

# A Review On Chemical Stabilization in Soils

---

**Arzu OKUCU**

Balıkesir University, Department of Civil Engineering, Balıkesir, Türkiye

**Perihan EFE**

Balıkesir University, Department of Civil Engineering, Balıkesir, Türkiye

---

## **Abstract**

Soil stabilization is the improvement of the engineering properties of the ground when the existing ground conditions are not suitable for the desired purposes. One of the oldest and most widely applied methods used to improve the geotechnical properties of unsuitable soils is chemical stabilization. In this study, the chemical stabilization method and the additives used in this method is investigated.

**Keywords:** Soil Stabilization, Chemical Stabilization

# Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Üzerine Bir Derleme

**Arzu OKUCU**

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Balıkesir, Türkiye

**Perihan EFE**

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Balıkesir, Türkiye

## Özet

Zemin stabilizasyonu, mevcut zemin koşullarının istenilen amaçlar için uygun olmadığı durumlarda zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Sorunlu zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirilmesinde kullanılan en eski ve en yaygın uygulanan yöntemlerden biri kimyasal stabilizasyondur. Bu çalışmada kimyasal stabilizasyon yöntemi ve bu yöntemde kullanılan katkı malzemeleri üzerine bir araştırma yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin Stabilizasyonu, Kimyasal Stabilizasyon

## 1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı ve kentleşmeden dolayı uygun yerleşim alanlarının hızla azalması, özellikle büyük şehirlerde ve sanayi bölgelerinde yaşanan arsa sıkıntıları ve yüksek maliyetler nedeniyle taşıma gücü zayıf, sıkışabilirliği yüksek veya oturma yönünden zayıf ve sorunlu olan zeminlerde de yapılaşma zorunlulukları ortaya çıkmıştır. Bu zorunluluklar nedeniyle zemin iyileştirilmesi ihtiyaç olmaktan çıkmış ve hemen hemen her yapı inşaatında uygulanması zorunlu hale gelmiştir. İstenilen özelliklere sahip olmayan zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi ancak zeminlerin stabilizasyonu ile mümkün olmaktadır. Zemin stabilizasyonu çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada zemin stabilizasyon yöntemlerinden kimyasal stabilizasyon yöntemi ve bu yöntemde kullanılan katkı malzemeleri üzerine bir inceleme yapılmıştır.

## 2. ZEMİN STABİLİZASYONU

Genel olarak zemini daha stabil hale getirmek için, mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özelliklerinin iyileştirilmesine zemin stabilizasyonu denilmektedir. Zemin stabilizasyonunun amacı, zemin tanelerini birbirine bağlayarak, taneleri su geçirmez hale getirmek veya ikisinin bir kombinasyonunu sağlayarak zeminin dayanımını ve su ile yumuşamaya karşı direncini artırmak ayrıca zeminde beklenen oturmaları ve deformasyonları azaltmaktır [1,2]. Zemin stabilizasyonunda temel ilke, zemin içerisindeki boşlukların mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması ya da çeşitli katkı maddelerinin kullanılması suretiyle mevcut zeminin iyileştirilmesidir [3].

Zemin stabilizasyonu ile zayıf zeminlerin taşıma kapasiteleri artırılabilirken, sıkışabilirliği, permeabilitesi ve sıvılaşma potansiyeli azaltılabilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri;

- Zayıf zeminin taşıma kapasitesini artırmak,
- Toplam oturmaları azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını desteklemek,
- Zeminin potansiyel sıvılaşma riskini azaltmak.
- Zemin geçirimliliğini azaltmak,

gibi amaçlarla yapılır. Zemin iyileştirme yöntemleri uygulandığında zeminin;

- Kayma mukavemetini artar.
- Kumlu zeminlerin sıkılığı, killi zeminlerin kıvamı iyileşir.
- Sıkışabilirliği azalır.
- Şişme ve büzülme potansiyeli düşer.
- Permeabilitesi azalır.
- Sıvılaşma potansiyeli azalır [3].

