

Kilin Çelik Cürufu ile Stabilizasyonu

Münire FINDIK^{1*}

^{1*} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye, (ORCID: 0000-0001-7333-8713), mnr.dikmen@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 30.04.2024 ve Kabul Tarihi 25.06.2024)

(DOI: 10.35354/tbed.1476122)

ATIF/REFERENCE: Fındık, M. (2024). Kilin Çelik Cürufu ile Stabilizasyonu. *Teknik Bilimler Dergisi*, 14 (2), 19-28.

Öz

Yetersiz taşıma kapasitesine sahip killer, şişen zeminler ve oturma sorunları mühendisler için dünya çapında bir sorundur. Zeminlerin taşıma kapasitesini ve mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve şişme problemlerini en aza indirmek için farklı katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu en yaygın ve ekonomik açıdan çok tercih edilen yöntemlerdir. Zeminlerin inşaat atığı, silis dumanı, uçucu kül, plastik atık ve cam atığı gibi farklı katkı maddeleri ile stabilizasyonuna literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Günümüzde artan çevre kirliliği, doğaya zarar vermesi ve ekolojik dengenin bozulması nedeniyle bu atıkların kontrollü depolanması sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu atıkların geri dönüşüm ürünü olarak kullanılması hem doğaya hem de bazı mühendislik problemlerinin çözümüne katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada Burdur -Muğla bölgesinden elde edilen yumuşak kil ve demir cürufu ile killi zeminlerin stabilizasyonu, ile rijitlik özelliklerinin iyileştirilmesi, şişme basıncının ve potansiyelinin azaltılmasına yönelik deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla kuru kil ağırlığının % 10, % 15, % 20' si oranında cüruf içeren cüruf-kil karışımları hazırlanmıştır. Öncelikle kil numunesinin indeks özellikleri belirlenecek, dayanıklılık ve sıkışma testleri yapılmış ve ödometre testi yardımıyla şişme basıncı ve şişme yüzdesi belirlenmiştir. Sonrasında proktor sıklığında hazırlanan kil numunelerine %10, %15 ve %20 oranında demir cürufu karıştırılarak aynı deneyler tekrarlanmıştır. Bu deneylerin sonuçları grafik ve tablolar halinde sunulmuş ve demir cürufunun kile stabilizatör olarak kullanımıyla nem oranı, şişme yüzdesi, şişme basıncı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde ise oturma değerlerinin azaldığı ve gerilme şekillerinin değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kil, Çelik cürufu, Stabilizasyon, Plaxis 3D

Stabilization of Clay with Iron Slag

Abstract

Clay and expansive soils with insufficient bearing capacity and settlement problems are a worldwide problem for engineers. The most common and economical methods are used in soil stabilization with additives used to improve the bearing capacity and durability properties of soils and to minimize swelling problems. Stabilization of soils with different additives such as construction waste, silica fume, fly ash, plastic waste and glass waste is frequently encountered in the literature. Today, increasing environmental pollution poses the problem of controlled storage of these wastes due to damage to nature and disruption of ecological balance. Using these wastes as recycling products contributes to both nature and the solution of some engineering problems. In this study, experimental research will be carried out on the stabilization of clay soils, improvement of durability properties, and reduction of swelling pressure and potential with soft clay and iron slag obtained from the Burdur- Muğla region. For this purpose, slag-clay mixtures containing slag at the rate of 10, 15, 20% of the dry clay weight were prepared. First of all, the index properties of the clay sample were determined, durability and compression tests were performed, and the swelling pressure and percentage were calculated with the help of an odometer test set. Afterwards, the same experiments were repeated by mixing 10%, 15% and 20% iron slag into the clay samples prepared at proctor density. The results of this experiment were presented in graphs and tables, and it was observed that the moisture content, swelling percentage and swelling pressure values decreased with the use of iron slag as a clay stabilizer. From the finite element analyses, it was determined that the settlement values decreased and the stress patterns changed.

Keywords: Clay Iron slag, Stabilization, Plaxis 3D

1. Giriş

Yumuşak zeminlerin zayıf mühendislik performansı, yani yüksek sıkışabilirlik ve düşük taşıma kapasitesi, düşük kesme mukavemeti; altyapı bütünlüğünü, temel davranışını ve şev stabilitesini ciddi şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla bu özellik geoteknik mühendisliğinde evrensel olarak incelenmektedir [1],[2],[3],[4]

Nem içeriği değişen killi zeminlerin davranışına, özellikle bu zeminlerin Montmorillonit (smektit) ve illit mineralleri gibi hacim değişimine duyarlı önemli miktarda kil minerali içermesi durumunda büyük dikkat gösterilmelidir. Yağışlı mevsimlerde bu zeminler suya maruz kaldıkça şişip yumuşar, kurak mevsimlerde ise su kaybettiği büzülür ve sertleşir [5] Bu zeminler nem içeriğindeki değişime bağlı olarak önemli hacim değişimi gösterir. Çünkü bu zemindeki kil, suyu emme kabiliyeti yüksek olan mineralleri açısından zengindir. Bu zeminin şişme-büzülme davranışı, üzerine inşa edilen hafif binalar ve yol kaplamaları gibi altyapıların zarar görmesine neden olur [6] Bu davranışın bu tür zeminler üzerine inşa edilen yapılara ciddi zararlar verdiği bilinmektedir [5] Bu zeminlerin mekanik özellikleri iyileştirilerek oluşturacakları hasarlar azaltılabilir.

Zemin stabilizasyonu, özel mühendislik gereksinimlerini karşılamak üzere zemin özelliklerinin değiştirilmesi yoluyla zeminlerin iyileştirilmesine yönelik çözümlerden biridir. Başka bir deyişle zeminlerin belirli özelliklerinin bu amaçla uygulanacak mühendislik çözümleriyle fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için kompaksiyon, enjeksiyon, derin karıştırma, taş kolon, jet grout, zemin donatı takviyesi ve katkı malzemeleriyle stabilizasyon gibi çeşitli teknikler kullanılmıştır.

Geniş zemin özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok stabilizasyon tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Zemin güçlendirme yöntemlerinden biri olan kimyasal stabilizasyonda zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çok tercih malzemeler mevcuttur. Kireç, çimento ve uçucu kül, inorganik tuz ve diğer kimyasal bileşikler zemin davranışını iyileştirmek için tercih edilen stabilize edici malzemelerdir [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Bununla birlikte, bu yöntemlerin enerji veya yenilenemeyen kaynak tüketimi açısından önemli çevresel etkileri vardır. [6]. Bu bağlamda endüstriyel yan ürünlerin ve metalik cürüfların kullanımı son zamanlarda teşvik edilmektedir [12],[13],[14],[15].

