

## Bölüm

# PROBLEMLİ ZEMİNLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER, KULLANIM KOŞULLARI, AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

# 7

Yasemin ASLAN TOPÇUOĞLU <sup>1</sup>  
&  
Zülfü GÜROCAK <sup>2</sup>

**bu bölümden alıntı yapmak için:**

Aslan Topçuoğlu, Y. & Gürocak, Z. (2022). *Problemlı Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanılan Yöntemler, Kullanım Koşulları, Avantaj ve Dezavantajları*. İ. Çetiner (Ed.), Fen Bilimleri ve Mühendislik Araştırmaları: Faydacı Yaklaşımlar (s. 109-160). Klaipeda: SRA Academic Publishing.

<sup>1</sup> 0000-0002-3135-5926, Dr., Fırat Üniversitesi, yaslan@firat.edu.tr

<sup>2</sup> 0000-0002-1049-8346, Prof. Dr., Fırat Üniversitesi, zgurocak@firat.edu.tr



## **GİRİŞ**

Doğal zeminler her zaman mühendislik açısından dayanımı yüksek, deformasyona dirençli, taşıma gücü yüksek, deprem, sel, heyelan gibi doğal afetlerde zarar görmeyecek şekilde mühendislik özelliklerine sahip olmazlar. Bazı zeminler mühendislik çalışmalarına uygun özelliklere sahip iken, problemlı zeminler olarak tanımlanan, suya doymuş yumuşak killer ve gevşek kumlar, non plastik siltler, yarı doymuş yüksek plastisiteli killer, aşırı konsolide killer, non plastik dispersif killer ve siltler ile organik zeminler yüksek su emme kapasitesine, düşük taşıma gücüne, yüksek sıkışabilirliğe ve sıvılaşılabılme özelliğine sahiptirler. Bu nedenle mühendislik çalışmalarının yapıldığı alanlarda bu tip zeminler istenmezler ve bu durumlarda farklı zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak zeminin geoteknik özellikleri iyileştirilmeye çalışılır. Zemin iyileştirmesi, zeminlerin belirli özelliklerinin hedeflenen bir mühendislik uygulamasına yönelik olarak, mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal gibi yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Uygun olmayan zemin şartlarında bir proje yapmak gerektiğinde zeminlerin değiştirilmesi veya inşaat alanının değiştirilmesi de çözümler arasındadır (Özaydın, 2012). Ancak, bu çözümler her zaman mümkün değildir ve zemin iyileştirmesi sıklıkla başvurulmuş çözümdür. Zeminler kullanım amacına uygun olarak istenilen özelliklere sahip olacak şekilde iyileştirilebilirler. Bunun için farklı zemin iyileştirme yöntemleri bulunmakla birlikte, son yıllarda geleneksel yöntemlere alternatif olan yeni yöntemler veya malzemeler de geliştirilmekte, başarılı sonuçlar veren yöntemler ise geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışma, günümüzde mühendisler tarafından zemin iyileştirme amacıyla tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasını, kullanım alanlarını ve sınırlamalarını içermektedir.

## **ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNE GENEL BİR BAKIŞ**

Geoteknik çalışmaların önemli bir bölümünde mühendislik çalışmasının gerçekleştirileceği alandaki zeminin mühendislik özellikleri tasarımı karşılayabilecek seviyede olmayabilmektedir. Bu tür durumlarda başvurulmuş en yaygın çözüm ise zeminin iyileştirilmesidir. Zeminin özelliklerinin yeterli olmadığı durumda yapılabilecekleri şu şekilde sıralamak mümkündür;

1. Proje alanının değiştirilmesi
2. Proje tasarımının problemlı zemine göre revize edilmesi
3. Problemlı zeminin projeye uygun zemin ile değiştirilmesi
4. İyileştirme yöntem veya yöntemleri kullanılarak problemlı zeminin iyileştirilmesi

Bu seçenekler içerisinde günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem olan zemin iyileştirme kavramı, zeminin dayanımını ve kayma direncini artırmak, hacimsel değişim kabiliyetini ve geçirimsizliğini azaltmak için yapılan işlemler olarak tanımlanmaktadır (Aytekin, 2004). Ayrıca, oluşacak oturmaları azaltmak, taşıma gücünü arttırmak, şişme ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak, atık malzemelerin değerlendirilmesine ve atıkların depolanmasına imkan sağlamak ve drenaj amaçlı farklı uygulamalar içinde zemin iyileştirilmesi yapılmaktadır.

Bu seçenekler irdelendiğinde, proje sahasının değiştirilmesi her zaman mümkün olamamakta ve dolayısıyla bu yöntem sıklıkla tercih edilememektedir. Problemlı zemin dikkate alınarak kazık veya radye temel gibi temel tiplerinin tercih edilerek projenin tasarlanması çoğu durumda problemlı zeminde projenin gerçekleştirilmesine imkan tanımakla birlikte, bazı durumlarda yapılan bu geoteknik tasarımlar yeterli olmamakta ve projenin gerçekleştirilmesinde önemli sıkıntılar yaşanabilmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemlerinden en eski ve en basit olanı problemlı zeminin kazılıp tamamen kaldırılması ve yerine yeterli mühendislik özelliğine sahip malzemeler sıkıştırılmasıdır. Ancak bu yöntem yeraltı su seviyesi üzerinde gerçekleştirilebilmektedir ve pratikte uygulanabilirliği düşük, aynı zamanda ekonomik olmayan bir yöntemdir (Genç, 2011).

Günümüzde problemlı zeminlerden kaynaklanan sorunların ortadan kaldırılması konusunda birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Japan International Cooperation Agency (JICA) (1994) tarafından önerilen sınıflamada, yöntemin uygulanacağı zeminin türünü dikkate alarak iyileştirme yöntemleri 4 sınıfa ayırmıştır. Bunlar;

1. Killi zeminler için kullanılan yöntemler
2. Kumlu zeminler için kullanılan yöntemler
3. Geçici amaçlar için kullanılan yöntemler
4. Diğer yöntemlerdir.

Varaksin (2010) ise yöntemin uygulanabileceği zemin türünü ve zemine katkı katılıp katılmayacağını dikkate alarak, iyileştirme yöntemlerini,

1. Kohezif olmayan zemin veya dolgu malzemeleri için katkı malzemesi kullanılmadan yapılan zemin iyileştirme yöntemleri,
2. Kohezif zeminlerde katkı malzemesi kullanılmadan yapılan zemin iyileştirme yöntemleri,
3. Katkı malzemesi kullanılarak yapılan zemin iyileştirme yöntemleri,
4. Enjeksiyon tipi katkıları kullanılarak yapılan zemin iyileştirme yöntemleri,
5. Donatılarak yapılan zemin iyileştirme yöntemleri

şeklinde 5 gruba ayırmıştır.

Hausmann (1990) ise;

1. Mekanik iyileştirme yöntemleri
2. Hidrolik iyileştirme yöntemleri
3. Fiziksel ve kimyasal yöntemler
4. Isıl yöntemler
5. Donatılandırma

olmak üzere 5 grup önermiştir.

Mekanik iyileştirme olarak adlandırılan yöntemde herhangi bir katkı maddesi kullanmadan ve zemin kütlesinde kimyasal herhangi bir reaksiyon oluşturmada zemin mekanik olarak sıkıştırılarak özellikleri iyileştirilir. Hidrolik iyileştirmede, zemin içerisindeki su çeşitli yöntemler ile drene edilmekte ve proje sahasındaki yeraltı suyu seviyesi düşürülmek suretiyle zeminin su içeriğinde azalma sağlanmakta, böylece mühendislik özelliklerinin iyileşmesi amaçlanmaktadır. Fiziksel iyileştirme, problemlı zemini iyileştirmek amacıyla zemine yapılan enjeksiyon çalışmaları ile gerçekleştirilmektedir. Kimyasal olarak yapılan iyileştirme çalışmalarında zemine katkı maddeleri (çimento, kireç, bitüm, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, reçine vb.) eklenerek, zeminde kimyasal bir reaksiyon olan puzolanik reaksiyon oluşturulmakta ve böylece zemin istenilen özelliklere uygun hale getirilmektedir. Isıl işlemlerde ise zemin ısıtılarak kurutulmakta veya dondurulmaktadır. Donatı kullanarak yapılan iyileştirmede ise zemine eklenen ve adhezyon ve/veya sürtünme kuvvetleri ile zeminde etkileşimde olan ve çekme gerilmelerine karşı koyabilen bir malzeme kullanılarak zemin güçlendirilmektedir. Zemin içerisine donatı olarak katılan fiber, çubuk, ağ veya şerit ile zeminin dayanımı artırılabilir.

Zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla yapılacak olan çalışmaların başarısı zeminin türüne, iyileştirmenin amacına, kullanılan malzeme, araç ve gereçlere, yöntemlerin uygulama derinliğine, performansına, avantaj ve dezavantajlarının dikkate alınmasına ve maliyetine göre en uygun yöntemin seçimine bağlıdır (Özaydın, 2011). Yöntemin seçimi, projelendirilmesi ve uygulanması, bu konuda yeterliğe sahip mühendislerin varlığı ile mümkündür. Geoteknik uygulamalarda mühendisler için yardımcı bir kaynak olarak hazırlanan bu çalışma kapsamında, zemin iyileştirme yöntemlerinin ana prensipleri, uygulamaları, avantaj ve dezavantajları hakkındaki bilgiler alt bölümlerde verilmiştir.

### **Mekanik İyileştirme Yöntemi**

Kompaksiyon olarak da adlandırılan mekanik iyileştirme, zeminin dış yükler ile sıkıştırılmasıdır. Bu yöntemde farklı araçlar kullanılarak, zemine farklı şekillerde ani olarak ağır yüklemeler yapılmaktadır veya zemin bir ağırlıkla ezilerek danelerin birbirine yaklaşması ile bir araya gelmesi ve

zemindeki hava hacminin azaltılması sonucunda zeminin sıkışması sağlanmaktadır. Yüzeysel mekanik iyileştirmelerde statik, titreşimli veya darbeli silindirler, daha derindeki zeminlerde yapılacak olan mekanik iyileştirmelerde ise dinamik kompaksiyon, hızlı darbeli kompaksiyon (RIC), vibro kompaksiyon ve taş kolon (vibro yer değiştirme) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu teknikler ile yapılan kompaksiyonun ana amaçları şu şekildedir (Sarsılmaz, 2017);

1. Kayma dayanımını artırmak
2. Sıkışabilirliği ve meydana gelebilecek oturmaları azaltmak
3. Geçirimsizliği azaltmak
4. Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak
5. Şişme ve büzülme kontrol altına almak
6. Zeminin duraylılığını artırmak

Bu iyileştirme yöntemlerinde zemine uygulanan enerji ile zeminin kuru birim hacim ağırlığı ( $\gamma_d$ ) artırılır ve zeminin boşluk hacmi azaltılarak danelerin birbirine yaklaşması sağlanır. Yüzeysel olarak yapılan kompaksiyon çalışmalarında tambur, lastik tekerlekli, keçi ayaklı, hasır, titreşimli tambur gibi farklı tip ve özellikteki silindirler kullanılarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. İyileştirme yapılan derinlik ve kullanılan ekipmana göre günümüzde kullanılan 5 mekanik iyileştirme yöntemi vardır (Hausmann, 1990). Bunlar;

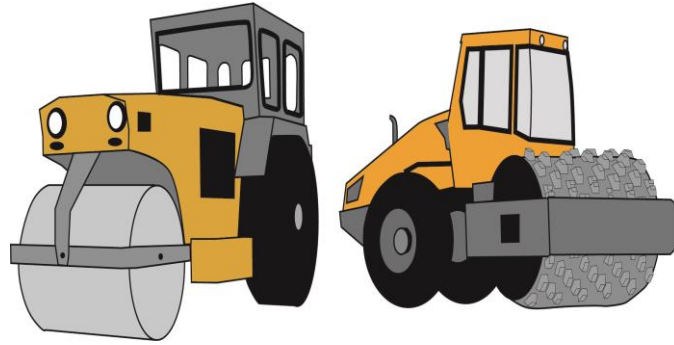
1. Yüzeysel kompaksiyon yöntemi
2. Dinamik kompaksiyon yöntemi
3. Hızlı darbeli kompaksiyon yöntemi
4. Vibro kompaksiyon ve vibroflotasyon yöntemleri
5. Patlatma yöntemi
6. Taş kolon yöntemidir.

### **Yüzeysel Kompaksiyon Yöntemi**

Bu yöntem, zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan en eski ve yaygın yöntemlerden birisidir. Yüzeyseldeki zemine farklı tip ve özellikteki silindirler (Şekil 1) kullanılarak uygulanan statik veya dinamik yükler ile zeminin sıkı hale gelmesi sağlanır. Danelerin birbirine yaklaştırılması sonucu zeminin birim hacim artmasıyla ve böylece zeminin mühendislik özellikleri de olumlu yönde değişmektedir. Statik ve dinamik yükler altında danelerin birbirine yaklaşması birbirlerine göre hareket edebilmeleri ile sağlanmaktadır. Bu ise uygulana yükün şiddetine (kompaksiyon enerjisi) ve doğal su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Doğal su içeriğinin kompaksiyon üzerinde iki farklı etkisi vardır. Doygunluk derecesinin danelerin birbirine yaklaşmasına engel olacak şekilde yüksek olmasına zemindeki su miktarı neden olmaktadır ve bu durum kompaksiyonu güçleştirecektir. Su içeriğinin fazla olması sonucu, boşluklardaki havanın bir kısmı zemin içerisinde hapsedilecek, sıkışan

hava basınç artışı meydana getirecek ve kompaksiyon zorlaşacaktır. Zeminin tamamen suya doymun olması durumunda ise kompaksiyonun gerçekleşmesi mümkün değildir. Çünkü oluşacak boşluk suyu basıncı danelerin birbirlerine yaklaşmasına engel olacaktır. Öte yandan, zemindeki su miktarı danelerin birbirlerine göre hareket edebilmelerini etkilemektedir. Yüksek su içeriğinde daneler arasındaki sürtünme azalacak ve aynı zamanda daneler arası çekim kuvvetleri ve kapiler gerilmeler azalacaktır. Düşük su içeriğinde ise sürtünme ve kapiler kuvvetler ile daneler arası çekim kuvvetleri artacaktır. Kısaca, su içeriği arttıkça danelerin birbirine göre hareketi kolaylaşmakta, ancak birbirlerine yaklaşmaları güçleşmektedir. Bu durumda bahsedilen iki etkinin aynı anda düşürülmesi ile sıkışmanın en iyi şekilde sağlanabileceği görülmektedir. Zeminin su içeriğinin artırılarak kompaksiyonun tekrarlanması durumunda zeminin kuru birim hacim ağırlığının maksimuma ulaştığı değere Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_{dmax}$ ) adı verilir. Zeminin su içeriğinin artırılmaya devam edilmesi durumunda kuru birim hacim ağırlık değeri azalmaya başlar. Kuru birim hacim ağırlık değerinin maksimum olduğu durumdaki su içeriği ise Optimum Su İçeriği ( $w_{opt}$ ) olarak adlandırılır ve zeminin en iyi sıkıştırılabildiği su içeriğini tanımlar (Özyadın, 2011).

Bu yöntem yüzeysel zemin iyileştirmelerinde ve dolgu zeminlerde kullanılabilen bir yöntemdir. Sıkıştırmak istenen zemin öncelikle optimum su içeriğine getirilir ve belli kalınlıklarda serilerek silindirler yardımıyla sıkıştırılır. Böylece, zemini daha sıkı, dayanımlı ve geçirimsiz hale getirmek mümkün olmaktadır.



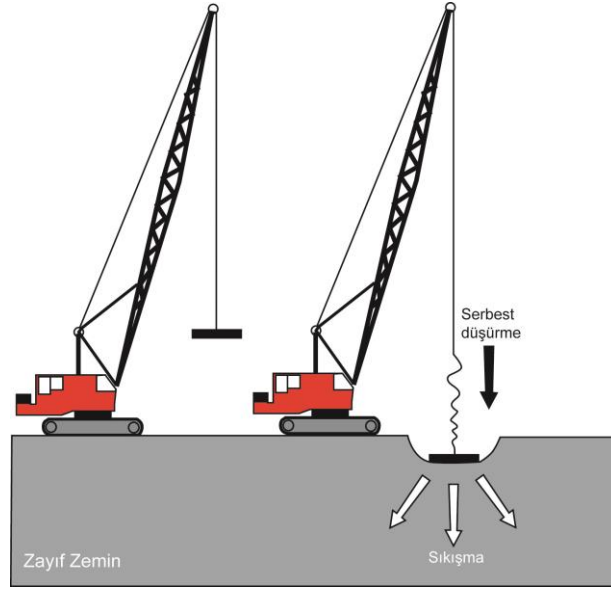
**Şekil 1.** Tambur (a) ve keçi ayaklı (b) silindirler

Bu yöntem ile gerçekleştirilen kompaksiyonun başarısı zeminin granülometrisine, su içeriği ve sıklık derecesi gibi özelliklerine, sıkıştırmada kullanılacak makinenin özelliklerine, sıkıştırılan tabakanın kalınlığına, makinenin geçiş hızı ve titreşim frekansı gibi kompaksiyon yöntemine bağlıdır (Özyadın, 2011).

