

Zeminlerde Kimyasal Stabilizasyon Uygulamaları ve Kullanılan Malzemeler

Tayfun Şengül¹

Yaşar Vitoşoğlu²

Özet

İstenilen özelliklere sahip olmayan doğal zeminlerin taşıma kapasitesinin ve diğer mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi zeminlerin stabilizasyonu ile mümkün olmaktadır. Zemin stabilizasyonu kimyasal, mekanik veya termal yöntemlerle zeminin iyileştirilmesini ifade eder. Bu şekilde zeminin dayanıklılığı artırılarak, hacim değişimi ve su geçirgenliği azaltılarak veya diğer mühendislik özellikleri geliştirilerek yapıların güvenli ve sağlam bir temel üzerine oturtulması sağlanabilir. Zemine kimyasal katkı maddeleri ekleyerek, zeminin dayanıklılığını ve taşıma kapasitesinin artırılması en eski zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olup binlerce yıldır uygulanmaktadır. Bu katkı maddeleri genellikle çimento, kireç, uçucu kül ve diğer kimyasal maddeleri içerebilir. Bu katkılar, genellikle ucuz, yerel olarak bulunabilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu malzemelerdir. Dolayısıyla, bu malzemelerin tek tek veya kombinasyon halinde kullanılması, taban zeminlerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde birçok avantaj sağlar ve üst yapıların performansını önemli ölçüde artırır. Bu çalışmada kimyasal stabilizasyon yönteminde kullanılan katkı malzemeleri incelenmiş, zeminin özellikleri, projenin gereksinimleri ve yerel koşullar göz önüne alınarak uygun bir stabilizatör seçimi için kullanılan katkı malzemeleri ile elde edilen kazanımlar literatürde bulunan deneysel araştırma sonuçları ile somutlaştırılmıştır.

1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, 0000-0003-3473-7724

2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, 0000-0002-5543-9673

1. Giriş

İnşaat mühendisliği projeleri hayata geçirilmeden önce yapılacak en önemli işlerden birisi saha fizibilite etüdünün yapılmasıdır. Bu etüt, genellikle tasarım süreci başlamadan önce, projenin yeri konusunda karar vermek üzere taban zemininin özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Projenin yerinin seçimi esnasında göz önünde bulundurulacak tasarım kriterlerinin başında, yapının tasarım yükü ile işlevi, kullanılacak temel türü ve taban zemininin taşıma gücü gelir.

Geçmişte, taban zemininin taşıma gücü yer seçiminde daha fazla rol oynamıştır. Zeminin taşıma gücünün yetersiz olması durumunda ise tasarımın saha koşullarına uyacak şekilde değiştirilmesi, yerindeki zeminin çıkarılması ve değiştirilmesi ile sahanın terk edilmesi başlıca seçenekler olarak göz önüne alınmıştır. Bunun sonucunda, taban zemininin taşıma gücünün yetersiz olması nedeniyle terk edilen sahalar önemli ölçüde arttığından arazi kıtlığı ciddi bir sorun haline gelmiştir. Heyelana uğramış ve kirlenmiş arazilerin yanında terk edilen alanlar arasında, sıvılaşmaya yatkın sahalar ile yumuşak kil ve organik zeminlerle kaplı olanlar başta gelmektedir. Dolayısıyla çoğu inşaat mühendisliği projesinde, zemin modifikasyonu olmadan tasarım gerekliliklerini karşılayacak bir inşaat sahası elde etmek oldukça güçtür. Mevcut uygulama, tasarım şartnamelerindeki koşulları sağlamak için taşıma gücü düşük ve sorunlu zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Günümüzde, yumuşak killer ve organik topraklar gibi zeminler ortaya çıkacak inşaat mühendisliği gereksinimlerine göre iyileştirilebilmektedir. Bu inceleme, çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan zemin stabilizasyonu yöntemine odaklanmaktadır.

Zemin stabilizasyonun amacı, zemin tanelerini birbirine bağlayarak, taneleri su geçirmez hale getirerek veya ikisinin bir kombinasyonunu sağlayarak zeminin dayanımını ve su ile yumuşamaya karşı direncini artırmaktır [1]. Zeminlerin yumuşak ve taşıma kapasitesinin düşük olduğu, yerel doğal agregaların kalitesiz olduğu ve ithalinin maliyetli olduğu veya zeminlerin kazılıp granüler malzemelerle değiştirilmesinin pahalı olduğu durumlarda gerçekleştirilir. En basit stabilizasyon süreçleri, sıkıştırma ve drenajdır. Diğer süreç ise tane boyutu dağılımının iyileştirilmesi olup zayıf zeminlere bağlayıcılar eklenerek daha fazla iyileştirme sağlanabilir [2]. Zemin stabilizasyonu çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler, mekanik ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır.

Mekanik stabilizasyon, doğal zemin tanelerinin fiziksel yapısını titreşim veya sıkıştırma yoluyla değiştirerek veya bariyerler ve çiviler gibi diğer fiziksel unsurları zemin yapısına dâhil ederek gerçekleştirilir. Mekanik

stabilizasyonun, aynı zamanda, bir zeminin tane dağılımının farklı tane dağılımına sahip diğer zemin türleriyle karıştırılarak değiştirilmesi yoluyla da gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu şekilde daha yoğun bir zemin kütlesi elde edilebilir. Silt veya kil gibi ince malzemelerden az miktarda ilave edilmesi, kohezyonsuz zeminlerdeki iri tanelerin bağlanmasını sağlayarak zeminin dayanımını artırır. Diğer yandan, iri ve köşeli kum ve çakıl taneleri, karışımın içsel sürtünmesini artırarak sıkıştırılabilirliğini azaltır. Zeminleri iyileştirmek için yüksek çekme dayanımına sahip doğal veya sentetik doğal lifler, donatı çubukları, geosentetik şeritler, geotekstiller veya geogridler gibi katkı maddelerinin kullanılması olan zemin takviyesi de, mekanik stabilizasyon yöntemlerinden birisidir.

Kimyasal stabilizasyon, doğal zeminlerin geoteknik özelliklerini belirli mühendislik amaçlarını karşılayacak şekilde iyileştirmek için gerçekleştirilir. Doğal zeminlerin geoteknik özellikleri, kesme mukavemeti parametrelerinin iyileştirilmesiyle, çekme mukavemetinin artırılmasıyla ve rijitliğin yükseltilmesiyle geliştirilebilir. Bu teknikte zeminlere kimyasal olarak aktif malzemeler eklenerek zemin kütlelerinin stabilitesini arttırmak veya korumak amaçlanır. Kimyasal zemin stabilizasyonu, istenen etkiyi elde etmek için esas olarak çimentolu bir malzeme olan stabilizatör ile puzolanik maddeler içeren zemin mineralleri arasındaki kimyasal reaksiyonlara bağlı olup şişen killerden granüler malzemelere kadar çok çeşitli tipte taban zeminlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir. Bu husus, tasarım ölçütlerinin oluşturulmasının yanı sıra, istenen mühendislik özelliklerini elde etmek için kullanılacak uygun kimyasal olarak aktif katkının ve katkı oranının belirlenmesine imkân verir. Kimyasal stabilizasyon işleminin yararları arasında daha yüksek dayanım değerleri, plastisitede azalma, daha düşük geçirgenlik, üst yapı kalınlığının azalması, kazı malzemelerinin kaldırılmasının veya taşınmasının önlenmesi sayılabilir. Aynı zamanda nem değişkenliğinin neden olduğu şişen veya ince taneli zeminlerdeki hacimsel değişiklikleri en aza indirmesi, bir başka faydasıdır. Dolayısıyla, şişen zeminlerin katkı maddeleriyle stabilizasyonu, zeminlerin hacim bakımından değişim potansiyelini kontrol eder ve zeminlerin taşıma gücünü artırır. Kimyasal zemin stabilizasyonu, aynı zamanda uygun maliyetli, performans açısından verimli ve çevre dostu bir yöntem olarak kabul edilir.

Zeminler, kireç, çimento, uçucu kül, bitüm, silis dumanı, pirinç kabuğu külü veya bunların kombinasyonu olan çimentolu malzemelerle stabilize edilebilir. Daha önce de ifade edildiği gibi, stabilize edilmiş zeminler, doğal zeminden daha yüksek dayanıma, daha düşük geçirgenliğe ve daha düşük sıkıştırılabilirliğe sahiptir. Stabilizasyon, yerinde stabilizasyon ve yerinde olmayan stabilizasyon olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir.

2. Stabilizasyonun Bileşenleri

Zemin stabilizasyonu, dayanım, sıkıştırılabilirlik, geçirgenlik ve dayanıklılık gibi geoteknik özelliklerini iyileştirmek için zayıf zeminlerde stabilize edici bağlayıcı maddelerin kullanılmasını içerir. Stabilizasyon teknolojisinin bileşenleri arasında zemin veya zemin mineralleri ile stabilize edici ajan veya bağlayıcı özelliğe sahip çimentolu malzemeler bulunur.

2.1. Zeminler

İstenilen mühendislik özelliklerini elde etmek amacıyla stabilizasyon, killerden granüler malzemelere kadar çok çeşitli tipte zeminlere uygulansa da, çoğu zaman killi, siltli veya organik zeminlerde gerçekleştirilir. İnce taneli granüler malzemeler, tane çaplarına oranla geniş yüzey alanları nedeniyle stabilize edilmesi en kolay malzemelerdir [1]. Diğerlerine kıyasla killi bir zemin, düz ve uzun tanelere sahip olduğundan geniş bir yüzey alanına sahiptir. Öte yandan, siltli malzemeler nemdeki küçük değişikliklere karşı hassas olabildiklerinden stabilizasyon sırasında zorluklar çıkarabilir. Turba zeminler ve organik zeminler, çok yüksek su içeriğine, yüksek gözenekliliğe ve yüksek organik içeriğe sahiptir. Organik zeminlerde stabilizasyonun başarılı olması, uygun bağlayıcı seçimine ve ilave edilen bağlayıcı miktarına bağlıdır.

2.2. Stabilize Edici Maddeler

Stabilize edici maddeler, su ile temas ettiğinde veya puzolanik minerallerin varlığında su ile reaksiyona girerek çimentolu kompozit malzemeler oluşturan bağlayıcılardır. Yaygın olarak kullanılan bağlayıcılar, kireç, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bitümlü malzemelerdir. Bunların dışında, puzolanlar, prinç kabuğu külü, kireç fırını tozu, çimento fırını tozu, silika dumanı ve geopolimerler de zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Bu katkıları, genellikle ucuz, yerel olarak bulunabilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu malzemeler olduklarından kullanılmaları birçok avantaj sağlar. Bu malzemelerin tek tek veya kombinasyon halinde kullanılması, taban zeminlerinin özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.2.1. Kireç

En sık kullanılan kimyasal stabilizasyon yöntemlerinden biri olan kireç stabilizasyonu, kohezyonlu zeminlerin dayanımlarının artırılması ve plastisite özelliklerinin iyileştirilmesi için iyi bilinen ve ekonomik bir tekniktir. Kireç üzerine yapılan araştırmalar, zeminin dayanımının artırılmasının kireç stabilizasyonunun en göze çarpan yararlarından biri

olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, kirecin; killerin hacim stabilitesini, işlenebilirlik ve durabilite gibi özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Özellikle orta ve ince daneli zeminler, kireç ile stabilize edilerek, plastisiteyi düşürülür, şişmesi azaltılır ve direnci yükseltilir. Kireç kil mineralleriyle daha iyi çalıştığı için kireç stabilizasyonuna killi zeminlerde yaygın olarak başvurulmaktadır. Ayrıca, killi çakıllar ve siltli killer de kireç ile kolayca reaksiyona girer. Kireç stabilizasyonu için genellikle plastisite indisi değeri (PI) 10'dan büyük, kütlece en az %25'i ince daneli olan killi zeminler ideal zemin grubudur. Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği (AASHTO) Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-2 (7), 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 [3]. Diğer taraftan, kireç stabilizasyonu granüler zeminlerde, düşük kohezyonlu veya kohezyonsuz zeminlerde puzolan ilavesi olmadan daha az uygundur [4-5]. 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 [6]. Kirecin çimentoyla birlikte kullanılması da oldukça yaygındır.

Kireç stabilizasyonunda, katyon değişimi, topaklanma yığılması, kireç karbonizasyonu ve puzolanik reaksiyon nedeniyle, zemin parçacıkları birbirine yapışarak daha büyük parçacıklar oluşturur ve bu da zeminin özelliklerini iyileştirir [7-8]. Zeminin dayanım artışında, puzolanik reaksiyonun getirdiği çimentolaşma etkisinden ziyade katyon değişim kapasitesi daha etkili olmaktadır [1]. Zemin modifikasyonunda, kil parçacıkları topaklaştıkça, doğal plaka benzeri kil parçacıklarının iğne benzeri birbirine kenetlenen yapılara dönüştüğü görülür. Böylece, killi zeminler, daha kuru ve su içeriği değişikliklerine daha az duyarlı hale gelir [2]. Kireç stabilizasyonu, sönmemiş kireç (CaO) ya da sönmüş (hidrate) kireç (Ca(OH)₂) 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 nem içeriğindeki azalmayı hızlandırarak yüksek ısı meydana getirmesidir [2].



Kireç stabilizasyonu uygulamalarının çoğunda kullanılan kireç miktarı, zemin kuru ağırlığının yaklaşık olarak %5'i ile %10'u arasında değişmektedir.

Bazı araştırmalar, kirecin sıkıştırma parametreleri üzerinde büyük bir etkisinin olmadığını rapor etmiştir. Bununla birlikte, diğer bağlayıcılarla karşılaştırıldığında, kireç zemin parçacıklarıyla hızlı ve kapsamlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girmektedir. Kimyasal etkileşimin bir sonucu olarak zeminin özelliklerinin değiştirilmesi, zeminin sıkışma ve dayanım parametreleri gibi çeşitli özelliklerinde iyileşme sağlar [7-9].

Kireç stabilizasyonu kapsamında Kavak ve Akyarlı (2007) [8], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yeşil ve kahverengi killerin hâkim olduğu 200 m uzunluğundaki bir yol kesiminde gerçekleştirilen kireç stabilizasyonu uygulaması sonucunda elde edilen iyileştirmeler çeşitli laboratuvar ve saha testlerinin sonuçlarına dayanarak belirlenmiştir. Saha koşullarında kireç stabilizasyonu her iki kil için de %5 kireç ilavesiyle gerçekleştirilmiş olup 30 cm kalınlığında tek bir tabaka halinde uygulanmıştır. Laboratuvarda yapılan Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerinde, 28 gün sonunda yeşil ve kahverengi killerde ilk CBR değerlerine kıyasla sırasıyla 16 ve 21 kata varan artışlar gözlenmiştir. CBR değerlerinde gözlenen yüksek artışlar, yolların üst tabaka kalınlığının azalacağı anlamına gelmektedir. Benzer iyileşmeler, serbest basınç ve plaka yükleme deneylerinde de elde edilmiştir.