### 2.1. Kimyasal Stabilizasyon

Zeminin dayanım, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik ve dayanıklılık gibi geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacıyla zemine kireç, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, bitüm, puzolan gibi kimyasal katkı maddelerinin eklenerek özellikle ince taneli zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesine Kimyasal

Stabilizasyon adı verilmektedir [1,4]. Zemin iyileştirme işlemlerinde katkı maddeleri kullanılarak, zeminlerin mekanik özelliklerinde çevresel ve yüklenme koşullarına bağlı olarak gerekli işlemler yapılarak güvenli, ekonomik ve doğal bir malzeme teşkil edilmesi amaçlanmaktadır. [5]. Zeminlerin kimyasal stabilizasyonu için yaygın olarak kullanılan ana bağlayıcılar, kireç ve çimentodur. Bu ana bağlayıcıların etkinliğini arttırmak ve katı atık yönetimi kapsamında endüstriyel atıkları değerlendirmek amacıyla farklı türdeki fabrika atıkları da (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, bitümlü malzemeler vb.) zemin stabilizasyon çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bunların yanı sıra puzolanların da zemin iyileştirme çalışmalarında değerlendirilmesi yaygın bir şekilde gözlenmektedir [6,7,8,9]. Bu katkı malzemelerinin, genellikle ucuz olmaları, yerel olarak bulunabilmeleri, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu malzemeler olmaları nedeniyle kullanılmaları birçok avantaj sağlamaktadır [1].

### 2.1.1. Kireç ile Stabilizasyon

En yaygın kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biri olan kireç ile stabilizasyon, kohezyonlu zeminlerin dayanımlarının artırılması ve plastisite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan ekonomik bir yöntemdir. Özellikle orta ve ince taneli zeminlerin kireç ile stabilize edilmeleri sonucunda, zeminlerin plastisiteleri düşürülür, şişmesi azaltılır ve direnci yükseltilir. Kireç kil mineralleriyle daha iyi çalıştığı için, özellikle killi zeminlerde kireç ile stabilizasyon yaygın olarak uygulanmaktadır. Ayrıca, killi çakıllar ve siltli killer de kireç ile kolayca reaksiyona giren zemin türlerindedir. Kireç stabilizasyonu için genellikle plastisite indisi değeri (PI) 10'dan büyük, kütlege en az %25'i ince taneli olan killi zeminler ideal zemin grubudur. Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği (AASHTO) Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-2, A-5, A-6, ve A-7 sınıfı zeminler, 0.002 mm'yi geçen kısmı %7 den büyük olan killer de kireç ile karıştırılarak başarılı bir şekilde stabilize edilebilirler. Bu tür zeminler için stabilize edilmiş tabaka kalınlığı, en az 12 cm olmalı ve standart proktor yoğunluğunun en az %100'ü kadar sıkıştırılmalıdır [10]. Kireç, bazı durumlarda killi zeminlerin yalnızca işlenebilirliğinin geliştirilmesi amacıyla da kullanılabilir. Killi zeminleri stabilize etmek için kirecin çimentodan daha uygun bir malzeme olduğu düşüncesi çoğu zaman doğru değildir. Çimento, PI değeri 20 ila 50 arasında olan killi zeminlerin stabilize edilmesinde kireç kadar iyi sonuç vermektedir [11]. Kirecin çimentoyla birlikte kullanılması da oldukça yaygındır.

Kireç stabilizasyonu, sönmemiş kireç (CaO) ya da sönmüş (hidrate) kireç (Ca(OH)<sub>2</sub>) ile sağlanabilirken, sönmemiş kireç kullanımı daha yaygındır. Bunun sebebi sönmemiş kirecin birim kütle başına daha yüksek serbest kireç içeriğine sahip olması ve kendi ağırlığının %32'si kadar su ile birleşerek sönmüş kirece dönüşürken mukavemet kazanımını ve yüksek ısı meydana getirerek nem içeriğindeki azalmayı hızlandırmasıdır [12].