Endüstriyel atıkların bertaraf edilmesi yerine yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi daha cazip hale gelmektedir. Demirin çeliğe dönüştürülmesinin bir yan ürünü olan çelik cürufu, halen büyük bir yüzdesi çöplüklerde bertaraf edilen endüstriyel atıklardan biridir. Geçtiğimiz yıllarda, inşaat malzemesi olarak doğrudan kullanım için daha istikrarlı olduğu düşünülen yüksek fırın cürufunun çelik cürufundan daha fazla olması nedeniyle çelik cürufu çok tercih edilmemektedir. Ancak 2002 yılında Avrupa'da ise 12 milyon ton, dünya çapında ise 50 milyon mt çelik cürufunun üretildiği tahmin ediliyordu [16], [17]. Şu anda dünya yıllık çelik cürufu üretiminin 90 ila 135 milyon mt arasında olduğu tahmin edilmektedir [18] Türkiye'de de artan çelik yapı stoğu göz önüne alındığında artan çelik cürufunun stoğu olduğu gözardı edilmemelidir.

Çelik fabrikalarının üretimi sonucu oluşan cüruf, katı atık olarak düzensiz bir şekilde depolanmakta ve çok sayıda arazi kaynağı tüketilmektedir. Bu büyük miktarlardaki katı atığın bertaraf edilmesi, kirlilik, enerji tüketimi ve karbon

emisyonlarından kaynaklanan çevresel sorunlar; kullanılmayan arazi kaynaklarından ve pahalı çimentolu malzemelerin değiştirilmesinden kaynaklanan ekonomik sorunlar oluşmaktadır [19]. Katı atıklar, özellikle taşıma maliyetinin en aza indirildiği kıyı bölgelerinde çevre dostu bir alternatif olarak yumuşak zeminin stabilizasyonunda giderek daha fazla kullanılmaktadır [20].

Çelik cürufunun çevresel güvenilirliği birçok araştırma ve saha inşaatı ile iyi bir şekilde kanıtlanmış olmasına rağmen, hacim kararsızlığı nedeniyle çelik cürufunun kullanımı, demir üretim prosesindeki cürufan, yani yüksek fırın cürufundan nispeten daha düşüktür. Çelik cürufunun yüksek oranda serbest kireç ve serbest magnezyum oksit içerdiği ve bunların su ile temas ettiğinde reaksiyona girerek hacim genişlemesine neden olabilecek hidroksitler oluşturduğu yaygın olarak bilinmektedir [21]. Çelik cürufu kimyasal bileşim olarak portland çimentosuna benzediği ve çevresel etkilerde daha güvenli olduğu için alternatif bir ürün olarak son zamanlarda tercih edilmektedir. Çünkü çimento ve kireçle stabilize edilmiş zemin büyük miktarlarda enerji ve kaynak tüketir; ayrıca çimento fabrikalarından kaynaklanan CO₂ emisyonu hem çevre hem de insan hayatı açısından ciddi sorunlara yol açmaktadır [20] Dünya çapında yayılan toplam karbon monoksitin yüzde beşinden sorumlu olduğunu iddia etmiştir [21]. Bu nedenle inşaat projelerinde atık veya yan ürünlerin oluşması için ilave çimentolu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik cürufunun yüksek oranda serbest kireç ve serbest magnezyum oksit içerdiği ve bunların su ile temas ettiğinde reaksiyona girerek hacim genişlemesine neden olabilecek hidroksitler oluşturduğu yaygın olarak bilinmektedir [22],[23],[24]. Bu nedenle, kilin şişme ve kayma mukavemeti parametrelerinin iyileştirilmesinde çimento, kireç gibi malzemelere alternatif olarak çelik cürufunun stabilizatör olarak kullanılması önerilmektedir [21]

Bazı araştırmacılar genişleyen zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için kırılmış kireçtaşı (CRL) kullanmıştır [25]. Çelik cürufunun farklı işlemlerde kullanılması, bertaraf sorununun hafifletilmesine ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olacaktır. Bu amaçla araştırmacılar, çelik fabrikalarının çelik cürufunu atık malzemesini zemin iyileştirmede, [26], [27] yol yapımında veya kaldırımlarda kullanılan agregalar olarak çelik cürufunun kullanımının uygulanabilirliğini belirlemeye odaklanmıştır, betonda agrega olarak veya diğer üretim süreçlerinde hammadde olarak kullanmışlardır [15].

Killi zeminde çelik cürufunun etkisini değerlendirmek amacıyla Doğal ve stabilize edilmiş zeminler üzerinde zemine %0, %2,5, %5, %10, %15 ve %20 oranında çelik cürufu ekleyerek bir dizi laboratuvar testi yapmışlardır. Zemin stabilize edildiğinde likit limit, plastisite indeksi, optimum nem içeriği, şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin azaldığını göstermiştir. Ancak killi zemin numunelerine çeşitli oranlarda çelik cürufunun eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı değerleri artırılmıştır. Çelik cürufunun killi toprakların geoteknik özelliklerini başarılı bir şekilde iyileştirdiğini görmüşlerdir [28]. Yumuşak killi toprak ile kuru ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çelik cürufu eklenecek elek analizi, Atterberg limitleri, serbest şişme indeksi (SI), özgül ağırlık, sıkıştırma, serbest basınç dayanımı ve üç eksenli test, hem kil zemin hem de harmanlanmış zemin üzerinde gerçekleştirmişlerdir Testler kürlenmenin 0, 7, 14 ve 28. günlerinde yapılmıştır. Karışımın zeminin mukavemet

karakteristiğinin, çelik cüruf yüzdesi ve kür süresindeki artışla arttığı bulmuşlardır [29].

Çimento ve çelik cürufu ile birlikte stabilize edilen zeminlerin mekanik performansını ve mikro güçlendirme mekanizmasını araştırıldığında; zeminin basınç dayanımının, genel nem içeriğinden bağımsız olarak göreceli çelik cürufu miktarıyla birlikte azaldığını göstermektedir. Çelik cürufunun çimentoya optimal ekonomik oranı 6:9 yani, zemin stabilizasyonu için kullanılan çimento ve çelik cürufunun dozajı sabitse, çimentonun %40'ının yerine çelik cürufunun kullanılması gerektiği bulunmuştur. Çelik cürufunun parçacık boyutu ne kadar küçük olursa, çelik cüruf parçacıklarının çimento ile puzolanik reaksiyon verimliliği de o kadar yüksek olup zeminin mukavemetindeki iyileşme de o kadar belirgin olur. Stabilize edilmiş zeminin basınç dayanımı, kür süresi boyunca artmıştır. Zeminlerin erken mukavemeti, çimentonun hızlı hidratasyonu nedeniyle etkili bir şekilde geliştirilebilirken, daha sonraki mukavemetleri, çelik cürufunun çimento hidrasyon ürünleri ile reaksiyonuyla daha da güçlendirilebilmektedir [30].