Killi zeminler karayolu yapımında birçok soruna neden olur ve tatmin edici bir performans için değiştirilmeleri veya stabilizasyon ile iyileştirilmeleri gerekir. Daha önce de belirtildiği gibi, kireç stabilizasyonu, killerin performansını artırmak için iyi bilinen bir teknik olup kilin kireçle karıştırılmasıyla çimentolu mineraller oluşur ve bu da mukavemet ve dayanıklılıkta bir iyileşmeye neden olur. Kavak ve Baykal (2012) [10], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, X-ışını kırınım şablonu, taramalı elektron mikroskobu ve serbest basınç dayanımı kullanılarak, uzun süre kürlenmiş ve kireçle stabilize edilmiş kaolinit kilinin mikro yapısındaki değişiklikler incelenmiştir. Stabilize edilmemiş saf kaolinitin serbest basınç dayanımı 125 kPa olarak bulunmuştur. Kürlenmiş ve kireçle stabilize edilmiş numuneler için 1 ay sonra bu değer 1015 kPa'a ve 10 yıl sonra 2640 kPa'a yükselmiştir. Benzer uzun süreli dayanım artışları, %12 oranında kireç ile stabilize edilmiş kaolinit için de gözlenmiştir. Kaolinitin yapısında kalsiyum alüminat silikat hidrat mineralleri tespit edilmiştir. Bu durum, kireç stabilizasyonu ile puzolanik reaksiyonların uzun vadede 10 yıla kadar devam edebileceğini göstermektedir.

Soğuk bölgelerde, dolgular ve yollar gibi toprak yapılar donma-çözülme döngülerine maruz kalmaktadır. Donma-çözülme döngülerinin kireç

ile stabilize edilmiş iki farklı plastisite özelliğine sahip zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Hotineanu ve diğerleri (2015) [11] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada hem işlem görmemiş hem de 300 güne kadar varan kürlenme süresinde kireçle işlem görmüş yüksek plastisiteli bentonit ve düşük plastisiteli kaolinit olmak üzere iki tür killi zemin test edilmiştir. Donma-çözülme döngülerinin bu zeminlerin porozite, hacim değişimi, serbest basınç ve direkt kesme dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, işlem görmüş zeminlerin hacminin ilk donma-çözülme döngüleri sırasında arttığını, daha sonra bu artışın daha az belirgin hale geldiğini göstermiştir. Kür süresi 3 günden 28 güne ve daha sonra 300 güne uzatıldığında serbest basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır. Malzemeler donma-çözülme etkisine maruz bırakıldıktan sonra, kireçle stabilize edilmiş zemin numunelerinin gözeneklerinde buz merceklerinin oluşmasından kaynaklanan çatlak oluşumunun bentonit zeminde kaolinit zemine göre daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kayma mukavemeti parametrelerinde ise artan donma-çözülme döngü sayısı ile değişim meydana gelmiş içsel sürtünme açısı hafifçe artarken kohezyon değeri azalmış, bunun sonucunda stabilize edilmiş zeminin dayanımının etkilendiği belirlenmiştir.

Kireçle stabilize edilmiş numuneler üzerinde yapılan araştırmalarda, gevrek malzemelerde karşılaşıldığı gibi bir kayma kırılması biçimi tespit edilmiştir [12-13]. Birçok çalışma, zeminlerin dayanım özelliğindeki iyileşmede kirecin etkin rolünü ortaya koymuştur [8,12,14]. Zemin ve kireç parçacıkları arasındaki zeminin dayanımını artıran bu etkileşim puzolonik reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır [8].

Bazı araştırmalarda kohezyonlu zeminleri stabilize etmek için kirecin yanında arıtma çamuru külü de kullanılmıştır. Lin ve diğerleri (2007) [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çamur külü ve sönmüş kirecin ağırlıkça %0, %2, %4, %8 ve %16 olmak üzere beş farklı oranı, kohezyonlu zemin ile karıştırılmış ve zemin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları, katkı maddesi içeren numunelerin serbest basınç dayanımlarının işlem görmemiş zemininkinden üç ila yedi kat daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bu numuneler için şişme davranışlarının da etkili bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Üç eksenli basınç deneyinin sonuçlarından, kayma mukavemeti parametresi olan kohezyonun artan katkı miktarı ile arttığı, 30 kPa'dan 50-70 kPa'ya yükseldiği, görülmüştür.

Araştırmacılar, plastisite indisindeki azalmanın kimyasal stabilizasyonda kireç miktarının artmasından kaynaklandığını ortaya çıkarmıştır. Zeminin plastisite indisi ile zeminin şişme basıncı ve şişme potansiyeli arasında direkt

bir ilişki bulunup, stabilize edilmiş zeminin plastisite indisindeki düşüşün şişme basıncının da düşmesine sebep olmaktadır [7-9,12].

2.2.2. Çimento

Portland çimentosu, su ilavesiyle sertleşen ve kimyasal olarak reaksiyona giren hidrolik bir bağlayıcı olup %21.9 silikon monoksit (SiO_2), %6.9 alüminyum oksit (Al_2O_3), %3.9 demir oksit (Fe_2O_3) ve %63 kalsiyum oksit (CaO) içerir [15]. Zemin stabilizasyonunda kullanılan en eski bağlayıcı malzemelerden biridir. Çimento ile stabilizasyon, belirli miktarda çimento ve suyun ufulanmış 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, Portland çimentosu, yüksek fırın çimentosu, sülfata dayanıklı çimento ve yüksek alüminalı çimentolar en fazla kullanılan türlerdir. İşlem görecekt zeminin türüne ve istenen nihai dayanıklılığa bağlı olarak çimento seçimi gerçekleştirilir.

Hidratasyon süreci, çimento reaksiyonunun gerçekleştiği bir süreç olup, çimentonun su ve diğer bileşenlerle karıştırılmasıyla başlar ve sertleşme olayıyla sonuçlanır. Çimentonun sertleşmesi ya da priz alması zemini tutkal gibi sarar, ancak zeminin yapısını değiştirmez. Hidratasyon reaksiyonu çimento tanelerinin yüzeyinden itibaren yavaş ilerler ve tanelerin merkezi susuz kalabilir [1]. Çimento hidrasyonu, bilinmeyen bir dizi kimyasal reaksiyon içeren karmaşık bir süreçtir [16]. Ancak bu süreç, yabancı maddelerin varlığı, su/çimento oranı, kürlenme sıcaklığı, katkı maddelerinin varlığı ve karışımın özgül yüzeyi gibi faktörlerden etkilenebilir.

Çimento ile stabilize edilmiş zeminin priz alması ve mukavemet kazanması bazı faktörlere bağlı olarak değişebileceğinden istenen dayanımı elde etmek için karışımın tasarımı sırasında bu durum dikkate alınmalıdır. Çimentolu hidratasyon, çimentoya özgü bir kimyasal işlem olup çimentoda bulunan faz bileşenleri trikalsiyum silikat (C3S), dikalsiyum silikat (C2S), trikalsiyum alüminat (C3A) ve tetrakalsiyum alüminoferrit

(C4AF). Kalsiyum silikatlar olan C3S ve C2S bileşenleri, sıradan Portland çimentosunun dayanım gelişiminden sorumlu iki ana çimentolu bileşendir. C3S ve C2S su ile reaksiyona girdiğinde hidrasyon reaksiyonu sertleşmiş çimento hamuruna mukavemet ve sertlik gibi mühendislik özelliklerinin çoğunu veren trikalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kristalize kalsiyum hidroksit (CH) üretir. Kristalize kalsiyum hidroksit, stabilize edilen zeminde bulunan puzolanik malzemelerle reaksiyona girerek daha fazla çimentolu malzeme meydana getirir [1]. C3A, suyla C3S'den daha hızlı reaksiyona girerek çimento hamurunun anında sertleşmesine neden olduğundan hidrasyonun erken aşamasında özellikle önemlidir. Bu reaksiyon, önemli olsa da, geciktirilmesi gerektiğinden ani sertleşmeyi önlemek için alçı eklenir [17]. C3A ve alçı suyla reaksiyona girerek etrenjit üretir. Alçı tükendiğinde, C3A su ile reaksiyona girerek trikalsiyum alüminat hidrat (CAH) meydana getirir. CSH ve CAH, zemin parçacıkları için bağlayıcı görevi gören bir jel ağı oluşturarak bir zemin-çimento matrisi elde edilir ve çimento hamuru sertleştiğinde dayanıklılık oluşur. Normalde kullanılan çimento miktarı az olmasına rağmen zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmek için yeterlidir. 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, taban zemininin taşıma gücünü artırarak 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 kullanılabileceği bilinmektedir. Ancak organik zeminler, yüksek derecede plastik killer ve bazen de yetersiz şekilde reaksiyona giren kumlu zeminler bunun istisnalarıdır [18]. Çimento, çakıllı ve kumlu zeminlerin stabilizasyonunda tercih edilse de killi zeminlerin ve turba toprakların stabilize edilmesinde de kullanılabilir. Çimento stabilizasyonu için en iyi zemin adayları, 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 daneli zeminler de, 200 nolu elekten geçen kısım %35'den az ve $PI < 20$ ise çimento stabilizasyonu uygulanabilir [3]. Çimento stabilizasyonu için uygun olan killi zeminler kaolinitik ve illitik

killi zeminler olup çimentonun düşük plastisiteli kilin stabilizasyonunda etkili olduğu bilinmektedir. Turba zeminler, puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesine izin veren ve killi zeminlerde bulunan silika (SiO_2) ile alüminadan (Al_2O_3) yoksun olmasına rağmen, birincil hidratasyon reaksiyonu bu zeminler için çimentolu bağ oluşturmak için yeterlidir. İçlerinde çok kalsiyum minerali bulduran 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 [18]. 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 daneli 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 [19].

Mohamedzein ve Al-Rawas (2011) [20] yüksek sıkışabilirliğe ve düşük kayma dayanımına sahip aynı zamanda tuz içeren bir zeminin kayma dayanımını arttırmak amacıyla çimento ile stabilizasyon çalışması yürütmüştür. Bu çalışmada çimento, zeminin kuru ağırlığı esas alınarak %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında eklenmiş ve zemin karışımlarının 7, 14 ve 28 gün boyunca kürlenmelerine izin verilmiştir. Stabilize edilmiş malzemenin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla serbest basınç, konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin-çimento karışımlarının kayma dayanımında önemli iyileşmeler olduğunu ve karışımların aynı zamanda 12 ıslanma/kuruma döngüsünden sonra küçük ağırlık kaybına uğramaları nedeniyle dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Oyediran ve Kalejaiye (2011) [21], etkili stabilizasyon için gerekli optimum çimento içeriğini belirlemek amacıyla, ağırlıkça artan çimento miktarlarının zeminlerin mukavemet ve sıkıştırma parametreleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, öncelikle açılan bir test çukurundan 0.5

m, 1.0 m ve 2.0 m derinliklerde zemin örnekleri alınmıştır. Bu zemin örneklerinin maksimum kuru yoğunlukları, optimum su muhtevası, Kaliforniya taşıma oranları (CBR) ile kürlenmiş ve kürlenmemiş serbest basınç dayanımları, ağırlıkça %2, %4, %8, %10 ve %20 oranlarında çimento ile stabilize edilerek ve edilmeden belirlenmiştir. Sonuçlar, çimento oranı arttıkça zemin örneklerinin maksimum kuru yoğunluklarının, Kaliforniya taşıma oranlarının ve serbest basınç dayanımlarının arttığını, optimum su muhtevasının ise azaldığını göstermiştir. Ancak, ağırlıkça %10'dan fazla çimento ilavesi maksimum kuru yoğunlukları, Kaliforniya taşıma oranlarını ve serbest basınç dayanımlarını azaltmış ve optimum su muhtevasını ise artırmıştır. Sonuç olarak, araştırma, stabilizasyonda kullanılan çimento miktarındaki sürekli artışın bazı geoteknik özelliklerin iyileştirilmesinde daha iyi sonuçlar elde etmek için yeterli olmadığını göstermiştir.

2.2.3. Kireç-Çimento

Kireç ve çimento ayrı ayrı katkı maddeleri olarak kullanılmak suretiyle zemin stabilizasyonu yapılabileceği gibi farklı oranlarda bir kombinasyon şeklinde de kullanılarak zeminler stabilize edilebilir. Kireç ve çimentonun kombinasyon halinde zeminlerin stabilizasyonunda kullanıldığı bir çok çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle bazı zemin özellikleri açısından en iyi performansı sunan kireç ve çimentonun ideal karışım oranları belirlenmeye çalışılmaktadır. Kireçli çimento stabilizasyonunun başarısı ise zeminin özelliklerine, kireç/çimento oranına ve kür süresine bağlıdır.

Khemissa ve Mahamedi (2014) [22] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeşitli çimento ve kireç içerikli karışımlarla muamele edilmiş bir kil zemin üzerinde Proctor kompaksiyon deneyi, metilen mavisi testi, California taşıma oranı ve drenajsız direkt kesme deneyleri yürütülmüş ve sonuçları sunulmuştur. Deney sonuçları, doğal kilin taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğunu, en iyi performansın %8 çimento ve %4 kireç içeriğine karşılık gelen bir karışımdan elde edildiği belirtilmiştir.

Al-Rawi ve Al-Samadi (1995) [23] tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada üç farklı zeminin stabilize edilmesi için çimento, kireç ve alkali sodyum kimyasal katkı maddeleri kullanılarak en iyi serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı sonuçlarını üreten optimum kombinasyonun bulunmasına çalışılmıştır. Killi silt zeminin stabilize edilmesinde kuru ağırlıkça %9 çimento veya %7 çimento + %2 kireç katkısının gerektiği, karışıma 0.5 N sodyum hidroksit veya karbonat eklendiğinde stabilize edici madde miktarının azaltılabileceği belirlenmiştir. Siltli kil zeminde ise bu karışım oranı %12 çimento veya %8 çimento + %4 kireç olarak

bulunmuştur. Sodyum alkalilerin çimentolaşma malzemesini azaltabileceği saptanmıştır. Üçüncü zemin olarak seçilen kil zeminin ise, çimentoya zayıf tepki gösterdiği ve %18 oranında sülfata dirençli çimentoya ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu zemin kullanılan alkali sodyum kimyasallarına olumsuz tepki göstermiştir. Her bir zemin için stabilizatör miktarına ilişkin seçimin mevcudiyete, maliyete, ilgili alanın ekonomik koşullarına ve inşaat süresine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Düzenli depolama maliyetlerinin yüksek olması ve atık dökümhane kumlarının potansiyel kullanım alanlarının çok olması, bu kumların faydalı bir şekilde yeniden kullanımı konusundaki araştırmaları teşvik etmiştir. Karayolları, dökümhane kumlarının büyük hacimli kullanımı için yüksek bir potansiyele sahiptir. Bu amaçla, karayolu alt temel malzemesi olarak uygulanabilirliklerini değerlendirmek için çimento ve kireç katkılı zemin-dökümhane kumu karışımları üzerinde bir laboratuvar test programı Güney ve diğerleri (2006) [24], tarafından yürütülmüştür. Karışımlar laboratuvarında çeşitli nem içeriklerinde ve sıkıştırma enerjilerinde sıkıştırılmış ve serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı ve hidrolik iletkenlik deneylerine tabi tutulmuştur. Hazırlanan karışımların çevresel uygunluğu, hidrolik iletkenlik testleri sırasında toplanan atık su analiz edilerek değerlendirilmiş, mukavemet parametreleri kullanılarak gerekli alt temel kalınlıkları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, bir karışımın mukavemetinin kütleme süresine, sıkıştırma enerjisine, kireç veya çimento varlığına ve sıkıştırma sırasındaki su içeriğine büyük ölçüde bağlı olduğu belirlenmiştir. Dökümhane kumu bazı numunelerin kış koşullarına karşı direncinin genellikle tipik bir alt temel referans malzemesinden daha iyi olduğunu, laboratuvar sızıntı testleri bu karışımların daha sonra asfalt kaplamadan drenaj edilen su gibi doğrudan çevreye boşaltılan suyla temas etmesi halinde suyun kalitesinin etkilenmeyeceğini göstermiştir.