### 2.1.2 Çimento ile Stabilizasyon

Çimento ile stabilizasyon, belirli miktarda çimento ve suyun zeminlerle karıştırılması ve istenilen yoğunluk elde edilinceye kadar sıkıştırılmasıdır. Burada çimento, zemin içindeki mineral parçaları arasında kuvvetli bir bağ oluşturarak zeminin plastisitesini değiştirir ve kayma gerilmelerine karşı direncini artırır. Killi zeminlerin su tutma kapasitesini azaltıcı rol oynadığından, çimento ile stabilize edilmiş zeminler, absorbe edilmiş suyun hacim artırıcı ve yumuşatıcı etkilerine karşı korunmuş olur. Ayrıca zeminin donma ve çözülme döngülerinin bozucu etkilerinden de korunmasına yardımcı olur. Çimento reaksiyonu zemin minerallerine bağlı olmayıp, çimentonun herhangi bir zeminde mevcut olabilecek su ile reaksiyonudur. Bu nedenle çimento çok çeşitli zeminleri stabilize etmek için kullanılabilir. Piyasada çok sayıda çimento türü mevcut olup, işlem göreceği zeminin türüne ve istenen nihai dayanıklılığa bağlı olarak çimento seçimi gerçekleştirilir [1].

Çimentoyla stabilize edilmiş zeminlerin plastisitesi, hacim değişimi veya sıkıştırılabilirliği azalırken dayanımı artmaktadır. Yüzeysel zemin stabilizasyonunda çimento karışımlarının kullanılması, kireç kullanımı kadar yaygın bir uygulama olup kireç gibi, çimento stabilizasyonu da zeminlerin dayanımını arttırmaktadır. Çimentonun aktif olarak zemin ile karıştırılmasının, yollarda taban zemininin taşıma gücünü arttırarak üst yapı tasarım kalınlığını azaltmak gibi iki önemli getirisi vardır. Dolayısıyla, çimento kullanılarak gerçekleştirilen yüzeysel zemin stabilizasyonu, özellikle karayolu ve demiryolu gibi yol inşaatlarında ya da havaalanı pistlerinin yapımında tercih edilmektedir. Yüzeysel zemin stabilizasyonu için genellikle Portland çimentosu kullanılır. Çimentoların hemen hemen tüm zemin türlerini stabilize etmek için kullanılabilirliği bilinmektedir. Ancak organik zeminler, yüksek derecede plastik killer ve bazen de yetersiz şekilde reaksiyona giren kumlu zeminler bunun istisnalarıdır [13]. Çimento, çakıllı ve kumlu zeminlerin stabilizasyonunda tercih edilse de killi zeminlerin ve turba toprakların stabilize edilmesinde de kullanılabilir. Çimento stabilizasyonu için en iyi zemin türleri, zayıf kohezyonlu granüler zeminlerdir. Dolayısıyla, AASHTO Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-2 ve A-3 sınıfına giren iyi derecelenmiş granüler zeminler çimento ile en iyi sonucu verirler. Kumlu ve çakıllı zeminlerin  $PI < 30$  ise, ince taneli zeminler de, 200 nolu elekten geçen kısım %35'den az ve  $PI < 20$  ise çimento stabilizasyonu uygulanabilir [10]. İçlerinde çok kalsiyum minerali bulunduran kil çeşitleri, çimento ile stabilizasyon için en uygun kil tiplerini oluştururken daha çok sodyum ya da hidrojen barındıran killer ise kireç ile stabilizasyona daha uygundur. Genellikle %2'den daha fazla organik madde içeren ve pH'ı 5.5'tan az olan zeminlerin stabilizasyonunda çimentonun kullanılması uygun değildir [13]. Bu sebeple, gerçekleştirilecek stabilizasyon için kullanılacak malzemenin seçimine önem verilmelidir. Çoğu uygulamada, normal olarak Tip I veya Tip II Portland çimentosu kullanılır ve çimento içeriği zeminin kuru ağırlığının %4'ü ile %16'sı arasında değişebilir. Genel olarak, zeminin kil kısmı arttıkça, gereken çimento miktarı da artar. %10 kil içeriğine sahip zeminlerin stabilizasyonunda gerekli çimento oranı %5 iken, kil içeriği %30'a yükseldiğinde bu oran %10 veya daha fazlasına yükselmektedir. İyi granülometrilili zeminler dona karşı daha az hassas ve şişmeye karşı daha az elverişli olduklarından stabilizasyonu için gerekli çimento oranı daha düşüktür. Buna karşılık üniform taneli kumlar, dona karşı hassas siltler ve killer için stabilizasyonda gerekli çimento miktarı artmaktadır. Ayrıca ince öğütülmüş çimentonun, daha büyük parçacıklar içeren aynı miktarda çimentodan daha yüksek dayanımlar üreteceği belirlenmiştir [14].

