

MERMER TOZU VE/VEYA GENLEŞTİRİLMİŞ POLİSTİREN (EPS) DANECİKLERİNİN KİLLİ ZEMİNLERİN KIVAM LİMITLERİNE ETKİSİ

THE EFFECT OF MARBLE POWDER AND/OR EXPANDED POLYSTYRENE (EPS) BEADS ON THE CONSISTENCY LIMITS OF CLAYEY SOILS

Mete ÇITAK¹, Ebru AKIŞ²

ÖZET

Zeminlerin tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında önemli bir yer tutan kıvam limitleri, mühendislik yapılarının tasarımı ve zemin davranışlarının tahmini gibi önemli alanlarda belirleyici bir faktördür. Bu çalışmanın ilk bölümünde, yüksek plastisiteli bir bentonitin atık malzemeler ile iyileştirilmesi durumunda, kıvam limitleri üzerinde meydana gelen değişiklikler, likit limit ve plastik limit deneyleri yapılarak incelenmiştir. Likit limit deneyleri düşen koni metodu kullanılarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında deneyler için kullanılan kil Çankırı iline ait bentonit olup, söz konusu kil birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak tanımlanmaktadır. Atık malzeme olarak mermer tozu ve/veya genişletilmiş polistiren (EPS) danecikleri katkı malzemeleri olarak kullanılmıştır. Bentonit, yalnız atık mermer tozu, yalnız atık EPS daneleri ve her iki katkı malzemesinin farklı oranlarda kullanılmasıyla iyileştirilmiş olup likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Mermer tozu kuru malzeme miktarının ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20'si, EPS danecikleri ise kuru malzeme miktarının ağırlıkça %0.3 ve %0.9'u olacak şekilde eklenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise gerek bu çalışmada elde edilen sonuçlar, gerekse literatürdeki benzer çalışmaların deney sonuçları kullanılarak mermer tozu ve/veya EPS danecikleriyle iyileştirilen zeminlerin likit limitleri, plastik limitleri ve plastik indeksleri için veri seti derlenmiştir. Sonra bu veri seti kullanılarak çoklu lineer regresyon yöntemiyle atık malzeme ile iyileştirilmiş killi zeminlerin kıvam limitlerinin tahmini için ampirik bağıntılar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kıvam limitleri, iyileştirme, mermer tozu, EPS danecikleri, lineer regresyon

¹ Araştırma Görevlisi, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, citak.mete@student.atilim.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Dr. Öğretim Üyesi, Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, ebru.akis@atilim.edu.tr

ABSTRACT

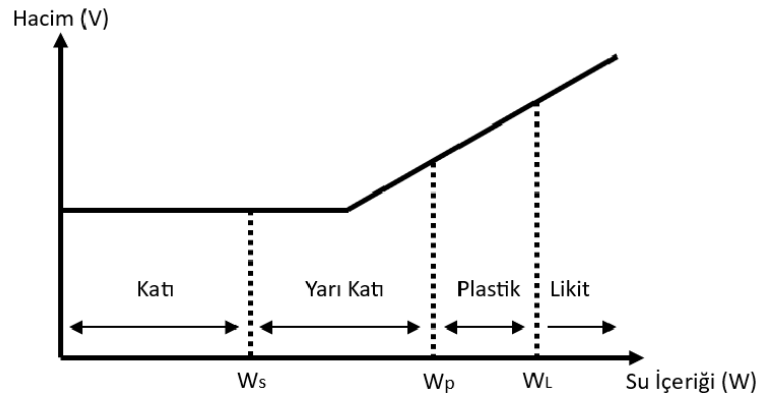
Consistency limits, which play an important role in the definition and classification of soils, are a determining factor in crucial areas such as the design of engineering structures and the prediction of soil behavior. In the first section of this study, the changes in consistency limits of a high-plasticity bentonite when stabilized with waste materials were examined through liquid limit and plastic limit tests. The liquid limit tests were conducted using the fall cone method. The clay used for the experiments within the scope of the study is bentonite from Çankırı province and classified as high plasticity clay (CH) according to the Unified Soil Classification System (USCS). Waste marble dust and/or expanded polystyrene (EPS) beads were used as additive materials. The bentonite was improved using only waste marble dust, only waste EPS beads, and various combinations of both additives in different proportions. Liquid limit and plastic limit tests were conducted. Marble dust was added in amounts corresponding to 5%, 10%, 15%, and 20% by weight of the dry material, while EPS beads were added in amounts of 0.3% and 0.9% by weight of the dry material. In the second part of the study, a data set of soils improved with marble dust and/or EPS beads were compiled using both the results obtained in this study and the experimental results of similar studies in the literature. This dataset was then used to develop empirical correlations for predicting the consistency limits of improved soils with waste materials through multiple linear regression analysis.