### **Dinamik Kompaksiyon Yöntemi**

Yüzeysel iyileştirmede kullanılan bir diğer yöntem ise 1960'lı yıllarda ilk kez Louis Menard tarafından bulunan dinamik kompaksiyondur. Dinamik kompaksiyonun amacı, yeraltı suyu seviyesi altında veya üstündeki granüler zeminlerin sıkıştırılarak oturmanın azaltılması, sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesi ve taşıma kapasitesinin artırılmasıdır (Miao et al., 2006). Bu yöntem 5.5 ile 27.5 ton kütledeki ağırlığın 12 ile 30 m yükseklikten iyileştirilecek zemine çok sayıda düşürülmesiyle uygulanmaktadır (Şekil 2). Bir veya daha çok geçişte düşme yükü belli aralıklarla tüm alana uygulanmakta ve her geçişten sonra oluşan çukurların içi granüler malzeme ile doldurulmakta ya da dozer ile düzeltilmektedir (Scombe, 2004). Zemine uygulanan darbeler sonucunda boşluk oranı düşmekte ve zemin yüzeyinde ani bir oturma oluşmaktadır (Durgunoğlu et al., 2002).

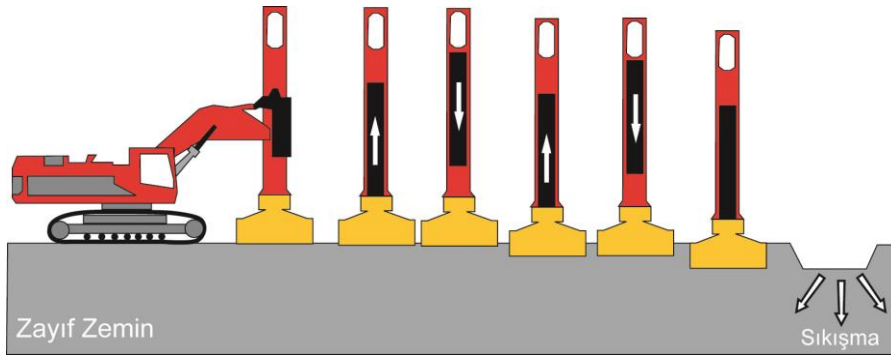
Kohezyonsuz zeminlerde yöntem başarıyla uygulanabildiği gibi kohezyonlu zeminlerde de iyi sonuçlar verebilmektedir. Fakat bu yöntemin kohezyonlu zeminlerde etkili bir şekilde uygulanabilmesi için zeminin yapısını bozacak yeterli enerji ile suyun hareketi ve artan boşluk suyu basıncı için çatlak kanallarının meydana gelmesi gerekmektedir. Dinamik kompaksiyon doymuş haldeki kil, silt veya çakıl, kum gibi çok sayıda zeminde uygulanabilmekle birlikte, zemin içerisindeki ince dane oranının artması sonucunda dinamik kompaksiyonun etkisinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Özellikle doymuş killerde, anlık boşluk suyu basıncının oluşmasıyla hemen hemen hiçbir iyileşme meydana gelmez. Mitchell ve Jardine (2002) 20 kN/m<sup>2</sup> değerinden az drenajsız kayma dayanımı olan killerin bulunması durumunda, dinamik kompaksiyon etkisinin alt tabakalara yeterli oranda iletilmediğini, ayrıca iyileştirilen zeminin altında bulunabilecek karstik boşluklar ve boşluklu zemin sebebiyle, yeterli sıkışmanın yapılamayacağını ve iyileştirmenin stabil olamayacağını belirtmektedirler. Kısmen doymuş killerde ise dinamik kompaksiyon ile yeraltı su seviyesi üzerindeki bölgelerde zeminin iyileştirilmesi mümkün olabilmektedir.



**Şekil 2.** Dinamik kompaksiyon uygulaması

### **Hızlı Darbeli Kompaksiyon Yöntemi**

Yüzeysel kompaksiyonla iyileştirme yapılan seviyelerden daha derin seviyeler ile derin kompaksiyonla iyileştirilen seviyelerden daha sıkı derinlerdeki zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilen Hızlı Darbeli Kompaksiyon (Rapid Impact Compaction) yöntemi, mühendisler tarafından zeminin taşıma gücünü artırmak, aşırı oturmaya azaltmak ve sıvılaşmayı önlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Şekil 3).



**Şekil 3.** Hızlı darbeli kompaksiyon yönteminin uygulanması

Bir inşaat sahasının yakınında mevcut yapısal ve geometrik kısıtlamalar nedeniyle ağır ekipmanların kullanımının sınırlı olduğu dinamik kompaksiyon yöntemi gibi yöntemlere göre küçük alanlarda mükemmel makine çalışabilirliğine, azaltılmış toz ve titreşim gibi çevre dostu avantajlarına sahip yüksek bir uygulanma hızına sahiptir. Bu yöntem, orta (max 10 m) sıkıştırma derinliğinde kohezyonsuz granüler zeminlerin iyileştirilmesinde dünya çapında yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu

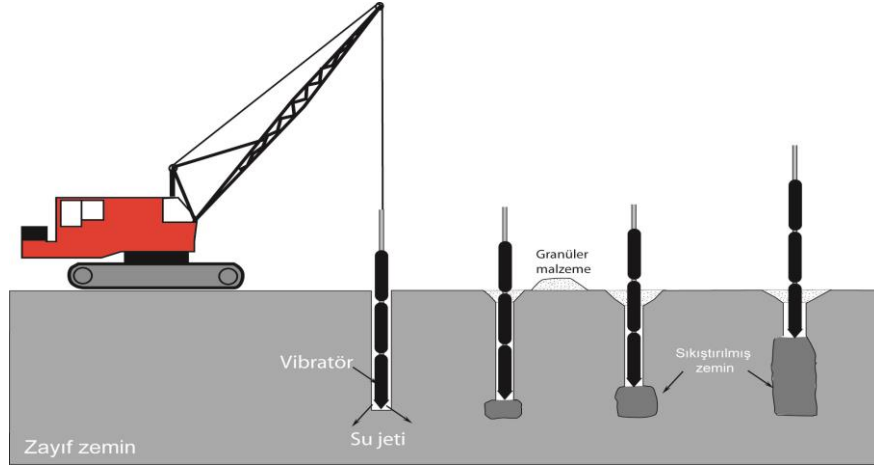
yöntem, dinamik kompaksiyon yöntemine göre daha küçük bir darbe enerjisine sahiptir. Ancak önemli ölçüde daha büyük bir darbe hızı ve darbe enerjisi aktarımı sırasında çelik sıkıştırma ayağının sürekli olarak zemin ile temas halinde olması gibi farklı özelliklere sahiptir.

Yöntem uygulanırken kullanılan ekipman, vinçe veya ekskavatöre bağlı hidrolik kazık çakıcı tokmak ve tokmağın düştüğü çelik ayaktan oluşmaktadır. 5 - 16 ton ağırlık, 1.2-1.5 m yükseklikten 1.0-2.4 m çaplı çelik ayağa düşürülür (Şekil 3). Ağırlığın çelik ayağa dakikada 30-60 darbe uygulayabildiği bu yöntemde iyileştirme, yukarıdan aşağıya doğrudur. İlk düşüşlerde çelik ayağın altında oluşan sıkışmış tabaka, sonraki düşüşler ile daha alt seviyelere taşınır ve böylece derindeki tabakalarda da sıkışma sağlanmış olur (Cheng et al., 2021).

### **Vibrokompaksiyon ve Vibroflotasyon Yöntemleri**

Vibrokompaksiyon yöntemi, titreşimli kazık çakma çekici kullanılarak, alt kısmında 200-400 mm çapında ve 2-4.5 m uzunluğunda silindirik uzun bir yatay titreşim elemanı olan sondanın (vibroflot) zemin içinde titreştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bir vinçe bağlı ve asılı bir şekilde taşınan vibroflot kendi ağırlığına ek olarak su veya hava yardımıyla zemine itilir. Titreşim elemanının alt uç kısmında bulunan jetten çıkan yüksek basınçlı hava veya su yardımıyla titreşim elemanın zemine penetrasyonu sağlanır. Sonrasında prob zemin yüzeyine doğru geri çekilirken vibrasyon sürdürülerek zemin sıkıştırılmaya devam edilir (Şekil 4). İlave zemin, zemin altında veya yüzeyinde sıkışmanın neden olduğu oturmayı önlemek için kullanılabilir. Granüler zeminlerin sıkıştırılması için derinde malzeme ilavesine gerek olmayan vibrokomopaksiyon yönteminde, zemin yüzeyinde oluşan çöküntü konileri ise dolgu malzemesi ile doldurulur.

Bu yöntemle istenilen derinlikte zemine titreşim uygulamak, böylece zeminin sıkışmasını sağlamak mümkündür. Hausmann (1990), vibro-kompaksiyon uygulamasına en uygun zeminlerin 5-10 arasında SPT değerine sahip olan ve yüzeye yakın kumlu zeminler olduğunu belirtmektedir. Kohezyonsuz zemindeki ince dane miktarı %15'den fazla olmadığı durumlarda bu teknik uygulanabilmektedir. Vibroflotasyonun tersine titreşimler, vibrokompaksiyon yönteminde düşey doğrultuda uygulanmaktadır. Vibroflotasyon tekniğine göre prob çalışma hızı daha yüksek olsa da; vibro tijlerin etki edebildiği alan genişliği ve çevresindeki zeminin rölatif sıklığı, vibroflotasyona nazaran daha düşüktür.



**şekil 4.** Vibrokompaksiyon ve vibroflotasyon yöntemlerinin uygulanması

Zemine yerleştirilen bir vibratörün, derin ve kohezyonsuz zeminlerde, yüksek enerji ile yatay olarak titreştirilmesiyle zemin danelerinin yerleşim yapısı bozulmakta ve daneler birbirine doğru yaklaşmaya zorlanmaktadır. Bu şekilde zeminin sıkılaşmasının amaçlandığı vibroflotasyon yönteminde, 40-50 m derinliğe kadar ulaşılmakta ve sıkıştırma işlemi, bu derinlik boyunca belirli aralıklarla yapılmaktadır. Vince asılan bir vibroflot, zemini sıkılaştırmak için kullanılmaktadır. Elektrik veya hidrolik güç ile hareketi sağlanan merkezi bir şaft üzerine monte edilmiş bir ağırlık içeren vibroflotlar, yaklaşık 3.0-4.9 m uzunluğunda ve çoğunlukla 30-46 cm çapındadır. Hava veya su jetlerinin yardımıyla vibroflot, zeminin en alt kısmına kadar batırılmakta ve zemin yatay titreşimler uygulanarak sıkıştırılmaktadır. Granüle temiz kum veya çakıl malzeme ile üstten sondanın oluşturduğu çöküntü konisi doldurulmaktadır (Brown, 1976). İyileştirme yönteminin verimliliğini, zeminin dane çapı dağılımı ve kullanılan dolgu malzemesinin özellikleri etkilemektedir. Zemin danelerinin arasındaki sürtünmeyi azaltarak vibrasyon, danelerin tekrar sıkı bir şekilde yerleşmesini i gerilme oluşturmadan sağlamaktadır. Uygulamadan sonra başlangıç boşluk oranı ve sıkışabilirlik büyük oranda azalmakta; zeminin sıvılaşmaya karşı gösterdiği direnç ve taşıma gücü ise içsel sürtünme açısındaki artışa bağlı olarak artmaktadır.

Hitchman (1989), bu yöntemin 0.063 mm boyutlu danelerin %10'dan az, 0.002 mm boyutlu danelerin %2'den az ve üniformluk katsayısı ( $C_u$ ) değerinin ise 2.5'tan büyük olduğu orta ve iri kumlarda uygulanabileceğini, ince dane oranının yüksek olmasının vibratör tarafından üretilen kesme gerilmelerinin etkin bir şekilde iletilmesine engel olacağını ve titreşimlerin önemli ölçüde sönümleneceğini belirtmektedir.

### **Patlatma Yöntemi**

Eskiden beri kullanılagelen bu yöntem, suya doygun, sıkılaşmamış, kohezyonsuz zeminlerin patlayıcı maddelerin infilak ettirilmesiyle dinamik olarak sıkıştırılmasıdır. Zemin içerisinde patlayıcıların infilak ettirilmesi sonucunda boyuna ve kayma dalgaları oluşmakta, zemin daneleri yer değiştirmekte, parçalanmakta ve yeniden daha sıkı bir şekilde paketlenmesi sağlanmaktadır (Court & Mitchell, 1994). Yöntem, iyileştirme yapılacak olan zeminde delgi yapılarak istenilen derinliğe kadar inilmesi, patlayıcı malzemenin yerleştirilip delgi kuyusunun kapatılması, daha önceden belirlenen aralık ve sıra ile patlayıcı maddelerin patlatılması şeklinde uygulanmaktadır. Zeminde patlama ile meydana gelen ani titreşim ve darbeler bölgesel sıvılaşma oluşturmakta, oluşan dinamik yük geçici olarak boşluk suyuna aktarılmakta ve zemin daneleri daha sıkı olacak şekilde yeniden düzenlenmektedir. Bu yöntemin başarısı öncelikle patlama sonrasında oluşan şok dalgaların düzgün bir şekilde dağılımı ile mümkündür. Bunun gerçekleşebilmesi için zeminin suya doygun olması gerekmektedir. Eğer zemin suya doygun değilse homojen bir sıkılaşma elde etmek güçleşmektedir. Oluşan yeniden paketlenme, zeminin sıkışmasını, boşlukların azalması ve büyük hacimlerde suyun sıkışmasını sağlarken, başlangıç boşluk oranı, uygulama derinliği ve istenilen sıkışma derecesi bu boşlukların azalma miktarını etkilemektedir (Court & Mitchell, 1994).

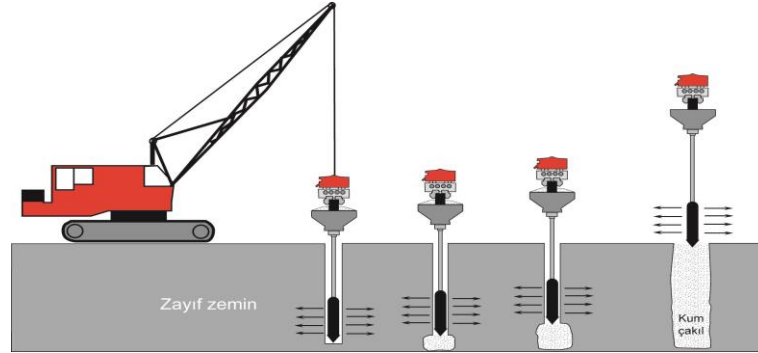
Patlatma yönteminde uygulama derinliği sınırlaması olmamasına karşın, yöntemi rölatif yoğunluk ( $D_r$ ) %50-60'dan düşük olan temiz kumlar ve siltli kumlarda başarı ile uygulamak mümkündür. Zeminin ilk sıklığı yeterli miktarda düşükse ( $D_r < \%50$ ) ortalama %15-30 arasında zeminin sıklığı artırılabilirken, orta sıklıktaki zeminlerde ise önemli bir iyileşme meydana gelmesi oldukça zordur (Court & Mitchell, 1994). Tumluer (2006), patlama yönteminin en büyük avantajlarını ekonomik olması ve diğer yöntemlerde mümkün olmayan derinliklerde kullanılabilir olması olarak ifade etmektedir.

### **Taş Kolon Yöntemi**

Taş kolonlar, 1930'ların ortalarında ilk olarak Almanya'da tasarlanan ve kohezyonlu zeminleri iyileştirmek için kullanılan vibro-sıkıştırma yönteminin bir uzantısıdır ve ağırlıklı olarak Avrupa'da geliştirilen taş kolon tekniği, günümüzde başta dolgu ve yol çalışmaları olmak üzere dünyanın birçok bölgesinde giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır (Slocombe & Moseley, 1991). Yumuşak zemin koşullarını iyileştirmeye yönelik çeşitli yöntemler arasında, taş kolonlar en çok yönlü ve uygun maliyetli zemin iyileştirme tekniklerinden biri olarak kabul edilir. Taş kolonlar, yük taşıma kapasitesini artırmak, yapısal temellerin oturmasını azaltmak ve akış yolu uzunluklarının kısalması nedeniyle konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak için yaygın olarak kullanılmıştır.