Çelik cürufunun killi zeminin şişme potansiyeli üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, optimum su içeriği koşullarında farklı yüzdelerde çelik cürufu kullanılarak şişme testleri yapılmıştır. Çelik cürufu içeriği arttıkça serbest şişmenin kökeninin neredeyse doğrusal olarak azaldığını göstermektedir. İşlenen zeminin serbest şişmesi %0 çelik cürufu için %5,1'den , %15 çelik cürufu için %3'e ve %30 çelik cürufu için %1,7'ye düşürüldü. Çelik cüruf içeriğinin artmasıyla birlikte şişme basıncının azaldığını göstermiştir. şişme basıncının %0 çelik cürufu için 110 kPa'dan %15 çelik cürufu için 55 kPa'ya ve %30 çelik cürufu için 25 kPa değerine düştüğünü göstermektedir. kPa cinsinden şişme basıncının yüzde cinsinden şişme değerine oranı dikkate alınır bu oran %0 çelik cürufu için 20, %30 çelik cürufu için 15,2'dir (yani çelik cüruf içeriğinin artmasıyla oran azalır). Çelik cüruf içeriğinin artmasıyla birlikte şişme değeri ve şişme basıncının azalması, çelik cüruf agregalarının plastik olmayan yapısından kaynaklanmaktadır [5].

Yüksek plastisiteli bir kilin çelik cürufu (SS) ve pirinç kabuğu külü (RHA) ilavesiyle stabilizasyon mekanizması araştırılmış ve CH'ye %15 SS ve %9 RHA eklenmesiyle CBR, UCS ve elastik modül sırasıyla %412,5, %384,1 ve %374,7 arttı. SS'nin eklenmesi, hidrasyon reaksiyonu için gereken kalsiyum ve alüminyum iyonlarını sağlayarak, RHA'nın puzolanik aktivitesi SS'nin aktivitesini artırabilir ve SS'nin jelleşme özelliğini daha da geliştirebilmektedir [31].

Tablo 2. Kil Zeminin Kimyasal Özellikleri [33]

Zemin	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Kil	< 0.1	17.4	4.3	47.1	< 0.1	0.3	2.8	0.2	0.1	16.6

2.2. Çelik Cürufu

Çelik ve paslanmaz çelik üretimi, Çelik Cürufu olarak bilinen ve çeliğin türüne göre karbon çeliği cürufu veya paslanmaz çelik cürufu olarak sınıflandırılabilen katı bir atık üretir [15] Çelik cürufu, Açık Ocak (OH), Bazik Oksijen Fırını (BOF) ve Elektrik Ark Ocağı (EAF) gibi çeşitleri farklı işlemlerden üretilir.

Zayıf zeminlerin mühendislik parametresini iyileştirmek için kullanılan katkı maddelerine alternatif olan çelik cürufunun kullanımı üzerine son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda göz önüne alınarak bu makalede killi zeminleri çelik cürufu ile iyileştirmenin etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kil zemin içine %10,15,20 oranında çelik cürufu ilave edilerek, doğal ve stabilize edilmiş zeminler üzerinde bir dizi laboratuvar testi yapıldı. Gerçekleştirilen testler arasında, özgül ağırlık, hidrometre analizi, standart proktor deneyi, şişme basıncı, şişme yüzdesi, serbest basınç dayanımı yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kil Zemin

Çalışmada kullanılan kil Muğla' da yapılan Eşen barajlarının şantiye alınmıştır. Kil numunesi üzerinde elek analizleri, kıvam limitleri, hidrometre ve standart kompaksiyon deneyleri yapılmıştır

Yapılan elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda zemin numunesinin içerisinde %0 çakıl, %2 kum, %38 silt ve %60 kil olduğu belirlenmiştir. Zemin numunesi, birleşik toprak sınıflandırma sistemine (USCS) ASTM D2487-11 [32] göre Casagrande'nin plastisite tablosuna göre yüksek plastisiteli killi zemin (CH) olarak sınıflandırılmıştır. ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kil Zeminin Özellikleri

Özellikler	Kil
W _R (%)	21
W _L (%)	101
W _P (%)	32
PI(%)	71
γ _{kmax} (gr/cm ³)	1.16
W _{opt} (%)	51
γ _s (gr/cm ³)	2.7

Kil numunesinin kimyasal bileşimleri, yapılan X-Ray deneyleri sonucunda detay kil analizi ile elde edilen minerolojik yapı belirlenmiştir ve Tablo 2' de sunulmuştur.

Demir cürufu ayrıca Yüksek Fırın cürufu ve Çelik cürufu olarak da alt bölümlere ayrılabilir. Yüksek fırın cürufu granüle cüruf, atmosferde soğutulmuş hava soğutmalı cüruf ve genişletilmiş cüruf olabilir [6]. Sıcak demir (BOF) ve/veya hurda metal (EAF), her süreçte çelik yapımında kullanılan birincil metallerdir. Çelik cürufu esas olarak çelikle eş zamanlı olarak geliştirilen demir, alüminyum, manganez, kalsiyum ve magnezyumun kaynaşmış oksitleri ile birleştirilmiş kalsiyum silikatlar ve ferritlerden oluşur. Çelik cürufu genellikle dört ana oksit, yani kireç; magnezya; silika ve alümina içerir [6]. Kuru zemin numunelerinin ağırlığına göre % 10, 15 ve 20 oranında

çeşitli oranlarda zemine karıştırılan çelik cürufu Şekil 1' de sunulmuştur. Çelik cüruf numunesinin özgül ağırlığı 3,31'dir.



Şekil 1. Çelik Cürufu

2.3. Deney Programı

Zemin numunesinin plastik limit, likit limit ve plastisite indisi değerlerinin belirlenmesinde ASTM D4318-84 [34] deney metodu kullanılmıştır.

Çelik cürufu 40 nolu elekten elenerek, kil numunesinin ağırlığına göre belirlenen kile eklenmiştir ve deneyler yapılan tüm karışımlar için tekrarlanmıştır.

Numunelerin kompaksiyon özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D698 [35] standartlarındaki standart kompaksiyon deneyi yapılmıştır.

Şişme basınçlarının belirlenmesinde ASTM D4546 [36] standartında belirtilen serbest şişme deney yöntemi kullanılmıştır. Numuneler No 40 eleğinden elenerek maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinde olacak şekilde kompaksiyonla hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerin her aşamasında damıtık su kullanılmıştır.

