma taşla yapılan deneyde aynı pistonun aynı batma derinliğine kadar gelmesi için uygulanan standart gerilmeye oranı olarak tanımlanmaktadır. CBR değeri genellikle 2.54 mm (0.10 in) penetrasyona karşılık gelen deneyde uygulanan gerilmenin standart gerilmeye oranı olarak bulunur. Deney sonunda bir CBR elde edilir [31]. Farklı oranlarda İSAÇ karıştırılarak oluşturulan zemin numunesi üzerinde CBR değerleri belirlenmiştir. İçme suyu arıtma tesisi atığı oranları ise sırasıyla %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 olarak seçilmiştir. Deneylerde, çapı 14.24 cm ve yüksekliği 17.78 cm olan CBR kalıpları kullanılmış ve zemin kalıba 5 tabaka halinde serilerek sıkıştırılmıştır. Taban plakası takılmış ancak üst yüzeyi açık kalıba yerleştirilen zemin numunesi, basınç aletinin plakası üzerine yerleştirilmiştir [32]. Numunenin üzerine 4.5 kg'lık ağırlıklar konularak, penetrasyon işlemi için kullanılacak alet 1.27 mm/dk (0.05 in/dk) hızla pistonu numune içerisine itilmiştir. Belirlenen penetrasyon miktarına karşılık gelen yük okumaları kayıt edilmiş ve yük okumaları 5 mmlik penetrasyon değerlerine kadar alınmıştır [31]. Penetrasyon işlemi tamamlandıktan sonra, piston kaldırılmış, numune yüzeyinde bırakmış olduğu girintiler doldurularak, çıkıntılar çelik cetvelle kesilip numunenin yüzeyi düzeltilmiştir. Deney sonucunda, %100 CBR değerine karşılık olan standart yük- penetrasyon, 1.25 mm'lik penetrasyonda 860 kg, 2.5 mm'de 1350 kg, 5.0 mm'de 2035 kg, 7.5 mm'de 2585 kg, 10 mm'de 3130 kg ve 12.5 mm'de 3590 kg olarak tanımlanarak, belirli bir penetrasyonu sağlayan yükün aynı penetrasyonu sağlayan standart eğri üzerindeki yüke oranı, o penetrasyondaki CBR değeri olarak tanımlanmıştır [31, 32].