Taş kolonlar, vibrokompaksiyon yöntemine benzer olmakla birlikte çakıl geri dolgu kullanılır ve siltli kumlarda uygulanmaktadır. Kalınlığı 10 m'den az olan problemlı zemin varlığında, genellikle yumuşak ve orta katı kil zeminlerde tercih edilmektedir (U.S. Army Corps of Engineers, 1999). Bu uygulama ile taşıma kapasitesi artırılabilen ve oturma problemleri çoğunlukla %50-60 oranında azaltılabilmektedir.

Taş kolonların uçlarının sağlam taban zeminine oturtulması önerilirken, zemin şartları ve üst yapı proje yüklerine bağlı olarak çapı 75-100 cm olacak şekilde üçgen veya kare yerleşim planında projelendirilmektedir. Kullanılan taşların boyutları genellikle 10-50 cm aralığında, temiz ve içindeki ince dane oranı %5-10 arasında olmalıdır. Zeminin su jetiyle veya doğrudan delinmesiyle içerisine kaba granüler malzeme konulduktan sonra vibrasyonla sıkıştırılması ile taş kolonlar elde edilmektedir. Granüler zeminlere sondanın sürülmesiyle zeminde oluşan boşluklar kuyunun üstünden veya alttan beslemeli sistemler ile kuyu dibinden çakılla doldurulmaktadır. Sonda doldurma işleminden sonra tekrar işleme dahil olmakta ve bu işleme istenen taş kolon boyutları oluşturulana kadar tekrarlı olarak devam edilmektedir. 30-50 cm ile değişen aralıklarla her bir faz tekrarlanmaktadır (Şekil 5).



**Şekil 5.** Taş kolon yönteminin uygulanması

Temellerin oturacağı zeminlerin taşıma gücünün artırılmasında, doğal şevlerin ve dolguların stabilitelerinin güvenliğini artırmada, kil zeminlerin konsolidasyonunun hızlandırılmasında, farklı ve toplam oturmanın azaltılmasında, kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasında başarılı bir şekilde taş kolon tekniği kullanılmaktadır (Mihalıs et al., 2003). Fakat taş kolonlar sınırlı rijitlikleri nedeniyle statik ve deprem yükleri altında özellikle zayıf killi ve siltli zeminlerde düşük yanal zemin direncinden dolayı kolaylıkla deforme olabilmekte ve üst yapıda farklı deplasmanların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir (Demiröz & Karaduman, 2009).

### **Hidrolik İyileştirme Yöntemi**

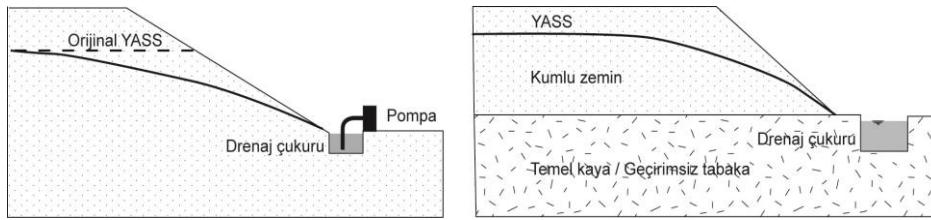
Zemin içerisindeki suyun ortamdaki uzaklaştırılması şeklinde gerçekleştirilen bu yöntem, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, böylece

zeminin su içeriğini azaltılması ve mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak da tanımlanabilir. Yöntemde zemin daneleri arasındaki serbest boşluk suyunun drenaj ile zeminin içinden çıkması sağlanır. Pompajla sondaj kuyularından su çekilerek yeraltı su seviyesinin düşürülmesi şeklinde iri taneli zeminlerde uygulanan bu işlem, ince daneli zeminlerde drenajın yavaş ve etkili olmaması nedeniyle ön yüklemeye yapılarak veya elektroosmoz gibi yöntemler ile gerçekleştirilebilmektedir.

## **Drenaj Yöntemi**

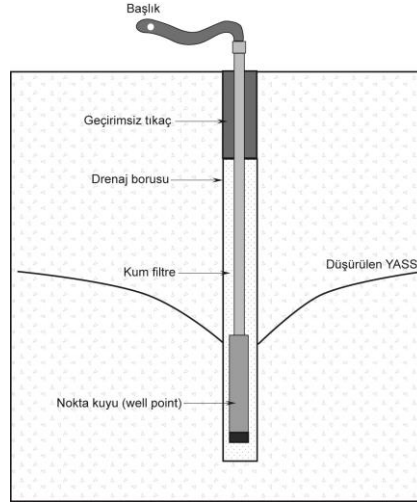
Yeraltı ve yerüstü sularının toplanarak uzaklaştırılması amacıyla yapılan işlemler olarak tanımlanan drenaj ile zeminin kayma direncinin artırılması, zemindeki suyun hareketinin yönlendirilmesi, sızıntı ve boşluk suyu basınçlarının azaltılması veya yok edilmesi, konsolidasyon oturmalarının hızlandırılması ve don olayının zararlı etkisinin azaltılması mümkündür. Bu amaçla yapılan drenaj çalışmaları yüzeysel ve yeraltı sularının drenajıdır ve en çok uygulanan yöntemler ise kuyular (well), drenaj çukurları (sumps) ve nokta kuyular (wellpoints), ön yüklemeye ve elektro osmoz yöntemleridir.

En yaygın ve ucuz drenaj yöntemi olan drenaj çukurları 1 m'den daha az, çok sığ derinliklerde drenaj yapmak amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde sızan sular drenaj çukurlarında toplanmakta, daha sonra yerçekimsel akış veya pompaj yoluyla bölgeden uzaklaştırılmaktadır. Temel kaya veya geçirimsiz tabaka üzerindeki sıkı ve iyi derecelenmiş, geçirimli daneli zeminlerde başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir.



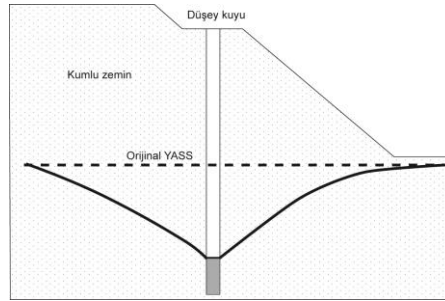
**Şekil 6.** Drenaj çukuru yönteminin uygulanması

Sığ seviyelerdeki drenajda kullanılan bir diğer teknik ise küçük çaplı (150 mm'den az), 1-3 m aralıklarla oluşturulan nokta kuyulardır (well points). Zemine itilerek veya zemin jetlenerek sokulan nokta kuyular kumlu, çakıllı, siltli ve killi zeminlerde uygulanabilmektedir. Nokta kuyu ile yapılan drenajlarda, drenler istenilen derinliğe indirildikten sonra iri kum ile drenin etrafı beslenerek bir kum filtre oluşturulmakta, yerçekimi etkisiyle kuyuya doğru yeraltı suyu akmakta ve bu su yüzeye doğru nokta kuyu başlığındaki vakum ile çekilmektedir. Kollektörlere iletilen su bölgeden uzaklaştırmaktadır (Şekil 7).



**Şekil 7.** Tipik bir nokta kuyusu (well point) kesiti

Daha derin (10-20 m) seviyelerde drenaj yapabilmek amacıyla kullanılan kuyular 150-200 mm çaplı pompalardan oluşan bir sistemdir. Özellikle kum veya kumlu çakıl gibi geçirimli özellikteki zeminlerde başarı ile uygulanabilmektedir. Zemin içerisinde istenilen derinliğe kadar açılmış olan sondaj kuyusundan sabit akış debisinde suyun çekilmesi sonucunda bölgedeki yeraltı suyu seviyesinde düşüm sağlanmaktadır. Böylece, yeraltı suyu seviyesi üzerinde kalan zeminin özelliklerinde iyileşme sağlanabilmektedir (Şekil 8).



**Şekil 8.** Kuyu yönteminin uygulanması

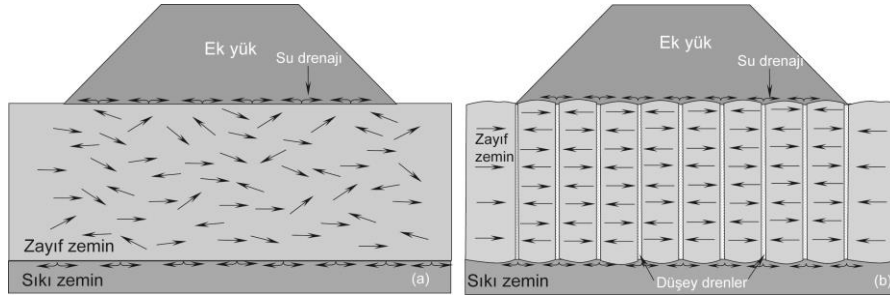
## **Ön Yükleme Yöntemi**

Problemlı killi zeminlerde dayanımı artırmak ve inşa sonrasında meydana gelebilecek aşırı oturmaları önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Zeminde meydana gelebilecek olan oturmaları izin verilebilir değerlere indirgeyebilmek için kullanılan ön yükleme yönteminde, temel zemini mühendislik yapısının inşasından önce kum ve çakıl dolgu ile geçici olarak yüklenmekte ve bu dolgu ağırlığı altında temel zemini konsolide edilmektedir. Zeminin doygun tabakalarında bu yükleme, artık boşluk suyu basıncı oluşturmakta ve zemin bu basınçla konsolide olmaya başlamaktadır. Zeminde yapılan yükleme sonucunda oluşturulan

konsolidasyon sonrasında zeminin dayanımı da artmaktadır. Zemine yapılan yükleme sonrasında dolgu kaldırılmakta ve zeminde ön konsolidasyon gerçekleştiği için yapıdan kaynaklı olarak meydana gelecek oturmalar tamamlanmış ya da çok azalmış olmaktadır. Bu yöntemde, oturmaların tamamlanabilmesi için uzun süre beklemek gereklidir. Yükleme yetecek malzeme miktarı ile oturmaların tamamlanabilmesi için gerekli olan sürenin uzunluğu ters orantılıdır. Bu süreyi kısaltmak amacıyla zemine drenler veya drenaj şeritleri yerleştirilerek, zemin suyunun daha kolay drene olması ve böylece oturmaların daha kısa sürede tamamlanması amaçlanır. Yöntem düşey drenli ve drensiz olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilir (Şekil 9).

### **Drensiz Ön Yükleme**

Düşük taşıma gücüne sahip olan suya doygun kohezyonlu zeminlerde, yapı yükleri altında büyük konsolidasyon oturmaları meydana gelir. Bu tür zeminlerde ön yükleme yöntemi kullanılmaktadır. İyileştirilecek olan killi zemin üzerine yapımı planlanan yapı inşa edilmeden önce ön yükleme yapılmasıyla zeminin doygun seviyelerinde artık boşluk suyu basıncı oluşur. Ön yükleme ile oluşan bu basınç sonucunda doygun zemin tabakaları konsolide olmaya başlar.



**Şekil 9.** Drensiz (a) ve düşey drenli (b) ön yükleme yöntemi

Böylece zeminde meydana gelebilecek oturmalar azaltılmış ve dayanımı da artırılmış olur. Genelde killi zeminlerde uygulanan bu yöntemde, killi zeminlerin permeabilitesinin düşük olmasından dolayı yükleme nedeniyle oluşacak oturmaların sonlanması uzun sürmektedir. Proje özellikleri dikkate alınarak yapılan drenajsız ön yükleme, zaman alıcı bir yöntem olsa da, ekonomik olması, yapının inşasından sonra zeminde meydana gelecek oturma miktarının minimuma çekilmesini sağlaması ve zeminin dayanımında anlamlı bir artışa neden olması nedeniyle tercih edilen yöntemlerden birisidir.

### **Düşey Drenli Ön Yükleme**

Ön yükleme yöntemini uygulamada en büyük zorluk, yöntemin kalın killi zeminlere uygulanması sırasında bu zeminlerin çok küçük geçirimsizliği sahip olmaları ve bu nedenle oturmaların tamamlanabilmesi için

beklenilmesi gereken sürenin uzun, ek yük oluşturmak için yapılan dolgu yüksekliğinin fazla olmasıdır. Bazı durumlarda ise ani yüklemekten dolayı stabilite problemleri de yaşanabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, hem oturma hızını artırmak ve dolayısıyla bekleme süresini azaltmak, hem de ek yük için gereken dolgunun fazla olmasını önlemek amacıyla düşey drenler kullanılmaktadır. Ön yüklemenin düşey drenlerle yapılması durumunda drenaj yolu azalmakta ve boşluk suyu basıncı hızlı bir şekilde sönmülenerek oturmalar daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Günümüzde bu amaçla farklı dren türleri kullanılmaktadır.

Uygulamada kum ve geosentetik (prefabrike) dren olmak üzere iki çeşit düşey dren kullanılmaktadır. Zemin içerisinde sondajla açılan deliklere kum doldurma suretiyle yapılan kum drenlerin (kazıklar) uygulama aralığı zeminin geçirimsizliğine bağlı olarak 1.5-6 m arasında, çapları ise 20-50 cm arasında değişmektedir. Uygulamayı kolaylaştırmak, atık malzemeyi azaltmak, drenajın sürekliliğini sağlamak amacıyla; kum, fabrik kılıf içerisine doldurularak 65 mm çapında drenler de oluşturulabilmektedir (Dastidar et al., 1969). Kum drenler zemin içerisindeki suyun hızlı derene edilmesini ve böylece konsolidasyonun hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar ancak oturma miktarını azaltmaz. Drenaj dolgusu olarak dane çapının en fazla %3'ü 200 nolu elek altında kalan temiz kum kullanılır. Kullanılan kumun dane boyutunun artırılması veya çakıl boyutunda malzeme kullanılması durumunda, bu drenler konsolidasyonu hızlandırmakla birlikte üst yapı yüklerini daha alt seviyelerdeki sağlam zeminlere aktarırlar. Kum drenlerin uygulama hızı zemin özelliklerine bağlı olarak 10-50 m/saat arasında değişmektedir.

Geosentetik drenler ise çevresine geotekstil sarılmış, genellikle PES (polyester) veya PP (polypropylene) esaslı malzemeler olup çekirdek ve filtre kısımlarından oluşmaktadır. şerit veya fitil şeklindeki geosentetik drenlerin çapları 5-10 cm arasında değişmektedir. Uygulama dren makineleri kullanılarak içi boş bir mil yardımıyla zemin içerisine sürülmesi şeklinde gerçekleştirilir ve zemin özelliklerine göre uygulama hızı (100-300 m/saat) oldukça yüksektir. Kum drenlere göre daha hızlı uygulanabilmesi ve daha ekonomik olmaları nedeniyle tercih edilen bir dren türüdür.

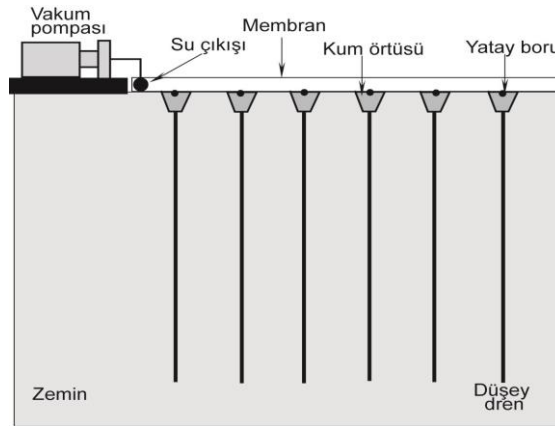
## **Vakumla Drenaj**

Vakum yöntemi, daha çevre dostu olması ve daha düşük maliyetli olması avantajından dolayı, killi zeminleri iyileştirmek amacıyla sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir (Zhou et al., 2022). Bu yöntemde konsolidasyon sürecini hızlandırmak ve drenaj yolunu kısaltmak için geçici bir ek yük olarak atmosferik basınç ve prefabrik düşey drenler kullanılır. Diğer hidrolik yöntemler ile karşılaştırıldığında, daha ucuz ve daha hızlıdır (Chu et al., 2000). Sistem Şekil 10'daki gibi dikey drenajlar, bir kum örtüsü tabakasına gömülü yatay vakum boruları, membranlar ve vakum pompalarından oluşur. Uygulanan vakum yükü anında boşluk suyu basıncına geçer ve efektif gerilmeyi artırır. Burada, efektif gerilme artışının miktarı, toplam gerilme ve boşluk suyu basınç kaybı miktarının toplamına eşittir.