Serbest şişmelerine müsaade edilen zemin numunelerinin şişme miktarı, düşey deformasyon saatinden belirlenmiştir. Deformasyon saatinde okunan değer sabitlenince yani zemin numunelerinin nihai şişmesinin tamamlandıktan sonra bu değer nihai deformasyon değeri olarak kaydedilmiştir. Numunenin şişme yüzdesi eşitlik 1'deki formülasyon kullanılarak belirlenmiştir.

$$SP = \Delta H/H_0 \quad (1)$$

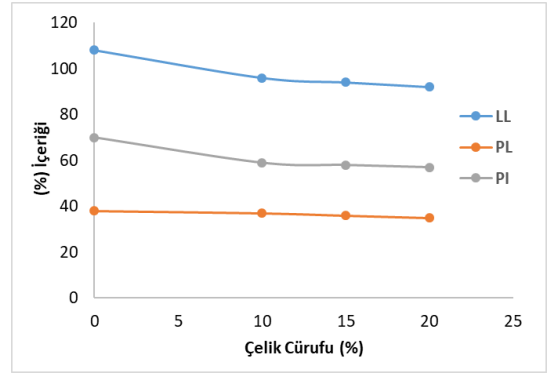
Burada SP (%) şişme yüzdesi, ΔH nihai şişme miktarı (mm), H_0 numunenin başlangıçtaki yüksekliğidir (mm).

Numunenin şişmesi tamamlandıktan sonra, numuneye küçük kademelerde yük uygulanmıştır. Her yük kademesinde en az 24 saat beklenilmiştir. Toplamdaki şişme miktarının sönümlenmesi için gerekli basınç belirlenerek, zeminin şişme basıncı elde edilmiştir. Ayrıca bu değer düşey deformasyonu ölçen saatin ibresinin yeniden başlangıç noktasına (sıfıra) dönmesinin sağlandığı basınç olarak kabul edilmektedir. Bu basınç değeri serbest şişme basıncı olarak ifade edilmiştir.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

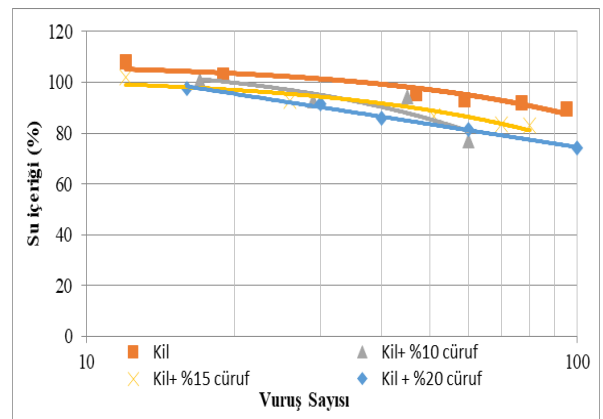
3.1. Çelik Cürufunun Atterberg Limitlerine Etkisi

Zeminlerin Atterberg limitleri, ince daneli zeminlerin su içeriğinin temel belirleyicisidir. Bu çalışmada likit limit, plastik limit ve büzülme limiti gibi Atterberg limitleri dikkate alınmıştır. Kıvam özellikleri açısından, %10, %15 ve %20 çelik cürufunun ilavesinin, likit limit, plastik limit, plastisite indeksi ve büzülme limitinin görülebilecek şekilde su emme kabiliyetinde azalmaya neden olduğu açıktır. Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Likit limit, plastik limit ve plastisite indeksinin çeşitli yüzdelerde çelik cürufuyla değişimi.

Zemin örneğine %0'dan %20'ye kadar çelik cürufunun eklenmesiyle likit limit değeri %20 oranında azalmış (Şekil 2), plastisite indisi değeri ise %70'ten %55.72'e düşmüştür. Sonuçlara dayanarak, zemin stabilizasyonu için çelik cürufu ilave tekniği başarıyla elde edildi. Ayrıca genleşmeyen stabilizatör olan çelik cürufunun kullanılması emilen su yüzdesini en aza indirmiş ve dolayısıyla Atterberg limitlerinde azalma elde edilmiştir (Şekil 3).

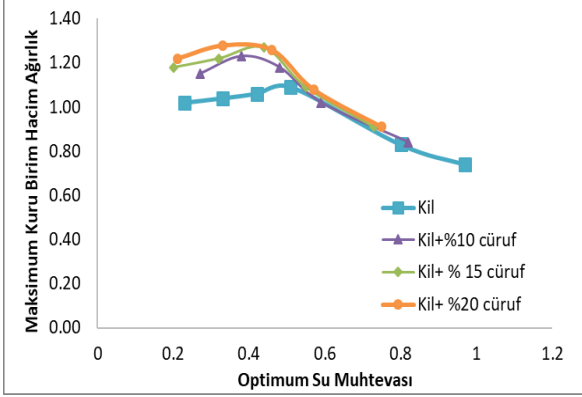


Şekil 3. Likit limitin çelik cürufuyla değişimi.

3.2 Çelik Cürufunun Sıkışma Parametrelerine Etkisi

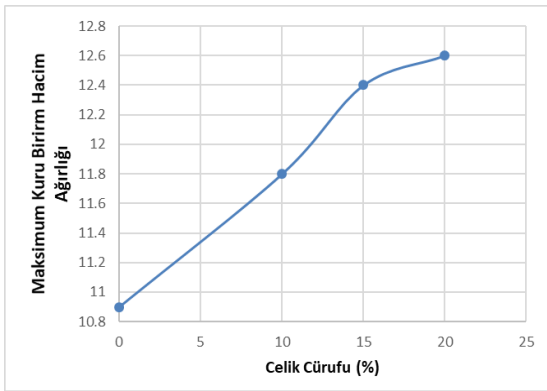
Kompaksiyon su muhtevasının bir fonksiyonudur. Su zemin partikülleri arasında sürtünmeyi azaltır. Doğal ve stabilize edilmiş toprak numunesi için değiştirilmiş Proktor sıkıştırma testleri

gerçekleştirilmiştir. Kuru kilin ağırlığına göre çeşitli yüzdelerde çelik cürufu (%10, 15 ve 20) eklenerek deneyler tekrarlanmıştır. Kuru yoğunluk ve su içeriğinin çeşitli yüzdelerde çelik cürufu ile değişimi Şekil 4'te gösterilmektedir. Doğal zeminin optimum su muhtevası %51 ve kuru birim hacim ağırlığı 11.8 kN/m³ olarak bulunmuştur.