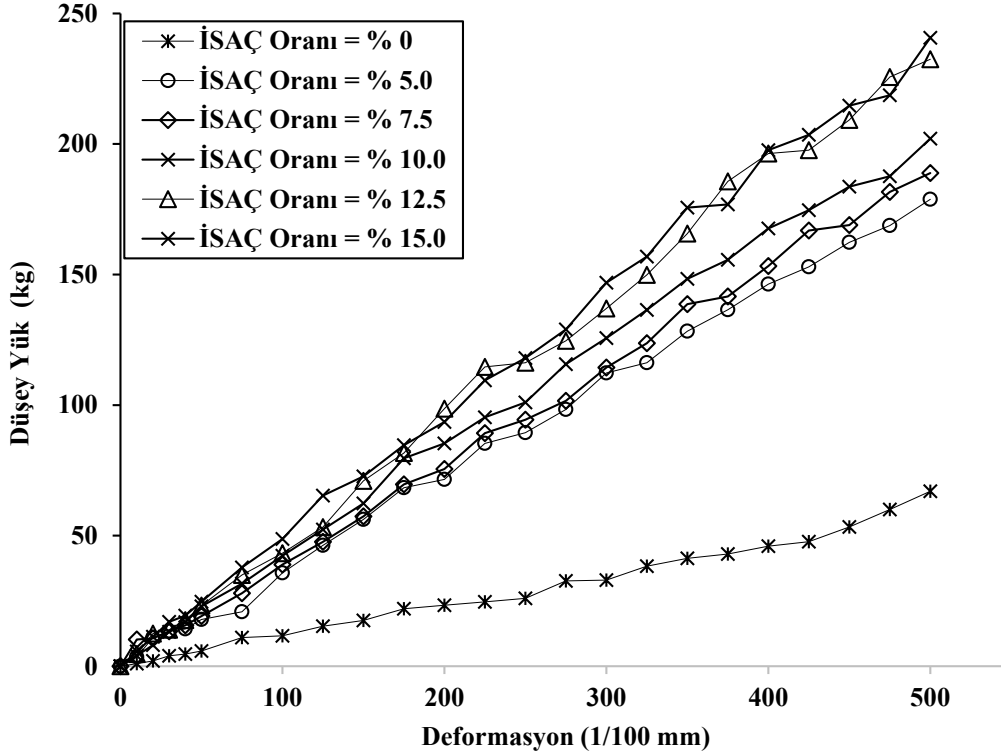


Şekil 4. Deney düzeneği

3. Bulgular ve Tartışma

Kil zeminin iyileştirilmesi amacıyla farklı oranlarda İSAÇ katkısı ile oluşturulan numuneler için 2.5 mm ve 5 mm penetrasyona karşılık gelen CBR değerleri belirlenmiştir. CBR değerleri TS 1900'da belirtildiği gibi, yük-deformasyon grafiğinde, 2.5 mm penetrasyona karşılık gelen yükün 1350'ye, 5 mm penetrasyona karşılık gelen yükün de 2035'e bölünmesi ile belirlenmiştir. Orta plastisiteli kil zemin için, su içeriği tüm deneylerde yaklaşık %10 alınmıştır [33]. Şekil 5'te farklı oranlarında İSAÇ

atığı ile oluşturulan orta plastisiteli kil zemin için yük deformasyon ilişkisi görülmektedir. Dene sonuçlarına göre, tüm karışım oranlarında İSAÇ ile stabilizasyon yapılması durumunda, stabilizasyon yapılmamış duruma göre, aynı deformasyona karşılık düşey yük değerlerinde iyileşmeler meydana gelmiştir.

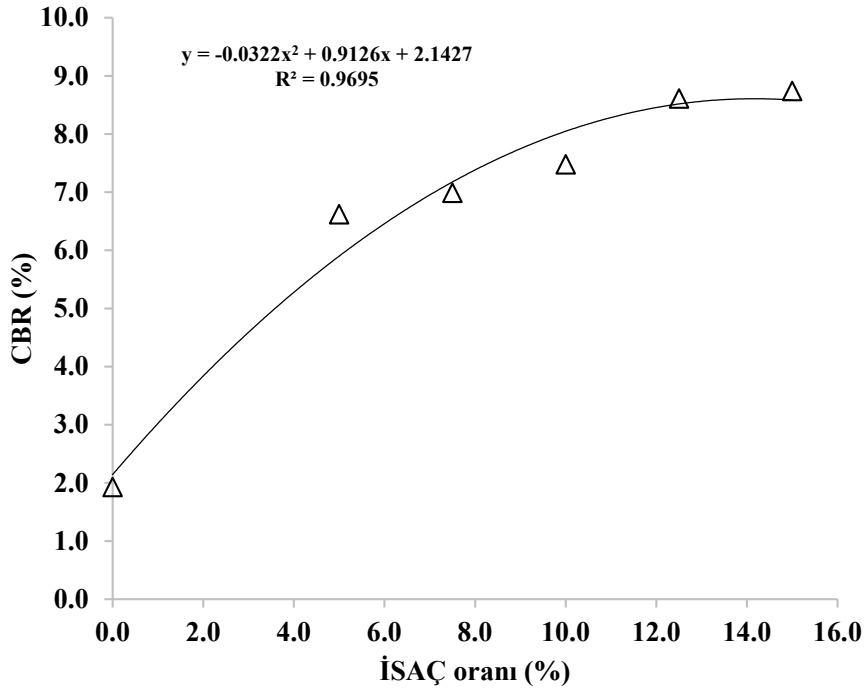


Şekil 5. Farklı oranlarda oluşturulan orta plastisiteli kil zemin için yük deformasyon ilişkisi