Keywords: consistency limits, treatment, marble dust, EPS beads, linear regression

1. Giriş

Killer, daneleri gözle görülemeyecek kadar küçük olan ve suyla birleştiğinde plastik bir kıvam alan, su kaybettiğinde sertleşen, diğer mineral bileşikleriyle birlikte kil mineralleri içeren, kohezyonlu zeminlerdir. Bu zeminler genellikle silt ve kil gibi ince daneli malzemelerden oluşur ve bu ince daneler zeminlerin mühendislik özelliklerini belirler (Holtz vd., 2015). Bu nedenle, zeminlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamak, mühendislik tasarımlarında ve zemin iyileştirme çalışmalarında kritik bir rol oynar.

Zeminlerin plastisitesi, onların şekil değiştirme kabiliyetini ifade eder ve bu özellik, zeminin su içeriğine bağlı olarak değişir. Kıvam limitleri, zeminlerin su içeriğine göre değişen özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu limitler, zeminin katı, yarı katı, plastik ve likit durumları arasında geçiş yapabilme kapasitesini gösterir ve zeminlerin mühendislik özelliklerini anlamada kritik bir rol oynar (Şekil 1). Likit limit, bir zeminin sıvı durumdan plastik duruma geçiş yaptığı noktadaki su içeriğini belirtir. Plastik limit, bir zeminin plastik durumdan yarı-katı duruma geçtiği noktadaki su içeriğini ifade eder. Plastik indeks ise zeminin likit limit ile plastik limit arasındaki farkı gösterir ve zeminlerin mühendislik özelliklerini değerlendirmede kullanılır. Katı durum, zeminin sert ve şekil verilemez olduğu durumu; yarı katı durum, su içeriği biraz artmış ancak zorlukla şekil alan durumu; plastik durum ise su içeriğinin çatlama veya kırılma olmamasına yeterli olup zeminin kolayca şekil verilebilir olduğu durumu tanımlar (Uzuner, 2007).



Şekil 1 Kohezyonlu Zeminlerin Kuruma Sırasında Hacim Değişimi ve Kıvam Sınırları (Das, B. M., & Sobhan, K., 1990)

Atık malzeme yönetimi, doğal kaynakların korunmasında ve çevre dostu uygulamaların teşvik edilmesinde büyük önem taşımaktadır (Aksel ve Çetiner, 2021). Atık malzemelerin inşaat sektöründe kullanımı hem maliyetleri düşürmekte hem de çevresel etkileri azaltmaktadır (Meyer, 2009). Özellikle mermer tozu ve genişletilmiş polistiren (EPS) daneciklerinin kullanımı, zeminlerin iyileştirilmesinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu atık malzemeler, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirirken aynı zamanda geri dönüşüm yoluyla çevresel yükün azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır (Rocco, 2012; Çiğdem, 2022).

Yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde atık malzemelerin kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Atık mermer tozu ve genişletilmiş polistiren (EPS) danecikleri, bu tür iyileştirme çalışmalarında son yıllarda araştırılan malzemelerdendir. Mermer tozu ve EPS daneciklerinin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılması, atık malzemelerin geri dönüşümünü teşvik ederek önemli katkılar sağlamaktadır (Jain vd., 2020; Saygılı, 2015).

Abdelkader vd., (2021) tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, mermer tozunun şişen zeminlerde kıvam limitleri, basınç dayanımı ve serbest şişme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma, mermer tozunun plastisite indeksini ve serbest şişme değerlerini düşürdüğünü, aynı zamanda basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Jain vd., (2020) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, mermer tozunun yüksek plastisiteli kil üzerindeki etkileri fiziksel ve kimyasal testlerle incelenmiştir. Çalışma sonuçları, mermer tozu miktarının artmasıyla birlikte likit limit, plastik limit, şişme miktarları ve optimum su muhtevası değerlerinin azaldığını, basınç dayanımının ise arttığını ortaya koymuştur. %20 mermer tozu, optimum mermer tozu miktarı olarak belirlenmiştir. Akış ve Çiğdem (2023), bentonitin EPS danecikleri ve cam tozu kullanılarak iyileştirilmesini incelemiş ve regresyon ve yapay sinir ağı (ANN) modellerini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sadece cam tozu kullanıldığında likit limit ve plastik limit değerlerinde azalma gözlenmiş, ancak sadece EPS danecikleri kullanıldığında bu eğilim görülmemiştir.

