



# Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi

Onur Selçukhan<sup>1</sup>, Abdullah Ekinci<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, KKK, İnşaat Mühendisliği Programı, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye (ORCID: 0000 -0001-7107-0485), selcukhan.onur@metu.edu.tr

<sup>2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, KKK, İnşaat Mühendisliği Programı, Güzelyurt, Mersin 10, Türkiye (ORCID: 0000 -0002-6787-9983), ekincia@metu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 16 Şubat 2021 ve Kabul Tarihi 5 Nisan 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.881603)

**ATIF/REFERENCE:** Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2020). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 481-496.

## Öz

Zemin iyileştirme Milattan önce 3000 yılına dayanan en eski inşaat mühendisliği uygulamalarından biridir. Artan dünya nüfusuna paralel olarak yapılaşmaya olan talep artmakta ve yapılaşma için uygun zeminlerin bulunması zorlaşmaktadır. Ortaya çıkan talep doğrultusunda yapılar için elverişsiz zeminler kullanılmaya başlanmıştır. Bahse konu zeminlerde genellikle taşıma kapasitesi, oturma, şişme veya deprem durumunda sıvılaşma problemleri yaşanmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan araştırma geliştirme olanakları neticesinde problemlerli zeminlerin yapılara elverişli duruma getirilmesi için yeni teknikler geliştirilmektedir. Bu derleme Türkiye ve yakın coğrafyamızda yaygın olarak inşaat endüstrisi tarafından kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerini incelemektedir. Yaygın kullanılan yöntemler yanında son yıllarda araştırmacılar tarafından çalışmaları süren yenilikçi, sürdürülebilir uygulamalardan da bahsedilmektedir. Çalışmanın neticesinde mevcut yaygın kullanılan yöntemler zemin türü, kullanım alanı, kullanım sıklığı, uygulama süresi, maliyet ve kontrol gerekliliği göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda oluşturulan çizelge neticesinde uygulayıcıların karar verme sürecine yardımcı olmak amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Zeminde İyileştirme, Maliyet, Taşıma Gücü, Oturma, Sıvılaşma

## The Interpretation of Ground Improvement Techniques: State-of-the-Art

### Abstract

Ground Improvement is one of the oldest civil engineering disciplines dating back to 3000 BC. Population increases results in demand in shelter and infrastructure needs resulting in lack of availability of suitable grounds. Therefore, structures are being build on soils which have bearing capacity, settlement, swelling or liquefaction problems. Nevertheless, with advancements in technology and research methods are being developed to improve such soils. In this review paper ground improvement techniques widely used in Turkey have been evaluated. In addition to widely available techniques, innovative, sustainable, and environmentally friendly were also investigated. Findings have been evaluated in light of soil type, suitability, cost, monitoring requirements, availability and proposed use. As a result, a guide has been proposed to be used during decision process of ground improvement.

**Keywords:** Ground Improvement, Cost, Bearing Capacity, Settlement, Liquefaction

\* Sorumlu Yazar: [ekincia@mtu.edu.tr](mailto:ekincia@mtu.edu.tr)

## 1.Giriş

En eski inşaat mühendisliği uygulamalarından biri olan zemin iyileştirme yöntemleri, son yıllarda en hızlı gelişen sektörlerden biri haline gelmiştir. Geoteknik mühendisliğinin alt çalışma alanlarından biri olması nedeniyle gerek ulusal gerekse uluslararası konferans ve sempozyumlarda en fazla ilgi gören ve araştırmacıları cezbeden araştırma alanı durumundadır. Bu kapsamda (Van Impe 1989; Holtz ve diğ. 1991; Bergado ve diğ. 1996; Mitchell and Jardine 2002; Bo ve diğ. 2003; Smolczyk 2003; Moseley ve Kirsch 2004; Indraratna ve Chu 2005; Woodward 2005; Kitazume 2005) kitaplar yayınlanmıştır. Bunlara ek olarak zemin iyileştirme alanında birçok makale ve teknik yayınlar bulunmaktadır, her geçen gün bu alanda yapılan çalışmalar artmaktadır.

Etkili bir zemin iyileştirme projesinin gerçekleştirilebilmesi için mühendislik sanatını kullanarak tasarlanan yöntemin rasyonel bir yol ile hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu sadece zemin iyileştirme projeleri değil mühendisliğin her dalında izlenmesi gereken yoldur.

Başarılı bir zemin iyileştirme projesi için, mühendisin zeminin temel davranış ilkeleri, çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri, zemin ile yapı arasındaki etkileşim, donanım ve maliyetle ilgili kapsamlı bilgi dağarcığına sahip olması gerekmektedir. Buna ek olarak mühendislik alanında yaşanmış olan tecrübeler önem arz etmekte, tasarımda ve uygulamada avantaj sağlamaktadır.

Teknik ve pratik bilgilerin bir araya gelmesi ile de ana tasarım ortaya çıkartılır. Sonuç olarak bir veya birden fazla yöntem ele alınarak problemleri zeminin iyileştirilmesi sağlanır.

Zemin iyileştirme, konsept, parametreler ve ekipmanların birlikte kullanılarak hayata geçirilen işlemlerdir. Zemin iyileştirme çalışma alanlarının gelişmesindeki en büyük katkı ise bu ekipmanları geliştiren ve sürekli yenilikler getiren üretici firmalardır.

Zemin iyileştirme yöntemleri birçok bilim insanı tarafından farklı şekillerde yorumlanmıştır. Bunlar içerisinde ise, geoteknik camiası tarafından Mitchel (1981) raporu en fazla ilgiyi görmekte ve referans verilmektedir. Bu rapor zemin iyileştirme yöntemlerini altı ana başlığa ayırmıştır.

Kohezyonsuz zeminin yerinde derin kompaksiyonu.

On ve fazla yüklem.

Enjeksiyon ve Harç (Derz) dolgu.

Katkı maddeleri.

Termal iyileştirme.

Geotekstil ve Geosentetik ile güçlendirme.

Terashi ve Jaran (2000) yapmış oldukları kendi çalışmalarına benzer sınıflandırmayı adapte edip yeni bir kategori olan "Değiştirme" yöntemini bilim dünyasına kazandırmışlardır. Bu sınıflandırmayı yaparken farklı bir maddenin toprağın mevcut yapısı ile değiştirilip değiştirilmediğine bakarak yapıldığı belirtilmiştir.

Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Topluluğu, Zemin İyileştirme Teknik Komitesi (TC211) tüm bu sınıflandırmaları değerlendirilip Geoteknik camiasının hemfikir olduğu bir sınıflandırma geliştirmiştir. Bu sınıflandırma aşağıdaki şekildedir.

Kohezyonsuz zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi.

Kohezif zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi.

Katkı maddeleri ile zemin iyileştirme.

Harç türü katkı maddeleri ile zemin iyileştirme.

Zemin Takviyesi.

Zemin İyileştirme Teknik Komitesi tarafından oluşturulan sınıflandırma, zemin davranışındaki değişimlere (Ör. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminin değişik durumlardaki tepkilerine bakılarak) ve katkı maddesi kullanılıp kullanılmadığına bakılarak oluşturulmuştur.

Zeminin davranışındaki değişimleri yoğun bir şekilde gözlemleyerek ve kalite kontrolü ile denetimleyerek, katkı maddesi kullanılmadan zemin iyileştirme uygulanmıştır. Örneğin bu kategoride bulunan dinamik kompaksiyon yöntemi, geniş saha kalibrasyonlarının yapılması ile güvenilir tasarımlar elde edilmesi sağlanmaktadır. Diğer yandan katkı maddeleri ile yapılan iyileştirmede, başarılı bir tasarım için doğru katkı maddesi, donanım boyut seçimi gibi ön hazırlıkların gereksinimine dikkat çekilmiştir.

Zemin İyileştirme Teknik Komitesi tarafından sınıflandırılan başlıklar altına yerleştirilebilen yöntemler bu derlemede incelenmiştir. Yine aynı sınıflandırmalar altında ülkemizde fazla kullanımı bulunmayan ancak son zamanlarda araştırmacılar tarafından geliştirilen yenilikçi, sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerde her başlık altında oluşturulan diğer yöntemler bölümünde özet olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilmesi düşünülen tasarımın ortaya çıkartılabilmesi için derleme kapsamında, ülkemizde uygulaması yaygın olarak görülen çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri tek tek ele alınarak zemin türü, kullanım alanı, kullanım sıklığı, uygulama süresi, maliyet ve kontrol gerekliliği göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Değerlendirme sonucunda, uygulanabilecek yöntem veya yöntemlerin belirlenmesinde yol gösterici olması amacı ile çizelge oluşturulmuştur.

## 2. Materyal ve Metotlar

### 2.1. Kohezyonsuz zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi

#### 2.1.1. Dinamik Kompaksiyon

Ağır bir cismin belli bir yükseklikten bırakılarak granüler zeminin sıkıştırılması ile yapılır. Dinamik kompaksiyon granüler, gevşek ve yumuşak zemin çeşitleri için uygundur (kohezyonlu). Temel amaç, zeminin enerji verilerek sıkıştırılması sağlanarak taşıma kapasitesinin artırılması, oturmaların azaltılması ve zeminin sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesidir. Zeminde istenilen sıklık değerlerine ulaşabilmek için gerekli teknik bilgi ve tecrübeye sahip olmak gerekmektedir. Şengezer (2010)'in dinamik kompaksiyon üzerine yaptığı çalışmalara göre dinamik kompaksiyon işlemi teknik açıdan iyi kontrol edilmez ise zeminin altında düzgün sıkıştırılmamış zemin oluşabilir ve işlem tekrarlanmak durumunda kalınabilir. Dinamik kompaksiyon yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, kompaksiyonun maliyeti ve uygulama süresi açısından diğer yöntemlere göre daha uygun bir yöntem olduğu ispatlanmıştır. Yee ve Aun (2010)'a göre 20.000 metrekare ( $m^2$ ) alanlı bir dinamik kompaksiyon çalışmasında ortalama bir metrekare başına 35.5 kilogram (kg) karbondioksit gazı ( $CO_2$ ) doğaya salınır. Aşağıda Nice Havaalanının zemin iyileştirilmesinde kullanılan dinamik kompaksiyon yöntemi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Nice Havaalanı yapımında kullanılan dinamik kompaksiyon. (Jian Chu, 2009)

#### 2.1.2. Vibro Kompaksiyon (Flotasyon)

Vibro kompaksiyon derin ve kohezyonsuz zeminlerde (kum, çakıl) zemine yerleştirilen bir sondanın enerji titreşimleri ile zemini sıkıştırarak istenilen zemin özelliklerine ulaşılması sağlanan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Yatay verilen titreşimler sonrasında kalın, ince ve iri daneliler arasında geçici sürtünme kaybı yaşanır. Granüler zeminlerde sondayı çevreleyen zeminde sıvılaşma gerçekleşir. Bu sıvılaşma sonucunda ani ve hızlı oturmalar olur. Zeminde çökmeler oluşur ve bu sebeple sonda etrafındaki zeminde sıkışma gerçekleşmiş olur. Sonda (Vibratör) sürekli su jeti ile beraber çalışır bu şekilde rölatif sıklık %70 ile %85 arasındaki değerlere yükseltilebilir. Demiröz ve Karaduman (2009) uygulama öncesi ve sonrası sahada yapılan kalite kontrol ile uygulamanın istenilen iyileştirmeyi yapıp yapmadığı kontrol edilir bu kontroller içinde deneyimli bir kişiye ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Vibro kompaksiyon yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Uygulama maliyeti olarak diğer yöntemlere göre aynı seviyededir. Uygulama süresi kısadır. Yee ve Aun (2010)'a göre vibro kompaksiyon dinamik kompaksiyona

kıyasla daha fazla  $CO_2$  salınımı yapar. Şekil 2' de Dubai Palm projesinde kullanılan çok sayıda titreşimli sonda gösterilmiştir.