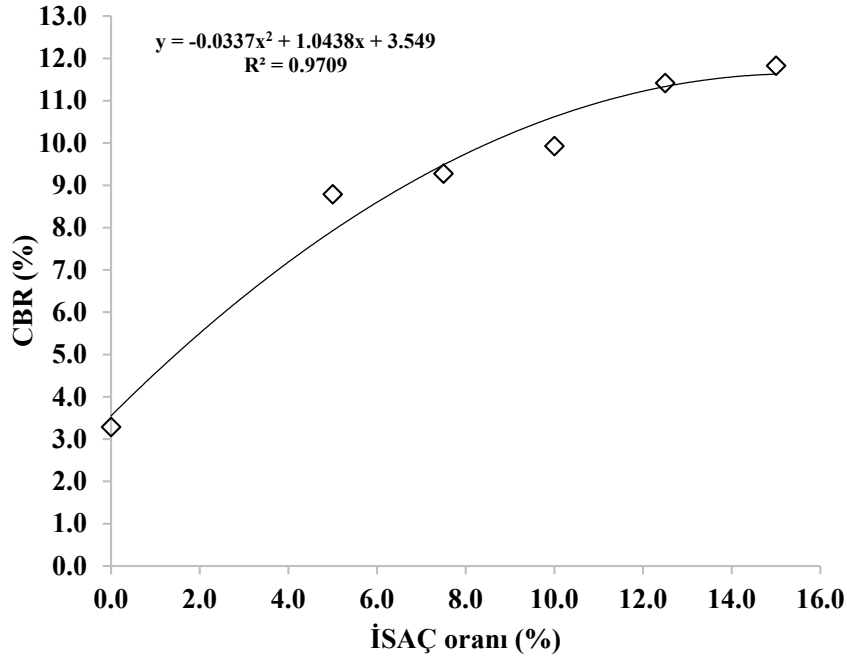
Şekil 6-7 ve Tablo 2’de, farklı oranlarda İSAÇ ile hazırlanan orta plastisiteli kil zemin için 2.5 mm ve 5 mm penetrasyona karşılık gelen CBR değerleri görülmektedir.

Tablo 2. 2.5 mm ve 5.0 mm için %CBR – %İSAÇ İlişkisi

İSAÇ Oranları %	2.5 mm için CBR değerleri	5 mm için CBR değerleri
0	1.93	3.29
5	6.62	8.79
7.5	6.99	9.28
10	7.48	9.93
12.5	8.61	11.42
15	8.74	11.83



Şekil 6. 2.5 mm için %CBR – %İSAÇ ilişkisi



Şekil 7. 5.0 mm için %CBR – %İSAÇ ilişkisi

CBR değerlerine göre zeminler 3 sınıfta (zayıf, az zayıf/orta ve sağlam zeminler) gruplandırılabilirler. CBR değeri 0-3 arasında değişen zeminler çok zayıf zeminlerdir. Bu gruptaki zeminler mutlaka ıslah edilmelidir. CBR değeri 3-7 arasında değişen zeminler az zayıf- orta zeminlerdir. Bu gruptaki zeminler ilave tedbirlerin alınıp alınmaması zeminin diğer mühendislik özelliklerine bağlıdır. CBR değeri 10'dan büyük zeminler ise sağlam zeminler olarak kabul edilmektedir [34]. Çizelge 1 incelendiği zaman, başlangıçta zeminin CBR açısından değerlendirilmesi yapıldığında zayıf grupta kategori

edilirken, zemine İSAÇ eklenmesi durumunda zeminin zayıf zemin kategorisinden çıkarak, az zayıf ve orta zemin kategorisinde değerlendirilebileceği gözlenmiştir. En yüksek CBR değeri her iki penetrasyon değerinde de yaklaşık %15 karışım oranında meydana geldiği gözlenmiş ancak %5, %7.5, %10, %12.5, %15 oranlarında İSAÇ karıştırılarak yapılan karışımlarda, İSAÇ olmaması durumuna göre, 2.5 mm ve 5 mm için CBR değerlerinde sırasıyla ortalama %66.71, %68.47, %70.53, %74.39 ve %75.05 artışlar meydana gelmiştir. %12.5 karışım oranına kadar CBR değerlerinde kayda değer bir artış (%74.39) meydana gelirken, %12.5 karışım oranından daha fazla karışım oranında yaklaşık olarak %0.66 oranında bir değerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu nedenle, karışımda İSAÇ atığının %12.5'den fazla eklenmesi durumunda CBR değerlerinde kayda değer bir artış meydana getirmediğinden optimum oran olarak %12.5 oranı belirlemiştir. Ayrıca, her iki batma değeri için yüksek korelasyon katsayılı ($R^2=0.97$) formüller önerilerek, orta plastisiteli killerin İSAÇ ile iyileştirilip karayolları zeminlerinde kullanılması planlandığında; CBR değerlerinin belirlenmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir (Denklem 1 ve Denklem 2).

2.5 mm penetrasyon için;

$$\text{CBR} = -0.0337 (\text{İSAÇ})^2 + 1.0438(\text{İSAÇ}) + 3.549 \quad (1)$$

5 mm penetrasyon için;

$$\text{CBR} = -0.0322 (\text{İSAÇ})^2 + 0.9126(\text{İSAÇ}) + 2.1427 \quad (2)$$

(İSAÇ: % cinsinden içme suyu arıtma tesisi atığı miktarını ifade etmektedir.) (Denklemler %0- %15 aralığındaki karışım oranlarında geçerliliğini korumaktadır.)