### 2.1.3. Kireç-Çimento ile Stabilizasyon

Kireç ve çimento, zemin stabilizasyonu için ayrı ayrı katkı maddeleri olarak kullanılabilirliği gibi, her ikisinin farklı oranlarda bir arada kullanılmasıyla da zeminlerin stabilize edilmesi mümkündür. Kireçli çimento stabilizasyonunun başarısı zeminin özelliklerine, kireç/çimento oranına ve kür süresine bağlıdır.

Kireç ve çimentonun kombinasyon halinde zeminlerin stabilizasyonunda kullanıldığını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır.

### 2.1.4. Uçucu Kül ile Stabilizasyon

Uçucu küller, kolaylıkla temin edilebilen, ucuz ve çevre dostu malzemeler olup termik santrallerde toz haline getirilmiş kömürün yakılmasından elde edilen ince tortu şeklindeki bir yan ürün olup kireç ve çimentoyla karşılaştırıldığında çok az çimentolaştırıcı özelliğe sahiptir. Uçucu küllerin çoğu, ikincil bağlayıcılar grubuna ait olup kendi başlarına istenen etkiyi yaratamazlar. Bununla birlikte, az miktarda aktivatör bir maddenin varlığında kimyasal reaksiyona girerek, ince taneli yumuşak zeminlerin dayanımının artmasına katkıda bulunan çimentolu bileşikler oluşturabilir.

Uçucu küllerin zemin stabilizasyonun da kullanılması bu malzemeler için yeniden kullanım olanakları yaratılması, çevresel ve ekonomik açıdan çok önemlidir. Türkiye’de bir yılda üretilen toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık 13 milyon ton civarındadır. Bu miktar çok büyük olup, zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı bu küller için gerekli depolama sahası ihtiyacını azaltmasının yanı sıra aynı zamanda değerli agregaların kullanımını da azaltmaktadır.

Düşük birim ağırlıklı olması, sıkıştırılabilir olması, puzolanik reaksiyon özelliklerinin bulunması, maliyet bakımından etkin olması ve enerji tasarrufu sağlaması gibi özellikleri açısından uçucu küller, ince taneli yumuşak zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesin de yaygın olarak kullanılan atık malzemelerinden biridir [15,16].

### **2.1.5. Uçucu Kül-Kireç ve Uçucu Kül-Kireç-Çimento ile Stabilizasyon**

Zemin stabilizasyonunda uçucu kül-kireç veya uçucu kül-kireç-çimento kombinasyonları birlikte kullanılabilir. Uçucu kül-kireç ve uçucu kül-kireç-çimento karışımları özellikle granül malzemelerin stabilizasyonunda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle genellikle temel ve alt temel malzemelerinin bu karışımlarla stabilize edilmesi uygun olmaktadır.

Yapılan birçok araştırmada, uçucu kül, kireç ve çimento karışımlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilen stabilizasyonun etkinliğinin daha da arttığı ve bu şekilde ince taneli yumuşak zeminlerin işlenebilirliği ile dayanım karakteristikleri ve donma çözülme dayanıklılığının, sadece uçucu kül stabilizasyonu veya kireç stabilizasyonu ile karşılaştırıldığında belirgin şekilde iyileştiği ortaya konulmuştur [17,18,19].