2.2.4. Uçucu Kül

Uçucu kül, termik santrallerde toz haline getirilmiş kömürün yakılmasından elde edilen ince tortu şeklindeki bir yan ürün olup kireç ve çimentoya 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 olarak reaksiyona girerek, yumuşak zeminlerin dayanımının artmasına katkıda bulunan çimentolu bileşikler oluşturabilir. Uçucu küller, kolaylıkla temin edilebilen, ucuz ve çevre dostu malzemeler olup C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu iki sınıf, yakılan kömürün türü ile ilgilidir. C sınıfı uçucu küller, bitüm altı veya linyit kömürünün

yakılmasıyla elde edilmektedir. Genellikle %15'ten daha fazla kalsiyum oksit (CaO) içeren ve aynı zamanda yüksek kalsiyum külleri olarak adlandırılan C sınıfı uçucu küller, kendiliğinden yüksek çimentoşlama özelliklerine sahip olduklarından 1970'lerde beton endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. C sınıfı uçucu küller, sadece doğada puzolanik değildir. Düşük kalsiyum külleri olarak adlandırılan F sınıfı uçucu küller ise, antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasıyla üretilir. Bu küller, kil minerallerinin flokülasyonu için gerekli olan serbest kalsiyum oksiti (CaO) %6'dan daha az içermeleri nedeniyle düşük kendiliğinden çimentolaşma özelliklerine sahiptir. Bu yüzden, kireç veya çimento gibi aktivatörlerin eklenmesini gerektirirler de genellikle puzolanik özellikler gösterir. Ayrıca bu küller tutuşma testindeki kayıp tarafından belirlenen %2'den daha fazla yanmamış karbon içerir.

Uçucu kül, birçok ülkede, betonların, tuğlaların ve astarların imalatı ile sıkıştırılmış dolguların ve setlerin inşası gibi çeşitli inşaat uygulamalarında kullanılmaktadır. Daha önce de ifade edildiği gibi, uçucu kül kendi başına çok az çimentolaşmaya sahiptir. Ancak nemin varlığında, kimyasal olarak reaksiyona girerek çimentolu bileşikler oluşturmakta ve zeminlerin dayanıklılık ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Uçucu kül katkısı, yüksek derecede plastik killerin şişme potansiyelini etkili bir şekilde azaltmaktadır ve bu azalma, kil mineralleriyle iyonik değişimden ziyade mekanik bağlanma ile ilgilidir [25]. Bununla birlikte, uçucu külle zeminlerin stabilize edilmesi bazı sınırlamalara sahiptir. Öncelikle, stabilize edilecek zemin daha az nem içeriğine sahip olmalıdır; bu nedenle susuzlaştırma gerekebilir. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda kürlenmiş ve daha sonra suya batırılan zemin-uçucu kül karışımı gevşemeye ve mukavemet kaybına karşı oldukça hassastır. Kükürt içeriği, zemin-uçucu kül karışımında genişleyen mineraller oluşturabilir, bu da uzun vadede mukavemeti ve dayanıklılığı azaltabilir [26]. Öte yandan, uçucu küllerin kullanılarak yok edilmesi ve bu malzemeler için yeniden kullanım olanakları yaratılması, hem çevresel hem de ekonomik kaygılar bakımından önemlidir. Türkiye'de bir yılda üretilen toplam uçucu kül miktarı, yaklaşık 13 milyon tondur. Bu çok büyük bir miktar olup, zemin stabilizasyonunda uçucu kül kullanımı uygulamaları sadece bu küller için depolama sahası ihtiyacını azaltmayacak, aynı zamanda değerli agregaların kullanımını da azaltacaktır.

Son yıllarda, zemin stabilizasyonunda doğal kaynakların ve endüstriyel minerallerin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, uçucu kül, kimyasal stabilizasyon için katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi uçucu kül, yakılan kömürün türüne bağlı olarak C sınıfı ve F sınıfı uçucu kül olarak ikiye ayrılır. Düşük birim ağırlık ve sıkıştırılabilirliğe sahip olması, puzolanik

reaksiyon karakteristiklerinin bulunması, maliyet bakımından etkin olması ve enerji tasarrufu sağlaması gibi faydaları bakımından, uçucu kül, yumuşak zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan atık malzemelerinden biri olmuştur [27-28].

Sezer ve diğerleri (2006) [27], yumuşak killi taban zemininin çok yüksek kireçli uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, zeminin %0, %5, %10, %15 ve %20'si uçucu kül ile değiştirilmiştir. Kontrol numunesine ek olarak, standart proktor testi ile belirlenen optimum su içeriklerinde uçucu kül ile zemin karıştırılarak dört farklı stabilize zemin numunesi hazırlanmıştır. 1, 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımı ve kayma dayanımı parametreleri, kohezyon ve içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. Uçucu kül ilavesinin zeminin özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur. Uçucu kül içeriğinin artmasıyla ortaya çıkan iyileşmeler, uçucu külün puzolanik reaksiyon ve gözenek inceltme etkisinin yanı sıra yüksek serbest kireç içeriğine sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Uçucu külün zeminlerin plastisite indisi üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda; uçucu kül muamelesinin plastisite indisinin düşmesine yol açabileceği belirtilmiştir [29,30]. Ayrıca, zeminin plastisitesinin azalması, sülfat kabarmasının zararlı etkisini ve şişme potansiyelini azaltmaktadır. Öte yandan, diğer bazı çalışmaların sonuçları, sadece uçucu kül uygulamasının, büyük ölçüde plastik olan zeminlerin özelliklerini geliştirmek için yetersiz olabileceğini ortaya koymuştur [30-32].

Zeminlerin sıkıştırılma özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, zeminlere uçucu kül eklenmesinin zeminlerin porozitesini ve boşluk oranını değiştirdiğini ortaya koymuştur [29,31,33,34]. Zemin stabilizasyonu sayesinde, zemin parçacıkları daha fazla miktarda su çekebilir. Bu etkileşim doğrudan optimum su muhtevasında bir artışa ve maksimum kuru yoğunlukta bir azalmaya yol açmaktadır.

Uçucu külün zeminlerin dayanımındaki etkinliği üzerine birçok araştırma bulunmaktadır [12,30,35-37]. Elde edilen sonuçlar, uçucu külün zemin taneleri ile birleşmesinin, zeminin dayanım özelliğinde önemli bir artış ile sonuçlandığını göstermiştir. Deneysel sonuçları, aynı zamanda uçucu kül ile muamele edilmiş örneklerde ikincil sıkışma katsayısının küçük olduğundan, yapıların ikincil konsolidasyona uğraması nedeniyle oturması olasılığının azalabileceği belirlenmiştir [38].

Zayıf veya yumuşak bir zemin üzerinde herhangi bir altyapının inşa edilmesi, zemin farklı oturmalarına, zayıf kayma mukavemetine ve yüksek sıkıştırılabilirliğe maruz kaldığı için geoteknik uygulamalar açısından

oldukça tipik bir durumdur. Normalde, temellerin tipi zemin tabakalarının mevcudiyetine ve maliyete bağlı olarak değişir. Bazen, zayıf bir zemin üzerinde yüksek bir binanın inşa edilmesi gerekli olabilir. Bu gibi durumlarda, zeminin yük taşıma kapasitesinin zemin stabilizasyonu veya takviyesi gibi çeşitli teknikler kullanılarak arttırılması çok önemlidir. Genel olarak, zemine bir katkının ilave edilmesi tekniği, kolay uyarlanabilirliği nedeniyle etkili bir zemin iyileştirmesi sağlar. Prabakar ve diğerleri 2004, zeminin yük taşıma kapasitesini arttırmak, uçucu kül ile karıştırılan zeminlerin davranışını açıklamak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada ağırlıkça %9 ila %46 arasında değişen farklı uçucu kül yüzdeleri kullanılarak üç farklı zemin türü ele alınmıştır. Araştırma, uçucu külün zemin katkısı olarak kullanılabilirliğini değerlendirmeye ve temel yapılarından daha fazla yük alabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu şekilde uçucu külün etkin kullanımına ve dolayısıyla zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde uygun maliyetli bir yöntem geliştirilmesine fayda sağlamaktadır. Bu çalışma, zeminin karakterizasyonunu, uçucu külü, sıkışma davranışını, oturmayı, Kaliforniya taşıma oranını, kayma mukavemeti parametrelerini ve şişme özelliklerini kapsamaktadır. Uçucu külün düşük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle zeminin kuru yoğunluğunu %15-20 mertebesinde azalttığı, uçucu kül katkılı zeminin kayma mukavemetinin, zemindeki uçucu kül içeriğinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Uçucu külün genleşmeyi önleyen özellikleri, parçacık boyutu ve şekilden dolayı zemindeki şişmeyi azaltması, zeminin şişme davranışının uçucu kül ilavesiyle etkili bir şekilde kontrol edilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca uçucu külün kesme mukavemeti, kohezyon ve dolayısıyla taşıma kapasitesinde iyileşme elde etmek için zeminde etkili bir şekilde kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Parsons ve Kneebone (2005) [30], taban zeminlerinin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan C sınıfı uçucu külün sağladığı iyileştirme seviyesini ve bu iyileştirmenin etkili bir şekilde kalıcı olma derecesini ölçmek üzere bir çalışma gerçekleştirmiştir. Uçucu külle işlem görmüş taban zeminlerinin yer aldığı 12 cadde ve işlem görmemiş taban zeminlerine bulunduğu beş cadde için bir dizi dinamik koni penetrometre değeri elde edilmiştir. Caddelerin yaşları sıfır ile dokuz yıl arasında değişmiştir. Uçucu kül içeren taban zeminleri için penetrasyon direnci, uçucu külle muamele edilmiş katman ve altındaki işlem görmemiş zemin için kaydedilmiştir. Uçucu külle muamele edilmiş tüm taban zemini katmanları için alttaki işlem görmemiş zemine göre daha yüksek mukavemetler kaydedilmiştir. Değerlendirilen taban zeminlerinde yaşla birlikte herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. Uçucu kül ile işlem görmüş zeminlerin laboratuvar ve saha testleri de uçucu külün

zeminin mukavemetine ve rijitliğine katkıda bulunduğunu, plastisite ve şişme potansiyelini azalttığını, ancak şişmenin tamamen ortadan kaldırılmadığını göstermiştir.

Uçucu kül kullanımı son birkaç on yılda artmış olsa da, Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl üretilen uçucu külün yüzde 60'ından fazlası kül havuzlarında ve düzenli depolama sahalarında toplanmaktadır. Birçok depolama tesisinin şu anda ya da yakın gelecekte tasarım kapasitelerine kadar dolacağı beklenmektedir. Bu nedenle uçucu küllerin geri kazanılmasına yönelik ilgi giderek artmaktadır. Killi taban zeminlerinin dayanım ve dayanıklılığının uçucu kül ile karıştırılarak artırılmasının yararları uzun yıllardır bilinmektedir. Literatürde, yol yapımındaki zemin stabilizasyonu çalışmalarında C ve F sınıfı uçucu küllerin etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır [37,39-41]. Uçucu kül, daha uzun ömürlü ve sürdürülebilir altyapılar oluşturmak için dolgular ile temel ve alt temel tabakaları, banketler, asfalt betonu kaplamalar ve Portland çimentolu beton plaklar gibi üstyapı katmanları dâhil olmak üzere karayolu inşaatlarında faydalı bir şekilde kullanılabilir.

White, ve diğerleri (2005) [26], tarafından yürütülen çalışmada, ince taneli üstyapı alt katmanları kuru zemin ağırlığının %20'sine kadar kendiliğinden çimentolaşan uçucu külle stabilize edilmiştir. Düşük plastisiteli silt'den (ML) yüksek plastisiteli kil'e (CH) kadar değişen beş farklı zemin türü ve hidratlı ve şartlandırılmış uçucu küller de dâhil olmak üzere birkaç farklı uçucu kül kaynağının karışımları kullanılmış, standart Proctor ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) test yöntemleri ile hazırlanan numunelerin mukavemet ve dayanıklılık testleri yapılmıştır. Ayrıca donma/çözülme ve ıslak/kuru kürlenme etkisi bazı numunelerde 2.5 yıla kadar gözlemlenmiştir. Zemin-uçucu kül karışımlarının morfolojisi ve zemin kil mineralojisi de X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, zeminin sıkıştırma özelliklerinin, basınç dayanımının, ıslak/kuru durumdaki dayanıklılığının, donma/çözülme dayanıklılığının, hidratasyon özelliklerinin, dayanım kazanma oranının ve plastiklik özelliklerinin uçucu kül ilavesinden etkilendiğini göstermiştir. Uçucu kül ilavesi ile uçucu kül-zemin karışımının kesme mukavemetinin arttığı belirlenmiş, yüksek basınç ve kesme dayanımı elde etmek için optimum karışım oranı olarak %60 uçucu kül ve %40 zemin oranı önerilmiştir.

Senol ve diğerleri (2006) [40], başka herhangi bir aktivatör olmaksızın sadece farklı tipte kendiliğinden çimentolaşan uçucu küller ile çeşitli yol sahalarından dört farklı yumuşak taban zemininin stabilizasyonu üzerine yürüttükleri araştırmada, optimum karışım oranını ve stabilize edilmiş

tabakanın kalınlığını dayanım testleri ile belirlemiştir. Uçucu kül ve zeminin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşiminin incelenmesinden ziyade uçucu külün performans analizinin, indeks özellikleri, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı ve belirli bir sahanın CBR testleri gibi laboratuvar testlerine dayandırılması önerilmektedir. Stabilizasyondan kaynaklanan mukavemet artışının kül içeriği, su muhtevası ve kompaksiyon gecikmesi olmak üzere üç temel faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir. Numuneler, 7 günlük kür süresinden sonra serbest basınç mukavemeti ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testlerine tabi tutulmuş, inşaat sırasında sahada yaygın olarak meydana gelen kompaksiyon gecikmesinin etkisini değerlendirmek için, numune setleri su ile karıştırıldıktan 2 saat sonra sıkıştırılmıştır. Serbest basınç dayanımı ve CBR testleri sonuçları üstyapı tasarımında stabilize edilmiş tabakanın kalınlığını belirlemek için kullanılmıştır.

Edil ve diğerleri (2006) [42], yumuşak ince taneli zeminlerin stabilizasyonu için elektrik santrallerinde bitüm altı kömürün yakılmasından elde edilen kendiliğinden çimentolaşan uçucu küllerin etkinliğini değerlendirmiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve esneklik modülü (M_r) testleri, altı inorganik zemin ve bir organik zemin olmak üzere yedi yumuşak ince taneli zemin ile dört uçucu külden hazırlanan karışımlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zeminler 15 ile 38 arasında değişen plastisite indeksleri ile nispeten geniş bir plastisite aralığını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Uçucu küllerden ikisi yüksek kaliteli C Sınıfı uçucu kül iken diğerleri, ASTM C 618'deki [43] C veya F sınıfı kriterlerini karşılamayan spesifikasyon dışı küllerdir. Uçucu kül ilavesi, inorganik zeminlerin CBR ve M_r değerlerinde kayda değer artışlara neden olmuştur. Optimumun %7 su içeriği için, zeminlerin CBR değerleri 1-5 arasında değişirken, %10 uçucu kül ilavesi CBR değerlerinin 8-17 arasında, %18 uçucu kül ilavesi ise CBR değerlerinin 15-31 arasında değişmesine neden olmuştur. Benzer şekilde, zeminlerin M_r değeri 3-15 MPa arasında değişirken, %10 uçucu kül ilavesi 12-60 MPa arasında, %18 uçucu kül ilavesi ise 51-106 MPa arasında M_r değerine yol açmıştır. Buna karşılık, bir uçucu kül dışında, uçucu kül ilavesinin organik zeminin CBR veya M_r değeri üzerinde genel olarak çok az etkisi olmuştur.