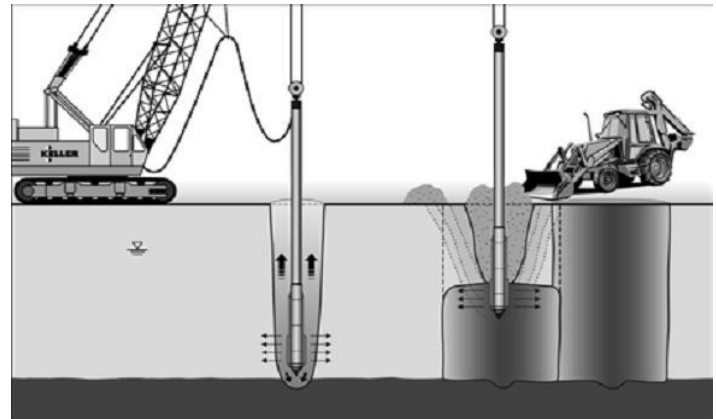
Şekil 2. Dubai Palm projesinde kullanılan titreşimli sondalar. (Wehr, 2007)

Vibro kompaksiyon son yıllarda birçok mega yapı projesinde kullanılmıştır. Bunlar arasında yer alan Changi East Projesi ve Şekil 3' teki Dubai Palm projesi en ünlüleridir.



Şekil 3. Dubai Palm Projesi. (Wehr, 2007)

İlerleyen teknoloji sayesinde yıllar içerisinde vibro kompaksiyon yöntemi geliştirilmiş ve 60 metre derinliğe kadar kara veya denizde bu yöntem kullanılarak iyileştirmeler yapılabilir duruma gelmiştir. Bu uygulamanın şeması 4. şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4. Vibro Kompaksiyon yönteminin uygulama şeması. (Raju ve Sondermann, 2005)

### 2.1.3. Patlatma ile Kompaksiyon

Patlayıcıların patlama etkisi dolayısı ile ortaya çıkan şok dalgaları ve titreşimlerin zeminin sıkışması ve sıvılaşmasına yol açtığı yöntemdir. Patlama tekniği ile yumuşak zeminlerin oturmaları hem de granüler zeminlerin taşıma kapasitesi artırılabilir. Rölatif yoğunlukta %35 - %85 artış sağlanabilmektedir. Granüler zeminlerde patlama ile taşıma kapasitesinin artırılmasının başarılı olabilmesi için zeminin tam doygun olması gerekmektedir. Zeminde ne kadar hava varsa taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi o kadar yetersiz kalmaktadır Tumluer (2006) patlatma üzerine yaptığı çalışmalara göre, patlama yönteminin en büyük avantajları ekonomik olması ve diğer yöntemlerde mümkün olmayan derinliklerde kullanılabilir olmasıdır. 40 metre derinliğe kadar başarılı patlatma ile kompaksiyon sonuçları elde edilmektedir. Uygulama süresi kısadır ancak bu yöntem çok tercih edilmemektedir çünkü teorik bilgiden çok tecrübeye dayalı uygulanmaktadır, yanlış kullanımı güvenlik açısından risk teşkil etmektedir ve doğaya çok zararlıdır.

### 2.1.4. Yüzey Kompaksiyonu

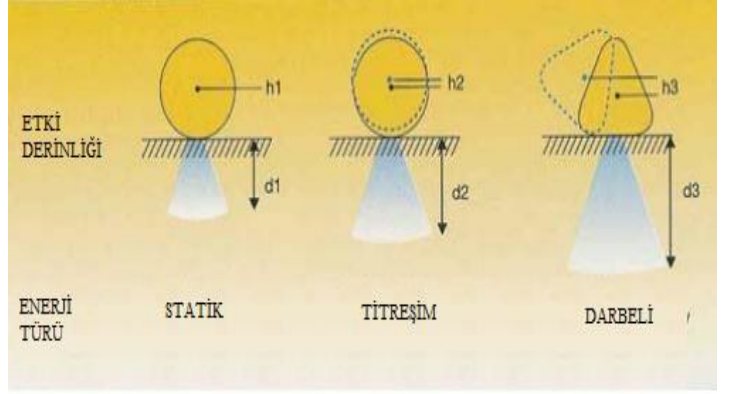
Kohezyonlu zeminlerde yüzey kompaksiyonunun en iyi biçimde sağlanabilmesi için zemin içinde ideal miktarda su bulunması gerekmektedir. Bu su miktarı farklı zemin türleri için değişiklik göstermektedir. Aynı zeminler içinde kullanılan kompaksiyon ekipmanına ve uygulanan enerjiye göre de ideal su miktarı farklılık gösterir. Özaydın (1999)'ın çalışmalarına göre, kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında bu ideal su miktarı daha az önem taşır çünkü kohezyonsuz zeminlerde danelerin boyutu büyük olduğundan zemindeki havanın çıkması kolaydır. Yüzey kompaksiyonu için kullanılan birçok silindirik geleneksel makine vardır. Şekil 5' de bazıları gösterilmiştir. Bu makineler:

- Düz ayaklı silindirler
- Lastik tekerlekli silindirler
- Keçi ayaklı silindirler
- Titreşimli silindirler
- Darbeli sıkıştırma araçları
- Demir bandajlı silindirler
- Pnömatik silindirler

Yüzey kompaksiyonunda hangi tip silindirlerin kullanılacağı:

- Zemin cinsi
- Sıkıştırma derecesi
- İşin büyüklüğü
- Silindir tipleri kapasitesi

Şartlarına bağlıdır.



Şekil 5. Yüzey kompaksiyon yöntemlerinin karşılaştırılması. (Mengé,2007)

Bunun yanında Ekinci (2019) killi zeminlerin yumru şeklinde büyük parçalar halinde sıkıştırılmasının zeminin doğal mikro yapısına benzer bir mikro yapı oluşturacağına değinmiştir. Oluşan yeni mikro yapının killi zeminin toz haline getirildikten sonra istenen su muhtevasına ulaştırılarak sıkıştırılmasından daha güçlü bir yapı oluşturacağına değinmiştir. Pengthamkeerati ve diğ. (2005)' yüzey kompaksiyonunun birçok açıdan doğaya zararlı olduğunu belirtmişlerdir.

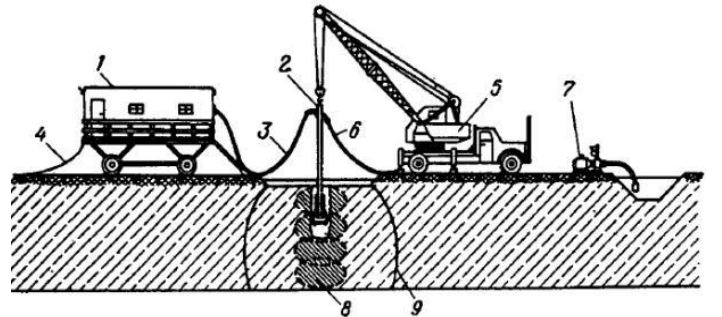
Özaydın (1999)'ın çalışmalarına göre, yüzey kompaksiyonu iyileştirilecek zeminin derin olmayan bölgelerde uygulanması uygun olan bir yöntemdir bu sebeple sıkıştırılan tabaka arttıkça homojen bir sıkışma elde etmek güçleşir ve sıkışma miktarı azalır. Eldeki mevcut silindire göre, zeminin cinsine ve tabaka kalınlığına göre sahada deneyimli birinin sıkışma kontrolünü gerçekleştirmesi gerekir. Yüzey kompaksiyonu zeminin taşıma gücünü artırır oturmaları ve geçirimsizliği azaltır ama derinde diğer yöntemler kadar etkili değildir. Maliyeti düşüktür ancak daha fazla zaman alır.

### 2.1.5. Diğer Yöntemler

Diğer yöntemlerde ülkemizde kullanımı fazla yaygın olmayan zemin iyileştirme yöntemleri sıralanmıştır.

#### 2.1.5.1. Elektrik Sinyali ile Kompaksiyon

Yüksek elektrik voltajının yarattığı şok dalgaları vasıtası ile granüler zeminin sıkıştırılması vasıtası ile yapılan zemin iyileştirme işlemidir. Yüksek maliyetlerinden ötürü fazla tercih edilen bir yöntem değildir. Maliyetlerin düşürülebilmesi için günümüzde bu alandaki araştırmalar kapsamlı bir biçimde devam etmektedir. Lumize ve diğerleri (1973) elektrik sinyali ile kompaksiyonu şemalandırmıştır. Şekil 6' da bu şema gösterilmektedir.