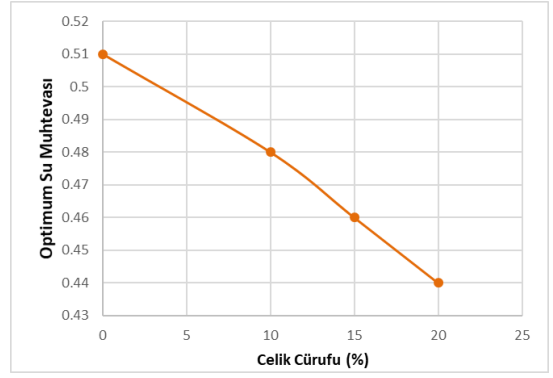
Şekil 4. Doğal ve stabilize toprak numunesinin sıkışma karakteristik eğrileri

Kil numunesine çelik cürufu ilavesiyle maksimum kuru yoğunluk değerlerinin arttığı, optimum nem içeriği değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Şekil 5'te çelik cürufu yüzdesi ile kuru birim hacim ağırlığındaki değişimi göstermektedir. Sonuçlara göre kuru birim hacim ağırlık değeri 11.8 kN/m³'ten 12.6 kN/m³'e çıkmıştır.



Şekil 5. Çeşitli yüzdelerde çelik cürufu (SS) ile Maksimum kuru birim hacim ağırlığı değişimi

Ancak, Şekil 6'da gösterildiği gibi toprak örneğine %0'dan %20'ye eklenen çelik cürufunun eklenmesiyle optimum su muhtevası değeri %51 'den %44'e düşmüştür.

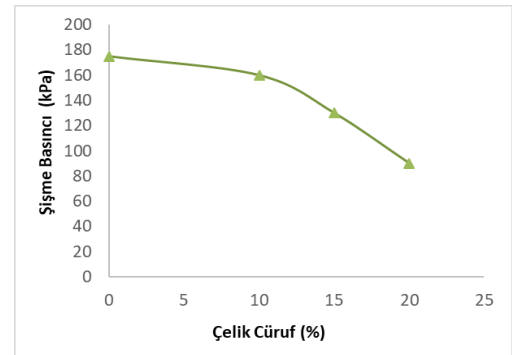


Şekil 6. Optimum su muhtevasının çeşitli yüzdelerde çelik cürufu (SS) ile değişimi.

Zemin ve çelik cürufu arasındaki katyon değişimi, çelik cürufu ilavesiyle zeminin mühendislik özelliklerinin değiştirilmesini etkileyen ana faktör olabileceği ifade edilmektedir [37]. Bu durum, dağınık su tabakasının azalmasını etkilemiş ve zemin-cüruf karışımlarında kil boyutundaki parçacıkların birikmesine yol açmıştır; böylelikle birim hacim ağırlığı artmış, nem içeriği azalmıştır.

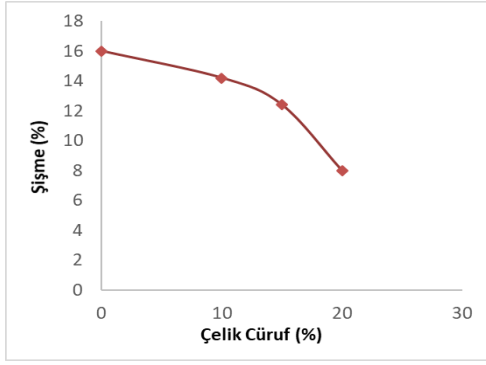
3.3 Çelik Cürufunun Şişme Parametrelerine Etkisi

Hem yalnızca kil hem de stabilize edilmiş kil numuneleri üzerinde şişme basıncı ve şişme yüzdesi testleri yapılmıştır. Kil numunelerine %0, %10, %15 ve %20 oranında çelik cürufu ilave edildi. Şişme basıncı değerleri, genleşmiş zemin numunesine eklenen çelik cüruf yüzdesinin artmasıyla azalmaktadır. %0'dan %20'ye çelik cürufu ilavesi ile şişme basıncı değerleri Şekil 7 'de görüldüğü gibi 175 kPa'dan 97.25 kPa'ya düşmüştür.



Şekil 7. Çeşitli yüzdelerde çelik cürufu ile şişme basıncının değişimi.

Ayrıca eklenen çelik cürufu yüzdesinin artmasıyla şişme yüzdesi değerleri de düşmektedir. Kile %0'dan %20'ye çelik cürufu eklenmesiyle şişme yüzdesi değerleri Şekil 8'de gösterildiği gibi %16 dan %8'e düşmüştür.



Şekil 8. Çeşitli yüzdelerde çelik cürufu ile şişme yüzdesinin değişimi.

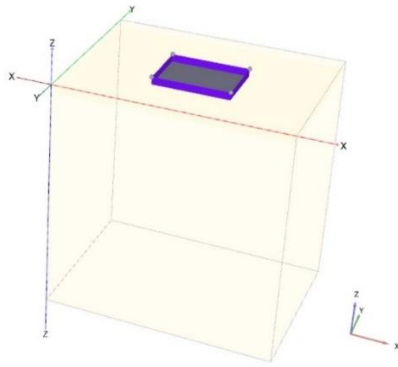
Eklenen çelik cürufu ile yeni oluşan kil parçacıkları arasında sertleşmiş güçlü bağlar oluşur. Yeni oluşturulan bağlar, zemin numunelerinin su emme kapasitesinin azalması nedeniyle meydana gelen şişmeyi güçlü bir şekilde karşılayabilen ve çok düşük şişme basıncı ve yüzdesi ile sonuçlanan zemin parçacıklarını sıkı bir şekilde birbirine yaklaştırır. Ayrıca şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki azalma, genişleyen bir

zeminin şişmesinin kil mineral bileşimi, mevcut kil dışı malzeme miktarı, yoğunluk, boşluk oranı gibi birçok faktörden etkilenmesinden kaynaklanabilir. Başka bir deyişle, çelik cürufunun (kil dışı malzemeler) varlığı, karışımın birim kütlesi başına kil-mineral içeriğini azaltır, bu da şişen kil parçacıklarının toplam yüzey alanının azalması anlamına gelir ve şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde azalmaya neden olmaktadır.