Li ve diğerleri (2012) [44], karayolu dolgu inşaatı için uçucu kül-zemin karışımının optimizasyonuna yönelik yürüttükleri çalışmalarında, optimum su içeriğinde hazırlanan zeminler ve uçucu kül-zemin karışımları üzerinde sıkıştırma, serbest basınç dayanımı (q_u) ve kesme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Uçucu külün zemine eklenmesinin, killi zeminin serbest basınç dayanımında kayda değer artışlara neden olduğu, ham zeminin q_u değeri 317 kPa iken, 14 günlük kürlemeden sonra bu değer 940 kPa ile 4300 kPa arasında değişen değerlere yükselebileceği belirlenmiştir.

Hakari ve Puranik (2012) [45], killerin geoteknik karakteristiklerini iyileştirmek için gerçekleştirdikleri bir çalışmada, uçucu kül ilave edilmesinin indeks, sıkıştırma ve mukavemet özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Uçucu külün stabilizatör olarak kullanılmasıyla killerin mühendislik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Likit limit, plastik limit ve büzülme limiti gibi plastisite parametrelerinin değerlerinde olumlu değişiklikler meydana gelmiştir. Likit ve plastik limit değeri azalırken büzülme limiti uçucu kül ilavesiyle artmıştır. Sıkıştırma özellikleri, yani maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevasında meydana gelen azalmayla birlikte artmıştır. Bu zeminlerin serbest basınç dayanımının yanı sıra CBR değerleri, uçucu külün eklenmesi sonucu artış göstermiştir. Çalışma, en uygun sonuçların, optimum uçucu kül yüzdesi olarak adlandırılacak %20 - %40 oranında uçucu kül ilavesiyle elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Mir ve Sridharan (2013) [46], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yüksek kalsiyumlu C sınıfı ve düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu küller şişme potansiyeli yüksek yerel bir zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, 20, 40, 60 ve 80) karıştırılmış ve laboratuvar testleri ile fiziksel özellikler, sıkıştırma karakteristiği ve şişme potansiyeli belirlenmiştir. Test sonuçları, şişebilen zemin-uçucu kül karışımlarının kıvam limitlerinin, sıkıştırma özelliklerinin ve şişme potansiyelinin önemli ölçüde değiştirildiğini ve iyileştirildiğini göstermektedir. Plastisite özelliklerini iyileştirmek için %40 uçucu kül içeriğinin optimum oran olduğu görülmüştür. Zemin-uçucu kül karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasının karışımındaki uçucu kül oranının artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca C sınıfı uçucu külden %10, F sınıfı uçucu kül de ise %40 karışım oranının şişme potansiyelini en aza indirmek için gereken optimum oran olduğu gözlemlenmiştir.

Camargo ve diğerleri (2013) [41], C sınıfı bir uçucu kül ile stabilize edilen geri kazanılmış bir yol üst yapısı malzemesinin ve bir yol yüzeyi çakılının özelliklerini, geleneksel bir temel malzemesi ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, mekanik özelliklerini iyileştirmek üzere geri kazanılmış yol üst yapısı malzemesine ve yol yüzeyi çakılına uçucu kül eklenmesinin Kaliforniya taşıma oranı (CBR), esneklik modülü (M_r) ve serbest basınç dayanımı değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca bu değerlerin kür süresi ile de değiştiği, 7 ve 28 günlük kür sonrası belirgin kazanımlar elde edildiği görülmüştür. Uçucu külün ilave edilmesi ile geri kazanılmış malzemelerin esneklik modülü deneyinde plastik şekil değiştirmelerinin ve donma-çözülme çevrimlerinin esneklik modülü ve serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisinin azaldığı belirlenmiştir.

Sengul v.d'nin (2023) [37], yol taban zeminlerinin iyileştirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmada, seçilen bölgesel yüksek plastisiteli bir zemin farklı yüzdelerde (%10, %20, %30 ve %40) uçucu kül ile takviye edilmiş ve bu zemin karışımlarının plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca donma-çözülme çevrimlerinin taban zeminlerinin dayanımına etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, uçucu kül ile stabilizasyonda etkili uçucu kül karışım oranının %10 olduğu, uçucu kül katkılı karışımın ve doğal zeminin 28 günlük serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında uçucu kül katkısının dayanımı %85.8 oranında arttırdığı, doğal zeminde donma-çözünme çevrimleri nedeniyle yaklaşık %80 oranında dayanım kaybının meydana geldiği, fakat uçucu kül katkısının donma çözülme çevrimlerinin meydana getireceği dayanım kaybını telafi ederek dayanımı arttırabileceği belirlenmiştir.

2.2.5. Uçucu Kül-Kireç ve Uçucu Kül-Kireç-Çimento

Zeminlerin stabilizasyonu uçucu kül-kireç veya uçucu kül-kireç-çimento kombinasyonlarının birlikte kullanılmasıyla da gerçekleştirilebilir. Uçucu kül, kireç ve su ile karıştırıldığında yüksek basınç dayanımları elde edilen sertleşmiş çimentolu kütle oluşturan silikon ve alüminyum bileşikleri içerir. Uçucu kül kirecin reaksiyona girebileceği bir madde sağladığından kireç ve uçucu kül karışımları granül malzemelerin stabilizasyonunda sıklıkla başarılı bir şekilde kullanılabilir. Bu nedenle uçucu kül-kireç veya uçucu kül-kireç-çimento stabilizasyonu genellikle temel ve alt temel malzemeleri için uygundur.

Birçok araştırma, uçucu kül ve kireç karışımının kullanılmasıyla gerçekleştirilen stabilizasyonun etkinliğinin arttırılabileceğini ve bu şekilde yumuşak zeminlerin işlenebilirliği ile dayanım karakteristiği ve donma-çözülme dayanıklılığının, sadece uçucu kül stabilizasyonu veya kireç muamelesi ile karşılaştırıldığında belirgin şekilde iyileştiği sonucunu ortaya koymuştur [12,28,31].

F sınıfı uçucu küllerin kendiliğinden çimentolaşma özellikleri düşük olduğundan, bir aktive edici ile birlikte kullanılması gerektiği bu nedenle bu küllerin halen yalnızca %32'si faydalı bir şekilde yeniden kullanılabilirdiği belirtilmektedir. Karayolları, uçucu küllerin kullanımı ve bertarafı için en büyük uygulama sahası olup her yıl milyarlarca lira tasarruf sağlanabilir. F sınıfı uçucu kül katkılı zemin-çimento veya zemin-kirecin karayollarında temel tabakası olarak kullanımının araştırıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak çimento ve kireç ile hazırlanan zemin-uçucu kül karışımları üzerinde serbest basınç, Kaliforniya taşıma oranı ve esneklik modülü deneyleri yürütülmüştür

[39]. Zemin stabilizasyonu için ağırlıkça %40 oranında F sınıfı uçucu kül ile değişik oranlarda kireç (%4, 7, 10) ve çimento (%1, 2, 4, 5, 7) kullanılmış laboratuvar bazlı mukavemet parametreleri kullanılarak gerekli taban kalınlıkları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçları, karışımın mukavemetinin büyük ölçüde kür süresine, sıkışma enerjisine, çimento içeriğine ve kompaksiyon sırasındaki su muhtevasına bağlı olduğu, kireç katkısının karışımların karayolu üst yapılarında temel tabakası olarak tasarlanması için yeterli mukavemeti sağlamadığı, donma-çözülme döngülerinin çimentoyla işlem görmüş karışımlar üzerinde zararlı bir etki oluşturmadığı belirlenmiştir.

Kireç stabilizasyonu, yüksek kil içeriğine sahip kohezyonlu zeminlerin hem plastik özelliklerini hem de mukavemetini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kireç kilin alümino-silikat fazlarıyla reaksiyona girerek çimento benzeri ürünler üretmektedir. Hızlı bir reaksiyon olup birkaç gün içinde iyileşmelerin meydana geldiği bu yöntemle çok geniş alanlar hızlı, düşük maliyetle ve çevreci bir yaklaşımla stabilize edilebilmektedir. Buna karşın, bazı killerde karşılaşılan sülfat fazları da kireçle reaksiyona girerek etrenjit oluşumuna neden olabilir. Bu genişleyici bir reaksiyon olup stabilize edilmiş zeminin şişmesi nedeniyle hacim stabilitesi sorunları ortaya çıkabilir. Bu zararlı etkiler genellikle üst yapı tamamlandıktan sonra görünür hale gelir ve sorunu gidermek için önemli maliyetler ortaya çıkabilir.

Uçucu küller beton ve harçtaki sülfat ataklarını bastırmak içinde kullanılmaktadır. Farklı bir malzeme olmasına rağmen kilde kirecin neden olduğu etrenjit oluşumunda yer alan kimya genel olarak benzerdir ve uçucu külün bu uygulamada etrenjit kaynaklı şişme üzerindeki etkilerini incelemeye yönelik çalışmalara ilgi artmaktadır [31].

Yarbaşı ve diğerleri (2007) [28], donma-çözülme döngülerinin zararlı etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla granüler zeminlerin modifikasyonunda silis dumanı, uçucu kül ve kırmızı çamur gibi atık malzemelerin kullanımını araştırmışlardır. Bunun için, ana kayadan elde edilen iki granüler zemin, silis dumanı-kireç, uçucu kül-kireç ve kırmızı çamur-çimento karışımları ile stabilize edilmiştir. Doğal ve stabilize edilmiş zemin numuneleri 28 gün boyunca kürlendikten sonra donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı, ultrasonik dalga ve rezonans frekansı deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, stabilize edilmiş numunelerin, yüksek donma-çözülme dayanıklılığına sahip olduğunu ve aynı zamanda dinamik davranışlarının da iyileştiğini göstermiştir.

Dayıoğlu ve diğerleri (2017) [47], şişme potansiyeli yüksek olan bir kilin C ve F sınıfı uçucu kül ve kireç ile stabilize edilmesi üzerine yürüttükleri bir araştırmada, farklı sürelerde (0, 7 ve 28 gün) kürlenmiş ve donma ve

çözülme etkilerine maruz bırakılmış örneklerin şişme basıncı ve serbest basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Sonuçlar, kilinin şişme basıncının, kuru zemin ağırlığının %4 oranında kireç ilavesiyle 235 kPa'dan neredeyse 0 kPa'ya, C ve F sınıfı uçucu küllerin ilavesiyle sırasıyla 47 ve 100 kPa'ya kadar önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Kil-uçucu kül karışımlarının aksine, donma ve çözülme döngüsü, kil-kireç karışımlarının şişme basıncını etkilememiştir. Katkı malzemelerinin kullanımının serbest basınç dayanımını arttırdığı, donma çözülme döngüsünün dayanım parametreleri üzerindeki düşürücü etkisini azalttığı belirlenmiştir.

Degirmenci ve diğerleri (2007) [29], çimento, uçucu kül ve fosfojips ile stabilize edilmiş zemin numuneleri üzerinde, Atterberg limitleri, standart Proktor kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Çimento, uçucu kül ve fosfojips ile iyileştirilmiş zeminlerin genellikle plastisite indisi ve optimum su muhtevası azalmış, maksimum kuru birim hacim ağırlığı çimento ve fosfojips içeriği arttıkça artmasına rağmen uçucu kül içeriği arttıkça azalmıştır. İşlem görmüş zeminlerin serbest basınç dayanımları, işlem görmemiş zeminlerinkinden daha yüksek bulunmuştur. Çimento katkısının uçucu küle göre dayanım üzerinde önemli ölçüde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

2.2.6. Yüksek Fırın Cürufları

Yüksek fırın cürufları, pik demir üretimi sırasında elde edilen yan ürünlerdir. Granül cürufun fiziksel yapısı ve derecelenmesi, cürufun kimyasal bileşimine, suyla söndürme sırasındaki sıcaklığına ve üretim yöntemine bağlıdır. Kireçtaşı akışının kok külüyle füzyonu ile demirin cevherden indirgenmesi ve ayrılmasından sonra kalan silisli ve alüminli kalıntıdan elde edilir. Yüksek fırın cürufları, esas olarak kireç ve diğer bazların silikatları ve alümino-silikatlarından oluşur [48]. Kimyasal bileşimleri çimentoya benzemesine rağmen kendi başına çimentolu bileşikler değildir. Ancak, kireç veya alkali malzeme ilavesiyle hidrolik özelliklerin gelişebileceği özelliklere sahiptir [1]. Yüksek fırın cürufları, beton karışımlarında çimento yerine ve zeminlerin stabilizasyonunda stabilizatör olarak kullanılabilir ve zeminlerin basınç dayanımını, geçirgenliği ve dayanıklılığı artırır.

Yadu ve Tripathi (2013) [49], granüle yüksek fırın cürufu kullanarak yumuşak bir zeminin stabilize edilme potansiyelini değerlendirmiştir. Yumuşak zemini stabilize etmek için %3, 6, 9 ve 12 oranlarında olmak üzere farklı miktarlarda granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş zeminlerin performansı, plastisite indeksi, özgül ağırlık, serbest şişme indeksi, sıkıştırma, şişme basıncı, Kaliforniya

taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı gibi fiziksel ve mukavemet performans deneyleri ile değerlendirilmiştir. Mukavemet performans deneylerine dayanarak, optimum granüle yüksek fırın cürufu miktarı %9 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar granüle yüksek fırın cürufunun kullanılmasının yumuşak zeminlerin mukavemetini artırdığını göstermiş, %9 granüle yüksek fırın cürufu ile modifiye edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı ham zemine kıyasla yaklaşık %28 daha yüksek bulunmuştur. Benzer şekilde, zeminlerin CBR değerlerinde önemli iyileşmeler gözlenmiştir.

Pathak ve diğerleri (2014) [50], öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun zeminin optimum su muhtevası, maksimum kuru yoğunluk, plastik limit, likit limit, sıkıştırma, serbest basınç dayanımı, üç eksenli basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı gibi mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak ve stabilize edilmiş zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla, zemine kuru ağırlıkça %0'dan %25'e kadar öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu eklemiştir. Genel olarak granüle yüksek fırın cürufu ilavesi ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştiği görülmüş, maksimum kuru yoğunluk değeri artarken, optimum nem içeriği artan granüle yüksek fırın cürufu ile azalmış ve %25 karışım oranında maksimum kuru yoğunluk değeri elde edilmiştir.