Şekil 6. Elektrik sinyali ile kompaksiyon. (Lomize ve diğ., 1973)

## 2.2. Kohezif zeminin katkı maddeleri kullanılmadan iyileştirilmesi

### 2.2.1. Mevcut Zeminin Hafif Madde ile Değiştirilmesi

Uygulanacak yapı yükünü taşıyamayan, yüksek oturma beklentisi bulunan, yapılacak yapı için uygun olmayan mevcut yumuşak killi (kohezif) zeminin sıyrılarak kaliteli kum veya çakıl ile yer değiştirmesi yöntemidir. Bu yöntem özellikle istinat duvarı inşaatlarında, istinat duvarına aktarılan basıncın azaltılması için mevcut zeminin daha hafif ancak daha dayanıklı madde ile değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Temellerin altında bulunan problemlili zeminler bu yöntem ile iyileştirilebilir. Zemin değiştirme yöntemi, bilinen en eski yöntemlerden olup, günümüze kadar bu alanda birçok yenilik yapılmış ancak araştırmalar eski yöntemlerin revize edilmesinden daha fazla ileriye gidememiştir. Altun (2010) çalışmasında bu yöntemin uygulanabilecek hızlı ve kontrol gerekliliği düşük yöntemlerden biri olduğunu ancak değiştirilecek zemin miktarına göre ekonomik açıdan pahalıya gelebileceğinden bahsetmiştir. Buna ek olarak doğaya en çok zarar veren yöntemlerden biridir. Yee ve Aun (2010)'a göre 100.000 m<sup>2</sup> alanda yapılan bir uygulamada ortalama doğaya bir m<sup>2</sup> başına 37.4 kg CO<sub>2</sub> gazı salınır.

### 2.2.2. Yatay Drenler ile Ön Yükleme

Bu yöntem, yumuşak kil tabakalarının taşıma gücünü artırmak ve geçirimsizlik katsayısı düşük zeminlerinde inşa edilecek olan yapının konsolidasyon oturmasını azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Ön yükleme yapının inşaatından önce en az yapı yükü kadar olmak şartı ile zemine kum ve çakıl dolgu yüklenmesi ile gerçekleştirilir. Yüklenen ağırlık ile oluşacak gerilmeler ile zemin tabakalarının konsolide olması sağlanmaktadır. Zeminin taşıma gücü, uygulanan ağırlık ve konsolidasyon basıncı doğrultusunda artırılmaktadır. Belli bir süre bekleyip istenilen oturma sağlandıktan sonra dolgu malzemesi kaldırılarak yapının inşaatına başlanabilir. Bildik (2017)'in yatay drenler üzerine yaptığı çalışmalara göre, maliyeti düşük, kontrol gerekliliği istenilen oturma miktarı dikkate alınarak uzman tarafından yapılması gereken ancak zaman alan bir yöntemdir. Önceden hazırlanmış yatay veya kum drenler ön yükleme yöntemine ek olarak kullanılmaktadırlar. Ön yükleme aşamasında drenler zemin gözeneklerinde biriken aşırı su basıncının, drenler aracılığı ile zeminin diğer bölgelerine yayılmasını sağlar. Böylece sıkıştırılma daha çabuk ve etkili yapılmış olmakla birlikte zamandan kazanç sağlanır. Yee ve Aun (2010)'a göre 100.000 m<sup>2</sup> alanda gerçekleştirilen yatay dren uygulamasında ortalama bir m<sup>2</sup> başına 13.6 kg CO<sub>2</sub> gazı doğaya salınır. Şekil 7'de deniz zemininde yapılan benzer çalışmalar görülmektedir.



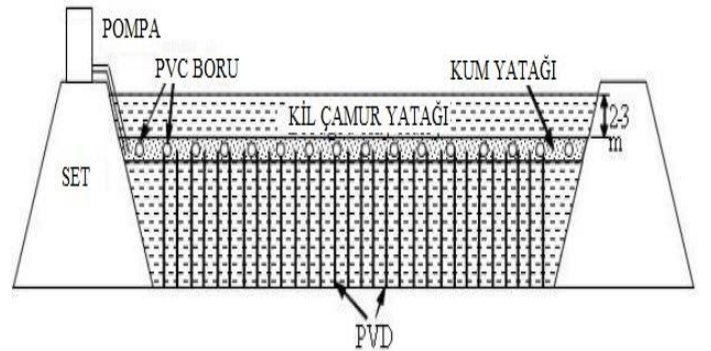
Şekil 7. Denizde yapılan iyileştirmede yatay drenlerin yerleştirilmesi. (Yan ve diğ.,2009)

### 2.2.3. Vakum ile Ön Yükleme

Vakum ile ön yükleme, mevcut zemin kapasitesinin üzerinde yükleme yapabilmek için sıkıştırılabilir zeminin 90kPa kadar vakum basıncı ile ön yükleme yapılması ile elde edilen zemin iyileştirme yöntemidir. Ön yükleme yapılacak zeminlerde dolgu malzemesinin alana getirilmesinin ekonomik olmayacağı durumlarda ve yumuşak, çok yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan alternatif bir yöntemdir. Yan ve diğ. (2009) çalışmalarına göre, yöntemin etkileri boşluk suyu basıncı değerleri kontrol edilerek yapılır. Gerçekleşen konsolidasyon oturması deneyimli kişiler tarafından analiz edilmelidir. Bu yöntem ile dengesizlik potansiyeli olan yükleme ihtiyacı elimine edilir. Oturma oranları ve değerleri kontrol edilebilir. Ön yüklemeye göre zaman tasarrufu sağlar ve bazı durumlarda daha ekonomik olabilir. Griffin ve O' Kelly (2014)' e göre vakum ile ön yükleme doğaya en zararsız zemin iyileştirme metotlarından biridir. 120 günde gerçekleştirilen bir havaalanı uygulamada doğaya ortalama bir m<sup>2</sup> başına 16.3 kg CO<sub>2</sub> gazı salınır. Şekil 8' de yöntemin saha uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 8. Vakum ile ön yükleme uygulaması. (Yan ve diğ., 2009)



Şekil 9. Şematik alan uygulaması. (Chu ve diğ.,2008)

## 2.2.4. Diğer Yöntemler

### 2.2.4.1. Arttırılmış Dren Sayısı ve Vakum ile Dinamik Konsolidasyon

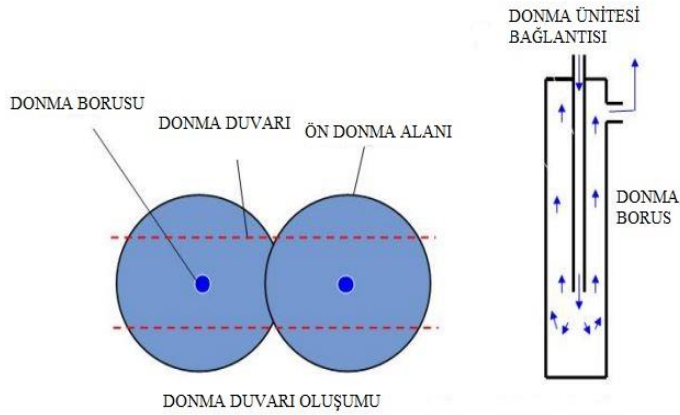
Dinamik konsolidasyona ek olarak yatay ve dikey direnlerin kullanılması ile konsolidasyon sırasında biriken aşırı su basıncının önüne geçilir ve konsolidasyon süreci kısaltılmış olur. Öztoprak (2016) bazı istisnalar haricinde bu yöntem ince tanecikli zeminlerde kullanılabilirdiğinden bahsetmiştir. Ancak çok yaygın bir yöntem değildir.

### 2.2.4.2. Elektro-Osmos veya Elektro Kinetik Konsolidasyon

Zemine yerleştirilen elektrotlar aracılığı ile aktarılan DC akımı sayesinde zemin sularının veya zemin içerisindeki solüsyonların anotlardan katotlara doğru hareket ettirilerek zemin konsolidasyonunun sağlandığı yöntemdir. Akyıldız (2019)'a göre katotlara yerleştirilmiş drenler vasıtası ile boşluklardaki sular dağılır ve bu sayede topraktaki su miktarının azaltılması vasıtası ile daha yüksek kesme dayanımı ve az miktarda sıkıştırılabilirlik sağlanır. Yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir.

### 2.2.4.3. Isıtma ve Dondurma Yöntemi ile Termal İyileştirme

Zeminin fiziksel veya mekaniksel özelliklerinin ısıtılma veya dondurma yolu ile geçici veya kalıcı olarak değiştirilme yöntemidir. Isıtma yöntemi zeminin özelliklerini kalıcı olarak değiştirip daha sert ve dayanıklı zemin elde edilmesini sağlar. Öztoprak (2016) zemin dondurma yöntemi ise geçici iyileştirme yöntemlerinin gerektiği yer altı kazılarında tercih edilen bir yöntemdir olduğundan bahsetmiştir. Maliyetleri çok yüksektir. Şekil 10' da zemin dondurma yöntemi şeması gösterilmiştir. Şekil 11' de ise saha alanındaki uygulaması gösterilmiştir.



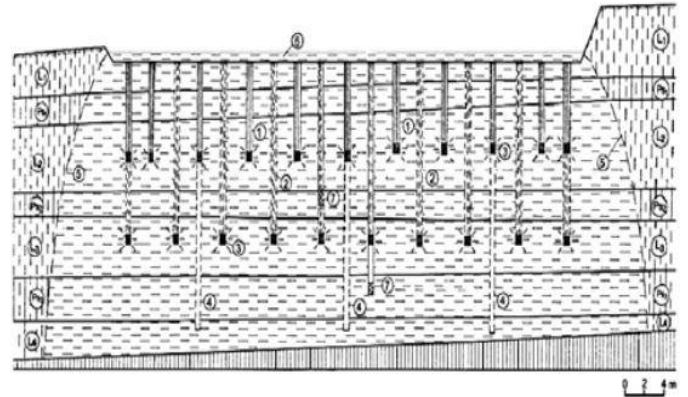
Şekil 10. Şematik Zemin Dondurma Yöntemi. (Yang, 2008)



Şekil 11. Zemin Dondurma Yöntemi Uygulama Alanı. (foam-tech,2008)

### 2.2.4.4. Hidro Patlatma ile Kompaksiyon

Hidro patlatma yöntemi ilk olarak Bulgaristan' da killi ve kumlu balçıktan oluşan nehir yataklarının iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Jefferson ve diğ. (2005)'e göre bu yöntemde sondaj kuyuları kullanılarak zeminin derinliklerine su pompalanması ile zeminin çökmesi sağlanır. Bunun ardından sondaj kuyularına yerleştirilen patlayıcılarla zeminin kompaksiyonu sağlanır. Şekil 12' de balçıklı yumuşak zeminde hidro patlatma yöntemi gösterilmiştir.