### **2.1.6. Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilizasyon**

Yüksek fırın cürufuları, pik demir üretimi sırasında elde edilen yan ürünlerdir. Bunların fiziksel yapısı ve derecelenmesi, cürufun kimyasal bileşimine, suyla söndürme sırasındaki sıcaklığına ve üretim yöntemine bağlı olarak değişiklik gösterir. Yüksek fırın cürufularının kimyasal bileşimleri çimentoya benzemesine rağmen aslında bunlar çimentolu bileşik değildirler. Yüksek fırın cürufuları, beton karışımlarında çimento yerine ve zeminlerin stabilizasyonunda stabilizatör olarak kullanılarak zeminlerin basınç dayanımları, geçirgenlikleri ve dayanıklılıkları arttırılabilmektedir.

### **2.1.7. Puzolanlar ile Stabilizasyon**

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri bulunmayan veya bağlayıcılık özelliği çok az olan, fakat ince taneli haldeyken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle ( $Ca(OH)_2$ ) kimyasal reaksiyona girince hidrolik bağlayıcılık özelliğini kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir [20]. Puzolanlar, normal sıcaklık değerlerinde, sulu ortamda ve bilhassa kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliğine kazanan malzemelerdir [21].

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan puzolanlar uçucu kül, silisyum eritme işleminden kaynaklanan silika dumanı, yüksek reaktif metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi silika bakımından zengin yanmış organik madde kalıntıları gibi endüstriyel yan ürünlerdir.

### **2.1.8. Bitüm ile Stabilizasyon**

Bitümler, karbon disülfürde çözünebilir ve sulu olmayan hidrokarbon sistemleridir. Bitümlü zemin stabilizasyonu, kontrollü miktarda bitümlü malzemenin mevcut bir zemin veya agrega malzemesiyle iyice karıştırılarak stabil bir temel veya aşınma yüzeyi oluşturulması işlemini ifade eder [22]. Bitümlü malzemeler bir zemine eklendiğin de, zeminin hem kohezyonunu hem de su emilimini azaltır.

Zeminlerin bitümlü malzemelerle stabilizasyonunda oluşan bağlayıcı filminin rolü zeminin özelliklerine bağlı olarak değişir. Kum veya çakıl gibi iri taneli granüler zeminlerde bağlayıcı filmi zemini su geçirmez hale getirmesinin yanında danelerini birbirine bağlayarak zeminin yük taşıma kapasitesini arttırır. İnce taneli kohezyonlu zeminlerin stabilizasyonunda, stabilize edilen zemin tabakasının geçirimsizliğinin sağlanması bitümlü malzeme kullanımının esas amacıdır. Genellikle, granüler veya plastik olmayan zeminlerin bitümlü malzemeler kullanılarak stabilize edilmesiyle başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Bitümlü malzemelerle zeminlerin stabilizasyonunda zeminlerin dayanıklılık, stabilite ve geçirimsizlik özelliklerini etkileyen dört ana etken mevcuttur. Bunlar, zemin cinsi, bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı, karıştırma ve sıkıştırma değildir. Genellikle, zeminin tane boyutu küçüldükçe ve plastisitesi arttıkça, bitümlü malzeme ile karışması zorlaşmaktadır. Çakılın varlığı durumunda stabilize edilmiş zeminin direnci ve dayanıklılığı artarken gerekli bitümlü malzeme miktarı azalır. Bitümlü malzemenin karışım içinde üniform dağılımını sağlamak ve sıkıştırmayı kolaylaştırmak için zemin içinde bir miktar su bulunmalıdır. Bitümlü malzemelerle etkili bir şekilde stabilize edilebilen zeminler genellikle 200 nolu elekten geçen ince malzeme oranı %30'dan ve plastisite indisi (PI) değeri %10'dan az olan zeminlerdir [23].