Fasihnikoutalab ve diğerleri (2020) [51], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, killi bir zemini stabilize etmek için olivin (Mg_2SiO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Stabilize edilmiş zeminin mekanik ve mikroyapısal özellikleri, 7, 18 ve 90 günlük kürlenme sürelerinin ardından serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile değerlendirilmiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile işlem görmüş zeminin serbest basınç dayanımı (NaOH ile aktivasyon olmadan), 90 gün sonra en yüksek cüruf dozajında bile, orijinal zemine kıyasla sadece hafif bir artış (142 kPa) göstermiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş zemin karışımına olivin eklendiğinde, serbest basınç dayanımı 90 gün sonunda 444 kPa'ya yükselmiş, bu karışıma olivin ve aktivatör olarak NaOH eklendiğinde ise, serbest basınç dayanımı aynı süre sonunda 6000 kPa'nın üzerine çıkmıştır. Bu önemli mukavemet artışı, sırasıyla cüruf ve olivinde bulunan Ca ve Mg'un çözünmesini ve daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayan ve C-S-H ve M-S-H jellerinin bir karışımını oluşturan NaOH tarafından sağlanan daha yüksek reaksiyon derecesine bağlanmıştır.

Maneli ve diğerleri (2016) [52], zemin iyileştirme uygulamasında %12 uçucu kül, %8 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %1-9 oranlarında kireç

kullanılmasının etkisini değerlendirmiştir. 7, 28, 60 ve 90 gün süreyle kürlenmiş modifiye zeminin performansı, standart spesifikasyonlara göre gerçekleştirilmiş sıkıştırma, Kaliforniya taşıma oranı ve serbest basınç dayanımı deneyleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı sıkıştırma seviyeleri ve kürlenme periyotları için ilave edilmiş atık malzemelerin etkisi, Kaliforniya taşıma oranı ve serbest basınç dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Stabilize edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, tüm kürlenme periyotları için %97 ve %100 sıkıştırma düzeyinde, alt temel malzemesi için şartname değerlerini karşılamıştır.

2.2.7. Puzolanlar

Puzolanın genel tanımı, köken, bileşim ve özellikler açısından büyük farklılıklar gösteren çok sayıda malzemeyi kapsar. Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri hiç olmayan veya çok az olan silisli ve alüminli malzemelerdir; ancak ince öğütülmüş formda ve nem varlığında, bağlayıcı özelliklere sahip bileşikler oluşturmak üzere normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerler. Dolayısıyla, hem doğal hem de yapay puzolanlar tamamlayıcı çimentolu malzemeler olarak kullanılabilir. Yapay puzolanlar, örneğin metakaolin elde etmek için kaolin killerin termal aktivasyonu ile üretilebildiği gibi kömürle çalışan elektrik santrallerinden kaynaklanan uçucu küller gibi yüksek sıcaklık süreçlerinden atık veya yan ürün olarak elde edilebilir. 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.

Bir puzolanın kalsiyum hidroksit ve su ile reaksiyona girme kapasitesinin ölçümü, puzolanik aktivitesinin ölçülmesiyle belirlenir. Kaolinit, montmorillonit, mika ve illit gibi kil mineralleri puzolanik yapıdadır. Kül gibi yapay puzolanlar, kil, şist ve bazı silisli kayalar gibi puzolan içeren doğal malzemelerin ısı işlemiyle elde edilen ürünlerdir. Bitkiler yakıldığında, besin olarak topraktan alınan silika geride küllerin içinde kalarak puzolanik elemente katkıda bulunur. Pirinç kabuğu külü, pirinç samanı ve küspe silika açısından zengin olup mükemmel bir puzolan oluşturur [1].

Doğal puzolanlar belirli yerlerde bol miktarda bulunur ve İtalya, Almanya, Yunanistan ve Çin gibi ülkelerde Portland çimentosuna katkı olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Büyük ölçüde volkanik camdan oluşan volkanik küller ve pomzalar, volkanik camın alkali sularla etkileşime girerek zeolitlere dönüştüğü çökelti gibi yaygın olarak kullanılmaktadır. Tortul kökenli yataklar daha az yaygındır. Silisli diatom mikro iskeletlerinin birikmesiyle

oluşan diyatumlu topraklar öne çıkan bir kaynak malzemedir. Doğal puzolanlar volkanik kökenli malzemeler ve tortul kökenli malzemeler olarak iki kategoriye ayrılabilir. Birinci kategori, patlayıcı volkanik püskürmeler sonucu atmosfere atılan erimiş magmanın sönmesiyle oluşan malzemeleri içerir. Patlayıcı püskürmenin iki sonucu vardır. İlk olarak, başlangıçta magma içinde çözülmüş olan gazlar, basıncın aniden düşmesiyle serbest kalır. Bu da ortaya çıkan malzemede mikro gözenekli bir yapıya neden olur. İkinci olarak, erimiş magma parçacıklarının atmosferle temas ettiğinde hızla soğuması, katılaştırmış malzemenin camsı yapıya sahip olmasıyla sonuçlanır. Doğal puzolanların ikinci kategorisi killeri ve diyatumlu toprağı içerir. Killeri, termal olarak işlenmedikleri sürece çok sınırlı puzolanik reaktiviteye sahiptir. Tortul bir kayaç olan diyatumlu toprak, esas olarak bir tür alg diyatomların fosilleştirmiş kalıntılarından oluşur. Amorf silisli bir yapıya sahiptir ancak kütlece %30'a kadar kristalin fazlar içerebilir.

Bahadori ve diğerleri (2019) [53], problemleri zeminlerden biri olan marn zeminin stabilizasyonu için üç tür doğal puzolanın (volkanik kül) kullanımına ilişkin deneysel bir çalışma yürütmüştür. X-ışını floresan (XRF) analizi kullanılarak marn zeminin tanımlanması ve sınıflandırılması yapılarak, %5, 10 ve 15'lik üç tip volkanik kül stabilizatör içeriğinin etkisi, maksimum kuru yoğunluk (Standart Proctor Deneyi) ve optimum su muhtevası, Atterberg limitleri, serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü belirlenerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, stabilizatör olarak volkanik kül ile stabilize edilen marn zemin karışımlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Volkanik kül içeriğindeki ve kür süresindeki artışın stabilize marn zeminin verimliliğini artırırken genişlemesini ve sünekliğini azaltmaktadır.

Al-Swaidani ve diğerleri (2016) [54], doğal puzolan ilavesinin kireçle stabilize edilmiş killi zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla zemine %0-20 arasında değişen oranlarda doğal puzolan %0-8 arasında değişen oranlarda kireç ekleyerek, kıvam, kompaksiyon, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve büzülme özelliklerini araştırmıştır. Doğal puzolanın stabilize edici bir madde olarak ilave edildiğinde kireçle işlem görmüş killi zeminlerin incelenen özelliklerinin önemli ölçüde geliştirilebileceğı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) analiz sonuçları ile işlem görmüş killi zeminin mikro yapısında önemli değişiklikler oluştuğı, killi partiküllerin daha iyi floküle olduğu ve çimentolaştırıcı malzemelerin daha fazla oluştuğı belirlenmiştir.

Harichane ve diğerleri (2011) [12], doğal puzolanın, kirecin veya her ikisinin kombinasyonunun kohezyonlu zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Doğal puzolan, kireç ve doğal puzolan-kireç iki kohezyonlu zemine sırasıyla %0-20 ve %0-8 oranlarında eklenmiştir. Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için işlem görmüş 1, 7, 28 ve 90 gün boyunca kür edilmiş ve işlem görmemiş zemin numuneleri üzerinde kıvam, sıkıştırma, drenajsız üç eksenli basınç ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kohezyonlu zeminlerin doğal puzolan ve kireç kombinasyonu ile başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği belirtilmiştir.

Yin ve diğerleri (2022) [55], doğal kireç, volkanik kül ve bunların karışımları ile stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerini Atterbeg limitleri, proctor, şişme yüzdesi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri ile araştırmıştır. Volkanik külün %20 ve kirecin %3 oranında ilave edilmesi doğal CBR değerlerini 10.76 kat artırırken, plastisiteyi %29 ve kabarma yüzdesini %88 azaltmıştır. Stabilize edilmiş zemin minimum şişme, plastisite ve mukavemet gereksinimlerini karşıladığından yarma ve dolguya alternatif olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

2.2.8. Bitümlü Malzemeler

Bitümler, karbon disülfürde çözünebilen 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 işlemi ifade eder. Bitüm stabilizasyonu katran, asfalt çimentosu, katbek asfaltı veya asfalt emülsiyonları kullanılarak gerçekleştirilir. Katranlar, kömür gibi organik maddelerin destrüktif damıtılmasıyla üretilir. Asfalt çimentosu ise, rafine edilmiş petrol bitümlerinden elde edilir. Asfalt çimentosu genellikle doğrudan kullanılmayacak kadar viskoz olduğundan, katbek asfaltları ile asfalt emülsiyonlarının kullanımı daha yaygındır. Ancak bunlar daha uzun bir kuruma süresi gerektirirler. Ayrıca enerji kısıtlamaları ve kirlilik kontrolü çabaları nedeniyle katbek asfaltları yerine emülsiyonlar tercih edilmektedir [56]. Bitümlü malzemeler bir zemine eklendiğinde, hem kohezyonu 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 artırır. 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 özelliklerine etkileyen dört ana etken mevcuttur. Bunlar, zemin cinsi, bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı, karıştırma ve sıkıştırmadır. Zeminin gradasyonu, plastisitesi ve pülverize edilebilme durumu stabilize edilmiş zeminin direnci üzerinde rol oynar. 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. Zeminin pülverize edilmesinde zeminin plastisitesi ve tane boyutunun yanında zeminin su içeriği de rol oynar. 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 [57].

Bitümlü malzemenin cinsi ve miktarı, stabilize edilmiş zeminin stabilitesi üzerinde etkilidir. Bitümlü malzeme püskürtme yoluyla 2-3 defada uygulanırsa toplam miktarı 3-4 lt/m² olur. Sabit tesislerde zeminle karıştırılırsa, bitümlü malzeme oranı karışım ağırlığının %4-6'sı kadardır. Kullanılacak bitümün türü, stabilize edilecek zeminin türüne, yapım yöntemine ve hava koşullarına bağlıdır. Don bölgelerinde, yüksek sıcaklıklardaki hassasiyeti nedeniyle bağlayıcı olarak katran kullanımından kaçınılmalıdır. Sıcak iklimlerde, yavaş sertleşen katbek asfaltlarının kullanılması durumunda, likit haldeki asfaltın sertleşmeden önce zemin taneleri arasına iyice girmesi sağlanmış olur. Soğuk iklimlerde ve fazla miktarda taneli malzeme içeren zeminler için hızlı kuruyan katbek asfaltların kullanılması daha uygundur. Yol katranları nemli iklimlerde diğer bitümlü malzemelere göre daha iyi sonuç verirken asfalt emülsiyonları genellikle sıcak iklimlerde kullanılır.

Karışımında kullanılan makinenin tipi, karıştırma enerjisi, bitümlü malzemenin ilave edilme şekli ve karıştırma sırasındaki sıcaklık derecesi iyi bir karışımın elde edilmesi ve karışımın üniform olması açısından önemlidir. Uygulama sıcaklıkları kullanılacak bitümlü malzemenin cinsine bağlı olarak değişir. Soğuk ve nemli havalarda özel önlemler alınmadıkça bitümlü malzeme ile stabilizasyon yapılması sakıncalı olduğundan stabilizasyonun sıcak mevsimde yapılması gerekir.

Sıkıştırma miktarı ve sıkıştırma sırasında karışımın içerdiği likit oranı stabilizasyonun kalitesi ve direnci üzerinde etkilidir. Sabit plantlerde asfalt

çimentosu kullanılarak gerçekleştirilen stabilizasyonlarda, agrega ısıtılarak bitümlü malzeme ile iyice sarılması sağlanmaktadır. Agreganın ısıtılmadan kullanılması halinde, karışımın yüksek sıcaklık derecelerinde 200-300 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılarak yapılması zorunludur. Bu tip stabilizasyonlar karıştırmadan hemen sonra serilip sıkıştırılmalıdır [3].

Çimento ve bitüm emülsiyonunun zeminle karıştırılarak zeminin mukavemetinin, dayanıklılığının ve ilgili diğer özelliklerinin iyileştirilebileceğini rapor eden birçok çalışma bulunmaktadır [58,59]. Bu şekilde çimento etkisi ile rijitliği artırılan stabilize edilmiş tabakanın bitüm emülsiyonu ile esnekliği ve zemin geçirgenliği iyileştirilerek daha iyi yük aktarımı sağlanmakta ve üst yapıların taşıma kapasitesi artırılmaktadır.

2.2.9. Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç kabuğu, pirinç öğütme işleminden geriye kalan bir yan ürün olup dünya çapında yılda yaklaşık 100 milyon ton kabuk üretilmektedir [60]. Pirinç kabuğu, aşındırıcı karakteri ve neredeyse ihmal edilebilir düzeyde sindirilebilir protein içeriği nedeniyle hayvan yemi olarak kullanılmaya uygun olmadığı gibi, yüksek kül ve lignin içeriği yüzünden kâğıt üretimi için de bir hammadde olarak kullanılamamaktadır [61]. Bu nedenle atık hacmini azaltmak için pirinç kabuğu ya açık yığınlar halinde yakılmakta ya da pirinç kurutmak ve enerji üretmek için fırınlarda yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakma işlemi, pirinç kabuğundaki organik bileşikler ve suyu uçurduğundan kütlede yaklaşık %17-25'i pirinç kabuğu külü olarak kalmaktadır [61]. Çok büyük miktarlarda üretilen bu atık külün değerlendirilmesi ile, bertaraf maliyeti ve çevresel zararının azaltılması, inşaat maliyetinin düşürülmesi ve öncelikli kullanımlar için yüksek nitelikli malzemelerin korunması sağlanabilir.

Pirinç kabuğu külü, kolaylıkla temin edilebildiğinden potansiyel olarak zemin stabilizasyonunda kullanılabilecek puzolanik bir malzemedir. Puzolanlar silisli ve alüminli malzemeler olup kendi başlarına çimentolaşma değerleri çok azdır veya hiç yoktur. Ancak, ince bölünmüş formda ve nem varlığında, çimentolaşma özelliklerine sahip bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerler. Pirinç kabuğu külü, silika bakımından zengin olup yaklaşık %90 oranında silika içerir, bu da tüm bitki kalıntıları arasında en yüksek konsantrasyondur [61]. Pirinç kabuğu külü, zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için tek başına ilave edilerek ya da çimento ve kireç gibi bir hidrolik aktivatör ile karıştırılarak kullanılabilir [60,62]. Buna rağmen, çoğu zaman çimentolaşma özelliğinin olmaması nedeniyle zemin stabilizasyonunda tek başına kullanılamaz [63].

Killi, killi kum, siltli kil ve siltli kum zeminler pirinç kabuğu külü ve kireç veya çimento ile muamele edildiğinde serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [60,63]. Pirinç kabuğu külü ve çimento ile stabilize edilen lateritik ve killi zeminlerin serbest basınç dayanımlarının sadece çimento ile muamele edilmeleri durumundaki artışına kıyasla çok az veya önemsiz artışlar gösterdiği belirlenmiştir [64]. Belirli bir kireç veya çimento içeriği için maksimum serbest basınç dayanımına karşılık gelen optimum pirinç kabuğu külü içeriği zemin türüne, külün özelliklerine, hidrolik aktivatöre ve kürlenme süresine bağlı olarak değişmektedir [60,63].