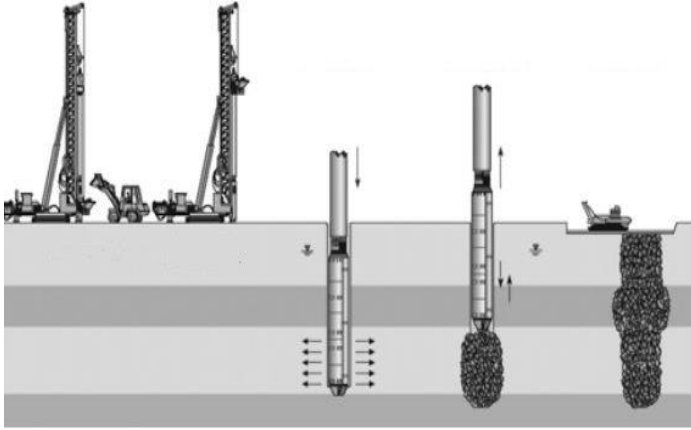


Şekil 12. Balçıklı Alanda Hidro Patlatma Yöntemi. (Jefferson ve diğ., 2005)

## 2.3. Katkı Maddeleri ile İyileştirme

### 2.3.1. Vibro Değiştirme ve Taş Kolonlar

Şekil 13'te şematik olarak görülen taş kolonlar, yumuşak ve gevşek zeminlerin iyileştirilmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Taş kolonlar yardımı ile projeye bağlı olarak zeminin taşıma kapasitesi artırılmakta, oturma süresi azaltılmakta ve deprem sırasında sıvılaşan veya taşıma kapasitesini yitiren zeminler sağlamlaştırılmaktadır. Demiröz ve Karaduman (2009) taş kolonların genellikle yumuşak veya orta katı kil zeminlerde ve iyileştirilecek zeminin 10m derinliği geçmeyen koşullarda tercih edildiğinden bahsetmiştir. Taş kolonlar sayesinde oturma problemi %50-60 oranında azaltılabilmekte taşıma kapasitesi ise çok daha yüksek oranlarda artırılabilir. Taş kolonlar zeminin su jeti ile ve doğrudan delinerek granüler malzemenin yerleştirilmesi sonrası vibrasyon ile sıkıştırılması sonucu elde edilir. Bu yöntemle iyileştirilen zeminlerin vibrasyon etkisi ile sıkıştırılması sağlanarak yoğunluk artışı elde edildiğinden dolayı taşıma gücü, kayma dayanımı ve dren kabiliyetlerinde artış sağlanmaktadır. Taş kolonlar dren özelliği de sergilediği için konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Çok hızlı ve ekonomik bir yöntemdir. Yee ve Aun (2010)' a göre uygulama doğaya en çok CO<sub>2</sub> salınımına sebep olan zemin zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.



Şekil 13. Taş Kolon Uygulamasının Şematik Anlatımı. (Raju ve Sonderman, 2005)

### 2.3.2. Kum Kompaksiyon Kazıkları

Killi ve kumlu zeminlerde özel olarak kullanılabilen kum kompaksiyon kazıkları ilk olarak Japonya' da kullanılmaya başlamıştır ve daha sonra Asya bölgesine yayılarak günümüzde kullanılan yaygın bir yöntemdir. Kum kompaksiyon kazığı gevşek kum tabakalarına zeminin yoğunluğunu arttırmak için çakılan yer değiştirme kazığıdır. İnce kumun sıvılaşma potansiyelini azaltmada yumuşak çökeltilerin, siltlerin taşıma gücünü arttırmada sıklıkla kullanılır. Kum kazıkları, kolay ayrılabilir bir temel plaka ile birlikte kaplama borusu çıkarılarak meydana getirilir. Daha sonra aşamalı olarak kaplama borusunun geri çekilmesi ile boru içindeki kum dolgu malzeme sıkıştırılır. Kum zeminlerde bu etki kum suya tam doymuş veya kuru olduğunda en fazla olur. Kum kazıklarının aralarındaki uzaklık genellikle 1 ile 1,5 m arasında değişir. Demiröz (1992)'e göre kum kompaksiyon kazıkları ince taneli zeminlerde maliyet ve iyileştirme uygunluğu açısından uygun bir metottur. Ayrıca suya doymuş zeminlerde çok etkili bir yöntemdir. Karada olduğu kadar Şekil 14' de görüleceği üzere deniz ortamında da kullanılmaktadır.



Şekil 14. Kum Kompaksiyon Kazıklarının Denizde Yerleştirilmesi. (Kitazume, 2007)

### 2.3.3. Geotekstil ile Güçlendirilmiş Kolonlar

Geotekstiller son yıllarda çok kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Demiröz ve Karaduman (2009)'a göre yumuşak killer üzerine oturan dolguların takviyesinde ve zemin iyileştirmesinde kullanılmaktadır. Zeminin geçirgenliğini azaltmak ve taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Geotekstil ile güçlendirilmiş kolonlar 80 santimetre (cm) çapında çelik gömleğin sürülme veya titreşme vasıtası ile zemine yerleştirildikten sonra oluşturulan sondaj kuyusuna aynı genişlikteki 200-400 kilonewton (kN)/m çekme dayanımına sahip geotekstil "çorabın" yerleştirilip kum ile doldurulması yöntemi ile yapılırlar. Bu yöntemdeki amaç zayıf zemindeki yükün zeminin yapısını bozmadan hafifletmektir. Şekil 15' te geotekstil yöntemi ile yapılmış kolon gösterilmiştir.

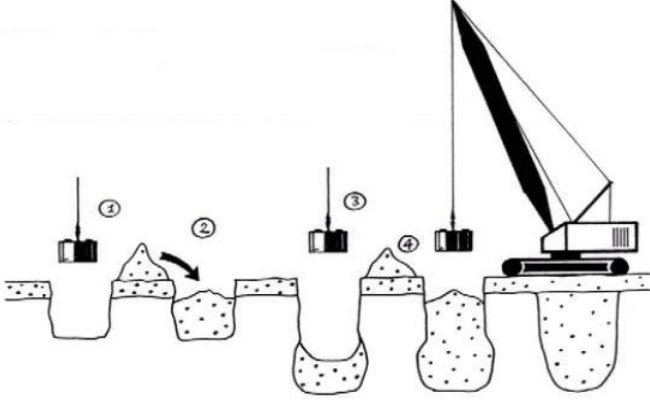


Şekil 15. Tamamlanmış Kolon Görünümü. (Raithel ve diğ., 2005)

### 2.3.4. Diğer Yöntemler

#### 2.3.4.1 Dinamik Değiştirme

Dinamik değiştirme zeminin taşıma kapasitesini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Dinamik değiştirme yönteminde, işlemin uygulanacağı alan üzerine ağırlıkları 15 ile 30 ton arasında değişebilen "Pounder" yüklerin 9m ile 36m arasında değişebilen (zemin durumuna göre) yükseklikten bırakılması ile yapılır. Altun (2010)'a göre bu düşürülen ağırlıklar alana önceden getirilen ve yerleştirilen granüler malzemeyi istenilen derinliğe kadar ulaştırmaya ve sıkıştırmaya zorlar. Bu yöntem sayesinde zemin sağlamlaşır ve drenaj şartlarını iyileştir. Şekil 16' da dinamik değiştirme yönteminin basamakları gösterilmiştir.



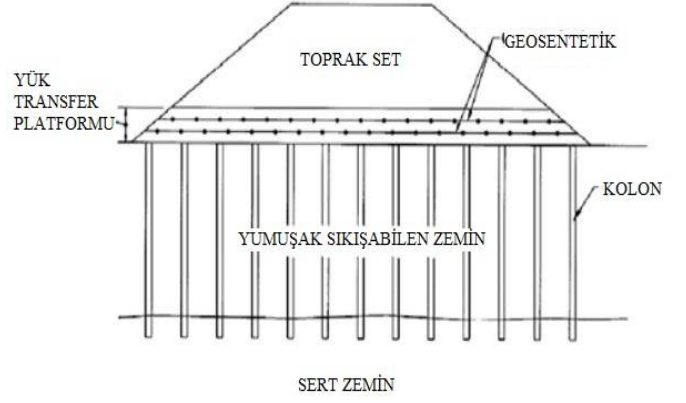
Şekil 16. Dinamik Değiştirme. (Lacazedieu, 2004)

#### 2.3.4.2 Rijit İlaveler

Genel olarak zeminin taşıma gücünü arttırmak ve çökmeyi azaltmak için rijit veya yarı rijit kolon veya nesnelerin zemine sürülmesi vasıtası ile uygulanan iyileştirmedir. Geniş bir bakış açısı ile bakıldığında zaman kum kompaksiyon kazıkları, geotekstil ile güçlendirilmiş kolonlar ve taş kolonlar ile aynı kategoride gözükseler de farklı sınıflandırılmışlardır. Bunun nedeni diğer yöntemlerde kullanılan maddelerin tanecikleri (kum, çakıl, taş) birbirlerinden ayrık durumdadır ve yanal mesnet olmadan tek bir vücut halinde duramazlar. Bal ve Öner (2015)'e göre rijit ilave yöntemi kazıklar ile benzerlik gösterebilir de ekonomik sebeplerden dolayı rijit ilavelerin dayanımı ve direngenliği kazıklara göre daha azdır. Bunun yanında birbirlerinden mekanik olarak ayrılıklar göstermektedirler. Rijit ilaveler zemindeki çökme farklılıklarını ve genel çökmeyi, zayıf yüklerin maruz kaldığı yükleri (%60-90) azaltarak engellemeye çalışır. Kazıklar ise yapıdan aktarılan tüm yükü zayıf zeminin altında bulunan, dayanımı yüksek ve güçlü zemine ileterek iyileştirmeyi sağlarlar.

#### 2.3.4.3. Geosentetiklerle Desteklenmiş Kolonlar ve Kazıklar

Geosentetikler plastik ve cam yününden imal edilen malzemelerdir. Bu ürünler zemin güçlendirmede, erozyon kontrolünde, güçlendirilmiş dolgu duvarlarda, şev kontrolünde, köprü ayaklarında, yol veya tren raylarının inşası esnasında gereken toprak dolguların güçlendirilmesinde kullanılır. Bu yöntemde önceki bölümlerde belirtilen rijit kolonlar, güçlendirilen zemin üzerine geosentetiklerden oluşan ve yük transferini sağlayan platformların inşası ile yapılır. Şekil 17' de geosentetikler ile desteklenmiş zemin iyileştirme yönteminin şeması gösterilmiştir.