4. Sonuçlar

İçme suyu arıtma tesisleri su arıtma prosesler ile istenilen ve yasal standartları karşılayan içme ve kullanma suyu üretirken, bir yan ürün olan içme suyu arıtma çamuru (İSAÇ) oluşturmaktadırlar. Bu atık İSAÇ'ların bertarafı için zemin iyileştirmede kullanılması önemli bir geri kullanım alanı sağlayabilir. Bu amaçla bu atığın, taşıma gücü ve oturma bakımından problem arz eden orta plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek amacıyla %5, %7.5, %10, %12.5, %15 oranlarında orta plastisiteli kil zeminlerle karışım yapılarak oluşturulan numunelerde CBR deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda genel olarak özetlenmiştir.

- İSAÇ %5, %7.5, %10, %12.5, %15 oranlarında karıştırılarak yapılan karışımlarda, İSAÇ olmaması durumuna göre, CBR değerlerinde sırasıyla ortalama %66.71, %68.47, %70.53, %74.39 ve %75.05 artışlar meydana gelmiştir.
- %12.5 İSAÇ ile yapılan karışım oranına kadar CBR değerlerinde %25.07'ye varan iyileşmelerin meydana geldiği belirlenmiştir.
- %12.5 karışım oranından daha fazla karışım oranında ise iyileşme değerinin bir miktar daha artarak (%0.66) sabit kaldığı, bu orandan sonra daha fazla artışın iyileşmede pek bir etkisinin olmayacağı görülmüştür.
- Orta plastisiteli killerin, İSAÇ ile iyileştirilmesinin sağlanmasında, optimum değer %12.5 olduğu görülmüştür.
- Kil zemin için CBR değerleri 2.5mm ve 5.0mm için sırasıyla 1.93 ve 3.29 olarak ortaya çıkmıştır. Kil zemine İSAÇ katkısı arttıkça, CBR değerlerinde 2.5mm ve 5.0mm için sırasıyla yaklaşık 4.5 ve 3.5 kata varan artışlar meydana gelmiştir. Böylece zemin zayıf zemin kategorisinden az zayıf- orta zeminler kategorisine yükselmiştir. İSAÇ kullanımı ile zeminin kategorisindeki iyileşmenin sebebi, İSAÇ içerisinde yüksek oranda Al_2O_3 bileşiğinin kil zeminin dayanımını artırarak, daha rijit bir yapının oluşması olarak düşünülmektedir.

- Bu tür zeminlerin, İSAÇ ile iyileştirilip karayolları zeminlerinde kullanılması planlandığında; CBR değerlerinin belirlenmesi için yüksek korelasyonlu denklemler elde edilmiş ve bu denklemlerin uygulamacılar ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmüştür.
2.5 mm penetrasyon için;
 $CBR = -0.0337(İSAÇ)^2 + 1.0438(İSAÇ) + 3.549$
5 mm penetrasyon için;
 $CBR = -0.0322(İSAÇ)^2 + 0.9126(İSAÇ) + 2.1427$
- Deney sonuçlarına göre, atık bir ürün olarak her yıl binlerce ton üretilen İSAÇ'ın, geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirmede alternatif bir katkı olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