Rahman (1986) [64] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, zemini oluşturan tanelerin %45'i 75 μm 'dan küçük olan lateritik zemin çeşitli oranlarda pirinç kabuğu külü, kireç ve çimento ile stabilize edilmiştir. Bu stabilizatörlerin etkilerini incelemek için Atterberg limitleri, standart Proctor sıkıştırma deneyi, serbest basınç ve Kaliforniya taşıma oranı deneyleri yapılarak, ekonomik stabilizasyon için gerekli pirinç kabuğu külü, kireç ve çimento miktarları belirlenmiştir. Bu çalışma, lateritik zemin stabilizasyonunda kireç ve çimentoya kıyasla pirinç kabuğu külünün potansiyelini ortaya koymuştur. Yol yapımında, temel malzemeleri için %7 çimento, alt temel malzemeleri için %5 kireç ve yine alt temel malzemeleri için %18 pirinç kabuğu külü önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranının 1 gün içinde pirinç kabuğu külündeki artışla sırasıyla %20 ve %18'e kadar arttığını, daha sonra azalmaya başladığını göstermiştir.

Pirinç kabuğu külü ile birlikte başka stabilizatörlerin de kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Basha ve diğerleri (2005) [63], tortu zeminlerin stabilizasyonunu, pirinç kabuğu külü ve çimento kullanarak kimyasal olarak incelemişlerdir. Zeminin kompaksiyon, dayanım ve X-ışını kırınımı gibi özellikleri değerlendirildiğinde, hem çimento hem de pirinç kabuğu külünün zeminlerin plastisitesini azalttığı, maksimum kuru yoğunluğu azaltırken, optimum su muhtevasının arttığı belirlenmiştir. Plastisite, sıkıştırma ve mukavemet özellikleri ve ekonomi açısından bakıldığında, %6-8 çimento ve %10-15 pirinç kabuğu külü ilavesi optimum karışım oranı olarak önerilmiştir.

Pirinç kabuğu külü kendinden çimentolu olmadığından, zemin dayanımını artırmak için çimento oluşturmak üzere kireç gibi bir hidrolik bağlayıcı eklenmelidir. Behak (2017) [65], kumlu zeminlerde pirinç kabuğu külü ve kireç kombinasyonlarını uygulanarak stabilizasyon üzerine yürüttüğü araştırmada, pirinç kabuğu küllerinin alkalın reaktivitesi, X-ışını difraktometri analizi ve tutuşma kaybı testleri ile incelenmiştir. Farklı pirinç kabuğu külü ve kireç içerikli zemin karışımlarında çimentolu bileşiklerin oluşumu gözlemlenmiştir. Pirinç kabuğu külü ve kireç ile muamele edilmiş

zeminler üzerinde yapılan serbest basınç dayanımı deneyleri dayanımda artışların meydana geldiğini göstermiştir.

Prasanna (2022) [66], zemin numunelerinin uçucu kül ve pirinç kabuğu külü atıkları ile stabilize edilmesi üzerine yürüttüğü araştırmada, uçucu kül, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kombinasyonu, zemine %5, %10, %15, %20 ve %25 gibi değişen oranlarda eklenmiştir. Zemin numuneleri üzerinde kompaksiyon, kesme kutusu, likit limit ve plastik limit gibi çeşitli laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum kuru yoğunluk, optimum su muhtevası, kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi değerlerin farklı yüzdelerde uçucu kül, pirinç kabuğu külü, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kombinasyonları için güçlendirilmemiş zemine kıyasla artması nedeniyle zemin özelliklerinin iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

2.2.10. Kireç Fırını Tozu

Kireç fırını tozu, kireç üretiminde toplanan bir yan üründür. Hızlı kireç üretim tesislerinin fırınlarında toplanan kireç fırını tozu, gerçekte Portland çimentosu gibi karbon yoğun bağlayıcıların yerini almak üzere stabilizasyon faaliyetlerinde kullanılmaya uygun olduğu düşünülen yüksek kalsiyum içeriğine sahip bir maddedir. Kireç fırını tozu, fiziksel olarak çimento fırını tozuna benzese de kimyasal olarak oldukça farklıdır [67].

Taze kireç fırını tozu, serbest kireç ve serbest magnezya içeriği ile doğrudan ilişkili olan göreceli reaktiviteye dayalı olarak iki kategoriye ayrılabilir. Serbest kireç ve magnezya içeriği, en çok kullanılan hammaddenin kalsitik veya dolomitik kireçtaşı olmasına bağlıdır. Yüksek serbest kireç içeriğine sahip kireç fırını tozu oldukça reaktiftir ve su eklendiğinde ekzotermik bir reaksiyon üretir. Kireç fırını tozu, stabilizasyon amacıyla hidratlı kirecin doğrudan yerine kullanılabilir olması nedeniyle ticari ilgiye sahiptir [67].

Kireç üretiminin bir yan ürünü olan kireç fırını tozu, killi zeminlerin işlenebilirliğini artırmak için bir katkı maddesi olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak, bu amaçla kullanılan kireç fırını tozunun faydalarını ölçmek için yapılan araştırmalar sınırlıdır. Kakrasul ve diğerleri (2018) [68], taban zeminlerinin stabilizasyonunda kireç fırını tozunun kullanımına yönelik yürüttükleri deneysel çalışmada, iki farklı sahadan elde edilen killi zemin farklı oranlarda kireç fırını tozu ile karıştırılmıştır. Doğal ve kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminlerin Atterberg limitleri, karıştırma su muhtevası-yoğunluk ilişkileri, şişme potansiyeli, dayanıklılığı ve serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Kireç fırını tozu ile işlem görmüş numuneler 1-2 saat ve 1, 3, 7 ve 28 günlük sürelerde sıkıştırılmış ve kürlenmiş, ardından serbest basınç dayanımının ve hacim genişlemesinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır.

Kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminde, işlem görmemiş zemine göre %100'den fazla bir mukavemet artışı gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıca kireç fırını tozu ile işlem görmüş zeminin mukavemetinin zamanla sürekli olarak arttığını göstermiştir. Kireç fırını tozu ayrıca taban zemininin plastisitesini ve şişme potansiyelini önemli ölçüde azaltmış ve killi zeminin işlenebilirliğini ve dayanıklılığını geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kireç fırını tozunun killi taban zeminlerinin modifikasyonu veya stabilizasyonu için kullanılabilmesi değerlendirilmiştir.

Düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu küllerin, kombinasyon halinde kireç fırını tozundaki silika eksikliğini potansiyel olarak tamamlayabileceği düşünülmektedir. Arulrajah ve diğerleri (2017) [69], endüstriyel bir yan ürün olan ve düzenli depolama sahalarında biriken mevcut stokların azaltılması için bir çözüm bulmak üzere uçucu kül ve kireç fırını tozu kullanarak stabilize edilen geri dönüştürülmüş inşaat ve yıkım atıklarının mukavemetini ve dayanıklılığını artırmayı amaçlamışlardır. Bu şekilde Portland çimentosu üretiminden kaynaklanan genel karbon emisyonlarının da azaltılacağı düşünülmektedir. Kireç fırını tozu ve uçucu kül ile stabilizasyon işleminin, agregalar arasındaki temas alanını artırarak zemin matrisinin yük taşıma kapasitesini geliştirdiği belirlenmiştir. İnşaat ve yıkım agregaları + %20 kireç fırını tozu + %10 uçucu kül kombinasyonunun mukavemet ve esnek davranış açısından optimum karışım oranı olarak altyapı uygulamaları için uygun bir çözüm olduğu bulunmuştur.

Kang ve diğerleri (2015) [70], killi yol üst yapısı temel malzemelerinin stabilizasyonunda C sınıfı uçucu külü ve kireç fırını tozunun etkinliğinin araştırıldığı çalışmada, kimyasal olarak modifiye edilmiş zemin üzerinde, Proktor kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, Briaud kompaksiyon cihazı modülü ve termal iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, optimum su muhtevasında statik sıkıştırma ile oluşturulmuş, çeşitli kürlenme sürelerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ağırlıkça %20'ye kadar C sınıfı uçucu kül ilave edilmesinin, kuru birim ağırlığı 16.8'den 17.4 kN/m³'e, serbest basınç dayanımını 18.2 kPa'dan 497.2 kPa'ya, Briaud kompaksiyon cihazı modülünü 40 MPa'ya kadar yükseltebileceğini göstermiştir. Kireç fırını tozunun, zayıf zeminlerin serbest basınç dayanımını ve rijitliği nispeten küçük karıştırma oranlarında arttırabilen iyi bir stabilize edici olduğu belirlenmiştir.

2.2.11. Çimento Fırını Tozu

Çimento fırını tozu ile stabilize edilmiş zeminlerde çimentoda gözlemlenen benzer kimyasal reaksiyon ve hidrasyon ürünleri görülmektedir. Çimento

fırını tozu daha ileri bir işleme veya arıtmaya ihtiyaç duymayan bir atık ürün olduğundan ucuz olup toz halinde çimento yerine büyük ölçekli projelerde kullanılabilir. Çimento fırını tozunun zemin stabilizasyonundaki etkinliği hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerine bağlıdır. Partikül dağılımı, CaO ve SiO₂ yüzdesi, alkali ve sülfat içeriği çimento fırını tozunun stabilizasyon etkinliğini etkilemektedir.

Adeyanju ve Okeke (2019) [71], çimento fırını tozunun bir stabilizatör olarak uygunluğunu araştırmak için, %7.5, 10, 12.5 ve 15 gibi değişen oranlarda killi zemin ile karıştırmıştır. Bu deneysel çalışmada CBR değerinin %1.49'dan %28.6'ya yükseldiği ve %10 çimento fırını tozu ile karıştırılan zeminin 7 günlük bir kürlenme süresinden sonra en iyi mekanik iyileşmeyi gösterdiği belirlenmiştir. Zeminin kuru ağırlığına göre çimento fırını tozunun miktarındaki artışla stabilize zeminlerin geoteknik özelliklerindeki iyileştirmenin artacağı ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarıyla uyumlu olarak çimento fırını tozu gibi endüstriyel atıkların zeminlerin stabilizasyonunda faydalı bir şekilde kullanılabilceği belirlenmiştir.

Çimento fırını tozu, kireç, çimento ve C sınıfı uçucu külden oluşan geleneksel stabilizasyon maddelerine bir alternatif teşkil etmektedir.

Solanki ve diğerleri (2007) [72], farklı oranlarda çimento fırını tozunun zemin stabilizatörü olarak etkinliğini değerlendirmek için bir laboratuvar çalışması gerçekleştirmiştir. Hazırlanan silindirik numuneler sabit sıcaklık ile kontrollü neme sahip nemli bir odada 28 gün boyunca kürlenmiştir. Kürlenmeden sonra numunelerin esneklik modülü (M_p), elastisite modülü (M_E) ve serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Çimento fırını tozu ile stabilize edilmiş numunelerin M_p , M_E ve serbest basınç dayanımı değerlerinin karışımdaki çimento fırını tozu oranının artması ile arttığı, kimyasal reaksiyonlara bağlı ürünlerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilen mikrograflara dayanarak zemin boşluklarında açıkça görüldüğü ve mukavemetteki artışın sebebi olduğu sonucuna varılmıştır.

Hossain ve Mol (2011) [73], killi zeminleri farklı oranlarda çimento fırını tozu, volkanik kül ve bunların kombinasyonları ile stabilize ettikleri çalışmada, stabilizatörlerin etkisi Atterberg limitleri, standart Proktor, serbest basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, esneklik modülü ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri ile değerlendirmiştir. Suya daldırmanın dayanım, su emilimi ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi incelenerek, 14 tane stabilize edilmiş zemin karışımının dayanıklılık özellikleri araştırılmış, dayanıklılık, esneklik modülü ve Kaliforniya taşıma oranı arasındaki korelasyonlar kurulmuştur. Stabilize zemin karışımlarının, tatmin edici dayanım ve dayanıklılık özellikleri göstermesi yerel mevcut zeminlerin,

volkanik kül ve çimento fırını tozu ile stabilize edilerek kullanımı ile inşaat endüstrisine sürdürülebilirlik sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

Ismail (2013) [74], çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozu kullanarak şişen, yüksek plastisiteli Pliyosen çökeltileri zemininin, şişme potansiyelini düşürmeyi ve geoteknik özelliklerini iyileştirmeyi amaçladıkları çalışmada kimyasal stabilizasyon öncesi ve sonrasında mikroyapısal değişiklikler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca zeminin plastisite, sıkıştırma parametreleri, serbest basınç dayanımı (q_u), ultrasonik hızlar ve serbest şişme gibi geoteknik özellikleri, stabilizasyon öncesi ve sonrası ölçülmüştür. Çimento fırını tozunun optimum içeriği %16, kireçli çimento fırını tozunun optimum içeriği ise pH testine göre %3 kireç ve %14 çimento fırını tozu olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozunun eklenmesinin, maksimum kuru yoğunlukta bir azalmaya ve optimum su muhtevasında bir artışa yol açtığını göstermiştir. Çimento fırını tozu ve kireçli çimento fırını tozu kullanılan numunelerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç dayanımının, ultrasonik boyuna (V_p) ve kesme (V_s) hız değerlerinin arttığı, zeminin serbest şişme yüzdesinin uygulama sonrasında %80.0'dan %0.0'a düştüğü belirlenmiştir.

2.2.12. Geopolimer

Alkali ile aktive edilen bağlayıcılar olarak da bilinen geopolimerler, son yıllarda zemin stabilizasyonu için çimento gibi geleneksel bağlayıcılara bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Geopolimerler, işlenmiş zeminlerin içinde çimentolu ürünler oluşturmak için endüstriyel atıkların alkali aktivasyonunu kullanır ve killi toprakların mekanik ve fiziksel niteliklerini artırır. Geopolimerler, hızlı sertleşen, yüksek mukavemete, düşük büzölmeye ve asit-alkali korozyon direncine sahip bir tür yeşil çimento esaslı malzemeler olup soğuk bölgelerde taban zeminlerinin sıklığını, stabilitesini ve dayanıklılığını sağlamak için çok faydalıdır.

Geopolimerler genellikle yüksek konsantrasyonda alüminosilikat içeren birçok malzemenin sentezlenebilir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi silika (Si) ve alümina (Al) mineralleri bakımından zengin olan geopolimer öncülleri, zemin stabilizasyon uygulamalarında geopolimerizasyon için önerilmektedir.

Entegre bir süreç olan geopolimerizasyon, geopolimerlerin sentezlenmesi için süzme, difüzyon, yeniden yönlendirme, polimerizasyon ve yoğunlaşmayı içerir. Aşırı alkali koşullar altında silika ve alümina içeren kaynak malzemelerden oksit minerallerinin çözünmesi, çözünmüş oksit

minerallerinin yönlendirilmesi ve ardından jelleşme, üç boyutlu bir siliko- alüminat yapı ağı oluşturmak için polikondenzasyon, polimerizasyonun üç aşamasını oluşturur.

Wang ve diğerleri (2021) [75], metakaolin bazlı geopolimer bağlayıcı ile iyileştirilen killi zeminin serbest basınç dayanımının metakaolin ve alkali-aktivatör içeriği ile önce arttığını ve sonra azaldığını belirledikleri deneysel çalışmada, metakaolin ve alkali-aktivatörün geopolimer bağlayıcıdaki ideal karışım oranının yaklaşık 2:1 olduğu belirlenmiş, geopolimer bağlayıcının killi zemindeki maliyet açısından optimum karışım oranı yaklaşık %12 olarak önerilmiştir. Geopolimer ile iyileştirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, kesme dayanımı ve Brezilya yarma dayanımının arttığı belirlenmiştir.