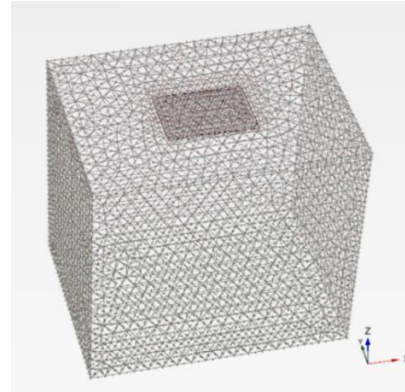
4. Plaxis 3D Analizleri

Analiz modelleri üç boyutlu olarak PLAXIS 3D programında oluşturulmuştur. Analizlerde, kuvvet değerleri için kilonewton

(kN), uzunluk değerleri için santimetre (m) biriminde seçilmiştir. Kil zemin için geometrik modelin genişliği 60 * 45 m ve toplam zemin yüksekliği 60 m, boyutlarında seçilmiştir. Temel 20*15 m boyutlarında 0.5 m derinliğinde radye temel olarak tasarlanmış ve Şekil 9'da oluşturulan model geometrisi görülmektedir.



a) Geometrik Model



b) Mesh Oluşturulması

Şekil 9. Geometrik model ve meshleme

Üç boyutlu programda model oluşturulurken, önce iki boyutta plan düzlemine ait boyutlar girilerek ardından oluşturulan yüzey üzerinde istenilen herhangi bir noktada sondaj kuyusu tanımlanmış, derinlik boyunca zemin profili atanarak üç boyutlu zemin ortamı tanımlanmış olur. Sondaj kuyusu seçilerek,

oluşturulan yüzey üzerinde yatay tabakalanma durumunda 1 adet sondaj kuyusu yardımı ile zemin profili oluşturulmaktadır. Çalışma kapsamında laboratuvarında yapılan zemin deneylerinden elde edilen parametreler Tablo 3'de sunulmuş ve programa bu değerler tanımlanmıştır.

Tablo 3. Kil zemin özellikleri

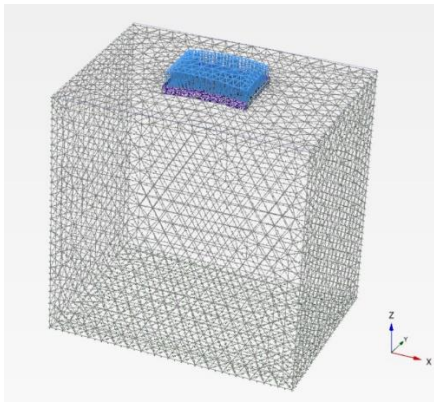
	MC Bünye Modeli	HS Bünye Modeli
γ_k (kN/m ³)	11.8	11.8
γ_d (kN/m ³)	12.8	12.8
E(kN/m ²)	7500	7500
	-	7500
	-	22500
ν	0.35	0.35
G(kN/m ²)	2777.78	2777.78
c(kN/m ²)	85	85

Zeminin malzeme davranışı lineer olmayan bir gerilme deformasyon davranışı sergilediğinden, zeminin yenildiği mertebenin belirlenmesi ve plastik davranışın başladığı bölgenin tanımlanması konusunda, karmaşalar ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden; plastik deformasyonlara neden olan gerilme durumunun tanımlanabilmesi için, elastik modellerin bir göçme kriteri içermesi gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan göçme yüzeylerinden bir tanesi de Mohr-Coulomb göçme zarfıdır. Literatürde dikkate alınarak sayısal analizlerde kil zemin davranışı, “Mohr-Coulomb (MC)” malzeme modeli ve Pekleşen zemin modeli ile hazırlanmıştır. MC malzeme modeli parametrelerinden; zemin kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), doymuş birim hacim ağırlığı (γ_d), içsel sürtünme açısı (Θ), kohezyon (c) ve elastisite modülü (E) değerleri kil numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilmiştir. Bir diğer malzeme modeli olan Pekleşen zemin (Hardening soil) modeli ise plastisite teorisi çerçevesinde geliştirilmiş bir modeldir. [37]. Bu model (Duncan ve Chang, 1970) [38] hiperbolik modelin yerini çok daha gelişmiş bir versiyonudur. Bu model hiperbolik modelden farklı olarak elastik teori yerine plastik teoriyi kullanır. Bu teoriye bağlı olarak hesaplanan plastik şekil değiştirmeler çoklu yüzey (multi surface) akış kriterine göre hesaplanmaktadır. HS Model gerilmeye bağlı rijitlik değerlerini dikkate almaktadır ki bu durum artan basınçla birlikte tüm rijitliklerin de artması demektir. HS Model, Mohr-Coulomb parametrelerini kullanır ve buna ilave olarak tek rijitlik parametresi yerine; Drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen sekant rijitliği E_{50}^{ref} , Drenajlı odömetre deneyleriyle elde edilen tanjant rijitliği E_{oed}^{ref} , Elastik yükleme/boşaltma rijitliği E_{ur}^{ref} olmak üzere üç farklı rijitlik parametresi kullanmasından dolayı zemin gerçek davranışa daha yakın modellenmektedir. Gerilmeye bağlı rijitlik değeri m yumuşak killer için 0.38~0.84 [39] olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında m değeri 0.5 alınmıştır.

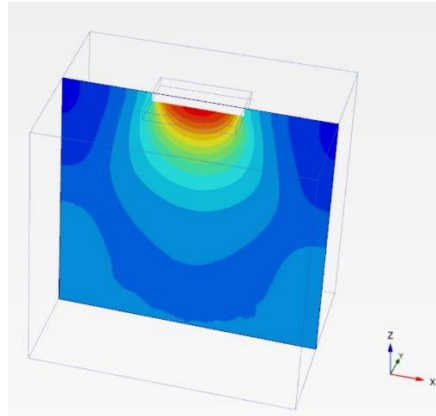
Zemin tanımlamasının yapılmasının ardından, yapısal elemanlar ve yükleme tipinin tanımlandığı yapı (structure) sekmesinden radye “Plate” malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir ve temel üzerine yayılı yük tanımlanarak yapısal yükleme durumu yansıtılmıştır. Geometri modeli malzeme ataması yapıldıktan sonra, geometrinin sonlu elemanlara bölünerek çözülmesi yapılmaktadır. Hesaplamanın doğruluğu için, özellikle analiz sırasında gerilim veya gerinimde önemli değişikliklerin beklenebileceği alanlarda, elemanlar yeterince küçük olmalıdır. Bu amaçla model de Medium (orta) mesh kullanılırken temel çevresinde fine (sıkı) mesh tercih edilmiştir. Zemin ortamı oldukça hassas bir çözüm elde etmek amacıyla 10 düğüm noktalı üçgen elemanlarla temsil edilmiştir.

Tüm modellemeler ve atamalar tamamlandıktan sonra analiz aşamasına geçildiğinde, saha şartlarındaki gibi aşama aşama gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla, mevcut zemin koşulu için ilk önce başlangıç gerilme durumu tanımlanmaktadır. Zemin profiline bağlı olarak başlangıç gerilme durumu, K0 Procedure dikkate alınmıştır.