Yapılan literatür incelemeleri, mermer tozunun ve EPS daneciklerinin zemin iyileştirmede etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Çiğdem, 2022; Soğancı vd., 2023;

Zorluer ve Usta, 2003). Örneğin, mermer tozu miktarının artmasıyla likit limit ve plastisite indeks değerlerinde azalma görülmüştür (Abdelkader vd., 2021; Başer ve Çokça, 2010). EPS danecik kullanımının likit limit ve plastisite indeks değerlerinde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir (Wankhade vd., 2014). Ayrıca, kıvam limitlerinin önceden tahmin edilebilmesi için çeşitli ampirik denklemler geliştirilmiştir (Fall, 2000; Akış ve Çiğdem, 2023).

Bu çalışmanın amacı, yüksek plastisiteli bentonitin mermer tozu ve EPS danecikleri ile iyileştirilmesi durumunda, kıvam limitlerindeki değişikliklerin incelenmesidir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, mermer tozu ve EPS daneciklerinin farklı oranlarda zemin numunelerine eklenmesiyle elde edilen likit limit, plastik limit ve plastisite indeks sonuçları, literatürdeki deney sonuçları ile birlikte kullanılarak çoklu lineer regresyon gerçekleştirilmiştir. Mermer tozu ve EPS daneciklerinin birlikte kullanılmasının, kıvam limitlerindeki değişimde daha etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan deneylerde, %20 oranında mermer tozu ve %0.9 oranında EPS daneciklerinin birlikte kullanılması, likit limit ve plastik limit değerlerinde en yüksek azalmayı sağlamıştır.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Deney Malzemeleri ve Deneyler

Bu çalışmada kullanılan kil, yüksek plastisiteli bentonit olup, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi' ne (USCS) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmaktadır. İyileştirme işleminde kullanılan atık malzemeler ise mermer tozu ve genleştirilmiş polistiren (EPS) danecikleridir. Mermer tozu, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında, EPS danecikleri ise ağırlıkça %0.3 ve %0.9 oranlarında kil numunelerine eklenmiştir. Zemin numunesinin kıvam limitleri, BS 1377 Part 2 : 1990 standardına göre belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri ve kıvam limitleri Tablo 1.'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Zemin Numunesinin Geoteknik Özellikleri

Likit Limit (LL, %)	223.4
Plastik Limit (PL, %)	30.2
Plastisite indeks (PI, %)	193.2

Likit limit deneyi için düşen koni penetrometre cihazı kullanılmıştır. Koninin zemine batması için 5 sn süreyle koni serbest düşmeye bırakılır ve bu süre sonunda koni batma miktarı ölçülür. 300 gr. zemin numunesi içerisine ilk koni batmayı 15 mm elde etmeye yetecek miktarda damıtılmış su eklenir ve porselen kaplarda yaklaşık 15 dakika karıştırılır. Çalışmada kullanılan zemin numunesi, yüksek plastisiteli kil olduğu için, 36 saat bekletilir. Düşen koni penetrometre cihazı, işlem öncesinde temizlenir ve kalibre edilir. Her ölçümden önce koni ve cihaz nemli bir bezle silinir. Hazırlanan numuneler 15 dakika karıştırılarak numune kabına yerleştirilir ve üstleri bıçakla düzeltilir. Koni ucu, kap içerisindeki malzemenin yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır düşüş gerçekleştirilir. İlk denemede 15 mm koni batma elde edilmeye çalışılır. En az 3 set aynı işlemler gerçekleştirilir. Her sette su eklenir ve karışım 40 dakika boyunca karıştırılır. İlk iki koni batma sonucu arasındaki fark 0.5 mm'den az ise, bu iki ölçümün ortalaması alınır. İki ölçüm arasındaki fark 1 mm'den az veya 0.5 mm'den fazla ise, üçüncü bir ölçüm yapılır. Bu ölçüm ile diğer sonuçlar arasındaki fark 1 mm'den az

ise, üç ölçümün ortalaması alınır. Ölçümler arasındaki fark 1 mm'den fazla ise, kap boşaltılır ve set tekrarlanır. Test sonuçları arasındaki fark istenen 1 mm'nin altına düştüğünde, yaklaşık 10 gram örnek alınarak su içeriğini belirlemek amacıyla etüve konur. Su içeriği ile düşen koni penetrasyon ölçüsü arasındaki ilişki grafiğe aktarılır ve bir doğru çizilir. 20 mm penetrasyona karşılık gelen su içeriği değeri, likit limit olarak kabul edilir.