Temiz kumdan oluşan kum örtüsü, bir drenaj tabakası görevi görür ve vakum basıncını yatay borulardan düşey drenlere dağıtır. Günümüzde vakum yönteminde kullanılan en fazla tercih edilen düşey drenler boru drenleri, kum drenleri ve prefabrik dikey drenlerdir. Membranlar, hava geçirmez koşullar oluşturmak için tüm siteyi kapatmak için kullanılır. Saha çok büyük olduğunda, daha küçük alt bölümlere bölmek gereklidir.

Yüksek su içeriğine sahip killeri drene etmek ve konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla kullanılan bu yöntemin en önemli sınırlaması ince parçacıkların drenlerin yüzeyine doğru hareket etmesi ve drenleri tıkamasıdır. Bu durum, drenaj yolunu uzatır ve drenaj verimliliğini azaltır (Bergado, 1996).

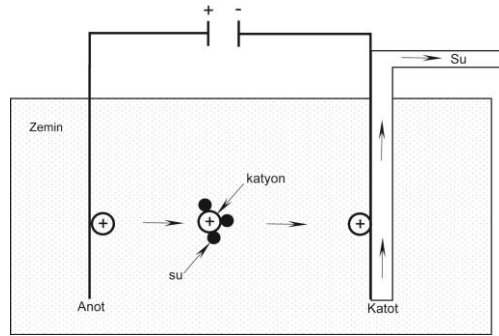
Vakum yönteminin diğer zemin iyileştirme teknikleriyle birlikte kullanılması yani dinamik sıkıştırma, elektro-osmoz, ısıl işlem ve hava yastığı yöntemleri ile birleştirilmesi sonucunda daha etkili ve hızlı iyileştirmeler elde etmek mümkündür.



**Şekil 10.** Vakum yöntemi ile drenaj

## **Elektro-Osmoz Yöntemi**

Elektro-Osmoz yöntemi, zemin suyunun drene edilmesi ve buna bağı olarak konsolidasyon oluşturulması amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemde, siltli ve siltli kil gibi zeminlere doğru akım uygulanır. Zemine uygulanan elektriksel potansiyel farkı, yüklü bir parçacık matrisinde akışkan akışını sağlamaktadır. Negatif yüklü kil yüzeyine doğru ortamdaki pozitif yüklü katyonlar hareket etmekte ve bu pozitif yüklü katyonlar kil yüzeyinde adsorbe olmuş su molekülünün negatif dipollerini kendilerine çekerek negatif katot borusu veya kuyusuna doğru beraberinde sürükleyerek bir akış oluştururlar. Böylece boşluk suyu anottan (+) katota (-) doğru hareket ettirilir (Şekil 11). Anottan katota doğru olan bu su akımı esnasında negatif boşluk suyu basıncı oluşmakta ve toplam gerilme sabit kaldığı için efektif gerilme artarak konsolidasyona neden olmaktadır. Boru şeklindeki katotta toplanan su ise pompayla alınarak konsolidasyon sağlanır. Oluşan konsolidasyon zeminde meydana gelebilecek oturma miktarlarında azalmaya ve dayanımda ise artışlara neden olmaktadır. Bu yöntemin başarılı olabilmesi için zeminin doygun halde ve plastik limitinin üzerinde su içeriğine sahip olması gereklidir.



**Şekil 11.** Elektro-Osmoz yönteminin şematik gösterimi

## **Fiziksel İyileştirme Yöntemi**

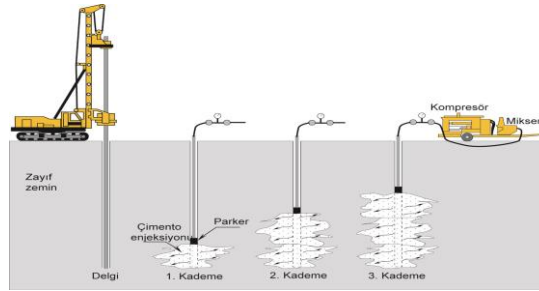
Bu yöntem hem yüzeysel hem de derindeki zeminlerde uygulanabilmektedir. Zemin ile kimyasal etkileşime girmeyen katkıları zemine enjekte edilerek veya karıştırılarak farklı şekillerde uygulanabilmektedir. Yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda problemlı zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

## **Enjeksiyon Yöntemi**

Zeminlerin mekanik (dayanım, deformasyon) ve hidrolik (geçirgenlik) özelliklerini iyileştirmek amacıyla süspansiyon veya çözelti halindeki akışkan malzemenin (kireç, bentonit, asfalt, çimento gibi su içinde dağılmış katı maddeler veya kimyasallar) basınçla zeminin daneleri arasındaki boşluklara enjekte edilmesi veya zeminle karıştırılması işlemi

enjeksiyon olarak tanımlanmaktadır. Yapılan uygulama sonucunda zemin daneleri arasındaki boşluk azalmakta, zeminin hacim değişikliğine karşı direnci artmakta ve bu şekilde zeminin geçirgenliği azalarak kayma dayanımı da artmaktadır. Tünel kazısını nedeniyle yüzeyde meydana gelebilecek oturmaların engellenmesi, deprem sırasında zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve zeminlerin taşıma gücünün arttırılması enjeksiyon yönteminin ana amaçlarındandır. Yöntem, zemine açılan delgiden basınç altında enjeksiyon sıvısının zemin içerisine enjekte edilmesi şeklinde uygulanır (Warner, 2004) (Şekil 12).

Bu yöntemde en önemli parametre zeminin dane boyutu ve geçirimsizliğidir. İnce kum ve siltlerin enjeksiyonunda kimyasal malzemeler kullanılırken, çakıl ve kum boyutundaki zeminlerde kireç, çimento, bentonit gibi daneli malzemeler kullanılmaktadır. Kimyasal malzemelerden en fazla kullanılanları reçine, silikatlar ve poliüretandır. Her zemin için aynı enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı, enjekte edilen hacim gibi) ve enjeksiyon malzemesi kullanılamaz. Bunlar uygulama amacına ve zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, rölatif sıklık, gerilmeler vb.) bağlı olarak tasarlanır (Shroff & Shah, 1993).



**Şekil 12.** Enjeksiyon yönteminin uygulanması

Enjeksiyon malzemeleri, reolojik ve performans özellikleri itibariyle çimento, kil, bentonit, bazen de kum ile hazırlanan daneli karışımlar, zamanla viskozite değeri artan ve Newton akışkanı olarak isimlendirilen kolloidal solüsyonlar ve gazların emülsifiye edilmesi ile elde edilen emülsiyonlardır.

Enjeksiyon malzemesinin zemine nüfuz etme şekline göre enjeksiyon yöntemleri;

1. Emdirme (Permeasyon) enjeksiyon
2. Çatlatma enjeksiyonu
3. Sıkıştırma (Kompaksiyon) enjeksiyonu
4. Jet grouting

olmak üzere dört çeşittir.

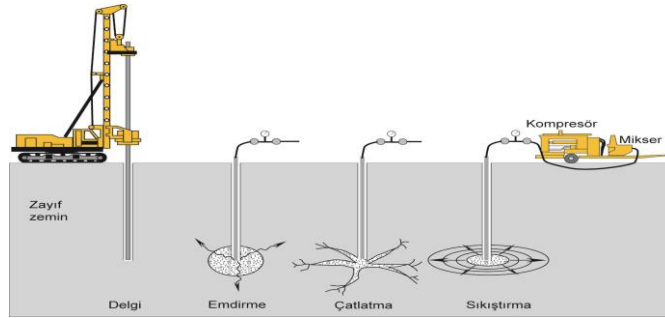
### **Permeasyon (Emdirme) Enjeksiyonu**

Bu enjeksiyon yöntemi kum ve çakıl gibi geçirimli zeminlere, zeminin dokusunu bozmadan, diğer enjeksiyon yöntemlerine göre daha düşük basınçlarda, düşük viskoziteli enjeksiyon sıvılarının enjekte edilmesi şeklinde uygulanmaktadır (Şekil 13). Zemin özelliklerinin bu yõteme elverişli olması durumunda enjeksiyon sıvısı boşluk ve çatlaklara kolaylıkla girerek doldurur ve tıkar. Böylece zemin daneleri arasında dayanımı yüksek bir çimentolanma oluşturur. Uygulama sonucunda zeminin sıkışabilirliği ve geçirimliliği azalır, kayma dayanımı ve taşıma gücü ise artar (Xanthakos et al.,1994).

Ancak, enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine emdirilmesinde bazı dirençlerle karşılaşmaktadır (Byle & Borden, 1995). Bunlar;

1. Enjeksiyon malzemesi içerisindeki zeminin boşluklarına giremeyecek kadar büyük danelerin filtrasyona uğraması,
2. Enjeksiyon malzemesi ile zemin arasındaki etkileşim sonucu oluşan iç kayma direnci,
3. Akışkan enjeksiyon malzemesinin akış hızını azaltan viskozitedir.

Bu dirençler permeasyon enjeksiyonlarının başarı ile uygulanmasındaki temel nedenlerdir ve bazı durumlarda zemine enjeksiyon yapmak mümkün olmamakta veya enjeksiyon basıncının artırılması ile enjeksiyon yapılabilmektedir (Byle & Borden, 1995). Süspansiyon türünde olan çimento şerbeti ve koloid yapıdaki saf kimyasal çözeltiler, bu zorlukları aşmak amacıyla kullanılabilir. Ancak zemin geçirimliliğinin azalmasıyla teknik ve ekonomik zorluklar artmaktadır (Xanthakos et al., 1994).



**Şekil 13.** Emdirme, çatlatma ve sıkıştırma enjeksiyon yöntemleri

### **Çatlatma Enjeksiyonu**

Emdirme yani permeasyon enjeksiyonunun başarılı bir şekilde uygulanamadığı kil türü veya kılcal çatlak veya fissüre sahip kaya ortamlarda uygulanan bir enjeksiyon yöntemidir. Enjeksiyon malzemesi 4 MPa gibi yüksek basınç altında zemine enjekte edilir. Böylece zeminde var olan kılcal çatlakların açılması veya kasıtlı olarak yeni çatlakların oluşması sağlanır. Bu çatlakların enjeksiyon malzemesi tarafından doldurulması ile zeminde ağaç dallarına benzer sertleşmiş çimento kanalları oluşmakta ve

zemin kontrollü bir şekilde ve bölgesel olarak sıkıştırılmaktadır (Şekil 13). Zemin içerisinde mevcut çatlaklara veya fissürlere bağılı olarak çatlatma enjeksiyonu sırasında oluşan çatlakların yönü değışmekle birlikte, ilk çatlaklar düşey doğrultuda oluşur ve böylece yatay gerilmeleri artırarak zemin sıkışır. Aynı noktada birden fazla çatlatma enjeksiyonunun yapılması durumunda oluşan çatlaklar yatay yöndedir ve bu çatlakların etkisi ile yüzeyde kabarmalar meydana gelebilir (Gallevresi, 1992). Çoğunlukla zeminin sıkıştırılması veya sertleştirilmesi için tercih edilen bu yöntem, zeminin geçirgenliğini azaltmak için de kullanılmaktadır.

### **Kompaksiyon (Sıkıştırma) Enjeksiyonu**

Bu enjeksiyon yöntemi, ASCE (American Society of Civil Engineers) (1980) tarafından çökme değeri 25 mm'den az olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt, içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar kum içeren zemin-çimento karışımı enjeksiyon malzemesinin yüksek basınçlarda (>50 bar), zemin boşlukları içerisine girmeden enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturacak ve bu sayede etrafındaki gevsek zeminleri sıkıştırarak şekilde enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır.

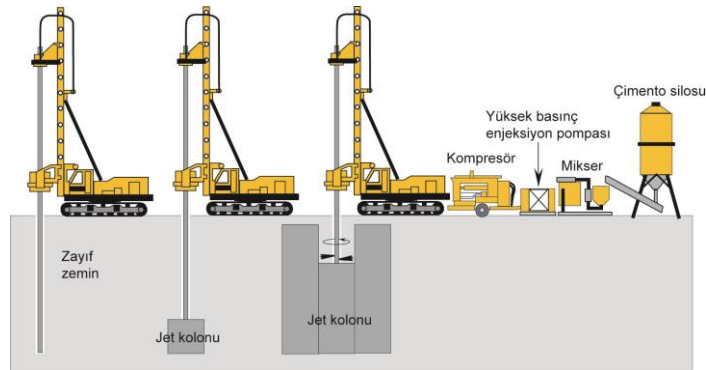
Bu yöntemde zemine yüksek basınçta enjekte edilen malzeme boşluk ve çatlaklara girmeden kendisi etrafında balon benzeri bir kütle oluşturur (Şekil 13). Oluşan kütle sonucunda etraftaki zayıf zemin sıkışmaya uğrar ve mühendislik özelliklerinde iyileşme oluşur. Bu yöntem yapı temellerinin alttan desteklenmesinde, farklı oturmaların olduğu yapı temellerinin iyileştirilmesinde, yapı inşası sonrasında zeminde meydana gelecek oturmalarının kontrolünde kullanılmaktadır.

Başarılı bir kompaksiyon enjeksiyonunda enjekte edilen malzeme zemin boşlukları içerisine girmeksizin, enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen küresel bir kütle olarak kalır. Burada enjeksiyon malzemesinin viskozitesi büyük rol oynar ve düşük viskoziteli olması halinde zemin hidrolik olarak çatlatır ve bu durum enjeksiyon noktası yakındaki yeraltı yapılarına veya üzerindeki binalara zarar verebilir. Kompaksiyon enjeksiyonu tüm zemin türlerine uygulanabilir. Ancak, enjeksiyondan kaynaklanan aşırı boşluk suyu basınçları yumuşak killerde oldukça yavaş sönmüleneceğı için özel tedbirlerin alınması gerekebilir. Bu yöntemin başarısını etkileyen en önemli faktörler ise zemin türü, su içeriğı, zeminin mevcut rölatif sıklığı, jeostatik gerilmeler ve mevcut yapısal elemanlardır. Bu faktörler enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme şeklini ve böylece elde edilen iyileştirmeyi etkilemektedir (Graf, 1992).

## Jet Grouting

Son yıllarda oldukça hızlı gelişen ve yeni bir yöntem olan jet grouting yöntemi, ilk olarak Japonya'da ortaya çıkmış ve daha sonraki yıllarda tüm ülkelerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemin en önemli kullanılma nedeni, klasik enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilemeyen killi zeminlerde başarılı bir şekilde uygulanabiliyor olmasıdır. Bu yöntemde zemin 300-600 barlık yüksek basınç ile genellikle su-çimento karışımı ile karıştırılır. Delme tijinin ucunda bulunan püskürtme memelerinden (nozül) 250-300 m/sn gibi bir hızla çıkan enjeksiyon malzemesi, zeminin doğal yapısını bozarak zemin ile karışır. Böylece özelliklerinin tamamen değiştiği ve iyileştirilmiş, çimento-zemin (soilcrete) karışımından oluşan jet-grout kolonlar meydana gelir (Essler & Yoshida, 1993).

Bu yöntem delgi, kesme ve püskürtme aşaması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Askay, 2002). Delgi aşamasında rotari usulü çalışan delici bir makine ile ve sirkülasyon suyu kullanılarak öngörülen kolon alt ucu kotuna kadar delme işlemi yapılır. Projede belirlenen derinliğe erişildiğinde delgi işlemi durdurularak tij içerisine bırakılan çelik bir bilya ile tijin uç kısmındaki valf kapatılır. Böylece tije gönderilecek enjeksiyon nozullara yönlendirilmiş olur. Püskürtme aşamasında ise delme tijinin ucundan küçük çaplı bir nozul ile basınçlı enjeksiyon püskürtülürken, tij belirli bir devir ile döndürülerek ve sabit bir hızda yukarı doğru çekilerek çimento şerbetinin zeminle karışması sağlanır ve böylece aşağıdan yukarıya doğru jet kolonları oluşturulur (Şekil 14).



**Şekil 14.** Jet grouting yönteminin uygulanması

Zeminin türü, enjeksiyon şerbetinin bileşimi ve jet enjeksiyon tijinin çekme hızı, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan basıncı ve akışkan debisi, jet grouting yönteminin özelliklerini belirleyen temel parametrelerdir. Yöntemin uygulandığı zeminlerde özellikle zeminin geçirgenliği azalmakta, taşıma gücü ve elastisite modülü ise artmaktadır. Ayrıca, yeraltı suyu kontrolü ve kazı desteği amacıyla kullanılan Jet grouting zaman tasarrufu sağlayacak kadar hızlı olmasının yanısıra en güvenli yöntemlerden biridir.