- [1] Sales A, De Souza FR, Dos Santos WN, Zimer AM., Almeida FdCR. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: thermal properties and potential application. *Construction and building materials* 2010; 24(12): 2446-2453.
- [2] Trinh TK, Kang LS. Response surface methodological approach to optimize the coagulation–flocculation process in drinking water treatment. *Chemical engineering research and design* 2011; 89(7): 1126-1135.
- [3] Kelessidis A, Stasinakis AS. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste management* 2012; 32(6): 1186-1195.
- [4] Yu S, Zhang G, Li J, Zhao Z, Kang X. Effect of endogenous hydrolytic enzymes pretreatment on the anaerobic digestion of sludge. *Bioresource technology* 2013; 146:758-761.
- [5] Hamood A, Khatib JM, Williams C. The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed Fly Ash (u-FA). *Construction and Building Materials* 2017; 147: 27-34.
- [6] Yıldız Ş, Yılmaz, E, Ölmez, E. Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği İstaç A.Ş., Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu (TÜRKAY), Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryum ve Sergi Salonu, Piyalepaşa Bulvarı No.74, Şişli, 34379, İstanbul, 2009.
- [7] Grobelak A, Stępień W, Kacprzak M. Sewage sludge as an ingredient in fertilizers and soil substitutes. *Inżynieria Ekologiczna* 2016; 48: 52-60.
- [8] Chen P, Zhan L, Wilson W. Experimental investigation on shear strength and permeability of a deeply dewatered sewage sludge for use in landfill covers. *Environmental earth sciences* 2014; 71(10): 4593-4602.
- [9] Dayton E, Basta N. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute. *Water Environment Research* 2001; 73(1): 52-57.
- [10] Cao Y, Pawłowski A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16(3): 1657-1665.
- [11] Amin SK, Hamid EA, El-Sherbiny S, Sibak H, Abadir M. The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. *HBRC journal* 2018; 14(3): 309-315.
- [12] Rahman MM, Khan MMR, Uddin MT, Islam MA. Textile effluent treatment plant sludge: characterization and utilization in building materials. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2017; 42(4): 1435-1442.
- [13] Zhang Y, Jia L, Mei H, Cui Q, Zhang P, Sun Z. Fabrication, microstructure and properties of bricks fired from lake sediment, cinder and sewage sludge. *Construction and Building Materials* 2016; 121:154-160.

- [14] Blakemore R, Chandler R, Surrey T, Ogilvie D, Walmsley N, Management of water treatment plant residuals in New Zealand, Water Supply Managers' Group, New Zealand Water and Wastes Association, Auckland (1998) 56.
- [15] Ahmad T, Ahmad K, Alam M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. *Procedia Environmental Sciences* 2016; 35: 950-955.
- [16] Okuda T, Nishijima W, Sugimoto M, Saka N, Nakai S, Tanabe K, Ito J, Takenaka K, Okada M. Removal of coagulant aluminum from water treatment residuals by acid. *Water research* 2014; 60: 75-81.
- [17] Essler R. Chapter 59 Design principles for ground improvement, ICE manual of geotechnical engineering, Thomas Telford Ltd2012, pp. 911-938.
- [18] Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica* 2013; 8(4): 395-405.
- [19] Senol A, Edil TB. M.S. Bin-Shafique, H.A. Acosta, C.H. Benson, Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling* 2006; 46(4): 365-376.
- [20] Fauzi A, Nazmi WM, Fauzi UJ. Subgrade stabilization of Kuantan Clay using Fly Ash and bottom ash, The 8th international conference on geotechnical and transportation engineering, 2010.
- [21] Bergado D, Anderson L, Miura N, Balasubramaniam A. Soft ground improvement in lowland and other environments, ASCE, 1996.
- [22] Prabakar J, Dendorkar N, Morchhale R. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials* 2004; 18(4): 263-267.
- [23] Zaliha SS, Kamarudin H, Al Bakri A, Binhussain M, Salwa MS. Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 2013; 7(5): 258-265.
- [24] Cofra, Ground Improvement, MebraDrain, BeauDrain and AuGeo <<http://www.cofra.co.uk/brochures/PVDUK.pdf>>, 2019 (accessed 10 Mar 2016).
- [25] Ordu E, Bicer P, Ordu S, Abanozoglu EG. Kumlu zeminlerin iyileştirilmelerinde atık lastiklerin kullanılması üzerine bir araştırma. *Aksaray University Journal of Science and Engineering* 2017; 1(1): 51-61.
- [26] Öntürk K, Fırat S, Vural İ, Khatib JM. Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanarak Yol Altyapısının İyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi* 2014; 17(1): 35-42.
- [27] Sabat AK. Stabilization of expansive soil using waste ceramic dust. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 17(Bund. Z) 2012.
- [28] Vural İ., İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 2019; 7(1): 1-6.
- [29] T.S. Enstitüsü, TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara, 2000.
- [30] Bağrıaçık, B., Güner, E.D. An Experimental Investigation of Reinforcement Thickness of Improved Clay Soil with Drinking Water Treatment Sludge as an Additive. *KSCE J Civ Eng*, 2020; 24, 3619–3627.
- [31] Aytekin M. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara, 2004.
- [32] T.S. Enstitüsü, TS 1900 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1987.
- [33] Bağrıaçık B. Ulaşım Yapıları Temel/Alt Temel Zeminlerinin Kireçle Stabilizasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(1): 39-48.
- [34] Türedi Y, Örnek M, Bal BB, Işık AO. Çelikhane Cürufu Katkısının Cbr Sonuçlarına Etkisinin Araştırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, Turkey; 2017, 429-436.