Plastik limit testi için en az 20 gram numune, damıtılmış su eklenerek karıştırılır ve malzeme avuç içinde rulo haline getirilebilecek kıvama gelene kadar yoğrulur. Numune top şeklinde şekillendirilir ve 36 saat bekletilir. Numune ikiye bölünür ve bir kısmı su kaybı olmaması için korunur. Numune, 3 mm kalınlığa ulaşana kadar cam yüzey üzerinde sabit kuvvet uygulanarak ileri-geri hareketler ile yuvarlanır. Numune çatlaklar oluştuğunda ve kırılma başladığında plastik limitine ulaşılmış kabul edilir. Eğer numune 3 mm'nin altına düştüğünde çatlama olmazsa, su içeriği yüksek olduğu anlaşılır; 3 mm'nin altında kırılma meydana gelirse, su içeriği düşük olduğu anlaşılır. 3 mm'lik kalınlık sağlandığında ve çatlaklar oluştuğunda, numuneden örnek alınır ve su içeriği hesaplanır. En az üç örnek alınır ve bunlar arasındaki fark %0.5'ten az ise doğru kabul edilir. Aksi takdirde, test tekrarlanır.

2.2. Karışımların Hazırlanması

Bu çalışmada, katkısız ve katkılı zemin numunelerinin kıvam limit değerleri, BS 1377 Bölüm 2 : 1990 standardına göre düşen koni yöntemi ve plastik limit testi ile belirlenmiştir. Katkı maddeleri, bentonitin kuru ağırlığının yüzdesi olarak eklenmiştir. Sadece EPS daneleri, sadece mermer tozu ve her iki katkıyı da içeren numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin isimlendirilmesi "BMxEy" şeklinde yapılmıştır; burada "B" bentonit, "M" mermer tozu, "E" EPS danelerini, "x" ve "y" ise kilin kuru ağırlığına göre mermer tozu ve EPS danelerinin yüzdesini ifade etmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Atterberg Limitleri Deney Sonuçları

Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin deney sonuçları (likit limit, plastik limit), plastisite indeks değerleri ile bu değerlerin katkısız zemin numunesine göre yüzdesel değişimleri Tablo 2'de verilmektedir. Bentonitin likit limit değeri %223.4 olup katkı maddelerinin artırılmasıyla bu değer düşmektedir. Mermer tozu ve EPS daneciklerinin likit limit üzerindeki azaltıcı etkisi literatürdeki verilerle uyumludur (Abdelkader vd., 2021; Akış ve Çiğdem 2023; Başer ve Çokca 2010; Hakro vd., 2021; Jain vd., 2020; Sakr vd., 2021). Bentonitin plastik limiti %30.2 olarak ölçülürken, en düşük plastik limit değeri %26.3 ile BM15E0 numunesinde belirlenmiştir. Bu değer %26.7 olan BM15E0 değerine oldukça yakındır. Plastisite indeksi, likit ve plastik limitler arasındaki fark alınarak bulunmuştur. Mermer tozu ve EPS daneciklerinin miktarlarının artışı, plastik limit değerlerinde %30 ile %26 arasında hafif bir düşüş eğilimi göstermektedir. Mermer tozu ve EPS daneciklerinin içeriği arttıkça, plastisite indeks değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir. BM0E0 numunesinin plastisite indeks değeri %193.2 iken, %20 mermer tozu ve %0.9 EPS danesi eklenmesiyle (BM20E0.9), %22.4 azalış göstererek PI değeri %150'ye ulaşmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Katkılı ve Katkısız Zemin Numunelerinin Atterberg Limit Test Sonuçları ve Katkılı Numunelerin Katkısız Zemin Numunesine Göre Yüzdesele Değişimleri

	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LL değişimi (%)	PL değişimi (%)	PI değişimi (%)
BM0E0	223.4	30.2	193.2	0.0%	0.0%	0.0%
BM5E0	206.4	29.6	176.8	-7.6%	-1.9%	-8.5%
BM10E0	198.4	27.3	171.1	-11.2%	-9.5%	-11.4%
BM15E0	189.3	26.3	163.0	-15.3%	-13.0%	-15.6%
BM20E0	180.9	26.7	154.2	-19.0%	-11.7%	-20.2%
BM0E0.3	221.4	30.1	191.3	-0.9%	-0.3%	-1.0%
BM5E0.3	205.8	29.2	176.6	-7.9%	-3.2%	-8.6%
BM10E0.3	197.7	29.9	167.8	-11.5%	-0.9%	-13.2%
BM15E0.3	189.0	27.5	161.5	-15.4%	-9.1%	-16.4%
BM20E0.3	180.1	26.9	153.2	-19.4%	-10.9%	-20.7%
BM0E0.9	220.9	29.3	191.6	-1.1%	-2.8%	-0.8%
BM5E0.9	205.9	28.0	178.0	-7.8%	-7.5%	-7.9%
BM10E0.9	196.0	29.1	166.9	-12.3%	-3.6%	-13.6%
BM15E0.9	188.8	29.3	159.5	-15.5%	-2.8%	-17.5%
BM20E0.9	178.5	28.5	150.0	-20.1%	-5.5%	-22.4%