Şekil 17. Geosentetiklerle Desteklenmiş Kolon Uygulamasının Şematik Anlatımı. (Collin ve diğ., 2005)

Liu (2009)'ya göre yük transferini sağlayan platform 0.4-1m kalınlığında tek bir veya birden fazla geogridin yatay tabakalar şeklinde sıkıştırılmış, kırılmış veya çakıl arasına yerleştirilmesi ile uygulanır. Şekil 18' de saha uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 18. Platformda Uygulanan Geosentetik. (H.L.Liu, 2009)

Şekil 19' da erozyona uğramış bir köprü dolgusu altında yukarıda anlatılan yöntemin yapısını görebilirsiniz.

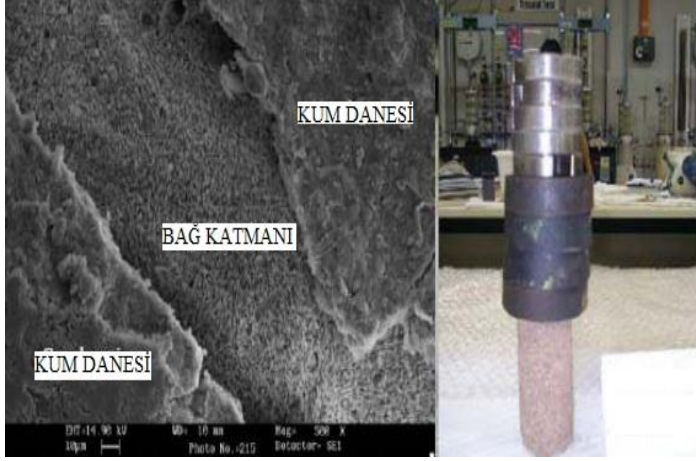


Şekil 19. Erozyona uğramış dolgu. (Huesker,2008)



### 2.3.4.4 Mikrobiyolojik Yöntemler

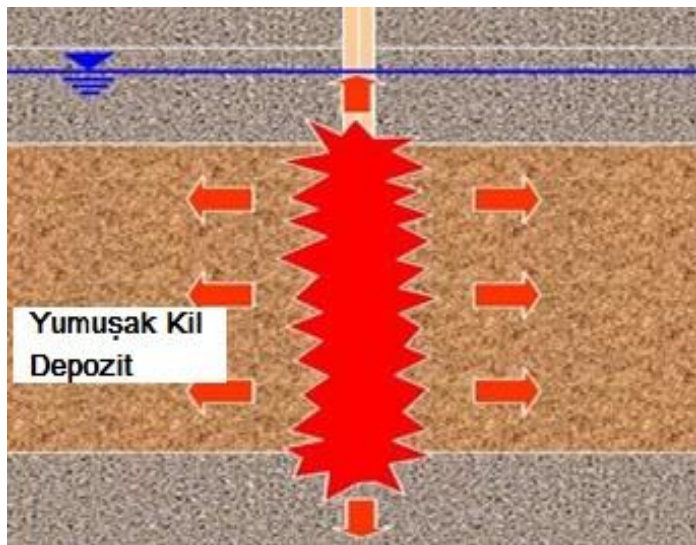
Mikrobiyolojik yöntemler günümüzde yeni olmasına rağmen araştırmacıların ilgisini çeken yöntemlerden biridir. Avrupa araştırma merkezlerinin araştırılmasını teşvik ettiği en önde gelen alanlardan biri durumundadır. Mitchell ve Santamarina (2005) prensipte mikrobiyolojik yöntemlerin, mikro organizmaların zemine karıştırılarak zemin daneleri arasında bağ ve sementasyon oluşturarak kesme ve gerilmenin artırılıp, geçirgenliğin azaltılmasını sağladığından bahsetmiştir. Bu yöntemle ilgili en büyük endişe ise mikro organizmaların salgılayacağı zararlı maddelerin içme suyuna karışıp insan sağlığı için tehlike oluşturmasıdır. Şekil 20' de mikrobiyolojik yöntemin yapısı ve laboratuvar deneyi gösterilmiştir.



Şekil 20. Mikrobiyolojik Yapının Oluşturduğu Yapı ve Bu Yapının Laboratuvar Deneyi. (Mitchell ve Santamarina, 2005)

### 2.3.4.5 Patlatma Yöntemi ile Kum Kazık Çalışması

Patlayıcı madde kullanarak kum kazıkları oluşturulması kullanılan diğer yöntemlerden biridir. Gohl ve diğ. (2000) bu yöntem sondaj kuyularına ardı arkasına dizili birden çok patlayıcının yerleştirilerek birbirlerini tetikleyecek şekilde patlatılması ile kum zeminin sıkışarak iyileştirilmesi ile gerçekleştirilir. Şekil 21' de yöntemin şeması gösterilmiştir.



Şekil 21. Patlayıcı Yönteminin Şematik Anlatımı. (Dembicki ve diğ., 2006)

## 2.4. Harç Türü Katkı Maddesi ile Zemin İyileştirme

### 2.4.1. Mineral Katkılı Harçlar

Ekinci ve diğ. (2020'a) kohesif malzemelerin iyileştirilmesi üzerine yaptığı çalışmada birden fazla mineral katkının zeminde bulunan boşluklardaki su ile reaksiyona girip pelteli (jel) veya katı çökelti oluşturarak zeminin güçlenmesine veya geçirgenliğinin azaltılmasına katkı sağladığını belirtmiştir. Zemin içerisinde oluşan kimyasal reaksiyon yaklaşık olarak 1 yıl süre ile devam eder. Kireç, bu kullanılan mineral harçlardan biri olup, bilinen en eski iyileştirme malzemesidir. Kireç kullanımı toprağın taşıma kapasitesini artırır. Özdemir (1994)'e göre toprağa ilave edilen kireç uzun dönemde toprak aşınımını önler ve toprağın asitlik değerini azaltmasına yardımcı olur. Değişik zemin türüne göre değişik mineral katkı harçlar tercih edilir. Bu mineraller arasında odun külü, bakır cürufu ve uçucu kül yaygın kullanılan malzemelerdir (Ekinci ve diğ 2020b). Mineral katkı harçlar daha yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda özellikle yol inşaatlarında tercih edilmektedir. Aşağıdaki 22. şekilde zemin türüne göre tercih edilen mineral katkı harçlar gösterilmektedir.

Çakıl	Kum		İri Silt	Plastik Olmayan Silt
	İnce	Orta		
			İl	
				Çimento
				Bentonit
				Poliüretan ve Poliakrilamid
				Yüksek Yoğunluklu Silikat
				Düşük Yoğunluklu Silikat
				Aminoplast
				Fenoplast
				Akrilatlar
				Akrilamid
				Sıkıştırılmış Hava

Şekil 22. Zemin Türüne Göre Tercih Edilen Mineral Katkılı Harçlar. (Karol, 2003)

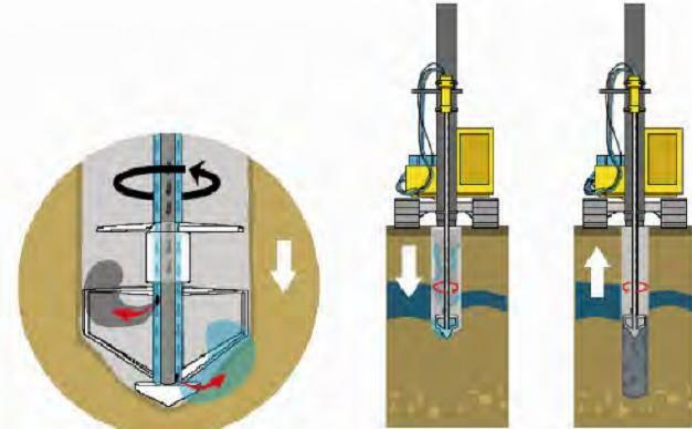
### 2.4.2. Katkı Malzemeleri ile Karıştırma Yöntemi (Derin Karıştırma)

Katkı malzemeleri ile karıştırma tekniği kullanılarak yapılan iyileştirme, yapının zemine kolay uyum sağlanması açısından önemli bir yöntemdir. Katkı maddesi için kireç, çimento, asfalt başta olmak üzere bazı atık malzemelerde kullanılmaktadır. Katkı maddeleri ile atık malzemelerin beraber kullanılması toprağa ve doğaya çok zarar verir. Önalp (1983)'e göre katkı maddeleri etkinlikleri yanında, ucuzluk ve gereksinim duyulduğunda kolayca bulunabilme özelliğine göre belirlenir. Katkı maddeleri zeminde laboratuvar testlerinde çok yararlı görünürken, arazi kullanımında etkin karıştırma güçlükleri, çevre koşulları nedeniyle bu olumlu durumu yitirebilir. Şekil 23'te saha uygulaması görülen çimento ile derin karıştırma yöntemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Karıştırma işlemi isteğe göre sıkıştırma ile veya sıkıştırma yapılmadan uygulanabilir. Zeminin taşıma kapasitesinin artırılması, oturma azaltılması ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması için tercih edilen bir yöntemdir. Su yapılarında da kullanımı giderek artmaktadır. Hafif yapıların temelleri de bu yöntemle sertleştirilebilir.



Şekil 23. Çimento ile Karıştırma Yönteminin Kullanıldığı Alan. (Burgos ve diğ., 2007)

Birçok yöntemde olduğu gibi bu yöntemde de yenilikler ve araştırmalar devam etmektedir. Bu yeniliklerden en yakın zamanda uygulanmaya başlanılan Gunther ve diğ. (2004) ün İsveç' te geliştirdiği Kuru Karıştırma yöntemidir. Şekil 24'te kuru karıştırma yönteminin şeması gösterilmiştir.