### 3. SONUÇ ve ÖNERİLER

Zemin stabilizasyonu, mevcut zemin koşullarının istenilen amaçlar için uygun olmadığı durumlarda zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Sorunlu zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan en eski ve en yaygın yöntemlerden biri kimyasal stabilizasyondur. Özellikle düşük taşıma kapasitesine, yüksek geçirgenliğe ve hacim değişikliği potansiyeline sahip yumuşak ince taneli zeminler, kimyasal stabilizasyon yöntemleri sayesinde ekonomik, çevreci ve etkili bir şekilde iyileştirilebilmektedirler. Kimyasal stabilizasyonda yaygın olarak kullanılan birçok malzemenin endüstriyel atıklar olması nedeniyle, bu atıkların değerlendirilememesi durumunda depolama maliyetleri ve çevreye verdikleri olumsuz etkileri çok fazladır. Bu sebeplerden dolayı bu atıkların zemin iyileştirme süreçlerinde kullanılması çeşitli çevresel sorunların ortaya çıkmasını önleyebilir, iyileştirme maliyetlerini düşürebilir ve değerli agregaların kullanımını azaltabilir.

### Kaynaklar

- [1] Sherwood, P., "Soil stabilization with cement and lime", State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO,(1993).
- [2] Uzuner, B., "Temel Mühendisliğine Giriş", Derya Kitabevi, Trabzon, (2000).
- [3] Sağlamer, A., "Zemin İyileştirme Yöntemleri", Sunu, Trabzon.
- [4] Tunç, A., "Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları", Atlas Yayın dağıtım, İstanbul, (2002)
- [5] Önalp, A., "Geoteknik Bilgisi Cilt II", KTÜ Basımevi, Trabzon, (1997).
- [6] Yılmaz, F., Kamiloglu, H. A. and Sadoglu, E., "Soil stabilization with using waste materials against freezing thawing effect". Acta Physica Polonica A, 128, 392-394, (2015)
- [7] Calik, U. and Sadoglu, E., "Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite", Geomechanics and Engineering, 6(4), 403-418, (2014).
- [8] Celik, E. and Nalbantoglu, Z., "Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-Stabilized sulfate-bearing soils", Engineering Geology, 163, 20-25, (2013).

- [9] Yılmaz, F. and Yurdakul M., "Evaluating of marble dust for soil stabilization", *Acta Physica Polonica A*, 132, 710-711, (2017).
- [10] Umar, F., Ađar, E., "Yol Üst Yapısı", İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, (1985).
- [11] Prusinski, J.R., Sankar, B., "Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils", *J. Trans. Res. Board* 1652 215-27, (1999).
- [12] Rogers, C.D., Glendinning, S., "Modification of clay soils using lime", *Proceeding of the Seminar held at Loughborough University on Lime Stabilization*, 99-114, London: Thomas Telford, (1993).
- [13] Little, D. N., Nair, S., "Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Web only document – 144, Texas A&M University, Texas, (2009).
- [14] Ingles, O.G, Metcalf, J.B., "Soil stabilization: principles and practice". Sydney: Butterworth, (1972).
- [15] Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H.R., Ramyar, K., "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay, *Building and Environment*", 41(2), 150-155, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.009>, (2006).
- [16] Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., "Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives", *Cold regions science and technology*, 48(1), 44, (2007).
- [17] Harichane, K., Ghrici, M., Missoum, H., "Influence of natural pozzolana and lime additives on the temporal variation of soil compaction and shear strength", *Frontiers of Earth Science*, 5(2), 162- 169, (2011).
- [18] Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., "Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives", *Cold regions science and technology*, 48(1), 44, (2007).
- [19] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Jones, R., "Role of Fly Ash in the Mitigation of Swelling in Lime Stabilised Sulfate Bearing Soils", Paper presented at the World of Coal Ash (WOCA), Lexington, KY, USA, (2009).
- [20] Bulut, Ü. and Tanaçan, L., "Perlitin puzolanik aktivitesi", *İtüdergisi/a Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 8 (1), 81-89, (2009).
- [21] Yılmaz, F., "Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve tomografi tekniği ile araştırılması", *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 160, (2015).
- [22] Guyer, J.P., "Stabilization for Pavements", NY.: Continuing Education and Development, Inc., (2011).
- [23] Onyelowe, K.C., Okofofor, F.O., "Geochemistry of Soil Stabilization", *ARNP Journal of Earth Sciences* 1(1), 32-5, (2012).
- [24] M. İ. Onur, "Innovative Research in Geotechnical Engineering". , Özgür Publications, December, (2023). ■