3.2. Atterberg Limit Deney Sonuçlarının Çoklu Lineer Regresyon ile Tahmin Edilmesi

Regresyon analizi, bir değişkenin diğer bir değişken üzerindeki etkilerini incelemek ve bu değişkenler arasındaki ilişkiyi kullanarak birinin değeri bilindiğinde diğerinin değerini tahmin etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Kıcıman, 1975). Regresyon analizleri birden fazla bağımsız değişken içerebilir ve bu tür analizler çoklu doğrusal regresyon olarak adlandırılır. Çoklu regresyondaki amaç, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini göstermektir (Kayaalp vd., 2015).

Çoklu regresyon denkleminin genel formu Eşitlik 1 de verilmektedir. A sabiti tüm X bağımsız değişkenleri sıfır olduğunda Y 'nin değerini temsil eder. B_1 ile B_n regresyon katsayıları, X_1 ile X_n bağımsız değişkenler olarak tanımlanmaktadır (Tabachnick ve Fidell, 2019). Eşitlik 1. de B regresyon katsayısı, A sabit terim, Y' bağımlı değişken, X bağımsız değişkenleri temsil etmektedir.

$$Y' = A + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad (1)$$

Bu çalışmada elde edilen veriler ve literatürdeki veriler kullanılarak veri setleri oluşturulmuş ve çoklu lineer regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, mermer tozu ve EPS danecikleri ile iyileştirilmiş killi zeminlerin likit limit (LL_{iyi}), plastik limit (PL_{iyi}), ve plastisite indekslerini (PI_{iyi}), tahmin eden ampirik denklemler önerilmiştir. Abdelkader vd., (2021) çalışmalarından 6 adet, Başer ve Çokca (2010) 7 adet, Hakro vd., (2021) 7 adet, Kalay (2010) 10 adet, Jain vd., (2020) 9 adet, Jain vd., (2022) 11 adet, Jassim vd., (2022) 6 adet, Sakr vd., (2021) 20 adet, Zumrawi (2018) 4 adet, Çiğdem (2022) 4 adet, Wankhade vd., (2014) 4 adet deney sonuçları birleştirilerek toplam 103 veri elde edilmiştir. Bu veriler, %80'i eğitim (training) (81 veri) ve %20'si (22 veri) doğrulama (test) amaçlı olmak üzere rastgele iki veri seti hazırlanmıştır.

Eğitim için hazırlanan veri seti kullanılarak lineer regresyon analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılan verilerin sayısı ile analizler sonucunda elde edilen p -değerleri, korelasyon katsayısı (R^2) ve varyans şişirme faktörü (VIF) değerleri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmektedir. p değeri, istatistiksel analizde anlamlılık düzeyini gösterir ve verilerin ne kadar güvenilir olduğunu belirler. p değeri, anlamlılık düzeyinden küçük olduğunda, hipotez reddedilir (Ünver vd., 2011). Üç tahmin edilen parametre için de p değerleri sıfıra yakın çıkmıştır. Varyans şişirme faktörü (VIF), çoklu regresyonda bağımsız değişkenler arasındaki çoklu bağlantılılığı ölçer. VIF değeri 10'u aşarsa, bağımsız değişkenler arasında güçlü doğrusal ilişki olduğunu ve bu durumun regresyon sonuçlarını olumsuz etkileyebileceğini gösterir (Montgomery ve Runger, 2010). Korelasyon katsayısı (R^2), bağımlı değişkenin yüzde kaçının modele dahil edilen bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını gösterir. R^2 değeri, modele daha fazla değişken dahil edildikçe genellikle artar ve korelasyonun başarı oranı R^2 değerinin 1'e yakın olmasıyla belirlenir. Pearson Korelasyon Katsayısı (r), iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü ölçen istatistiksel göstergedir. Değerleri -1 ile 1 arasında değişir; 1 mükemmel lineer pozitif ilişkiyi, -1 mükemmel negatif ilişkiyi ve 0 doğrusal bir ilişki olmadığını ifade eder (Montgomery ve Runger, 2010).