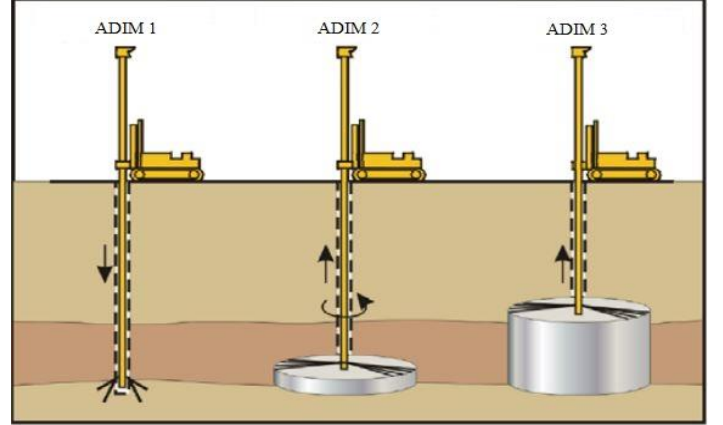
Şekil 24. Kuru Karıştırma Yöntemi Şematik Anlatımı. (Gunther ve diğ., 2004)

Şekil 24'te gözüktüğü gibi araç çubuğu zemine doğru hareket ederken, kılavuz çubuğunun bir boşluğundan su bir diğerinden ise kuru malzeme verilir. Kelly marka Koaksiyal sondaj ekipmanı ile zemin karıştırılır.

#### 2.4.3. Jet Harç Enjeksiyonu

Jet harç enjeksiyonu iyi bir karışım ile homojen bir şerbet haline getirilen çimentonun 90-130 milimetre (mm) çapında tijin zemine itilmesinden sonra yüksek basınçlı (200 bar) harç kullanılarak, toprağın kemirilip yerine 1-1,5 m çapında dairesel kolonların inşa edilmesi aracılığı ile yapılmaktadır. Jet harç metodu tek bir tijle uygulanabilirken iki, üç tij ile uygulanması daha etkili bulunmuştur. Erol ve Bayrama (2018) bahse konu yöntemin birçok zemin türünde uygulanabilir bir yöntem olduğunu söylemiştir. Jet harç enjeksiyonunun uygulanması günümüzde en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi olup, maliyeti düşük, uygulanması kısa ve kolay, mevcudiyeti yeni bir yöntem olması nedeni ile düşüktür. Jet harç enjeksiyonu zeminin taşıma gücünü artırmakta ve oturmaları, sıvılaşma riskini ve geçirirmliliği azaltmaktadır. Harç karışımının hazırlanması, zemin içine enjekte edilmesi tamamen otomatik makineler yardımı ile yapılır. Tecrübeli kişiler tarafından uygulanması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Hanafi ve diğ. (2020)' ne göre 1 kg çimento üretimi için 0.74 kg CO<sub>2</sub> gazı doğaya salınır ve e-ISSN: 2148-2683

çimentonun uygulama alanına nakliyesi başta olmak üzere uygulamanın kendisinde göz önünde bulundurulunca doğaya en çok zarar veren yöntemlerden biridir. Şekil 25'te jet harç enjeksiyonu ile zemin iyileştirme yöntemi gösterilmiştir.

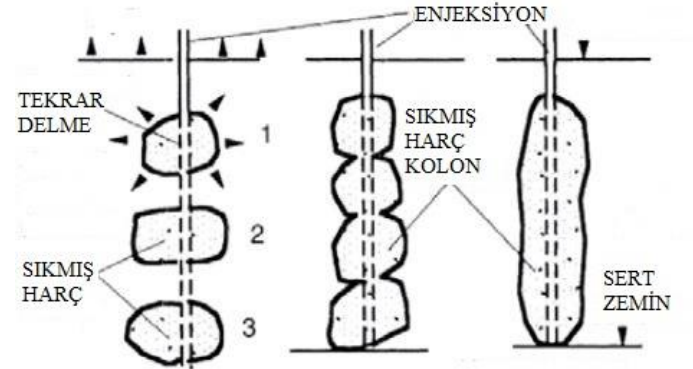


Şekil 25. Süper Jet Yöntemi Şeması. (Welsh ve Burke, 2000)

#### 2.4.4. Diğer Yöntemler

##### 2.4.4.1. Harç ile Kompaksiyon

Harç ile kompaksiyon yöntemi katı harcın yüksek basınç ile birbirinden soyut derinlikteki zayıf zemine pompalanması ile yapılır. Pompalanan harç katılığı dolayısı ile zemindeki boşluklara kaçamayıp homojen bir biçimde kaldığından etrafındaki bölgelerin kontrollü bir biçimde sıkışmasının sağlayıp alüvyon olan zeminleri iyileştirmede kullanılır.



Şekil 26. Harç ile Kompaksiyon Yöntemi. (Woodward, 2005)

Şekil 26. şekilde gözüktüğü üzere harç ile kompaksiyon yöntemi zemine doğru hareket ve zeminden dışarıya doğru hareket olmak üzere iki yöntemle uygulanır. Zeminden dışarıya doğru olan yöntem daha çok tercih edilmektedir.

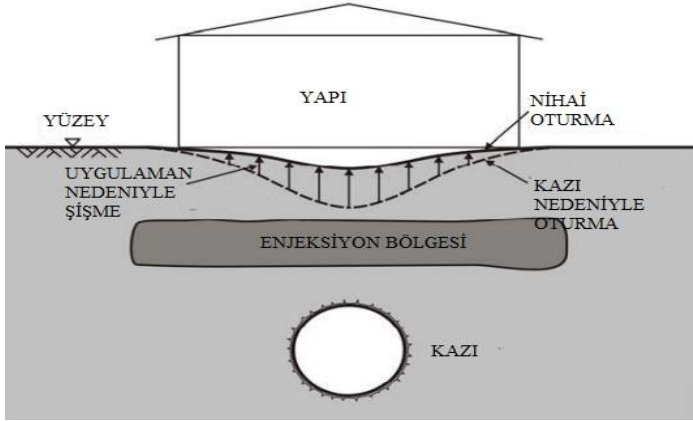
Bu metodun aşamaları aşağıda belirtildiği gibidir.

- Sondaj deliğinin açılıp çelik gömleğin yerleştirilmesi.
- Sıkı harcın kademeli pompalanması
- Kademelerin tamamlanması ile gömleğin çekilmesi.

Woodward (2005) bu yöntemin her türlü granüler, gevşek ve boşluklu dolgu zeminlerde kullanıldığını yazmıştır. Amacı zemindeki sıkışmayı önlemektir.

#### 2.4.4.2. Harç ile Koruma

Harç ile koruma yöntemi yeraltında inşa edilen tünel veya benzeri kazılarda zemin üzerinde bulunan yapıların korunması için geliştirilmiş bir yöntemdir. Prensip gereği gerekli miktarda harç bir önceki belirttiğimiz yöntemlerle kazının yapıldığı bölgenin üzerine pompalanarak, kazıdan dolayı meydana gelecek yapısal zararların veya zeminin çökmesini engellemek için yapıldığı bir yöntemdir. Tünel kazılarında kullanılan tipik kullanım şeması 27. şekilde görülmektedir.



Şekil 27. Harç ile Koruma Yönteminin Tünel Projesinde Uygulanması. (Kummerer,2003)

Harç ile koruma daha çok ince granüllü zeminlerde kullanılan bir yöntem olsa da granüler zeminlerde de başarılı kullanıldığı raporlanmıştır.

#### 2.4.4.3. Biyo Enjeksiyon

Lin ve diğ. (2016)' ne göre biyo enjeksiyon, çevre dostu, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir zemin iyileştirme tekniğidir. Yöntem uygulanırken mikrobik kaynaklı karbonat çökeltisi kullanılır. Daha çok yeni geliştirilen bir enjeksiyon yöntemi olduğundan ülkemizde kullanımı mevcut değildir.

### 2.5. Zemin Takviyesi

#### 2.5.1. Geosentetikler ile Mekaniksel İyileştirme

Önceki yöntemler arasında arkasında büyük bir tarih yatan en önemli yöntemdir. Ekinci ve Ferreira (2012)'de Babilonların milattan önce 3000'li yıllarda hurma dalları kullanıp kil tuğlaları güçlendirdikleri belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada, bahse konu yöntem ile günümüze kadar gelmiş birçok tarihi eser inşa edildiği, bunlar arasında en önemlisinin Şekil 28'de görülen Irak'taki Ziggurat tapınağı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 28. Irak'taki Ziggurat Tapınağı (Hann ve diğ.,2015)

Ekinci ve Ferreira (2012) Babilonlardan sonra Romalıların kereste parçalarını kullanarak istinat duvarları inşa ettiklerini belirtmiştir. Bu yapılar arasında günümüzde görülebilen en önemli eserler ise Londra nehri boyunca inşa edilmiş iskeleler ve İtalya'nın üç büyük nehri olan Tiber'in kıyılarının güçlendirilmesi için inşa edilmiş eserlerdir. Şekil 29' da Londra'da inşa edilmiş istinat duvarı gösterilmiştir.



Şekil 29. Londra İskelesi. (Greater London Industrial Archaeology Society,2017)

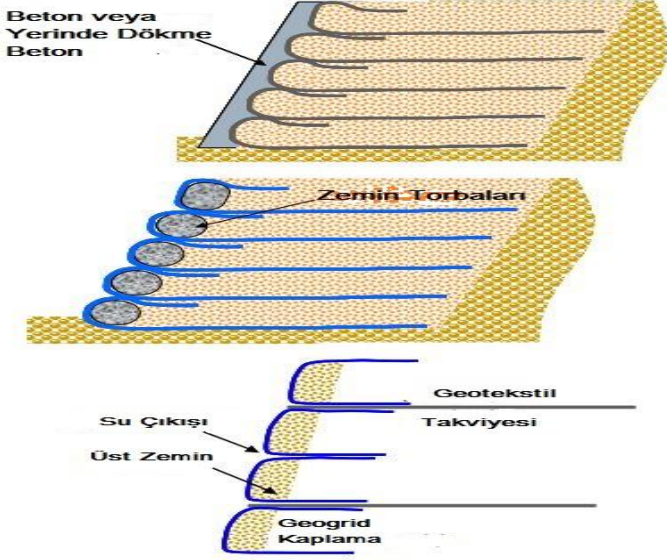
Bu iki ulusu takriben Çinliler ağaç dallarını kil ve çakıl ile karıştırarak Çin Seddi'nin inşasında kullanmışlardır. Şekil 30' da Çin Seddi gösterilmiştir.