Zemin stabilizasyonunda Portland çimentosu yerine çevre dostu bir alternatifin geliştirilmesine yönelik ilgi artmaktadır. Ghadir ve diğerleri (2021) [76], volkanik kül bazlı geopolimerin çimentoya alternatif bir zemin stabilizatörü olarak kullanılmasının fizibilitesini, kayma mukavemeti davranışlarını ve yaşam döngüsü değerlendirmesini karşılaştırarak değerlendirmiştir. Kütleme koşullarının, dikey sınırlamaların, bağlayıcı içeriklerinin ve alkali aktivatör özelliklerinin etkileri araştırıldığı çalışmada, bağlayıcı türünden bağımsız olarak artan bağlayıcı içeriğinin agregasyon yoluyla killi zeminin yapısını değiştirdiğini ve böylece kayma direncini artırdığını ortaya koymuştur. Parçacıklar arası bağlar daha yüksek kütleme sıcaklıklarında daha hızlı gelişmiş ve parçacıkların birbirine kenetlenmesi daha yüksek sınırlama basınçlarında artmıştır.

Sıradan Portland çimentosunu endüstriyel atık bazlı geopolimerlerle değiştirerek “düşük karbon ayak izine” sahip çimentolu malzemeler geliştirmek, zemin stabilizasyon teknolojisinin geliştirilmesinde daha çevreci bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Zhou ve diğerleri (2021) [77], tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, düşük kalsiyum içerikli geopolimerler, yüksek kalsiyum içerikli geopolimerler ve sıradan Portland çimentosu ile stabilize edilen yumuşak deniz zemininin mekanik özellikleri ve mikro yapısı, serbest basınç dayanımı (UCS) testi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karşılaştırılmıştır. Düşük kalsiyum içerikli ve yüksek kalsiyum içerikli geopolimerler sırasıyla alkali ile aktive edilmiş kömür içeren metakaolin ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile üretilmiştir. Sonuçlar, nispeten yüksek alkali aktivatör/öncül madde oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı ve NaOH konsantrasyonunun kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerin mukavemet gelişimi için faydalı olduğunu, ancak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler için elverişsiz olduğunu göstermiştir. Kömür içeren metakaolin

ile muamele edilmiş numuneler için optimum alkali aktivatör/öncül madde oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5 ve 75:25 iken, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler için 1.0 ve 25:75'tir. Pratik uygulamalar için önerilen NaOH molaritesi 12 M'dır. Aynı öncül içeriğinde, kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numuneler, ortam sıcaklığında düşük reaktiviteleri nedeniyle sıradan Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerden daha düşük bir mukavemet göstermiştir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numuneler, prekürsör içeriği ağırlıkça %20'den yüksek olduğunda sıradan Portland çimentosu ile muamele edilmiş numunelerden daha yüksek bir mukavemete sahip olmuştur. Kürleme süresi arttıkça, kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerin mukavemeti doğrusal olarak artarken, sıradan Portland çimentosu ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerin mukavemeti logaritmik olarak artmış ve kürlemenin ilerleyen aşamalarında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerin mukavemetinde bir azalma tespit edilmiştir. Sıcaklığın artırılması çimentolu ürünlerin oluşumunu hızlandırmış ve özellikle kömür içeren metakaolin uygulanmış numuneler için kür süresini kısaltmıştır. Kömür içeren metakaolin, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve sıradan Portland çimentosunun yumuşak deniz zemininin üzerindeki stabilizasyon etkisi esas olarak yoğun üç boyutlu jel ağ yapısının oluşumuna bağlanmıştır. Sıradan Portland çimentosu ile muamele edilmiş numunelerin hidratasyon ürünleri C-S-H jelleri, etrenjit (AFt) ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iken, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile muamele edilmiş numunelerde C-(A)-S-H jelleri ve kömür içeren metakaolin ile muamele edilmiş numunelerde N-AS-H jelleri gözlenmiştir.

Ghadir ve Ranjbar (2018) [78], volkanik kül bazlı geopolimer ve sıradan Portland çimentosu kullanılarak gerçekleştirilen killi zemin stabilizasyonunun mekanik performansını karşılaştırmıştır. Kürleme koşulları ve süresi, alkali aktivatör/kil ve alkali aktivatör molaritesi ve volkanik kül/kil oranının etkileri belirlenmiştir. İşlem görmemiş killi zemin numunelerinin basınç dayanımı, zemin bağlayıcıların ağırlıkça %15'i ile kısmen değiştirildiğinde, ıslak ve kuru ortam koşullarında sırasıyla 0.2-4 MPa ve 2-12 MPa arasında artırılabilmiştir. Geopolimer muamelesinin kuru koşullarda daha etkili olduğu, Portland çimentosunun ise ıslak ortamlarda üstün olduğu gözlemlenmiştir. Bu fark, geopolimerizasyon ve Portland çimentosu hidrasyon kinetiğinde su ve pH'nın rolü ile ilişkilidir. Ayrıca, alkali aktivatör ve alkali aktivatör/kil molaritesinin artırılması, geopolimer ile işlenmiş zeminin basınç dayanımını artırmaktadır. Ayrıca, tüm geopolimer numunelerindeki daha yüksek enerji emilimi,

bu malzemenin sıradan Portland çimentosuna kıyasla üstün sünekliliğini göstermektedir.

Şişen zeminler, nem içeriğindeki değişimlere bağlı olarak şişme ve büzülme eğilimindedir. Bunun sonucunda, zemin ciddi şekilde bozulur ve üzerindeki yapıda önemli hasara neden olur. Kireç, uçucu kül veya çimento gibi katkı maddelerinin şişen zeminleri stabilize etmek için kullanımına, geçmişte zeminin şişen yapısını modifiye etmek amacıyla kapsamlı bir şekilde başvurulmuştur. Kireç ve çimentonun şişen zeminlerin stabilizasyonu için sıklıkla kullanılmasına rağmen, bu geleneksel katkıların enerji yoğun olduğu ve önemli miktarda CO₂ salınımı yaptığı artık bilinmektedir. Bu malzemelerin bu dezavantajı göz önünde bulundurularak, daha düşük çevresel maliyetlerle eşit derecede verimli olan yeni bağlayıcı malzemeler geliştirilmeye çalışılmıştır. Uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve alkali aktivatör gibi endüstriyel atık malzemeleri karıştırarak toprak zemin parçacıklarını bağlayabilen bir macun haline getiren geopolimer teknolojisi geliştirilmiştir.

Santhikala ve diğerleri (2022) [79], çimento ve uçucu kül bazlı geopolimer stabilizasyonunun şişen zemin davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre, uçucu kül bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç dayanımı artan bağlayıcı konsantrasyonu ile yükselmiştir. Aktivatörün molaritesi 8 M'den 10 M'ye çıkarıldığında, uçucu kül bazlı geopolimerle stabilize edilmiş şişen zeminin serbest basınç dayanımı artmış, ancak aktivatörün molaritesi 12 M'ye çıkarıldığında serbest basınç dayanımı azalmıştır. En az %20 bağlayıcı içeriğine ve en az 0.75 aktivatör/bağlayıcı değerine sahip uçucu kül bazlı geopolimerle stabilize edilmiş şişen zemin numuneleri, aynı dozda çimento uygulanmış numunelere kıyasla daha yüksek serbest basınç dayanımı ortaya koymuştur. Sonuç olarak, şişen zeminlerin uçucu kül kullanılarak geopolimer stabilizasyonu, çimento stabilizasyonuna göre daha çevre dostu bir alternatif olarak düşünülebilir.

Sülfat bakımından zengin zeminlerin genişmesi ve kabarması, kireç ve çimento gibi kalsiyum bazlı stabilizatörlerle zemin stabilizasyonu için uzun süreden beri zorluklar çıkaran bir olgudur. Bu durum, sülfat konsantrasyonlu bir zemine kalsiyum ve su eklendiğinde genişleyici bir mineral olan etrenjit oluşumundan kaynaklanır. Zhang ve diğerleri (2015) [80], tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, inorganik bir alüminosilikat çimentolu malzeme olan kalsiyum içermeyen geopolimerin sülfat bakımından zengin zeminler için bir stabilizatör olarak kullanılmasının fizibilitesini araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla, 1000, 5000 ve 10.000 ppm alçıtaşı (sırasıyla 565, 2825 ve 5650 ppm sülfat konsantrasyonuna eşdeğer) ile önceden karıştırılmış sentetik

yağsız kili stabilize etmek için metakaolin bazlı geopolimer kullanılmıştır. Kil numuneleri ağırlıkça %8 ve %13 oranında metakaolin bazlı geopolimer ile stabilize edilmiş ve mekanik özellikleri ve şişme potansiyelleri belirlenmiştir. Kil numunelerinin mikroyapısal ve mineralojik özelliklerini daha ayrıntılı incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınım ölçer (XRD) testleri yapılmıştır. Ayrıca, metakaolin bazlı geopolimerin sülfatça zengin zeminler için etkili bir stabilizatör olup olmadığını değerlendirmek üzere bir referans temel sağlamak için stabilize edilmemiş kil, kireç ve çimento ile stabilize edilmiş kil içeren kontrol numune setleri hazırlanmış ve test edilmiştir. Kil numunelerinin serbest basınç dayanımı, Young Modülü ve göçme gerilmesi (gerinimi), metakaolin bazlı geopolimer ile stabilizasyondan sonra önemli ölçüde artmıştır. Geopolimer ile stabilize edilen numunelerin şişme gerinimi, suda bekletildikten sonra %4 kireçle stabilize edilen benzerlerinden çok daha düşük bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) sonuçları ve X-ışını kırınım ölçer (XRD) spektrumları ile doğrulandığı üzere, geopolimer ile stabilize edilmiş kil örneklerinde geopolimer jelleri gözlenmiş, ancak etrenjit kristalleri gözlenmemiştir. Kalsiyum içermeyen geopolimerin aşırı genleşme olmaksızın sülfat bakımından zengin zeminler için etkili bir stabilizatör olabileceği belirlenmiştir.

2.2.13. Silika Dumanı

Silika dumanı, silikon ve ferrosilikon alaşımlarının üretiminde yüksek saflıkta kuvarsın elektrikli fırınlarda kömürle indirgenmesi için gerçekleştirilen eritme işleminin bir yan ürünüdür. Ayrıca ferromanganez, ferromagnezyum, ferrokrom ve kalsiyum silikon gibi diğer silikon alaşımlarının üretiminde yan ürün olarak da elde edilir. Genellikle silika dumanı bileşenlerinin %90'ından fazlasını oluşturan son derece ince amorf silikon dioksit (SiO_2) parçacıkları içerir. Silika dumanı aynı zamanda mikrosilika, uçucu silika ve yoğunlaştırılmış silika dumanı veya silika tozu olarak da bilinir. Silika dumanı, aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla çimento harcı ve betonda tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak kullanılmaya uygun puzolanik bir malzemedir. Silika dumanının beton endüstrisinde kullanımı dünya çapında oldukça yaygınlaşmıştır [81].

Singh ve diğerleri (2020) [82], düşük maliyetli bir malzeme olan silis dumanının zemin stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasının uygunluğunun araştırıldığı çalışmada, şişebilen bir zemin, çeşitli yüzdelerde silika dumanı (%10-100) kullanılarak stabilize edilmiştir. Serbest şişme,

Atterberg limitleri, standart proktor, Kaliforniya taşıma oranı, serbest basınç dayanımı ve konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyi doğal ve silis dumanı ile stabilize edilmiş zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Silika dumanı eklenmesinin serbest şişmeyi küçülttüğü, optimum nem içeriğinde artışa ve maksimum kuru yoğunlukta azalmaya yol açtığı, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyinde kohezyon ve içsel sürtünme açısından ve serbest basınç dayanımındaki kohezyon değerlerinde artışa sebep olduğu bu da zeminin mukavemet özelliklerinde genel olarak iyileşme olduğunu göstermektedir.

Silika dumanı kullanılarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada, Kalkan ve Akbulut (2004) [83], silis dumanının hidrolik bariyer olarak kullanılmak amacıyla sıkıştırılmış kil astarların geçirgenliği, şişme basıncı ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test sonuçları, silis dumanı ile sıkıştırılmış kil numunelerinin, ham kil numunelerine kıyasla oldukça düşük geçirgenlik, şişme basıncı ve önemli ölçüde yüksek basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. Bu nedenle silis dumanı, katı atık muhafaza sistemlerinde sızıntı suyuna maruz kalan astarların inşaatında kullanılmaya uygun bir malzeme olarak önerilmektedir.

3. Stabilize Edilmiş Zeminin Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Stabilize edilmiş zeminlerde organik maddelerin, sülfatların, sülfidlerin ve karbondioksitin varlığı, mukavemet kaybına neden olabilir [1].

Zemindeki organik maddeler hidrasyon ürünü olan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile reaksiyona girerek pH değerinin düşmesine ve hidrasyon sürecinin gecikmesine sebep olabilir. Bu durum da, stabilize edilmiş zeminlerin sertleşmesini etkileyerek kompaksiyonu zorlaştırabilir. Zeminlerin sülfat bakımından zengin olması ve bu zeminlerde kalsiyum bazlı stabilizatörlerin yüksek su muhtevasında kullanılması, kimyasal reaksiyon sonucu kalsiyum sülfalüminat (etrenjit) veya tamausit oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda zeminde oluşan büyük miktardaki hacim artışları taşıma gücünde azalmaya neden olabilir [1,18]. Atık malzemeler ile endüstriyel yan ürünlerin çoğunda bulunan demir pirit formundaki sülfidlerin oksidasyonu, ortamda kalsiyum karbonat varlığında hidratlı kalsiyum sülfat oluşturmak üzere reaksiyona girebilen sülfürik asit üretir ve fazla suyun varlığında, stabilize edilmiş zemine hasar verebilir [1].

Çimentoyla stabilize edilmiş zeminlerde çimentonun su ile temasından hemen sonra hidrasyon süreci başlar ve geçen süreye bağlı olarak zeminin plastiklik özelliği kaybolarak katılaşma meydana gelir. Bu katılaşma zeminlerin kompaksiyonunu zorlaştırmasının yanında uygulanan kompaksiyon

enerjisinin artmasına dolayısı ile maliyet artışına neden olabilir. Kireçle stabilizasyon uygulamalarında zeminin işlenebilirliğinin artması nedeniyle bir süre beklenilerek kompaksiyon enerjisinin uygulanması ise sıkıştırma verimliliğini artırmaktadır.

Zeminlerin stabilizasyonunda, yeterli nemin olması sadece hidrasyon işlemi için değil aynı zamanda verimli sıkıştırma için de gerekli bir faktördür. Tamamen hidrate olmuş çimento, kendi ağırlığının yaklaşık %20'si, sönmemiş kireç (CaO) ise kendi ağırlığının yaklaşık %32'si kadar çevredeki su ile reaksiyona girer [1]. Yetersiz nemin olması hidrasyon sürecini etkileyerek dayanım kayıplarına sebep olabilir.

Puzolanik özelliğe sahip katkı malzemeleri ve zemin parçacıkları arasındaki puzolanik reaksiyonlar ortam sıcaklığından etkilenmektedir. Düşük ortam sıcaklıklarında puzolanik reaksiyonların yavaşlaması stabilize edilmiş kütlenin daha düşük mukavemete sahip olmasına sebep olabilir. Bu nedenle çimentolu katkı malzemeleri ile yapılan zemin stabilizasyon uygulamalarında ortam sıcaklığı göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür.