Korelasyon katsayısı LL_{iyi} için 0.933, PL_{iyi} için 0.616 ve PI_{iyi} için 0.953 olarak hesaplanmıştır, bu değerlerin yeterince tatminkâr olduğu gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen tahmin denklemleri ise eğitim ve doğrulama R^2 değerleri ile birlikte Tablo 4'te gösterilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı EPS için 0.157 ile 0.397, MP için -0.250 ile -0.448 arasında değişmekte iken; LL , PL ve PI için sırasıyla 0.869, 0.384 ve 0.936 hesaplanmıştır (Tablo 3).

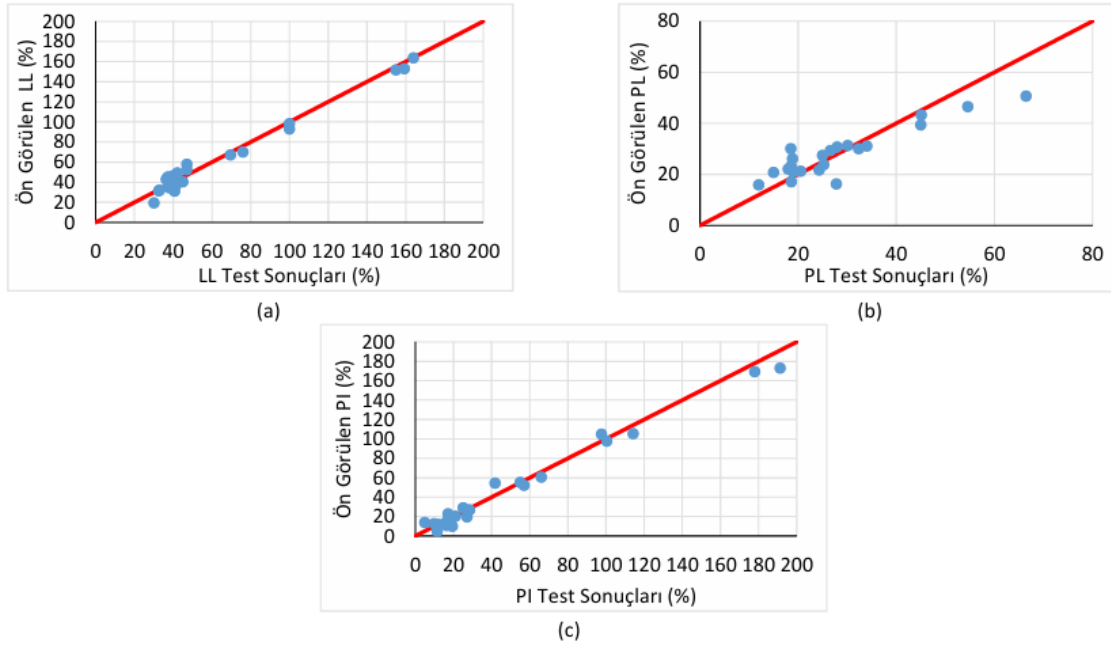
Tablo 3. Öngörülen Denklemlerin Değişkenleri ve İstatistiksel Sonuçları

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken	Veri Sayısı	p	Pearson Korelasyon Katsayısı			VIF		
LL_{iyi}	EPS, MP, LL	81	5.010E-45	0.393	-0.315	0.869	1.187	1.077	1.162
PL_{iyi}	EPS, MP, PL	81	5.370E-16	0.157	-0.448	0.384	1.037	1.269	1.230
PI_{iyi}	EPS, MP, PI	81	7.420E-51	0.397	-0.250	0.936	1.209	1.048	1.167

Tablo 4. Katkılı Numunelerin LL , PL ve PI Değerleri İçin Tahmin Denklemleri

Tahmin Denklemleri	Eğitim R^2	Doğrulama R^2
$LL_{iyi} = 13.744 + 3.180EPS - 1.200MP + 0.843LL$	0.933	0.985
$PL_{iyi} = 12.476 + 2.548EPS - 0.411MP + 0.597PL$	0.616	0.791
$PI_{iyi} = 8.241 + 0.064EPS - 0.721MP + 0.852PI$	0.953	0.981