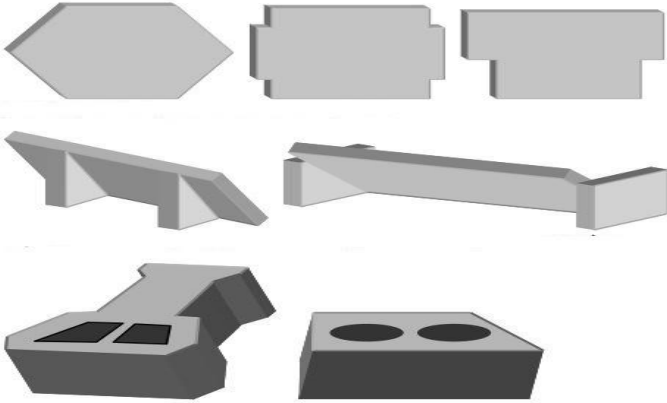
Şekil 30. Çin Seddi (James,2009)

En yakın geçmişte ise (1822) İngiliz Kraliyet ordusu albay Pasley benzer tekniği kullanarak istinat duvarı arkasındaki zayıf zemini çalı, tahta parçaları ve tekstil artıkları ile güçlendirmiştir. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise Vidal tarafından bu konu ile ilgili ilk bilimsel araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Tarihten bu yana zemin iyileştirme yöntemleri arasında en fazla ilgi gösterilen yöntem olmasına rağmen Vidal 'in öngördükleri dışında çok büyük atılım olmamıştır. Yine de gelişen teknoloji analitik ve deneysel çalışmalar ile birleştiği zaman bu yöntem inşaat alanında 20. yüzyılın en önemli yeniliği durumuna gelmiştir. Şekil 31' de yüzeyde kullanılan yeni yöntemler gösterilmiştir.

Günümüzde bu yöntem için dizayn kodları ve standartlar geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. Ekinci ve Ferreira (2012)'ya göre mekaniksel iyileştirme yöntemi yol, temel, zemin dolgu, yol kesitleri veya istinat duvarları için dolgu zeminin çekme dayanımı yüksek olan çelik maddeler veya geosentetikler ile kesme dayanımının artırılması ile yapılmaktadır. Bu kategoriye giren birçok uygulama aşağıdaki şekil 31 ve 32' de gösterilmektedir.



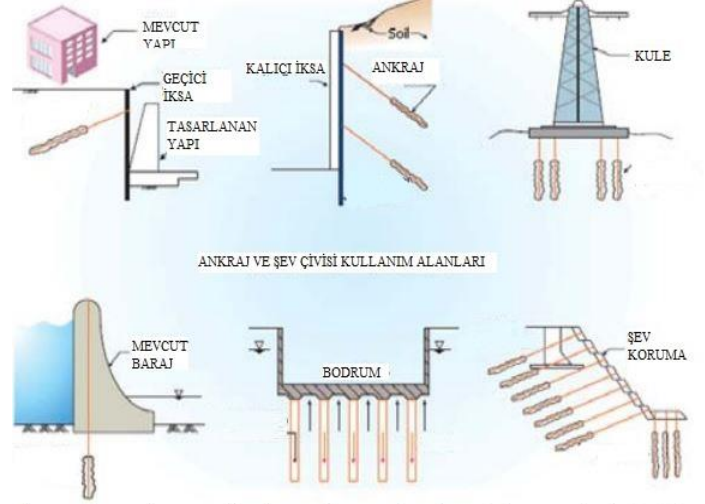
Şekil 31. Yüzeysel Yöntem Örnekleri (Menge, 2007)



Şekil 32. Geosentetik Uygulama Alanları. (Sankey ve diğ. 2008)

### 2.5.2. Zemin Ankortları ve Çivileri

De Cock (2008) zemin ankortları, yerçekimi kullanılarak desteklediği yapıları zemin içerisine yerleştirilen ankortlar sayesinde gerilme gücü kullanılarak zeminin temellerde veya yapılarda oluşturduğu itme veya kaldırma gücüne karşılık eğimler, kuleler, tüneller ve daha birçok yapıda kullanılması vasıtası ile yapılır. Şekil 33'te zemin ankortları ve çivilerinin kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 33. Zemin Ankortları ve Çivilerinin Kullanım Alanları. (De Cock, 2008)

Zemin çivileri, zemin ankortları ile aynı görevi görürler ancak bunlar daha önceden açılmış sondaj kuyularına harç ile tutturulurlar. Bir diğer farklılıkları ise ankortlara göre daha kısa ve daha küçük oluşlarıdır. Ayrıca ankortlar yerleştirildikten sonra ön gerilmeye tabi tutulurlar.

### 2.5.3. Biyolojik Yöntemler

Bahse konu problemleri alan ekilen bitkiler vasıtası ile zemin içerisinde gelişen köklerle zayıf zeminlerin erozyonu engellenir. Buna ek olarak zemindeki suyu çeken bitkiler toprağın emme gücünü artırıp yerinde durmasını sağlar. Vegetasyonun sağladığı bu katkılar sayesinde eğimi az veya dayanıklılığı yüksek olan zeminlerin iyileştirilmesi sağlanır

## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Metotlar kısmında açıklanan ve ülkemizde uygulanabilir olmasına göre bilgileri kaynaklar doğrultusunda sağlanabilen zemin iyileştirme yöntemleri, yukarıda aktarılan bilgiler dahilinde ve sahada zeminin sağlaması gereken koşulların önem sırasına göre, aşağı kısımda yıldız sistemi ile önem sırasına göre etkinlik ölçeklendirmesi yapılmış (tablo1) ve bu ölçeklendirme kriterlerine göre hangi iyileştirme metodunun hangi koşula göre seçileceğine yardımcı olmak amacı ile bir değerlendirme ölçeği hazırlanmıştır (tablo2). Hazırlanan bu tablonun amacı, uygulanacak zemin iyileştirme metodunun saha şartları ve zemin türüne göre daha doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Tablo 1'in ilk kısmı iyileştirme yöntemlerinin, zeminin hangi özelliğini iyileştirirken daha etkin olmasına göre üç yıldız uygun, iki yıldız orta uygun, bir yıldız az uygun ve uygun değil şeklinde sınıflandırılmıştır. Yöntemin kullanım sıklığı, uygulama süresi, maliyeti ve kontrol gerekliliği ise üç yıldız yüksek, iki yıldız orta ve tek yıldız az olmak üzere sınıflandırılmaya alınmıştır.

Tablo 2 de zemin iyileştirme çalışması ile elde edilmek istenilen önceliklere göre bu yöntemler yetkili kişiler tarafından değerlendirilip hangi iyileştirmenin uygulanacağına karar verme aşamasında bu sonuçların yardımcı olması hedeflenmiştir.

Örneğin tablo 2'de görüldüğü üzere taş kolonlar kohezyonsuz zeminlerde yüksek uygulama sıklığına sahipken kohezif zeminlerde de kullanımı mevcuttur. Zeminin taşıma kapasitesini yüksek miktarda iyileştirdiği gibi orta etkinlik seviyesinde

oturmaları önleyip az etkinlik seviyesinde ise sıvılaşmayı önlemektedir. Kullanım sıklığı yaygın olan taş kolonlar istinat yapılarında geçirimsizliği önlemekte kullanılmamaktadırlar.

Tablo 1. Yıldız sistemine göre zemin iyileştirme ölçeklendirilmesi

Sembol	Oturma, Sıvılaşma, Geçirim	Kohezif, Kohezyonsuz	Kullanım Sıklığı	Uygulama Süresi	Maliyet	Kontrol Gerekliği	Sürdürülebilirlik
	<i>Problemlerini iyileştirmeye uygun</i>	<i>Zeminlerinde kullanımı uygun</i>					
***	Yüksek		Yüksek				
**	Orta		Orta				
*	Az		Az				
-	Uygun değil		Bilinmiyor				

Tablo 2. Zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu

Sınıflandırma	Yöntemler	Zemin		AMAÇ					Kullanım Sıklığı	Uygulama Süresi	Maliyet	Kontrol Gerekliği	Sürdürülebilirlik	
		Kohezif	Kohezyonsuz	Taşıma Kapasitesi	Oturma	Sıvılaşma	Geçirimsizlik	İstinat Yapıları						
2.1.	Dinamik Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	**	*	***	*	Şengezer, 2010. Yee ve Aun, 2010.
	Vibro Kompaksiyon	-	***	***	**	**	-	-	**	*	**	***	*	Demiröz ve Karaduman, 2009. Yee ve Aun, 2010.
	Patlatma ile Kompaksiyon	**	***	**	**	**	-	-	*	*	*	***	*	Tumluer, 2006.
	Yüzey Kompaksiyonu	**	**	***	**	-	**	-	***	***	**	***	*	Özaydın, 1999. Pengthamkeerati ve diğ., 2005.
2.2.	Hafif Madde ile Yer Değiştirme	***	-	**	**	-	-	-	**	**	*	*	*	Altun, 2010. Yee ve Aun, 2010.

	<b>Yatay Direnler ile Önyükleme</b>	***	-	**	***	-	-	-	*	***	**	**	**	Şengezer, 2010. Yee ve Aun, 2010.
	<b>Vakum ile Önyükleme</b>	***	-	***	***	-	-	-	*	**	**	**	***	Cui Yan ve diğ., 2010. Griffin ve O' Kelly, 2014
2.3.	<b>Taş Kolonlar</b>	**	***	***	**	**	-	-	***	*	*	*	*	Demiröz ve Karaduman, 2009. Yee ve Aun, 2010.
	<b>Kum Kompaksiyon Kazıkları</b>	***	***	***	*	***	-	-	*	**	**	**	-	Demiröz, 1992.
	<b>Geotekstil ile Güçlendirilmiş Kolonlar</b>	***	-	***	*	-	-	-	*	**	**	**	-	Demiröz ve Karaduman, 2009.
2.4.	<b>Katkı Maddeleri ile (Derin) Karıştırma</b>	***	***	***	**	**	**	-	*	*	**	**	*	Önalp, 1983.
	<b>Jet Harç Enjeksiyonu</b>	**	***	***	**	***	**	-	***	*	*	**	*	Erol ve Bayram, 2008. Ekinci ve diğ., 2020.
2.5.	<b>Geosentetikler ile Mekaniksel İyileştirme</b>	**	***	**	*	-	-	***	**	***	**	*	-	Ekinci, Ferreire, 2012.
	<b>Zemin Ankör ve Çivileri</b>	**	**	*	*	-	-	***	***	***	***	**	-	De Cock, 2008.

## 4. Teşekkür

Bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde yardımcı olan meslektaşlarımıza ve kaynaklarını kullandığımız tüm yazar ve araştırmacılara teşekkür ederiz.