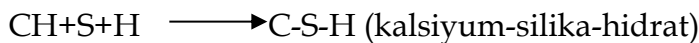
## **Kimyasal İyileştirme Yöntemi**

Kimyasal iyileştirme yöntemi zemine eklenen katkı malzemeleri ile zemin arasında gelişen kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminin dayanım, geçirimsizlik, sıkışma ve şişme gibi geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan çalışmaları kapsamaktadır. Uygulama derinliğine göre yüzeysel ve derin karıştırma olmak üzere iki şekilde uygulanabilmektedir.

## **Yüzeysel İyileştirme**

Zemin iyileştirme yöntemlerinden en kolay uygulanabilen ve ekonomik olanı ve bu nedenle en yaygın olarak tercih edileni zemine katkı maddeleri katılarak yapılan iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde zemine puzolanik özelliğe sahip katkı maddeleri katılmakta böylece puzolanik reaksiyonların oluşması sağlanarak killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Attom-Okine (1995), bu yöntemi killi zeminlerde karşılaşılan mühendislik problemlerine çözüm üretebilmek için bu tür zeminlerin jeoteknik özelliklerinin değiştirilmesi işlemi olarak tanımlamaktadır. Bu yöntemde kullanılan katkı maddeleri puzolan olarak adlandırılır ve puzolanlar kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, fakat uygun nem şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli-alüminli maddelerdir (ASTM C 618, 2012). Yapay ve doğal puzolanlar olarak iki grupta incelenen puzolanlardan doğal olanlarını başlangıcından sonra değişikliğe uğramış volkanik kökenli veya tortul kayalar oluşturur. Bunların kökeni çoğunlukla volkanik camlar, tüfler, traslar ve volkanik kül gibi piroklastik kayalardır. Doğal puzolan grubuna dahil edilen ama ısıl işlem görmüş doğal puzolanlar da vardır. Bunlar killer, şeyller ve diatomitlerdir. Yapay puzolanlar ise silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerdir.

Killi zeminlere eklenen bu puzolanlar zeminle tepkimeye girerek puzolanik reaksiyon oluştururlar. Puzolanik reaksiyon; öğütülerek ince daneler haline getirilen (dane boyu tercihen 0.0075 mm'den daha küçük) puzolanların, sönmüş kireç ve suyla birleştiğinde oluşan kimyasal reaksiyondur. Portland çimentosunun hidrasyonunda olduğu gibi silis, kalsiyum hidroksit ve su arasındaki reaksiyonlar, hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Nemli ortamda, ince öğütülmüş puzolanın silikası ile kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıdaki gibidir (Erdoğan, 2003).



Bu reaksiyon çok yavaştır ve ASTM C 618 (2012) standardına göre puzolanik reaksiyonun en iyi şekilde gelişebilmesi için puzolandaki  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  miktarı %80,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  miktarı %5, ateşte kaybının

maksimum %8, MgO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı maksimum %8 ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ise maksimum %6 olmalıdır. Diğer önemli bir özellik ise mineralojik bileşimidir. Ayrıca, katkı malzemesindeki camı faz miktarı %8'den fazla, alkali feldspat (ortoklas, sanidin, albit, oligoklas) miktarı yüksek, kil mineralleri (montmorillonit, kaolinit, halosit) ise düşük miktarda olmalıdır (Mazsazza, 1989).

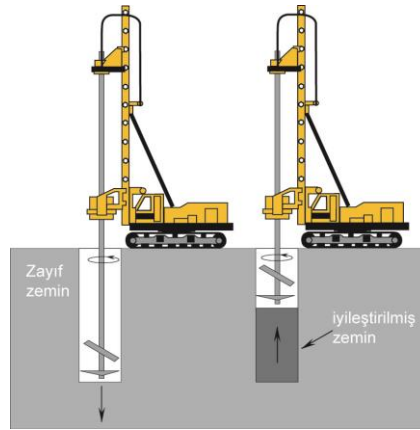
Kimyasal iyileştirme amacıyla kullanılacak olan malzemenin seçiminde puzolanik özelliğe sahip olması, ucuz ve kolay bulunabilir olması ve çevreci olması gibi birkaç temel faktör ön plana çıkmaktadır. Günümüzde artan çevre kirliliği nedeniyle, kullanılacak katkının çevre dostu olması daha önemli hale gelmiştir. Özellikle çimento, kireç ve uçucu kil gibi katkıların kullanımı stabilizasyon maliyetini ciddi oranda artırmakla beraber katkı maddelerinin üretildiği tesislerde karbon salınımına ve çevresel sorunlara da sebep olmaktadır.

Doğru seçilen bir katkı malzemesinin killi zemine eklenmesiyle oluşan puzolanik reaksiyon sonucunda, zemin daneleri büyük boyutlu kümeler haline gelmekte (topaklanma) ve zeminin dokusu değişmektedir. Böylece, zeminin boşluk oranı ve optimum su içeriği artarken, maksimum kuru yoğunluk ise azalmaktadır. Zeminin likit limitinin (LL) azalması ve plastik limitinin (PL) artması ile plastisite indisi (PI) azalmakta ve zemin non-plastik özellik kazanmaktadır. Zeminin dayanımı, yorulma dayanımı ve zeminin çevre koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanan ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngülerinin olumsuz etkilerine karşı koyma kabiliyeti olarak tanımlanan durabilite artmakta, şişme potansiyeli, hacimsel değişimi ve geçirimsizlik ise azalmaktadır. Dezavantajlarının olmasına karşın yukarıda kısaca özetlenen avantajları nedeniyle mühendislik çalışmalarında günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Hossain & Mol, 2011; Jawad et al., 2014; Locat et al., 1990). Genel olarak diğer iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, uygulanması kolay ve ekonomik olan bu yöntemin başlıca dezavantajı yüzeysel iyileştirmelerde ve özellikle dolguda kullanılacak zeminlerdeki iyileştirme çalışmalarında kullanılabilmesi ve etkisinin sadece killi zeminler ile sınırlı kalmasıdır.

## **Derin Karıştırma**

Derin karıştırma, sadece yüzeysel olarak dolgu zeminlere katkı malzemesi eklenerek yapılan kimyasal iyileştirmenin daha derin seviyelerde yapılabilmesi için kullanılan yöntemdir ve 1950'li yıllarda ilk kez ABD'de kullanılmıştır (Bruce, 1996). Günümüzde kullanılan ekipman ise ilk kez 1975'de önerilmiştir. Yöntemde, uygulama derinliğinde zemine katkılar eklenir ve bunlar kolonlar veya iyileştirilmiş malzeme panelleri oluşturacak şekilde büyük çaplı, tek veya çok eksenli burgular yardımıyla iyice karıştırılır (Şekil 15). Bu işlem üç safhadan oluşmaktadır (Larrison, 2003). Bunlar;

1. Karıştırıcının uygulama derinliğine indirilmesi
2. Katkı malzemesinin eklenmesi
3. Katkı ile zemin arasında puzolanik reaksiyonun ve moleküler difüzyonun gerçekleşmesidir.



**Şekil 15.** Derin karıştırma yönteminin uygulanması

İstenilen derinliğe indirilen baş içerisinde pompalanan katkı malzemesi boru ucundaki paletler yardımıyla zeminle karıştırılır. Bu işlemin amacı katkı ile zemini en iyi şekilde karıştırarak kimyasal reaksiyonların gelişimi için uygun ortamı oluşturmaktır. Katkının zemin içerisindeki dağılımı ne kadar iyi olursa iyileştirme o kadar başarılı olabilmektedir. Karıştırma işlemi sonucunda katkı malzemesi ve zemin arasında oluşan puzolanik reaksiyon sonucunda, zeminin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmekte, zemin içinde rijit veya yarı rijit kolonlar oluşturulmaktadır. Bu yöntem uygulanarak iyileştirilen zeminlerde dayanım artmakta, geçirimsizlik, sıkışabilirlik, su içeriği ve sıvılaşma potansiyeli ise azalmaktadır.

## **Isıl İyileştirme Yöntemi**

Zeminin mühendislik özelliklerinin ısı olarak iyileştirilmesi ekonomik olmadığından çok tercih edilmese de uygulamada zaman zaman kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde ısı alış verışı ile zemin

özelliklerinde iyileşme sağlamak mümkün olmaktadır. Termal yöntemler nükleer atık, petrol gibi endüstriyel malzemeler dahil kirleticiler ve endüstriyel malzemeler, zeminin özelliklerini geliştirmek amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır (Pina et al., 2002).

Yapılan çalışmalar, termal iyileştirme yöntemleri ile zeminin dayanımının artırılabilceğini göstermektedir O'Brien et al. (2017, 2018). Isıl olarak zeminlerde iyileştirme yapılırken kullanılan başlıca iki yöntem vardır. Bunlar ısıtma ve dondurma yöntemleridir.

### **Isıtma Yöntemi**

Killi zeminlerde 700°C'ye kadar ısıl işlem killi toprakların mikro yapısında fiziksel ve kimyasal değişikliklere yol açar. Antik çağlardan beri, konut evlerinin yapımında ısıl işlem görmüş toprak tuğlalar kullanılmıştır. Killi toprakların ısıl işlemi, katyon değişiminde ve sıkıştırılabilirlikte azalmaya neden olmaktadır (Joshi et al., 1994). Ayrıca killi zeminlerin içsel sürtünme açısını, kohezyonunu ve dayanımını artırmaktadır (Mitchell, 1969).

Suya doymun olmayan siltler, killer ve löslerin iyileştirilmesinde kullanılabilen bu yöntem ile ortam sıcaklığının olağan değerlerden çok yüksek değerlere çıkarılması ile zeminlerin dayanımında önemli artışlar sağlanabilmektedir. Isının 110 °C'ye ulaşması ile zemin suyunu kaybetmekte ve buna bağlı olarak taşıma gücü artarken yük altındaki deformasyon değerleride azalmaktadır. Meydana gelen bu değişimlerin kalıcı olabilmesi ısının daha yüksek değerlere ulaşması ile mümkün olmaktadır. Isıtma işlemi sonucunda zemin bileşenleri kristal veya camı yapıya dönüşürler. Normal sıcaklık şartlarında kurutulmuş zeminlerin mühendislik özelliklerinde görülen iyileşmeye oranla, zeminin yapay olarak 300-1000 °C gibi yüksek ısılarla kadar ısıtılması çok daha etkili bir iyileşmesinin oluşmasını sağlamaktadır (Terashi & Juran, 2000). Killi zeminler yaklaşık 900 °C ısıtıldığında faz değiştirmekte ve tuğlaya dönüşmektedirler. Isıtma yönteminde zeminlerin yerinde iyileştirilmesi için geliştirilmiş olan ve Rus Tekniği olarak da adlandırılan işlemde, zeminde açılan sondaj delikleri içerisinde basınç altında benzin veya gaz sıvı yakıt yakılmakta ve böylece ısı yükseltilebilmektedir. 8 günlük bir ısıtma işlemi sonrasında sondaj kuyusunun (150-200 mm) yarıçapının yaklaşık 10 katı genişliğe kadar bir alanda zemin özelliklerinin iyileştirilebilmesi mümkün olmaktadır. Ancak hem sadece suya doymun olmayan siltli ve killi zeminlerde kullanılabilir olması, hem de maliyetinin diğer yöntemlere göre yüksek olması ve yapılan iyileştirmenin kalıcı olmamasından dolayı arazide kullanımı pek tercih edilmemektedir.

### **Dondurma Yöntemi**

Zeminlerin geçici olarak iyileştirilmesinde kullanılan dondurma yöntemin ilk uygulaması 1982 yılında ABD'de bir madencilik projesinde yapılmış ve günümüzde ise birçok ülkede uygulanmaya devam edilmektedir

(Anderslan & Ladanyi, 2004). Özellikle akmaya veya göçmeye eğilimli zeminlerde yapılan yeraltı veya yerüstü kazıları sırasında çalışmayı kolaylaştırmak amacıyla boşluk suyunun dondurulması şeklinde uygulanır. Zemindeki boşluk suyunun dondurularak katı hale getirilmesi ile zeminin katılığı ve dayanımı artırılmış olur. Yöntemin uygulanması zemin içerisine yerleştirilen şebeke halindeki borulardan su soğuk hava geçirilmesi şeklinde yapılır. Almanya'da geliştirilen Pötck yönteminde ise amonyak veya freondan faydalanılarak bir soğutucu tesisatta soğutulan kalsiyum kloridli su zemin içerisine yerleştirilmiş olan borularda dolaştırılarak zeminin ısısı düşürülmektedir. Günümüzde ise sıvı karbondioksit ve sıvı nitrojen kullanılarak dondurma işlemi daha hızlı yapılmaktadır. Nitrojen  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $-40^{\circ}\text{C}$  olan tuzlu suyla karıştırıldığında nitrojenin kaynama noktası  $-196^{\circ}\text{C}$  olduğundan daha düşük ısı ve daha hızlı soğutma elde edilir. Karbondioksitin kaynama noktası ise  $-79^{\circ}\text{C}$ 'dir. Her tür zeminde ve 7-8 m derinliğe kadar uygulanabilmesine karşın yöntemin maliyetinin yüksek olması ve yeraltı suyu seviyesinin altındaki derinliklerde uygulanamaması kullanımdaki en büyük kısıtlamalardır. Ayrıca, dondurma işlemi süresince donma kabarması, hacimsel genişleme gibi deformasyonu etkileyen faktörler olduğu gibi; çevre ve çalışma sıcaklığı, sistemdeki kaçaklar, beton hidrasyon ısısı gibi donmayı etkileyen önemli faktörler de bulunmaktadır.

### **Donatılandırma Yöntemi**

Zeminin adhezyon ve/veya sürtünme kuvvetleri ile zeminle etkileşime giren ve çekme gerilmelerine karşı koyabilen malzemeler ile güçlendirilmesi olarak tanımlanan donatılandırma yöntemi, zemine eklenen metal, geosentetik, fiber gibi esnek, elastik veya bazen sıkıştırılabilir malzemeler ile zeminin stabilite, taşıma gücü ve sıkışabilirliğinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem kullanılarak iyileştirilen zeminler ise donatılı zemin olarak adlandırılmaktadır (Hausmann, 1990).

Geçmişte metal, alüminyum çubuklar ve doğal lifler kullanılırken, günümüzde bu yöntemde tercih edilen malzeme, kullanım amaçlarına göre değişik özelliklerde tasarlanabilen, geotekstil, geomembran, geogrid, geonet, geokompozit gibi çeşitleri bulunan geosentetik malzemelerdir. Genel olarak polietilen, poliester ve polipropilen polimer hammaddesinden üretilen geosentetiklerin kullanımı son zamanlarda oldukça yaygınlaşmıştır. Ayrıca, 1980'li yıllardan beri üretilen ama son dönemlerde yaygınlaşan bazalt fiber ve bazalt geogrid malzemeleri de zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılmaktadır.

Bu çalışmada zemin çivileme, ankraj ve kazık çalışmalarına yer verilmemiştir. Çünkü bu çalışmalar sonucunda zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirme sağlanmamakta, zayıf zemin daha dayanımlı bir ana kaya veya zemine bağlanmaktadır.

## **Geosentetikler**

Geosentetikler, zemin güçlendirme, ayırma, filtrasyon, drenaj, kapsama koruma ve erozyon kontrolü gibi çok yaygın bir kullanım alanına ve miktarına sahip olan, günümüzde 600 çeşitten fazla türü olan, polyester, polipropilen, polietilen, polivinilin, poliamid gibi sentetik polimerlerden elde edilen ürünlerdir. Geoteknikte pek çok alanda kullanılan bu malzemeler, geleneksel inşaat malzemelerinin yerini almıştır. Bunun en önemli nedenleri ise geosentetik kullanımının güvenlik katsayısını arttırması, yapının performansını iyileştirmesi, diğer malzeme ve yöntemlere göre daha ucuz ve daha hızlı uygulama imkanı sunmasıdır (Koerner, 2012). Günümüzde geotekstil, geogrid, geofom, geocells, geokompozitler zeminlerin iyileştirilmesi/güçlendirilmesi amacıyla kullanılan geosentetik türleridir (Rao et al., 2013).