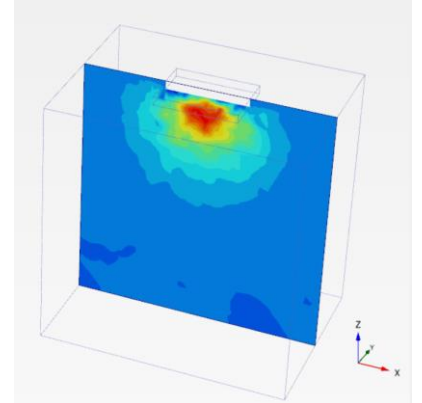
Çalışmalarda sayısal analizleri dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sırası ile başlangıç gerilme durumunun tanımlanması, kazı yapılması, radye temelin oluşturulması, ilave düşey yükün uygulanması olarak tamamlanmıştır. Başlangıç gerilmeleri oluşturulduktan sonraki hesaplama adımının başlangıcında “initial phase” de oluşan deplasmanlar sıfırlanarak sonraki hesaplama aşamalarında meydana gelecek olan deplasmanlar üzerinde “initial phase” aşamasındaki deplasmanların etkisi kaldırılmış ve diğer üç hesaplama aşamasında plastik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analizlerin deplasman ve gerilme görselleri Şekil 10’ da sunulmuştur.



Deforme Olmuş Zemin



Şekil Değişirme



Gerilme Dağılımı

Şekil 10. Plaxis 3D analiz görselleri

Modellenen zemin ve temel sisteminde dört aşamada yapılan analizler sonucunda düşey yöndeki deplasmanlar uz ve temel altında oluşan gerilme durumları incelenmiş kil zemin içine cüruf

eklenmesiyle iyileşen parametreler göz önüne alınarak oturma ve gerilme değerlerinin azaldığı Tablo 4’de görülmüştür.

Tablo 4. Plaxis Analiz Sonuçları

Numune	MC		HS	
	Deplasman (m)	Gerilme (kPa)	Deplasman (m)	Gerilme(kPa)
Kil	0.01165	1.009	0.006129	1.069
Kil+%10 Çelik Cürufu	0.01045	0.9771	0.005526	1.063
Kil+%15 Çelik Cürufu	0.01007	0.9012	0.005341	1.060
Kil+%20 Çelik Cürufu	0.0098	0.8074	0.005251	1.059

Zemin stabilizasyon tekniği, zemin boşluklarında ve sıkıştırılabilirliğinde bir azalmaya ve mukavemet ve sertlikte bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle sağlam tabakaların gerilmelerin önemli bir miktarını üstlenmesi, buna bağlı olarak oturmaların azalması ve sistem güvenliğinin artması beklenebilir. Bu çalışmada da mukavemet ve sertlikteki artışla yapılan analizlerde göstermiştir ki oturma değerleri azalmıştır.

Temellerden zemine iletilen gerilmelerin, bu zemin içinde yayılma şekilleri ve oluşturduğu etkileri çok önemlidir. Radye temellerin altında bulunan zemin tabakalarına aktarılan gerilmeler, oturma ve taşıma gücü kontrolleri için irdelenmektedir. Temele etkileyen P yükünün zemin dağılırarak aynı σ düşey gerilme yarattığı noktaların birleştirilmesi ile elde edilen Eşdeğer Gerilme Eğrilerine “Basınç Soğanları” da denilmektedir. Zemine çelik cürufu eklenmesiyle mukavemet ve sertlikteki artışla gerilmelerin etki ettiği noktalar yatayda yoğunlaşmıştır. Yalnızca kil zeminin olduğu analizde gerilmeler daha alt kotlarda oluşurken, çelik cürufu oranının artmasıyla bu değerler daha üst kotlara taşınmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışma, çelik cürufunun stabilizatör olarak killi zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve Plaxis 3D programındaki analizlerin sonuçları topluca sunulmuştur. Yapılan testlerin sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

Zemin numunesine %0'dan %20'ye kadar çelik cürufunun eklenmesiyle likit limit değeri %20 oranında azalmış plastisite indeksi değeri ise %70'ten %55.72'e düşmüştür.

Zemin numunesine %0'dan %20'ye oranında çelik cürufunun ilavesiyle maksimum kuru yoğunluk değerlerinin %7 oranında artış, nem oranının ise %16 azalış gözlemlenmiştir. Kütledeki çelik cürufunun oransal artışıyla kompozit malzeme gibi davranan kilin birim hacim ağırlığındaki artışların gözlenmesi nem içeriğindeki azalma daha da önem kazanmaktadır. Bu sonuçlar, ince fraksiyon ile çelik cürufu arasında puzolanik reaksiyonlar meydana geldikten sonra bazı serbest su moleküllerinin artık mevcut olmadığını göstermiştir.

Kile %0'dan %20'ye çelik cürufu eklenmesiyle zeminin şişme yüzdesi değerleri %16 dan %8'e düşmüştür. Şişme basıncı değerleri %45 oranında azalmıştır.

Bu sonuçlar, atık olarak kullanılan cüruf miktarının en aza indirilmesine ve aynı zamanda geoteknik veya geo-çevresel yapılarda yeniden kullanılmasına önemli bir katkı sağlayan zemin stabilizasyonu için endüstriyel puzolanlar olarak kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Plaxis 3D analizlerinin sonuçları incelendiğinde;

Kil zemin Mohr Coulomb ve Hardenin Soil bünye modeli ile tasarlandığında zemindeki çelik cürufunun %0'dan %20'ye çıkarılması durumunda oturma değerleri %15 oranında azalmıştır. Ancak Mohr Coulomb ve Hardening Soil bünye modeli analizleri değersel olarak kıyaslandığında pekleşen zemin modelindeki oturma değerleri diğerine kıyasla % 20 oranında azalmıştır.