## 5. Kaynakça

- Akyıldız, H. (2019). Elektroosmoz ve Isıl İşlemler Yöntemleri Zeminlerin İyileştirilmesi ve Stabilizasyonu. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10 (3), 1137-1144. DOI: 10.24012/dumf.562993
- Altun, S. (2010). Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri. Ege Üniversitesi, İMO.
- Bal, E., Öner, L., Çetin, K. (2015). Darbeli Kırmataş Kolonlar ile İyileştirilen Atıksu Arıtma Tesisi Sahasında Oturma Davranışının Gözlemlenmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, 26-27 Kasım 2015, Adana.
- Bergado, D. T., & Lorenzo, G. A. (2005). A full-scale study on cement deep mixing in soft Bangkok clay. In Elsevier Geo-Engineering Book series (Vol. 3, pp. 305-325). Elsevier.
- Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996). Soft ground improvement in lowland and other environments. ASCE.
- Bildik, S. 2017. Zemin İyileştirme Yöntemleri. İstanbul.
- Burgos, M., Samper, F., & Alonso, J. J. (2007). Improvements carried out in very soft dredged mud soil in the port of Valencia (Spain). In Proceedings of the 14th European Conference SMGE, Madrid, Spain (Vol. 4, pp. 2091-2103).
- Chu, J., Bo, M. W., & Arulrajah, A. (2009). Soil improvement works for an offshore land reclamation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 162(1), 21-32.
- Chu, J., Low, B. K., & Choa, V. (2003). Soil improvement: Prefabricated vertical drain techniques. Thomson Learning Asia.
- Chu, J., Yan, S., & Indrarana, B. (2008). Vacuum preloading techniques—recent developments and applications. In GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation (pp. 586-595).
- Collin, J. G., Han, J., & Huang, J. (2005). Geosynthetic reinforced column support embankment design guidelines. In Proceedings, the North America Geosynthetics Society Conference (pp. 1-15).
- Cui, X. (2010). Real-time diagnosis method of compaction state of subgrade during dynamic compaction. Geotechnical Testing Journal, 33(4), 299-303.
- De Cock, F. (2008). Ground anchors: overview of types, installation methods and recent trends. Proc. Int. Symp. On Ground Anchors, 1, 14.
- Demiröz, A. (1992). Zemin İyileştirme Metotları. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Demiröz, A., & Karaduman, M. (2009). Zemin İyileştirme Metotları. Selçuk-Teknik Dergisi, 8(3), 176-192.
- Ekinci, A., Hanafi, M., & Aydin, E. (2020a). Strength, Stiffness, and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay. Minerals, 10(9), 796.
- Ekinci, A., Scheuermann Filho, H. C., & Consoli, N. C. (2020b). Copper slag-hydrated lime-Portland cement stabilised marine-deposited clay. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 1-13.
- Ekinci, A. (2019). Effect of preparation methods on strength and microstructural properties of cemented marine clay. Construction and Building Materials, 227, 116690.
- Ekinci, A., & Ferreira, P. M. V. (2012). Effects of fibre reinforcement in the shrinkage behaviour of compacted clay. 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Erol, O., Bayram, Z. (2018). Jet Enjeksiyon Yöntemi. Ankara. Foamtech Insulation Solutions. (2008). Distribution & Fabrication of Specialist Thermal Insulation Products. <https://www.foam-tech.co.uk>
- Gohl, W. B., Jefferies, M. G., Howies, J. A., & Diggle, D. (2000). Explosive compaction: design, implementation and effectiveness. Geotechnique, 50(6), 657-665.
- Greater London Industrial Archeology Society. (2017, Feb 22). Plans For Regent's Wharf. <http://friendsofregentscanal.org/features/property-devt/Kings-Cross/Regents-Wharf/GLIAS-objection.html>
- Griffin, H., & O'Kelly, B. C. (2014). Sustainability of combined vacuum and surcharge preloading. In Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability (pp. 3826-3835).
- Gunther, J., Holm, G., Westberg, G., & Eriksson, H. (2004). Modified Dry Mixing (MDM)—a new possibility in Deep mixing. In Geotechnical Engineering for Transportation Projects (pp. 1375-1384).
- Hanafi, M., Aydin, E., & Ekinci, A. (2020a). Engineering Properties of Basalt Fiber-Reinforced Bottom Ash Cement Paste Composites. Materials, 13(8), 1952.
- Hanafi, M., Ekinci, A., & Aydin, E. (2020). Triple-Binder-Stabilized Marine Deposit Clay for Better Sustainability. Sustainability, 12(11), 4633.
- Hann, G., Dabrowska, K., & Townsend-Greaves, T. (2015). Iraq: The Ancient Sites and Iraqi Kurdistan. Bradt Travel Guides.
- Holtz, R.D., Jamiolkowski, L.R., & Pedroni, R. 1991. Prefabricated Vertical Drains: Design & Performance. CIRIA Ground Engineering Report, Butterworth-Heinemann Ltd., London.
- James, K. (2009). Great Wall of China.
- Jefferson, I., Rogers, C., Evstatiev, D., & Karastanev, D. (2005). Treatment of metastable loess soils: Lessons from Eastern Europe. In Elsevier geo-engineering book series (Vol. 3, pp. 723-762). Elsevier.
- Karol, R. H. (2003). Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded (Vol. 12). Crc Press.
- Kitazume, M. (2005). The Sand Compaction Pile Method, Port and Airport Research Institute, Yokosuka, Japan.
- Kitazume, M. (2007). Design, execution and quality control of ground improvement in land reclamation. In Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Kolkata (pp. 135-149).
- Kummerer, C. (2003). Numerical modelling of displacement grouting and application to case histories. Doktora Tezi, Graz Teknik Üniversitesi.
- Lin, H., Suleiman, M. T., Jabbour, H. M., & Brown, D. G. (2018). Bio-grouting to enhance axial pull-out response of pervious concrete ground improvement piles. Canadian Geotechnical Journal, 55(1), 119-130.
- Liu, H. L., Chu, J., & Ren, Z. (2009). New methods for measuring the installation depth of prefabricated vertical drains. Geotextiles and Geomembranes, 27(6), 493-496.

- Lomize, G. M., Kirillov, A. A., Semushkina, L. A., Kirillov, Y. A., & Abramkin, A. V. (1973). Tests of application of the electric spark method for compaction of the subsiding loess soils. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, 6, 22-25.
- Menge, P. (2007). Surface compaction of hydraulic fills of limited thickness. In Presentation made at TC 17 Workshop at 14ECSMGE, Madrid (pp. 24-27).
- Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement state-of-the-art report [C]. In Proceedings 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 509-521). Balkema.
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(10), 1222-1233.
- Önalp, A. (1985). Samsun Liman Sahasında Dinamik Konsolidasyon Uygulaması. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 8.Teknik Kongresi*, p. 189-208, Ankara.
- Özaydın, K. (1999). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi. İstanbul.
- Özdemir, N. (1994). Kirecin giderilmesinin toprağın aşınmaya karşı duyarlılık parametresi üzerine etkisi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2).
- Öztoprak, S. (2016). *Zemin İyileştirilmesi Yöntemlerine Genel Bir Bakış*. İMO İstanbul Karaköy.
- Pengthamkeerati, P., Motavalli, P. P., Kremer, R. J., & Anderson, S. H. (2005). Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and applications of poultry litter. *Agriculture, ecosystems & environment*, 109(1-2), 75-86.
- Rahardjo, P. P. (2005). The use of bamboo and bakau piles for soil improvements and application of pile raft system for the construction of embankment on peats and soft soils. In Elsevier Geo-Engineering Book Series (Vol. 3, pp. 899-921). Elsevier.
- Raithel, M., Kirchner, A., Schade, C., & Leusink, E. (2005). Foundation of constructions on very soft soils with geotextile encased columns-state of the art. *Innovations in Grouting and Soil Improvement*, 1-11.
- Raju, V.R., & Sondermann, W. (2005). Application of the vacuum preloading method in land reclamation and soil improvement projects. Chapter 21, *Ground Improvement - Case Histories*. B. Indraratna & J. Chu (Eds.), Elsevier, 601-638.
- Sankey, J.E, Bailey, M.J. & Chen, B. (2008). SeaTac third runway: Design and performance of MSE tall wall. *New Horizons in Earth Reinforcement – Otani, Miyata & Mukunoki (eds)*, Taylor & Francis: 151-156.
- Slocombe, B.C. (2004). Dynamic compaction. In M.P.Moseley & K. Kirsch (Eds.), *Ground improvement*, 2nd Ed.: Spon Press.
- Smoltzyk, U. (2003). Ground dewatering. *Geotechnical Engineering Handbook – Volume 2: Procedures*, Ernst and Son Verlag, Germany, 365-398.
- Şengezer, L. (2010). *Granüler Zeminlerde Dinamik Kompaksiyon Uygulaması*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Terashi, M., & Juran, I. (2000). Ground Improvement-State of the Art, *Proceedings of GeoEng2000*. Melbourne, Australia. 1: 461-519.
- Topolnicki, M. (2004). Insitu soil mixing. In M. P.Moseley & K.Kirsch (Eds.), *Ground improvement*, 2nd Ed.: Spon Press.
- Tumluer, G. (2006). *Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.
- Tunçdemir, F. (2004). *Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi*. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430.
- Van Impe, W. F. (1989). *Soil improvement techniques and their evolution*: Taylor & Francis.
- Wehr, J. (2007). *Vibro Compaction of reclaimed land*, TC 17 Workshop at 14ECSMGE, Madrid, 27 Sept.
- Welsh, J. P., & Burke, G. K. (2000). Advances in grouting technology. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Wong, P. K., & Lacazedieu, M. (2004). Dynamic Replacement Ground Improvement–Field Performance Versus Design Predictions for the Alexandria City Centre Project in Egypt. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering*, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004 (pp. 1193-1204). Thomas Telford Publishing.
- Woodward, J. (2005). *An introduction to geotechnical process*: Taylor & Francis.
- Woodward, J. (2005). *An introduction to geotechnical processes*. CRC Press.
- Yan, S. W., & Chu, J. (2005). Soil improvement for a storage yard using the combined vacuum and fill preloading method. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 1094-1104.
- Yang W.W.& Chen, S., (2008). Three-dimensional Mechanical Analysis of Artificial Ground Freezing Method in Cross-adit Construction [J]. *Tunnel Construction*, 3.
- Yee, K., & Aun, O. T. (2010). *Ground Improvement—A Green Technology towards a Sustainable Housing, Infrastructure and Utilities Developments in Malaysia*. *Geotechnical Engineering*, 41(1), 123.