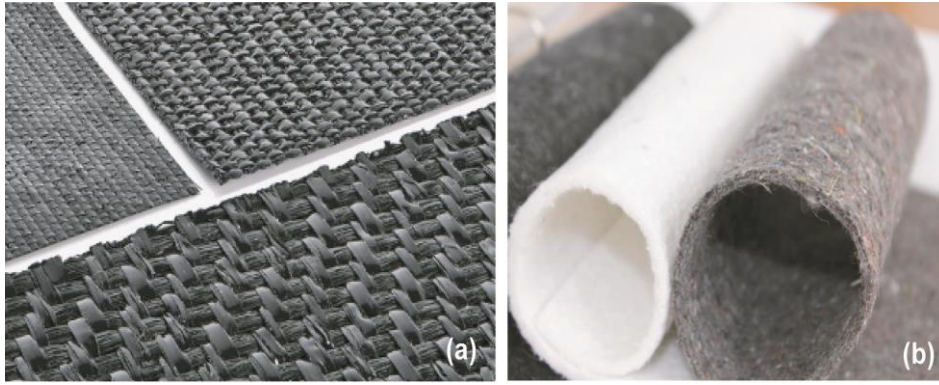
## **Geotekstil**

Geotekstiller sentetik polimerlerden üretilen, geniş bir kullanım alanına sahip polimerik, düzlemsel, ince, esnek, geçirgen tekstil ürünleridir. Birkaç milimetre kalınlığında ve birkaç metre genişliğindeki şilteler, birkaç milimetre genişliğinde ve kalınlığı milimetreden az, sonsuz uzunlukta şeritler veya milimetreden küçük çapta ve sonsuz uzunlukta silindirik lifler şeklinde olabilen geotekstiller örgülü ve örgüsüz olmak üzere iki tiptir (Şekil 16). Örgüsüz geotekstiller filtrasyon, ayırma, drenaj ve koruma amaçlı olarak kullanılır ve elyaflar binlerce filamentten oluşur. Bu filamentler ise mekanik, kimyasal ve termik yöntemler ile bir araya getirilirler. Mekanik üretimle yüksek yoğunluklu ve kalın geotekstil, düşük yoğunluklu ve gözenekli, termal yöntemde ise sert ve yoğun geosentetikler elde edilmektedir. Örgüsüz geotekstillerin kullanım alanları filtrasyon, ayırma, drenaj ve korumadır. Zemin iyileştirme ve ayırmada kullanılan geotekstil türü ise polimerlerden üretilen örgülü geotektildir. Polimerlerin ergitilmesi ile elde edilen fiberler soğutulur, çekilir ve elde edilen malzeme dokuma tezgahlarında dokunarak üretimi yapılan örgülü geoteksitler, kullanılan lif türüne göre monofilament, şerit, ayrık film, multifilament ve ağ tipi olmak üzere 6 çeşittir (Van Santvoort, 1994).

Uygulamada kullanılan geotekstilin mekanik davranışları ile kimyasal ve fiziksel özelliklerinin tasarımda bilinmesi gereklidir. Kumaşı oluşturan polimer madde, iplik çeşidi, lif ve kumaşın yapısı, kumaş özelliklerini belirleyen ana faktörlerdir (Görcelioğlu, 1990).

Zeminlerin iyileştirilmesinde geotekstil kullanımında, geotekstilin ana fonksiyonu zemine etkiyecek noktasal yüklerin eşit olarak geniş bir alana yayılmasını sağlamaktır. Böylece zeminin çekme dayanımı ve yenilmeden önceki deformasyon kapasitesi artırılarak zeminin güçlenmesi sağlanmaktadır. Kalınlık, sürtünme davranışı, kayma gerilmesi, kopma yükü, kopma uzaması ve kimyasal dayanıklılığı bir geotekstilde

bulunması istenen özelliklerdir. Geotekstilin kullanıldığı uygulamaların çoğunda, geotekstiller zemini güçlendirme ile birlikte ayırma fonksiyonunu da sağlamaktadır. bir geotekstil malzemesinde bulunması gereken temel özellikler, dır (Erdoğan, 2008). Güçlendirme sağlamak için kullanılan geotekstilin belli bir dayanıma sahip ve çekme kuvvetlerine karşı koyabilecek uzunlukta olması gereklidir. Yapılan uygulamanın etkili olabilmesi, güçlendirilen yapının aşırı hareketini önlemek için dayanımın göreceli olarak küçük birim deformasyonlar oluşturması gerekmektedir (Kotan, 2008). Sentetik polimerden üretilmiş geotekstiller haricinde, fonksiyonlarını sınırlı bir süre yerine getirebilen pamuk, keten, sisal, jüt, kenaf, abaka gibi doğal liflerin kullanıldığı geotekstiller de vardır (Horrocks & Anand, 2003).



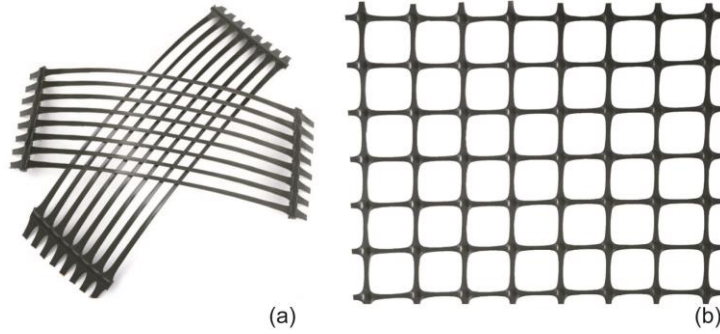
**Şekil 16.** Örgülü (a) ve örgüsüz (b) geotekstiller

## **Geogrid**

Zemin güçlendirmesi amacıyla kullanılan ve yüksek dayanıma sahip diğer bir malzeme olan geogridler, yüksek yoğunluklu polietilen ve polipropilenden üretilirler. Geogridler üretim şekline göre ekstrüde, dokuma ve yapıştırma olmak üzere üç tipi bulunan geogridlerden ekstrüde geogridler plakaların delinip belirli sıcaklıklarda çekilmesi ile, dokuma geogridler dokuma tezgahlarında istenilen dayanıma göre polyester ipliklerin örülmesi ile, yapıştırma geogridler ise polimer şeritlerinin lazer ya da ısıl işlem ile birbirine dik olarak yapıştırılması ile üretilirler (Koerner, 2012). Ekstrüde geogridler dayanımı en yüksek olanlardır ve bunlarda dayanımı arttıran en önemli faktör bağlantı noktalarının kendiliğinden ortaya çıkmasıdır (Çetin Karagül, 2007).

Tek eksenli ve çift eksenli geogridler olmak üzere geometrilerine göre ikiye ayrılırlar (Şekil 17) ve bu eksenler üzerinde yükün iletimi olacağı için gelen kuvvetlere göre geogrid seçimi oldukça önemlidir. Tek eksenli geogridler üzerine gelen kuvvetleri tek bir eksen üzerinden iletirler ve yük nakli bu eksen üzerinden tek yönlü olarak meydana gelir. Karayollarında köprü yaklaşım rampası gibi donatılı duvar imalatlarında en sık tercih edilen

geogridlerdir. Çift eksenli geogridler ise x ve y yönlerinde bir birlerine doksan derece açıyla bağlanmış, üzerlerine gelen kuvvetleri her iki yönde de ileten geogridlerdir. Temel altında bulunan zeminin güçlendirilmesinde, yol dolgularında, donatılı duvarlarda yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Toz, 2020).



**Şekil 17.** Tek eksenli (a) ve çift eksenli (b) geogridler

Geogridler üretilirken polyester iplikler örülür ve etrafı hasarları engelleyen ve stabilite artırıcı koruma amaçlı polimer malzeme ile kaplanır. Elde edilen ürünün en önemli özelliği çok az bir uzama da yüksek dayanım sağlamasıdır ve bu sayede özellikle granüler dolgularda yüksek sürtünme açısı sağlarlar ve temel amaçları ise uygulanan zeminde çekme dayanımını artırmalarıdır. Sahip oldukları yüksek çekme dayanımını zeminlere aktarır ve zeminlerin çekme kuvvetlerine karşı koymasını sağlarlar. Geogridlerin esas kullanım amacı donatıdır. Ancak dane çapı farklı iki zemin arasında kullanıldıklarında bu zeminlerin bir birine karışmasını önlemekte ve ayırma işlevi de görmektedirler. Ayrıca, üstüne gelen yükleri düzenli bir şekilde dağıtarak, yük aktarımından dolayı zeminde oluşabilecek farklı oturmaları da engelleyebilmektedir (Kharaghani et al., 2019).

### **Geofoam (Geoköpük)**

Geoteknik uygulamalarında kullanılan geosentetik bir malzeme olan geofoam, bir köpük malzemesidir. Gazlara karşı geçirgen yapıda olan bu köpük malzemesi polimerik (plastik) veya camsı köpük esastır (Yılmaz et al., 2005). Blok veya levha halinde rijit ve hücreli yapıya sahip olan bu malzeme haddeden çekilmiş polistiren köpük (XPS) polimerik köpük veya genişletilmiş polistiren sert köpük (EPS) şeklindeki geosentetik malzemelerdir (Şekil 18). EPS geofoamlar ekonomik olmaları nedeniyle uzun yıllardır kullanılan etkili bir ısı yalıtım malzemesidir. İlk olarak 1972 yılında, Norveç'te hafif ağırlık yol dolgu malzemesi olarak, yol dolgusundaki oturmaları azaltmak için kullanılmıştır.



**Şekil 18.** EPS geof foam bloğu

Geleneksel malzeme kullanımı temel zemininde aşırı oturmalara, stabilite problemlerine veya yanal basınçlara neden olmaktadır. Bu problemlere çözüm olarak ağaç parçacıkları, atık lastik, uçucu kül köpük beton, pelet agrega ve geof foam gibi hafif ağırlık dolgu malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde düşük taşıma gücüne sahip, yumuşak ve sıkışabilir zeminlerin iyileştirilmesinde hafif ağırlık dolgu malzemesi olarak geof foamların kullanımı yaygınlaşmıştır. Geof foamların özellikle yol dolgularında hafif ağırlık malzemesi olarak kullanımı ile stabilite sorunları ve aşırı oturma problemlerine çözüm getirilebilmektedir. Geoteknik uygulamalarda geof foamların sıklıkla tercih edilmesinde bu malzemenin tasarımılanmış ve standartlara göre üretilmiş olması, farklı projeler için farklı tiplerini bulunması, özelliklerinin değişken olmaması, fiziksel özelliklerinin gömülü şartlarda uzun vadede bozulmaması, tahmin edilebilir davranışa sahip olması, inşaat süresinin kısa olması, projeye göre istenilen boyutlarda kesilebilir olması önemli etkenlerdir.

Geof foamlar mühendislik uygulamalarında sıkışabilir tabaka, hafif ağırlık dolgu, ısı yalıtımı, drenaj, küçük genlikli dalga sönümleme ve yapısal/çeşitli kullanımlar olmak üzere altı farklı amaç için kullanılmaktadır (Horvath, 1995).

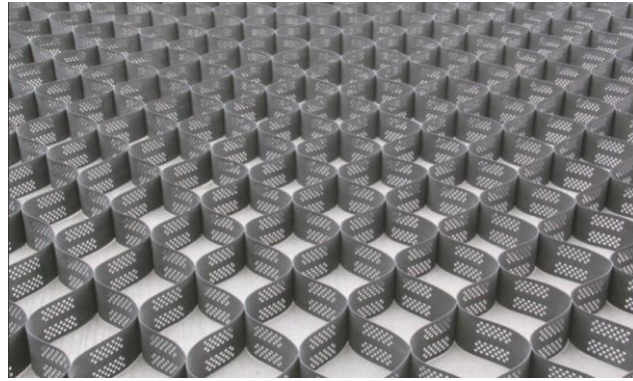
Isısal direnç, yoğunluk, titreşim sönümleme, sıkışabilirlik ve kendi kendini destekleyen yapısı gibi özelliklerinden dolayı uygulamalarda EPS Geof foam malzemenin önemi ve kullanımı artmaktadır. Bu özellikler ve ekonomik olması nedeniyle birçok geoteknik uygulamada karşılaşılabilen taşıma gücü problemlerinin çözülmesi sağlanabilmektedir. Uygulama hızı oldukça fazla olan bu yöntemde, malzeme istenilen ölçülerde kesilip hazırlanmakta ve şaşırtmalı olarak uygulanmaktadır. Toprak dolguya nispeten daha çabuk uygulanabilen geof foam, toprak malzemesine oranla 100 kat daha hafif olduğundan geof foam dolgular kolay uygulanmaktadır. Böylece iş makinesine gerek duyulmadan uygulama kolaylıkla yapılabilmektedir.

Geof foamlar, toprak dolgu malzemelerine göre çok hafif oldukları için zeminde ek yük oluşturmazlar. Yapılardan kaynaklanan ve zemine

aktarılan yükleri büyük oranda azaltarak taşıma gücü, oturma ve şev stabilitesi gibi problemlerin oluşmasını engellerler. Geoköpük kullanımı ile temel boyutları küçülmekte, temelin belli bölgelerinde gerilme artışı olmakla birlikte geofom bulunan bölgede gerilmelerde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Uygulama sonunda çelik donatı kullanımında %5, beton miktarında ise %15'e varan azalmalar elde edilebilmektedir (CTE-Wind, 2016).

### **Geocell (Geohücre)**

Geosentetiklerin bir türü olan geoceller, polimer esaslı üç boyutlu, peteksi bir dokuya, oldukça yüksek eğilme ve çekme dayanımına sahip bir malzemedir. Bu malzeme ile ilgili ilk uygulama Webster (1979) tarafından yapılmış, sonraki yıllarda maliyet ve uygulama kolaylığı nedeniyle diğer metal malzemelerin yerine tercih edilmeye başlanmıştır. Bu malzeme zemin iyileştirme, güçlendirme ve drenaj çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle 100 mm genişliğinde ve yaklaşık olarak 1.2 mm kalınlığındaki geocell, ultrasonik kaynaklama yöntemiyle birbirlerine 100 mm'lik genişliğinden ve yaklaşık 200 mm aralıklar halinde yapıştırılır ve uygulanacak alana akordeon gibi katlı şekilde getirilir. Çalışma alanında geocell doğrudan olarak temel zemini üzerine yerleştirilir ve akordeon şeklinde katlı olan hücreler açılarak uygulanacak alana yayılır (Şekil 19).



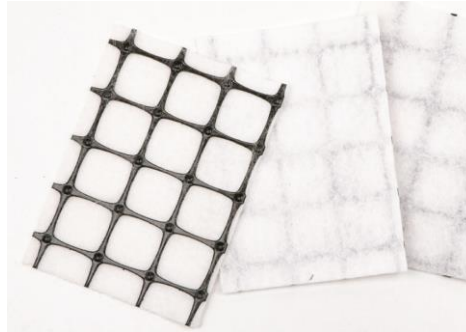
**Şekil 19.** Geocell malzemesi

Daha sonra hücreler granüler zemin ile doldurulur ve vibrasyonlu el sıkıştırıcıları (kompaktör) ile sıkıştırılır. Böylece petek şeklindeki hücrelerde daneli zemini hapsedilmekte, yanal ve düşey hareketler sınırlandırılarak zeminin kayma dayanımı ve dolayısıyla taşıma gücü büyük oranda artırılmaktadır. Daha kalın geocell kullanımı ile zeminde meydana gelecek olan iyileşme de artmaktadır. Ayrıca, geotekstil ile birlikte kullanılan uygulamalarda zemin ile geocell arası sürtünme daha fazla olduğundan, daha büyük bir taşıma gücüne ulaşılabilir. Geocell içerisindeki daneli zeminde yapılacak sıkıştırmanın derecesine bağlı olarak taşıma gücü üstel olarak artmaktadır. Bu malzemenin en önemli avantajlarından birisi de sadece sürtünmeli zeminlerde değil, aynı

zamanda kohezyonlu zeminler de kullanılabilmesidir (Koerner, 2012). Nitekim araştırmalarda geocelller ile güçlendirilen zemin örneklerinde taşıma gücünün arttırılmasına ek olarak zemin numunesine ek bir kohezyon kazandırdığı belirlenmiştir (Langa & Murty, 2007; Chen et al., 2013).