Kaynakça

- [1] Bi, J., Chian, S.C.J.G., (2020). Modelling of three-phase strength development of ordinary Portland cement- and Portland blast-furnace cement-stabilised clay. *Geotechnique*. 70 (1), 80–89.
- [2] Wu, Z., Deng, Y., Cui, Y., et al., (2020). Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region. *Eng. Geol.* 272, 105648.
- [3] Musso, G., Azizi, A., Cristina, J., (2020). A microstructure-based elastoplastic model to describe the behaviour of a compacted clayey silt in isotropic and triaxial compression. *Can. Geotech. J.* 57 (7), 1025–1043.
- [4] Meng, K., Cui, C.Y., Li, H.J., (2020). An Ontology Framework for Pile Integrity Evaluation Based on Analytical Methodology. *IEEE Access*, p. 99.
- [5] Shalabi F. I., Asi I. M., Qasrawi H.Y., (2020), Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* (2017) 29, 394–399
- [6] Zumrawi, M. M. E., & Babikir, A. A.-A. A. (2017). Laboratory Study of Steel Slag Used in Stabilizing Expansive Soil. *Asian Engineering Review*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.20448/journal.508.2017.41.1.6>
- [7] B.R. Phani Kumar, R.S. Sharma, (2004) Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (7) 764–767, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764)).
- [8] S. Saride, A.J. Puppala, S.R. Chikyala,(2013) Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays, *Appl. Clay Sci.* 85 34–45, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.09.008>.
- [9] C.H. Signes, J. Garzon-Roca, Fernández P. Martinez, M.E. Garrido de la Torre, Franco R. Insa,(2016) Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone facies tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres, *Appl. Clay Sci.* 132 768–773, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.027>.
- [10] J.S. Yadav, S.K. Tiwari, (2017). A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay, *J. Build. Eng.* 9, 177–191, <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.01.001>.

- [11] Yoobanpot N., Jamwawang P., Horpibulsuk S., (2017) Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue, *Appl. Clay Sci.* 141. 146–156, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.028>.
- [12] R.M. Nizdam, J.M. Kinuthia,(2010). Sustainable soil stabilization with blast furnace slag – a review, *Proc. Inst. Civil Eng.-Constr. Mater.* 163 157–165.
- [13] J.M. Manso, V. Ortega-Lopez, J.A. Polanco, J. Setién, (2013) The use of ladle furnace slag in soil stabilization, *Constr. Build. Mater.* 40 126–134, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079>.
- [14] Y. Yi, L. Gu, S. Liu, (2015) Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime – activated ground granulated blast furnace slag, *Appl. Clay Sci.* 103 71–76, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.005>.
- [15] Mozejko C.A., Francisca M.F., (2020), Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag, *Construction and Building Materials*, 239 117901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117901>.
- [16] Altun A, Yilmaz I, (2002), Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1247–1249, DOI 10.1016/S0008-8846(02)00763-9.
- [17] Motz H, Geiseler J, (2001) Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Management*, 21(3), 285–293, DOI 10.1016/S0956- 053X(00)00102-1.
- [18] Akinwumi I., (2014). Soil Modification by the Application of Steel Slag, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58/4 (2014) 371–377. <https://doi.org/10.3311/PPci.7239>.
- [19] Al-Khafaji Z, Al-Naely H, Al-Najar A (2018) A review applying industrial waste materials in stabilisation of soft soil. *Electr J Struct Eng* 18(2):16–23
- [20] Wang, X., Zhang, Z., Song, Z. (2022). Alkali kalıntısı ve çelik cürufu ile stabilize edilmiş deniz yumuşak kilinin mühendislik özellikleri: deneysel bir çalışma ve YSA modeli. *Acta Geotech.* 17, 5089–5112 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01498-5>
- [21] Cıkmit A.A., Tsuchida T., Kang G., Hashimoto R., Honda H., (2019). Particle-size effect of basic oxygen furnace steel slag in stabilization of dredged marine clay, *Soils and Foundations*, Volume 59, Issue 5, Pages 1385-1398, ISSN 0038-0806, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.06.013>.
- [22] C. Shi, J. Qian,(2000) High performance cementing materials from industrial slags a review, *Resour. Conserv. Recycl.* 3 (2000) 195–207, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(99\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(99)00060-9).
- [23] H. Motz, J. Geiseler, (2001) Products of steel slags an opportunity to save natural resources, *Waste Manage.* 21 (2001) 285–293, [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00102-1).
- [24] Cıkmit A.A., Tsuchida T., Hashimoto R., Honda H., Kang G., Sogawa K., (2019) Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay, *Construction and Building Materials*, 227 (2019) 116799, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116799>.
- [25] Al-Khashab, M. N., & Thafer, A. H. M. (2008). Treatment of Expansive Clayey Soil with Crushed Limestone. *Civil Eng. Dept. College of Eng. Mosul University. Engineering & Technology Journal*, 26, 376-386.
- [26] Chen, M., Zhou, M., & Wu, S. (2007). Optimization of blended mortars using steel slag sand. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 22(4), 741-744.
- [27] Abdalqadir Z.K. , Salih N.B., (2020). An Experimental Study on Stabilization of Expansive Soil Using Steel Slag and Crushed Limestone, *Sulaimani Journal for Engineering Sciences / Volume 7 - Number 1 – April 2020*, <https://doi.org/10.17656/sjes.10120>
- [28] Abdalqadir Z.K. , Salih N.B., Salih S. J. H. (2020) . Using Steel Slag for Stabilizing Clayey Soil in Sulaimani City-Iraq” *Journal of Engineering*, 26(7), pp. 145–157. doi:10.31026/j.eng.2020.07.10.
- [29] Kumar, A., Saha, S., Chattaraj, R. (2020). Çelik Cürufu Yumuşak Kil Stabilizasyonu. *Recent Developments in Sustainable Infrastructure Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 75. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_11
- [30] Shi, J., Wang S., Cao W., Su J., Zhang X.,. (2022). Mechanical Properties and Strengthening Mechanism of Dredged Silty Clay Stabilized by Cement and Steel Slag, *Materials* 15, no. 11: 3823. <https://doi.org/10.3390/ma15113823>
- [31] Kang, X., Li C., Zhang M., Yu X., ve Yongqing Chen. (2024). Çelik Cürufu-Pirinç Kabuğu Külü Katılaştırılmış Yüksek Plastisiteli Kilin Mekanik Özellikleri ve Stabilizasyon Mekanizması. *Geotechnical Testing Journal* 47/1 : 235–253. <https://doi.org/10.1520/GTJ20220294> .
- [32] ASTM D2487. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [33] Kalay, E., (2010). Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu Ve Kirecin Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Yüksek Lisans Tezi, 54s.
- [34] ASTM D4318. (2014). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [35] ASTM-D698-12 (2021). Standard practice for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). *Book of Standards* 04.08,
- [36] ASTM D4546. (2014) Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils. West Conshohocken, ASTM International.
- [37] Schanz, T., Vermeer, P., and Bonier, P. (1999), “Formulation and Verification of the Hardening Soil Model. In *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam.
- [38] Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear Analysis of Stress And Strain in Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, pp. 1629-1653.

- [39] Kempfert, H. G., & Gebreselassie, B. (2006), "Constitutive Soil Models and Soil Parameters", *Excavations and Foundations in Soft Soils*, 57-116.