Doğrulama için oluşturulan veri setindeki veriler kullanılarak Tablo 4'de verilen tahmin denklemleri ile LL_{iyi} , PL_{iyi} ve PI_{iyi} değerleri hesaplanmış ve gerçek değerler ile karşılaştırılması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tahmin Denklemleri Kullanılarak Ön Görülen Değerler ile Deneysel Sonuçları Karşılaştırılması
(a) LL_{iyi} (b) PL_{iyi} ve (c) PI_{iyi}

3.3. Sonuçların Tartışması

Tablo 3 ve Tablo 4'te öngörülen denklemler ve istatistiksel sonuçlar, katkılı numunelerin LL , PL ve PI değerleri için yapılan regresyon analizlerinin güçlü ve anlamlı olduğunu göstermektedir. LL_{iyi} değişkeni için, EPS , MP , LL bağımsız değişkenleri kullanılarak yapılan regresyon analizinde, p -değerinin $5.010E-45$ ve R^2 değerinin 0.933 olması, modelin yüksek açıklayıcı ve istatistiksel olarak son derece anlamlı olduğunu işaret etmektedir. Benzer şekilde, PI_{iyi} değişkeni için yapılan analizde, R^2 değerinin 0.953 olması, bu modelin de yüksek açıklayıcılığa sahip olduğunu göstermektedir. PL_{iyi} değişkeni için, R^2 değeri 0.616 olup, PI_{iyi} ve LL_{iyi} için yapılan modellere göre daha az anlamlı görülmektedir. VIF değerleri 1.027 ile 1.269 arasında değişmekte olup çoklu bağlantı olmadığı görülmektedir. Pearson korelasyon katsayıları EPS için bağımlı değişkenler arasında pozitif ilişki olmasına karşın MP ile bağımlı değişkenler arasında negatif ilişki olduğunu işaret etmektedir. LL için 0.869 ve PI için 0.936 olan Pearson korelasyon katsayıları, her iki değişkenin de ilgili bağımlı değişkenlerle güçlü pozitif ilişkisi olduğunu göstermektedir.

3.4. Sonuç

Çalışma kapsamında katkısız ve farklı oranlarda mermer tozu ve EPS danecik katkılarının yüksek plastisiteli kil zeminin kıvam limitlerine etkisi ilk olarak deneysel olarak incelenmiş daha sonra literatürdeki veriler ile beraber kullanılarak çoklu lineer regresyon ile tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Zemine farklı oranlarda mermer tozu eklenmesi likit limit ve plastik limit değerlerini azaltmaktadır. Ancak mermer tozu katkısının likit limit ve plastik limit değerlerine

etkisi EPS daneciklerinin etkisinden daha fazladır. Mermer tozu katkısı, kıvam limitleri bakımından daha olumlu yönde etki sağlamıştır.

- Tahmin denklemleri ise eğitim ve test veri setlerinde yüksek R^2 değerleriyle, modellenen değişkenler arasındaki ilişkilerin güçlü olduğunu ve öngörülen denklemlerin çalışmanın kısıtları dikkate alınarak güvenilir tahminler sağlayabileceğini göstermektedir.
- Atık mermer tozu ve EPS daneciklerinin yeni kullanım alanlarının bulunması, çevre kirliliğini azaltabilecek ve bu atık malzemelerin problemlili zeminlerde kullanılması, ekonomiye ve kaynakların korunmasına büyük katkı sağlayabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Atılım Üniversitesi Yüksek lisans tez çalışmasından oluşturulmuştur. Bentonit numunesinin tedarikini sağlayan Çanbensan A.Ş. Tansel Akyüz'e, mermer tozunu temin eden İsa Selek Mermer Mozaik, İsa Selek, teknik destek sağlayan Atılım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Abdelkader, H. A. M., Mohamed M. A. H., ve Haiwang Y. (2021), "Influence of Waste Marble Dust on the Improvement of Expansive Clay Soils", *Advances in Civil Engineering*, Vol 2021.
- Aksel, H., ve Çetiner, İ. (2021), "Yapım Sürecinde Atık Yönetimi: Yapım Sürecinde Atık Yönetiminin Sistem Yaklaşımıyla Ele Alınması" *Journal of Architectural Sciences and Applications*, Vol. 6, 206-226.
- Akış, E., ve Çiğdem, Ö. Y. (2023), "EPS Daneciklerinin ve/veya Cam Tozunun Killi Zeminlerin Kıvam Limitlerine Etkisi ve Limitlerin YSA ve Regresyon ile Tahmin Edilmesi". *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* Vol 13, 385-98.
- Başer, O. ve Çokça, E. (2010), "Şişen Zeminlerin Atık Mermer Tozu Kullanılarak İyileştirilmesi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği on Üçüncü Ulusal Kongresi*, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 143-152.
- British Standard, (1990), "BS 1377: Part 2:1990 Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes Part 2. Classification Tests" British Standard Institution: London, UK.
- Çiğdem, Ö., Y. (2022), "Utilization of Powdered Glass and Expanded Polystyrene Beads (EPS) as Additives in Clayey Soils", *Master Thesis*, Atılım Üniversitesi, Ankara.
- Das, B. M., ve Sobhan, K. (2014), "Principles of Geotechnical Engineering SI Edition" Cengage Learning.
- Fall, D., (2000) "A Numerical Model for Rapid Determination of Plasticity of Fine-Grained Soils" *Ground Engineering*, 43-45.
- Hakro, R., Hindu, A., K., Mangi, S. A., Jhatial, A. A. (2021), "Stabilization of Expansive Shale with Marble Dust Evaluation of Deformed Steel Brands View Project Unconfined Compressive Strength of Jet-Grouted Columns with and Without Fiber-Reinforcement View Project", *Article in Malaysian Construction Research Journal*, Vol. 14, 44-56.

- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C. (2015), "Geoteknik Mühendisliğine Giriş" (2. Baskı), [Erken A.], Pearson.
- Jain, A., K., Jha, A., K., Akhtar, P.M. (2022), "Assessing the Swelling and Permeability Behavior of Novel Marble Dust–Bentonite with Sand–Bentonite Mixes for Use as a Landfill Liner Material", *Indian Geotechnical Journal* Vol 52, 675-90.
- Jain, A., K., Jha, A., K., Shivanshi (2020), "Geotechnical Behavior and Micro Analyses of Expansive Soil Amended with Marble Dust", *Soils and Foundations*, Vol 60, 737–751.
- Jassim, N. W., Hassan, H. A., Mohammed, H. A., Fattah, M. Y. (2022), "Utilization of Waste Marble Powder As Sustainable Stabilization Materials for Subgrade Layer", *Results in Engineering*, Vol. 14.
- Kalay, E. (2010) "Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu ve Kirecin Kullanılması", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Üniversitesi, Isparta.
- Kayaalp, G., T., Güney, M., Ç., Cebeci Z., (2015) "Çoklu Doğrusal Regresyon Modelinde Değişken Seçiminin Zootekniye Uygulanışı", *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* Vol 30.
- Kıcıman, M. (1975), "Mühendisler için İhtimaller Hesabı ve İstatistiğe Başlangıç" ODTÜ.
- Montgomery, D. C. ve Runger, G. C. (2010), "Applied Statistics and Probability for Engineers", John Wiley and Sons.
- Meyer, C. (2009), "The Greening Of The Concrete Industry Cement and Concrete Composites", Vol 31, 601-605.
- Sakr, M., A., H., Ali E., O., Saad A., M., Moayedi H. (2021) "Geotechnical Parameters Modelling and the Radiation Safety of Expansive Clayey Soil Treated with Waste Marble Powder: A Case Study at West Gulf of Suez, Egypt" *Environmental Earth Sciences*, Vol 80, 1-18.
- Saygılı, A. (2015). *Utilization of Waste Marble Powder in Clay Bricks*. *Construction and Building Materials*, 94, 21-28.
- Soğancı, A., S., Yenginar, Y., Orman, A. (2023) "Geotechnical Properties of Clayey Soils Stabilized with Marble Dust and Granulated Blast Furnace Slag", *KSCE Journal of Civil Engineering* Vol 27, 4622-4634.
- Tabachnick, B., G., ve Fidell, L. S. (2019) "Using Multivariate Statistics", Pearson.
- Ünver, Ö., Gamgam, H., ve Altunkaynak, B. (2011), "SPSS Uygulamalı Temel İstatistik Yöntemler" Seçkin.
- Rocco, T., N. (2012) "Characterization of Expanded Polystyrene (EPS) and Cohesive Soil". PhD, Missouri University.
- Uzuner, B., A. (2007) "Temel Zemin Mekaniği", Derya Kitabevi.
- Wankhade, S., R., Rajurkar, V., J., Dahale, P. (2014) "Improvement of Swelling Shrinkage Behaviour of Expansive Soil Using EPS Beads", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 9, 23–28.
- Zumrawi, M. M. ve Abdalla, E. A. (2018), "Stabilization of Expansive Soil Using Marble Waste Powder", In *Conference Proceedings Civil Engineering 2018*.
- Zorluer, İ., ve Usta M. (2003), "Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi" *Türkiye IV Mermer Sempozyumu*, Afyon, 305-311.