## **Geokompozitler**

ASTM D4439 (2015) tarafından iki veya daha fazla malzemeden oluşan, bunlardan en az biri geosentetik olan ürünler şeklinde tanımlanmaktadır ve genel olarak geotekstil, geogrid, geoağ, geocell ve geomembran gibi geosentetik malzemelerin bir arada kullanılmasıyla oluşan geokompozitler drenaj işlevi ile birlikte güçlendirme, ayırma, filtrasyon ve koruma amaçlı da kullanılabilir. Geotekstil-geonet-geotekstil (geokompozit drenaj) şeklinde uygulanan geokompozitler, iki tekstil arasına geonetin yapıştırılmasıyla imal edilir ve drenaj amacıyla kullanılırlar. Geotekstil-geomembran geokompozitleri ise uygulamanın amacına göre örgüsüz tip geotekstillere geomembranın her iki yanına veya tek yönüne sarılarak oluşturulur. Geotekstillere çekme dayanımını sağlamakla birlikte delinme, yırtılma ve sürtünmeden dolayı meydana gelebilecek hasarlara karşı direnç sağlarken, aynı zamanda drenajı sağlamaktadır. Altta yer alan geomembran ise geçirimsizlik fonksiyonunu yerine getirir. Geomembran-geogrid geokompozitleri yüksek yoğunluklu polietilenden oluşan geogridler ile geomembranların birleşiminden oluşurlar. Bu geokompozit malzemeler geçirimsizlik sağlamak amacıyla kullanılırlar. Geotekstil-zemin geokompozitleri ise koruma amaçlı olarak kullanılan ve iki geotekstil katmanı arasına bentonit kil yerleştirilerek oluşturulan geokompozitlerdir. Drenajı sağlamak amacı ile birlikte geogridin çekme dayanımından faydalanılarak güçlendirme amacıyla da kullanılan geokompozit türü ise geotekstil-geogrid geokompozitleridir (Şekil 20). Bu geokompozitlerde genellikle örgüsüz geotekstillere ve yüksek yoğunluklu polietilenden oluşmuş geogridler kullanılmaktadır (Koerner, 2012)



**Şekil 20.** Geotekstil-geogrid geokompozit

## **Fiberler**

Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemler, geçmişten günümüze değin gelişerek ve artarak kullanılmaya devam etmektedir. Bu süreç içerisinde daha ekonomik ve güvenilir yöntemler belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar geoteknik uygulamalara yeni iyileştirme yöntemleri ve malzemeleri kazandırmaktadır. Bu malzemelerden birisi de düşük maliyetli olmasına karşın, dayanımları yüksek ve kolay ulaşılabilirliklerinden dolayı fiber/lif katkıların zemin iyileştirmede kullanımını son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Fiber, doğal olarak bulunabilen ya da insanlar tarafından üretilen, aynı malzemenin daha büyük boyutlu olanına göre daha yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip malzemelerdir (Ekincioglu, 2002). Doğal ve yapay fiber olmak üzere iki türü bulunan fiberlerin bazı türleri oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Doğal ve yapay fiberler problemlı zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla zemine katkı olarak eklenmesi durumunda, zeminin kesme dayanımını artırmakta, oturma değerleri azalmakta ve şişme yüzdelisinde ise önemli iyileşmeler sağlamaktadır.

### **Doğal Fiberler**

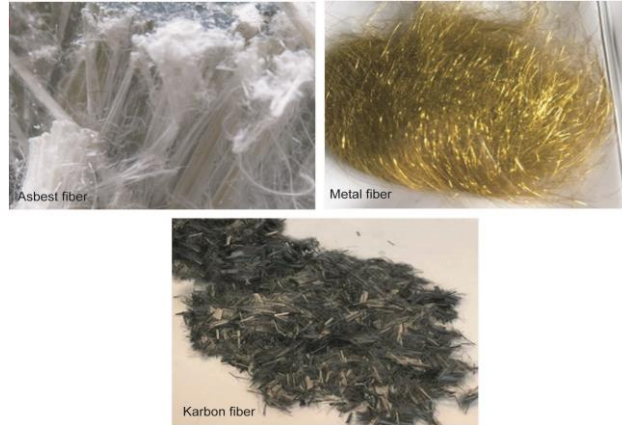
Doğada hazır halde bulunan fiber türleri doğal fiber olarak tanımlanmaktadır (Aral, 2006). Yoğunluklarının düşük, özgül ağırlıklarının yüksek, ekonomik, yenilenebilir, çevreye karşı herhangi bir zararı olmayan, aşınmaya karşı dayanıklı, kolay şekil verilebilen, ısı ve ses yalıtımı iyi olan ve geri kazanılabilen özellikte olmaları gibi çok sayıda avantajı bulunan doğal fiberlerin en büyük dezavantajı nemden etkilenmeleridir (Bismarck et al., 2006). Doğal fiberler bitkisel, hayvansal ve madensel fiberler olmak üzere üç gruba ayrılır. Bitkisel fiberler bambu, Hindistan cevizi kabuğu, keten, kenevir, jüt, sisal, şeker kamışı posası ve selüloz gibi bitki veya bitki artıklarını içeren gruptur (şekil 21). Hayvansal fiberleri ise yün ve ipek gibi hayvansal lifler oluşturur (şekil 22). Madensel fiberler ise asbest, metal lifleri ve karbon lifleridir (şekil 23).



**Şekil 21.** Bitkisel fiberler



**Şekil 22.** Hayvansal fiberler



**Şekil 23.** Madensal fiberler

## **Yapay Fiberler**

Yapay fiberler ise bazı katkı maddeleri eklenerek insanlar tarafından üretilen fiberlerdir (Aral, 2006) Bu fiber grubunu cam fiberler, polimer fiberler ve günümüzde kullanım alanı yaygınlaşan bazalt fiberler olmak üzere üç ana gruba ayırmak mümkündür. Diğer fiber türlerine göre daha maliyetli olan yapay fiberleri dayanımları kolay erişilebilir olmaları nedeniyle birçok alanda farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında ise özellikle beton ve zeminin dayanımını artırmak amacıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Cam fiberler, sert, korozyona dayanıklı ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeyen, hafif, esnek ve fiyatı uygun bir malzeme olduğu için düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda çok fazla tercih edilmektedir (Şekil 24). Elastisite modüllerinin benzer olmasına karşın, dayanımları farklıdır ve çevresel etkilere karşı farklı dirençler gösterirler. Kimyasal direnç ve çekme dayanımının fazla olmasının gerekmediği uygulamalarda E tipi cam fiberler, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda C tipi, elektriğe karşı dirençli malzeme imalatında D tipi, alkalın dayanımın yüksek olmasının istendiği uygulamalarda ise A tipi ve AR tipi cam fiberler kullanılmaktadır (Barbero, 1999). Beton ve çimento gibi alkalın içeren ortamlarda olumsuz korozyon etkisi nedeniyle cam fiber kullanımındaki problemler alkali etkisine dirençli cem-fil isimli cam fiber türünün üretilmesi ile aşılmıştır. Bu özel cam fiberler beton ve harçların donatılabilmesinde kullanılmaya başlamıştır (Kurt, 2006).



**Şekil 24.** Cam fiber

Polimer fiberler, tekstil ve petrokimya endüstrisinde üretilmiş akrilik, naylon, aramid, polipropilen ve polietilen olmak üzere farklı türleri bulunan, çekme dayanımları çok yüksek olmakla birlikte aramid hariç elastisite modülleri düşük sentetik ürünlerdir. Çapları mikron seviyesinde olan bu fiber grubunda, çap ve uzunluk oranı kalitelerini belirlemektedir. Tekil veya lif hamuru şeklinde bulunabilen polimer fiberler özellikle betonda dayanımı ve elastisite modülünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır (ACI Committee 544, 2002).

Polimer fiberlerden %85 oranında akronilit özellik gösteren sudan daha yoğun olanları akrilik fiber olarak tanımlanmaktadır (Şekil 25). Bu liflerin en önemli özelliği, naylon, poliester ve polietilene göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalarıdır (ACI Committee 544, 2002). Aramid fiberler ise ultra yüksek molekül ağırlıklıdır ve bu özelliği ile diğerlerinden ayrılırlar. Düşük yoğunluklu aramid fiberlerin mekanik özellikleri oldukça iyidir (Şekil 25). Dayanım, sertlik, hasar ve yorulma dirençlerinin yüksek olması, bu fiberlerin tercih edilmesini en önemli nedenidir (Gümüşderelioğlu, 2004).



**Şekil 25.** Akrilik ve aramid fiberler

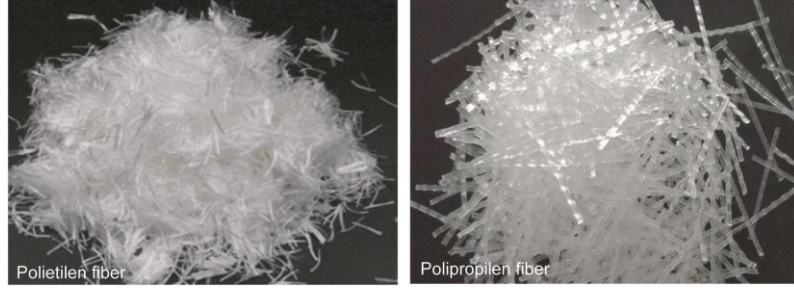
Naylon liflerin dayanımları yüksektir ve mükemmel elastik özellik gösterirler (Şekil 26). Ayrıca ısıya çok dayanımlı olmaları nedeniyle uygulamalarda kolaylıkla kullanılır ve tercih edilirler (Cook, 1984). Sadece monofilament formda bulunan polyester fiberler, çimentoda katkı malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen bir üründür. Günümüzde beton endüstrisine sunulan polyester fiberler (Şekil 26), termoplastik polyester alt grubuna aittir ve üretim tekniklerine bağlı olarak farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterirler (ACI Committee 544, 2002).



**Şekil 26.** Naylon ve polyester fiberler

Polietilen fiberler ilk olarak ICI tarafından 1930'lu yılların başında gerçekleştirilmiş ve günümüze değin üretilmeye devam edilmiştir (Şekil 27). Eriyikten lif çekim yöntemi kullanılarak elde edilen bu ürün, neme, dış ortam şartlarına, yüksek kimyasal dirence ve yüksek çekme dayanımına (25 kg/mm<sup>2</sup>) sahip olması ile birlikte, ucuz ve düşük maliyetli

olmasından dolayı poşet, kap, plastik kutu, mutfak eşyası, kaplama, boru, oyuncak, kablolarda yalıtkan tabakalar, kalıp yapımı, elektrik izolasyonu, paketleme malzemesi ve ambalaj filmi gibi birçok sektörde kullanım alanı bulunmaktadır (McIntyre, 2004).



**Şekil 27.** Polietilen ve polipropilen fiberler

Polipropilen fiberler (Şekil 27) ise polimer liflerin arasında maliyetinin ve özgül ağırlığın düşük olması, asit ve korozyon direncinin yüksek olması, tokluk özelliğinin üstün olması ve çatlak gelişimini engelleyebilme özelliğine sahip olmasından dolayı yaygın olarak uygulamalarda kullanılmaktadır (Banthia & Gupta, 2006).

Günümüzde kullanımı giderek yaygınlaşan bir diğer yapay fiber türü de bazalt fiberdir (Şekil 28). İlk olarak 1980'li yıllarda Ukrayna ve Gürcistan'da üretilmeye başlanan bazalt fiberin hammaddesi doğal bir malzeme olan bazalt kayasıdır. Belli bir dane büyüklüğüne kadar öğütülen bazalt yıkanır, temizlenir ve 1300-1700°C gibi yüksek sıcaklıklarda eritilir. Eritme işleminden sonra çekilerek lifler haline getirilir (Kamiya et al., 2013). Bazalt fiber üretiminde kullanılacak olan bazaltın kimyasal bileşimi, katılaşma sürecinde hava ile olan etkileşimi ve soğuma hızı üretim açısından önem taşımaktadır (Parnas et al., 2007). Bazalt fiberlerin dayanımları oldukça yüksektir. Ayrıca, yüksek ısıya, çevre şartlarına ve kimyasal maddelere karşı oldukça dirençli oldukları için betonun dayanımının artırılmasında katkı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bazalt fiberin zemin iyileştirmede kullanımı ise yeni olmakla birlikte her geçen gün artmaktadır. Zemin iyileştirmesi amacıyla zemine eklenen bazalt fiber, zemin parçacıkları ile etkileşime girerek birbirlerini sınırlamaktadır. Zemindeki fiber, zemin parçacıkları tarafından sarılmakta, zemin ve fiber parçacıkları birbiriyle temas ederek kapiler kuvvetler oluşturmaktadır (Tang et al., 2007). Böylece zeminin kayma ve serbest basınç dayanımı artmakta, şişme potansiyeli ise önemli ölçüde azalmaktadır.



**Ŗekil 28.** Bazalt fiber

## **YÖNTEMLERİN KULLANIM KOŖULLARI**

Zeminlerin iyileŖtirilmesi alıŖmalarının baŖarısı temel iki ana etken tarafından kontrol edilir. Bunlar; zemin için uygun yöntemin seçimi ve doğru Ŗekilde uygulanmasıdır. Bu nedenle, iyileŖtirme yöntemlerinin zemin türü, su durumu, uygulama derinliği gibi kullanım Ŗartlarını çok iyi bilmek, uygulanacak yöntemin avantaj ve dezavantajlarını dikkate almak gereklidir. Bu faktörlerin göz önü alınarak yöntemin seçilmesi, uygulamanın sonucu ile birlikte maliyetini de etkileyecektir. Bu nedenle, uygulama mühendislerinin farklı tipteki projelerde gereksinim duyduğu iyileŖtirme tasarımlarında baŖarılı olabilmeleri, ancak bu yöntemlerin kullanım Ŗartları ile birlikte avantaj ve dezavantajları hakkında yeterli bilgi ve deneyime sahip olmaları ile mümkün olabilecektir.

Bu bölümde, önceki bölümlerde genel olarak uygulanıŖları ve kullanılan malzemelere ait özellikleri verilen zemin iyileŖtirme yöntemlerinin hangi koŖullarda kullanılabileceği, avantaj ve dezavantajlarının ne olduğunu açıklayan, bir anlamda uygulayıcı için kılavuz olabilecek tablolar hazırlanmıŖtır (Tablo 1-6). Bu tablolarda, hangi yöntemin hangi zemin Ŗartlarında, hangi derinliklerde uygulanabileceği, uygulanacak olan yöntemin avantajı ile birlikte dezavantajının ne olduğunu kısaca açıklanmaya alıŖılmıŖtır. Verilen tablolar, metinle uyumlu olarak Haussmann (1990) tarafından önerilen iyileŖtirme sınıflaması esas alınarak düzenlenmiŖtir.

**Tablo 1.** Mekanik iyileştirme yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Max Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Yüzeysel kompaksiyon	Kum ve silt	2 m	Hızlı ve çok düşük maliyetlidir.	Etki derinliği çok düşüktür. Yan binalara etki edebilir.
Dinamik kompaksiyon	Granüle zeminler ve yarı doymun killer	10 m	Hızlı uygulanabilir. Büyük alanlarda ekonomiktir. Maliyeti orta-düşüktür.	İnce dane oranının artması sonucunda etkisi azalır. Doymun killerde anlık boşluk suyu basıncı etkisiyle iyileşme sağlanamaz. Kısmen doymun killerde zeminin iyileştirilmesi mümkündür. Yan binalara etki edebilir
Hızlı darbeli kompaksiyon	Granüle zeminler	10 m	Hızlı uygulanabilir. Küçük alanlarda mükemmel makine çalışabilirliği, azaltılmış toz ve titreşim nedeniyle çevre dostudur Maliyeti orta-düşüktür.	Geçirimlilik azaldıkça (>%20 ince zemin) etkisi azalır. İyileştirilen alanın etrafındaki yapılar için zararlı olabilir.
Vibrokompaksiyon	SPT sayısı 5-10 arasında olan granüle zeminler	45 m	Derin temellere göre daha ekonomiktir. Hızlı uygulanabilir. Yeraltı su seviyesinin üstünde de altında da çalışma imkanı verir. Maliyeti ortadır.	Zemin %12-15'ten fazla silt içeriyorsa veya %2'den az kil içeriyorsa iyi bir sıkılaşıma sağlanamaz.
Vibroflotasyon	Orta ve iri kum zeminler	40-50 m	Derin temellere göre daha ekonomiktir. Yeraltı su seviyesinin üstünde de altında da çalışma imkanı verir. Maliyeti ortadır.	Vibrokompaksiyon yöntemine göre daha yavaş uygulanabilir. Kil+silt oranının %10'dan fazla olması durumunda iyi sıkılaşıma sağlanamaz. Ağır iş makinelerine ihtiyaç vardır.
Patlatma	Doymun granüle zeminler	Herhangi bir derinlik	Hızlı ve kolay uygulanabilir. Düşük maliyetlidir.	Orta sıklıktaki zeminlerde ise ciddi bir iyileştirme sağlanamaz. İnsan hayatı ve etrafındaki yapılar için tehlikeli olabilir.
Taş kolon	Siltli kum zeminler ve yumuşak orta katılıktaki kil zeminler	20 m	Zemini sıkılaştırır. Yanal gerilmeyi artırır. Sıvılaştırılabilir zeminler için çok etkilidir. Orta-düşük maliyetlidir.	Belirli bir derinlikte bulunan sınırlı kalınlıktaki sıvılaştırılabilir zeminlerde yetersizdir. Sert tabakalara penetrasyonu güçlüdür. Kalınlığı 10 m'den fazla olan killi zeminlerde kullanılamaz. Etrafındaki zeminde oturmalara neden olur. Çevresel atıklar için düşey drenaj kanalı gibidir.