Stabilize edilmiş zeminler donma-çözülme döngülerine karşı hassas olduklarından dolayı bu zeminlerin donmaya karşı korunması gerekebilir. Donma çözülme döngüleri stabilize edilmiş zeminlerde dayanım kayıplarına sebep olduğu, bu nedenle katkı malzemeleri ile stabilize edilmiş zeminlerde maksimum kayma dayanımının elde edileceği optimum karışım oranı donma çözülme döngülerine maruz kalan ve kalmayan zeminler için aynı olmayıp stabilizasyon yapılan bölgedeki iklim koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir [37].

4. Sonuç

Zemin stabilizasyonu, mevcut zemin koşullarının istenilen amaca uygun olmadığı durumlarda gerekli olup zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Sorunlu zeminlerin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için en eski ve yaygın uygulanan zemin iyileştirme yöntemi kimyasal stabilizasyondur. Özellikle yumuşak ince taneli, düşük taşıma gücüne, yüksek geçirimsizlik ve hacim değiştirme potansiyeline sahip sorunlu zeminlerin mühendislik özellikleri kimyasal stabilizasyon ile ekonomik, çevreci ve etkin bir şekilde iyileştirilebilir. Kimyasal stabilizasyonda kullanılan malzemelerin birçoğu endüstriyel atık olup, bu atıkların değerlendirilmemesi durumunda depolama maliyetleri ve çevreye zararlı etkileri yüksek seviyelere ulaşabilir. Bu atık malzemelerin zemin iyileştirme uygulamaları ile bertaraf edilmesi birçok çevre probleminin ortaya çıkmadan engellenmesine, zemin iyileştirme

uygulamaları maliyetinin düşmesine ve değerli agregaların kullanımının azaltılmasına yardımcı olabilir.

Kimsayal stabilizasyonda seçilen katkı malzemesinin iyileştirilmesi düşünülen zemine uygunluğu stabilizasyonun başarısını belirleyen en önemli unsurdur. Ayrıca katkı malzemeleri yalnız uygulanabilecekleri gibi farklı katkı malzemelerinin bir kombinasyonu şeklinde de uygulanabilir. Katkı malzemelerinin karışımdaki oranı, optimum su muhtevası, küre, çevre ve iklim koşulları, kompaksiyon enerjisi, sıkıştırılan tabaka kalınlığı, sıkıştırma yöntemi gibi bir çok faktör yapılacak iyileştirmenin derecesini belirlemektedir. Ayrıca stabilizasyonda kullanılacak katkı malzemeleri ile zemin arasındaki kimyasal reaksiyonun ve bunun sonucu olarak zeminin mikro yapısında meydana getireceği değişimlerin iyi anlaşılması katkı malzemelerinin daha etkili bir şekilde kullanılmasına imkan sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Sherwood, P., (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO.
- [2] Rogers, C.D., Glendinning, S., (1993). Modification of clay soils using lime, Proceeding of the Seminar held at Loughborough University on Lime Stabilization, 99-114, London: Thomas Telford.
- [3] Umar, F, Ađar, E., (1985). Yol Üst Yapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [4] Amadi A.A., Okeiyi, A., (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data Int. J. Geo. Eng. 8:3
- [5] Ibrahim A., Abdullah M.S., Jamalludin D. Apo M., (2007). Comparison between hydrated lime dry powder and slurry on peat soil stabilization Academic. Journal Universiti Teknologi Mara, Pulau Pinang 87-100.
- [6] Prusinski, J.R., Sankar, B., (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils J. Trans. Res. Board 1652 215-27.
- [7] Harichane, K., Ghrici, M., Kenai, S., Grine, K., (2011). Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. Geotechnical and geological engineering, 29(5), 759.
- [8] Kavak, A., Akyarlı, A., (2007). A field application for lime stabilization. Environmental geology, 51(6), 987.
- [9] Castro-Fresno, D., Movilla-Quesada, D., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. A. (2011). Lime Stabilization of bentonite sludge from tunnel boring. Applied Clay Science, 51(3), 250-257.
- [10] Kavak, A., Baykal, A. (2012). Long-term behaviour of lime-stabilized kaolinite clay. Environmental Earth Sciences, 66(7), 1943-1955.
- [11] Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M., (2015). Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays Cold Regions Science and Technology, 119, 151-157.
- [12] Harichane, K., Ghrici, M., Missoum, H., (2011). 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.
- [13] Lin, D.-F, Lin, K.-L., Hungc, M.-J., Luo, H.-L. (2007). Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil. Journal of hazardous materials, 145(1-2), 58.
- [14] Seco, A., Ramírez, F, Miqueleiz, L., García, B., Prieto, E. (2011). The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science, 51(4), 419-423.
- [15] Dunuweera S.P, Rajapakse R.M.G., (2018). Cement types, composition, uses and advantages of nanocement, environmental impact on cement production, and possible solutions Adv. Mater. Sci. Eng. 1-11

- [16] MacLaren, D.C., White, M.A., (2003). Cement: Its Chemistry and Properties. *Journal of Chemical Education*, 8 (6), 623.
- [17] Domone, P., Illston, J., (2010). *Construction materials - their nature and behavior* (UK: Spon Press)
- [18] Little, D. N., Nair, S., (2009). 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.
- [19] Ingles, O.G, Metcalf, J.B., (1972). *Soil stabilization: principles and practice*. Sydney: Butterworth.
- [20] Mohamedzein, Yahia E.-A., Al-Rawas, Amer A. (2011). Cement-Stabilization of Sabkha Soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman. *Geotech Geol Eng* 29, 999–1008.
- [21] Oyediran, I.A., Kalejaiye, M., (2011). “Effect of Increasing Cement Content on Strength and Compaction Parameters of Some Lateritic Soil from South Western Nigeria”, *EJGE*, Vol. 16,pp 1501-1513.
- [22] Khemissa, M., Mahamedi, A., (2014). Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay *Applied Clay Science* 95 104-110.
- [23] El-Rawi, N.M., Al-Samadi, M.M.Y., (1995). Optimization of Cement-Lime-Chemical additives to Stabilize Jordanian Soils *Journal of Islamic Academy of Sciences* 8:4, 167-174.
- [24] Güney, Y., Aydılek, A.H., Demirkan, M.M. (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. *Waste Management*, 26(9), 932-945.
- [25] Mackiewicz, S.M., Ferguson, E.G., (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *World of Coal Ash (WOCA)*, 1-7.
- [26] White, D.J., Harrington, D.S., Thomas, Z., (2005). Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils. Vol. 1: Engineering properties and construction guidelines, Center for Transportation Research and Education, IHRB Project TR-461; FHWA Project 4, Iowa State University, Ames.
- [27] Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H.R., Ramyar, K., (2006). 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>.
- [28] Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., (2007). Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold regions science and technology*, 48(1), 44.
- [29] Degirmenci, N., Okucu, A., Turabi, A., (2007). Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and environment*, 42(9), 3393.

- [30] Parsons, R.L., Kneebone, E., (2005). Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Ground improvement*, 9(1), 33-38.
- [31] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Jones, R. (2009). 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.
- [32] McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., Dhir, R.K. (2012). Identifying the role of fly ash properties for minimizing sulfate-heave in lime-stabilized soils. *Fuel*, 92(1), 27-36.
- [33] Senol, A. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, conservation, and recycling*, 46(4), 365-87.
- [34] Sezer, A., (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, 41(2), 150.
- [35] Prabakar, J., Dendorkar, N., Morchhale, R.K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction & building materials*, 18(4), 263.
- [36] Kim, B., Prezzi, M. (2008). Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste Management*, 28(3), 649.
- [37] Sengul, T., Akray, N., Vitosoglu, Y., (2023), Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils, *Construction and Building Materials*, 400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132590>.
- [38] Tu, W., Zand, B., Butalia, T.S., Ajlouni, M.A., Wolfe, W.E. (2009). Constant rate of strain consolidation of resedimented Class F fly ash. *Fuel*, 88(7), 1154.
- [39] Arora, S., Aydilek, A., (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 640.
- [40] Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A., Benson, C.H. (2006). Soft subgrades stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation & Recycling*, 46(4), 365-376. doi:10.1016/j.resconrec.2005.08.005
- [41] Camargo, F.F., Edil, T.B., Benson, C.H. (2013). Strength and stiffness of recycled materials stabilized with fly ash: A laboratory study. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 505-517.
- [42] Edil, T.B., Acosta, H. A., Benson, C.H. (2006). Stabilizing soft fine grained soils with fly ash. *Journal of materials in civil engineering, ASCE*, 18(2), 283-294.

- [43] ASTM C618 (1998). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Pennsylvania.
- [44] Li, L., Santos, F., Li, Y., Shao, W., Zhao, Q., Amini, F., (2012). Evaluation of fly ash and soil mixtures for use in highway embankments. *Geo-Congress*, 3672-3680.
- [45] Hakari, U.D., Puranik, S.C., (2012). Stabilisation of Black Cotton Soils Using Fly Ash, Hubballi- Dharwad Municipal Corporation Area, Karnataka, India. *Global Journal of Researches in Engineering Civil And Structural Engineering*, 12(2), 21-29.
- [46] Mir, B.A., Sridharan, A., (2013). Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil–Fly Ash Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(4), 1059-1072.
- [47] Dayioglu, M., Cetin, B., Nam, S., (2017). Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives. *Applied Clay Science*, 146, 56-69.
- [48] Lee, R., 1974, Blast furnace and Steel Slag, Edward Arnold Publishers Ltd.
- [49] Yadu, L., Tripathi, R.K., (2013). Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil *Procedia Engineering*, Vol. 51, 125-131.
- [50] Pathak, A.K., Pandey, V., Murari, K., Singh, J.P., (2014). Soil Stabilisation Using Ground Granulated Blast Furnace Slag *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4(5), 164-171.
- [51] Fasihnikoutalab, M.H., Pourakbar, S., Ball R.J., Unluer, C., Cristelo, N., (2020). Sustainable soil stabilisation with ground granulated blast-furnace slag activated by olivine and sodium hydroxide *Acta Geotechnica* 15:1981-1991.
- [52] Maneli, A., Kupolati, W.K., Abiola, O.S., Ndambuki, J.M. (2016). Influence of fly ash, ground-granulated blast furnace slag and lime on unconfined compressive strength of black cotton soil. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 252-260.
- [53] Bahadori, H., Hasheminezhad, A., Taghizadeh, F., (2019). Experimental Study on Marl Soil Stabilization Using Natural Pozzolans *Journal of Materials in Civil Engineering Archive* Vol. 31, No. 2.
- [54] Al-Swaidani, A., Hammoud, I., Meziab, A., (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725.
- [55] Yin, Z., Lekalpüre, R.L., Ndiema, K.M., (2022). Experimental Study of Black Cotton Soil Stabilization with Natural Lime and Pozzolans

- in Pavement Subgrade Construction Coatings, 12, 103. <https://doi.org/10.3390/coatings12010103>
- [56] Guyer, J.P., (2011). Stabilization for Pavements. NY.: Continuing Education and Development, Inc.
- [57] Onyelowe, K.C., Okofofor, E.O. (2012). Geochemistry of Soil Stabilization. *ARNP Journal of Earth Sciences* 1(1), 32-5.
- [58] Shah, K.A., Ahmad, E., (2020). A Study on Alluvial Soil Stabilization using Bitumen Emulsion *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(6).
- [59] Baghini M.S., Ismail, A., Kheradmand, B., Hafezi M.H., Almansob, R.A., (2013). Bitumen-cement Stabilized Layer in Pavement Construction Using Indirect Tensile Strength (ITS) Method *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 5(24): 5652-5656.
- [60] Alhassan, M., Mustapha A.M., (2007). Effect of Rice Husk Ash on Cement Stabilized Laterite. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 11, 47-58.
- [61] Boateng A.A., Skeete D.A., (1990). Incineration of Rice Hull for Uses as a Cementitious Material. The Guyana Experience. *Cement and Concrete Research*, 20(5), 795-802.
- [62] Rahman M.A., (1987). Effects of Cement-Rice Husk Ash Mixtures on Geotechnical Properties of Lateritic Soils. *Journal of Soils and Foundations*, 27(2), 61-65.
- [63] Basha, E.A., Hashim, R., Mahmud, H.B., Muntohar, A.S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction & Building Materials*, 19(6), 448-453.
- [64] Rahman M.A., (1986). The Potential of Some Stabilizers for the Use of Lateritic Soil in Construction, *Building and Environment Journal*; 21(1): 57-61.
- [65] Behak, L., (2017). Soil Stabilization with Rice Husk Ash, *Rice: Technology and Production*. 29.
- [66] Prasanna, S., (2022). Utilisation of Fly Ash and Rice Husk in Soil Stabilization *Journal of Geology & Geophysics*, 1-6.
- [67] Chesner, W.H., Collins, R.J., MacKay, M.H., (1998). User Guidelines for Waste and By-Product Materials in Pavement Construction, Report No. FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC.
- [68] Kakrasul, J.I., Parsons, R.L., Han, J., (2018). Performance of lime kiln dust-treated subgrade soils, *IFCEE* 2018.
- [69] Arulrajah, A., Mohammadinia, A., D'Amico, A., Horpibulsuk, S., (2017). Effect of lime kiln dust as an alternative binder in the stabilizati-

- on of construction and demolition materials, *Construction and Building Materials* 152, 999-1007.
- [70] Kang, X., Ge, L., Kang G.C., Mathews, C. (2015). Laboratory investigation of the strength, stiffness, and thermal conductivity of fly ash and lime kiln dust stabilised clay subgrade materials. *Road Materials and Pavement Design*, 16(4), 928-945.
- [71] Adeyanju, E.A., Okeke1 C.A., (2019). Clay soil stabilization using cement kiln dust, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 640. DOI 10.1088/1757-899X/640/1/012080
- [72] Solanki, P., Khoury, N., Zaman, M., *Engineering Behavior and Microstructure of Soil Stabilized with Cement Kiln Dust GSP 172 Soil Improvement 2007* doi:10.1061/40916(235)6
- [73] Hossain, K.M.A., Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495-3501.
- [74] Ismaiel H.A.H., (2013), Cement Kiln Dust Chemical Stabilization of Expansive Soil Exposed at El-Kawther Quarter, Sohag Region, Egypt *International Journal of Geosciences*, 4, 1416-1424. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.410139>
- [75] Wang S., Xue, Q., Zhu, Y., Li, G., Wu, Z., Zhao, K., (2021). Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil, *Construction and Building Materials*, 267.
- [76] Ghadir, P., Zamanian, M., Motlagh N.M., Saberian, M., Li., J., Ranjbar, N., (2021). *Transportation Geotechnics*, 31.
- [77] Zhou, H., Wang, X., Wu, Y., Zhang, X., (2021). Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers, *Construction and Building Materials*, Vol.305. 124722.
- [78] Ghadir, P., Ranjbar, N., (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188, 361-371.
- [79] Santhikala, R., Chandramouli, K., Pannirselvam, N., (2022). Stabilization of expansive soil using fly ash based geopolymer, *Materials Today: Proceedings*, Vol.68, Part 1, 110-114.
- [80] Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., Nowak, P., Coen, A., Tao, M., (2015). Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils, *Applied Clay Science*, Vol.108, 199-207.
- [81] Siddique, R., Kunal, (2016). Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete: Development of sustainable construction materials, *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*,

Characterisation, Properties and Applications, 159-204. DOI: 10.1016/B978-0-08-102704-2.00011-1

- [82] Singh, P., Dash, H.K., Samantaray, S., b Effect of silica fume on engineering properties of expansive soil *Materials Today: Proceedings Volume 33, Part 8, 2020, Pages 5035-5040*
- [83] Kalkan, E., Akbulut, S., (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners, *Engineering Geology* 73, 145-156.