**Tablo 2.** Hidrolik iyileştirme yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
<b>Drenaj</b> Yüzeysel drenaj (Drenaj çukurları, kuyular ve nokta kuyular )	Geçirimli granüle zeminler	3 m	Uygulama oldukça hızlıdır. Maliyeti düşüktür.	Sığ derinlikler için uygundur. Sadece geçirimli granüle zeminlerde kullanılabilir
Derin Drenaj	Geçirimli granüle zeminler	Herhangi bir derinlik	Yeraltı su seviyesini hızlı bir şekilde düşürür. Hızlı ve kolay uygulanabilir. Düşük-orta maliyetlidir.	Killi zeminlerde uygulanamaz.
<b>Ön yükleme</b>				Konsolidasyon oturmalarının tamamlanması oldukça uzun sürebilir. Oturmaların tamamlanabilmesi için çok fazla malzemeye ihtiyaç duyulabilir. Stabilite problemleri oluşabilir.
Drensiz	Doygun kohezyonlu zeminler	30 m	Uygulama süresi uzundur. Düşük maliyetlidir.	Yapısal olarak zayıftır. Zeminin çok yumuşak olduğu durumlarda göçme durumu oluşabilir. Zemin konsolide oldukça drenajların etkinliği azalır. Stabilite problemleri oluşabilir.
Düşey drenli	Doygun kohezyonlu zeminler	30 m	Yalnızca ön yüklemeye göre konsolidasyon daha hızlıdır. Düşük maliyetlidir.	İnce parçacıkların drenlerin yüzeyine doğru hareket etmesi ve drenler tıkanır. Saha büyük ise iyileştirme sahasını küçük alanlara bölmek gerekir.
Vakum	Doygun killi zeminler	20 m	Ek yüklemeye gerek kalmadan drenaj ve konsolidasyon hızlı gerçekleşir. Maliyeti ortadır.	Zeminin hidrolik iletkenliği, elektriksel iletkenliği, elektrik alan şiddeti ve konsolidasyon katsayısı değerlerinin belli aralıklarda olması gereklidir. Yöntemin başarılı olabilmesi için zeminin plastik limitinin üzerinde ve doymuş olması gerekmektedir. Maliyeti orta-yüksektir.
Elektro-Osmoz	Doygun killi zeminler	Herhangi bir derinlik	Uygulama hızlıdır. Spesifik yüzey alanı fazla olan killi zeminlerde başarıyla uygulanabilir.	

**Tablo 3.** Fiziksel iyileştirme yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Enjeksiyon				
Permeasyon	Kum ve çakıl zeminler	Herhangi bir derinlik	Dar alanlarda kolay uygulanabilir. İnce dane oranının % 10'dan az olduğu zeminlerde güvenle uygulanabilir.	İnce malzeme oranının %20'den fazla olduğu zeminlere uygulanması mümkün değildir. Enjeksiyon malzemesinde büyük daneler filtrasyona uğrayabilir. Zemin ile enjeksiyon malzemesi arasında iç kayma direnç oluşabilir. Viskozitenin artması ile enjeksiyon malzemesinin akış hızı azalabilir. Maliyeti düşük-ortadır.
Çatlatma	Düşük geçirimliliğe sahip, ince daneli zeminler	Yüzeeye yakın olmayan herhangi bir derinlik	Dar alanlarda kolay uygulanabilir. Emdirme enjeksiyonunun mümkün olmadığı zeminler stabilize edilebilir.	Uygulama basıncı çok yüksek (4 MPa) olduğu için yüzeeye yakın yerlerde yapılan uygulamalarda kabarmalara yol açabilir. Maliyeti düşük-ortadır.
Kompaksiyon	Örselenmiş kum ve çakıl zeminler	Yüzeeye yakın olmayan herhangi bir derinlik	Dar alanlarda kolay uygulanabilir. İnce dane oranı yüksek olan (>%20) zeminlerde etkilidir. Temelin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrolünde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin iyileştirilmesinde ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde başarı ile uygulanabilir. Maliyeti düşük-ortadır.	Sığ derinliklerde (< 6m) enjeksiyon basıncı şişmeye sebep olabilir. Zeminde oluşturulan enjeksiyon kırılğan yapıdadır ve deprem etkisi ile kırılmalar oluşabilir. Enjeksiyon noktasından çok uzağa gitmeyen bir enjeksiyondur.
Jet grouting	Killi zeminler	Yüzeeye yakın olmayan herhangi bir derinlik	İnce daneli killi zeminlerde başarı ile uygulanabilir. Herhangi bir derinlik aralığı hedef olarak seçilebilir. Zeminin kayma dayanımını ciddi oranda artırır. Oturma değerlerini minimuma indirir.	Yüksek basınçlarda uygulandığı için hidrolik kırılma oluşabilir. Zeminde oluşturulan zemin-çimento karışımı kırılğan yapıdadır ve deprem etkisi ile kırılmalar oluşabilir. Maliyeti yüksektir.

**Tablo 4.** Kimyasal iyileştirme yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Yüzeysel	Killi zeminler	Yüzey ve yüzeye yakın seviyeler	Uygulaması hızlı ve basittir. Maliyeti düşük-ortadır.	Yeterli miktarda ve ekonomik katkı malzemesi temini zor olabilir. Kimyasal reaksiyonun gelişebilmesi ve zemin iyileşmesi zaman alır.
Derin karıştırma	Killi zeminler	20 m	Yumuşak plastik killerden orta sıkı kum ve çakıllara kadar geniş kullanım alanı vardır. Yüzeysel olarak yapılan kimyasal iyileştirme yöntemine göre uygulama daha derinlerde gerçekleştirilebilir. Yöntemde arazideki zemin iyileştirildiği için dışarıdan malzeme getirmeyi gerektiren yöntemlere göre daha ekonomiktir.	Karıştırıcı ekipmanın taşınma maliyetleri görece olarak yüksektir ve yöntem küçük alanlarda ekonomik değildir. Kalite kontrol yöntemleri standardize değildir. Katkı malzemesi ile karıştırılan zeminde iyileşmenin gerçekleşmesi için zamana gerek vardır.

**Tablo 5.** Isıl iyileştirme yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Isıtma	Doygun olmayan siltli ve killi zeminler	15 m	Zeminlerde hızlı bir şekilde şişme, sıkışma ve hassaslık derecesinde azalma, dayanımlarında ise artma sağlanabilir.	Doygun olmayan zeminlerde kullanılamaz. İyileştirme kalıcı değildir. Maliyeti orta-yüksek
Dondurma	Her tür zemin	8 m	Boşluk suyu dondurularak zeminin katılığı ve dayanımı hızlı bir şekilde artırılabilir.	Yeraltı suyu seviyesinin altındaki derinliklerde uygulanamaz. Donma kabarması ve hacimsel genişleme yakın alanlarda deformasyonlara neden olabilir. Çevre sıcaklığı, çalışma sıcaklığı, beton hidrasyon ısısı, sistemdeki kaçaklar donmayı olumsuz etkiler Maliyeti yüksektir.

**Tablo 6.** Donatılandırma yöntemlerinin kullanım şartları, avantaj ve dezavantajları

<b>İyileştirme Yöntemi</b>	<b>Zemin Koşulları</b>	<b>Uygulama Derinliği</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>
Geosentetikler	Her tür zemin	Yüzeysel çalışmalar	Kolay ve hızlı uygulanabilir. Uygulama alanı geniştir. Kullanım süreleri çok fazladır. Maliyeti ortadır.	Dolgu içerisinde parçalanabilir veya açıkta kalan kısımların atmosferik etkiler sonucu bozulabilir.
Fiberler	Her tür zemin	Yüzeysel çalışmalar	Kolay ve hızlı uygulanabilir. Uygulama alanı geniştir. Kullanım süreleri çok fazladır. Maliyeti düşük-ortadır.	Uygulama sırasında zemin içerisine homojen bir şekilde karıştırılmadığında homojen bir iyileşme sağlanamaz.

## **SONUÇ ve ÖNERİLER**

Geçmişten günümüze gelişerek ve çeşitlenerek devam eden zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanma şekli, koşulu, avantajları ve dezavantajlarının verildiği bu çalışmadaki bilgiler, başarılı bir zemin iyileştirme çalışmasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalar olduğunu göstermektedir. Uygulamadaki mühendislerin yapacakları başarılı bir zemin iyileştirme çalışmasında göz önünde bulundurmaları gereken noktaları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

1. Zemin iyileştirme çalışmasının amacı,
2. Zeminin türü,
3. Uygulama derinliği,
4. Yöntemin avantaj ve dezavantajları,
5. Maliyeti,
6. Teknik donanımın yeterliliği,
7. Uygulama mühendisinin seçilen yöntemdeki deneyimi,

Yukarıda verilen her bir maddenin dikkatlice değerlendirilerek iyileştirme yöntemi seçiminin yapılması, yapılacak olan iyileştirmenin başarılı olması ile birlikte, problemsiz, çalışmanın hızlı ve ekonomik bir şekilde tamamlanabilmesi için gereklidir.

## KAYNAKÇA

- ACI Committee 544 (2002). State of the art report on fiber reinforced concrete reported (ACI 544.1R-96 Reapproved 2002). ACI Structural Journal.
- Andersland, OB. & Ladanyi, B. (2004). *Frozen Ground Engineering*. 2nd edition, Wiley, New York.
- Aral, M. (2006). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- ASCE Committee on Grouting of the Geotechnical Engineering Division, (1980). Preliminary glossary of terms relating to grouting. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(7), 803-815.
- Askay, A. (2002). Soil improvement case studies using jet grouts. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi].
- ASTM C 618-12, (2012). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in Concrete*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 4439, (2015). *Standard terminology for geosynthetics*. American Society for Testing and Materials.
- Attoh-Okine, NO. (1995). Lime treatment of laterite soils and gravels-revisited. *Construction and Building Materials*, 9(5), 283-287.
- Aytekin, M. (2004). *Deneysel Zemin Mekaniği*. Teknik Yayınevi.
- Banthia N. & Gupta R. (2016). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Barbero, EJ. (1999). *Introduction to Composite Materials Design*. Philadelphia, Taylor & Francis.
- Bergado, DT., Manivannan, R. & Balasubramaniam, AS. (1996). Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains. *Geotextiles & Geomembranes*, 14(9), 481-505.
- Bismarck A., Baltazar-Y-Jimenez, A. & Sarikakis, K. (2006). Green composites as Panacea? Socio-economic aspects of green materials. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 445-463.
- Brown RE. (1976). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(12).
- Bruce, DA (1996). The return of deep soil mixing. *Civil Engineering, ASCE*, 66(12), 44-46.

- Byle, MJ. & Borden, RH., (Eds.) (1995). Verification of geotechnical grouting. *Geotechnical Special Publication, ASCE*, no.57.
- Chen RH., Huang YW. & Huang FC (2013). Confinement effect of geocells on sand samples under triaxial compression. *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 35-44.
- Cheng, SH., Chen, SH. Ge, L. (2021). Method of estimating the efective zone induced by rapid impact compaction. *Scientific Reports*, 11, 18336, 1-16.
- Chu, J., Yan, SW. & Yang, H. (2000). Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station. *Geotechnique*, 50(6), 625-632.
- Cook, JG (1984). *Handbook of Textile Fibres, Natural Fibres*. Merrow Publishing Ltd.
- Court, WA. & Mitchell, JK (1994). Soil improvement by blasting. *Journal of Explosive Engineering*, 12(3), 34-41.
- CTE-Wind, (2016). Structural design international foundation expertise, subsoil analysis. *Ground Improvement and Wind Turbine Foundations Conference*.
- Çetin Karagül, B. (2007). Yol dolgularının geogrid kullanılarak iyileŖtirilmesi. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Dastidar, AG., Gupta, S. & Ghosh, TK (1969). Application of sandwicks in a housing project. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 59-64.
- Demiröz, A. & Karaduman, M. (2009). Zemin iyileŖtirme metodları. *Selçuk Üniversitesi, Selçuk Teknik Dergisi*, 8(3), 176-192.
- Durgunoğlu, HT., Varaksin, S., Karadayılar, T., Nasöz, E., & Briet, S. (2002). Ağır dinamik kompaksiyon-yüksek enerji kolonları ile zemin ıslahına ait bir vaka analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 2, 444-452.
- Ekincioğlu, Ö. (2002). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranıŖlarının incelenmesi. *Sika Teknik Bülten*, 5/(2002/3), 10-17.
- Erdoğan, TY (2003). *Beton*. ODTÜ GeliŖtirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ŗ.
- Erdoğan, ÜH (2008). Jeotekstillerde kullanılan polipropilen liflerin kullanım anındaki özelliklerinin çeŖitli metotlarda incelenmesi. [Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi].
- Essler, R. & Yoshida, H. (1993). Jet grouting. MP. Moseley, & K., Kirsch (Eds.). *Ground improvement (2nd ed.)*, 160-196.

- Gallevesi, F. (1992). Grouting improvement of foundation soils. RH. Borden, (Ed.). *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, GS30, 4-39.
- Graf, ED (1992). Compaction grout. RH., Borden, (Ed.) *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, GS30, 275-287.
- Genç, D. (2011). *Zemin Mekaniği ve Temeller*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Görcelioğlu E. (1990). Jeotekstiller ve bunların çeşitli mühendislik ve peyzaj uygulamalarında kullanımı. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 40(2), 75-94.
- Gümüşderelioğlu, M. (2004). Geleceğin malzemeleri, kompozit malzemeler. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 2-5.
- Hausmann, MR (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill Publishing company.
- Hitchman, R. (1989). An evaluation of the phoenix machine: A new apparatus for the in-situ densification of soil. [A master's thesis, The University of British Columbia].
- Horrocks, AR. & Anand, SC (2003). *Technical Textiles Handbook*. The Textile Institute, Türk Teks Vakfı.
- Horvath, JS (1995). *Geofoam Geosynthetic*. Horvath Engineering, PC.
- Hossain, KMA. & Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8) 3495-3501.
- Japan International Cooperation Agency, (1994). *Soil Improvement Techniques*, Japan.
- Jawad, IT., Taha, MR., Majeed, ZH., & Khan, TA (2014). Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), 510-520.
- Joshi, RC., Achari, G., Horsfield, D. & Nagaraj, TS (1994). Effect of heat treatment on strength of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(6), 1080-1088.
- Kamiya, S., Sasaki, H. & Nakagawa, N. (2013). *Method for manufacturing basalt fiber*. US. Patent, Patent and Trademark Office, No. 8501643.
- Kharaghani, M., Badakhshan, E., Ebrahimi Far, M., Hosseinzadeh, M. & Ghsemipanah, A. (2019). Experimental model for shallow foundation of wind turbines on reinforced sand with geogrid. *Asas Journal*, 21(54), 16-31.

- Koerner, RM (2012). *Designing with Geosynthetics*. 6th Edition, Xlibris Cooperation.
- Kotan, D. (2008). Geotekstil donatılı zemin istinat duvarları ile yamaçlarda stabilitenin arttırılması. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Kurt, G. (2006). Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Larsson, S. (2003). Mixing process for ground improvement by deep mixing. [Doktora tezi, Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology].
- Latha GM. & Murthy VS (2007). Effect of reinforcement form on the behaviour of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 23-32.
- Locat, J., Berube, MA. & Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294-304.
- Massazza, F. (1989). *Puzolanlı çimentolar ve kullanım alanları semineri*, Ankara.
- McIntyre, JE (2004). *Synthetic Fibres: Nylon, Polyester, Acrylic, Polyolefin*. Elsevier.
- Miao, L., Chen, G. & Hong, Z. (2006). Application of dynamic compaction in highway: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(1), 91- 99.
- Mihalis, IK., Papdopoulo, BP., Anagnostopoulos, AG. & Vlavianos, G. (2003). The contribution of stone columns to the improvement of the stabilityconditions of embankments on soft clay. *Proceeding of the 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, 827-832.
- Mitchell JM. & Jardine, FM (2002). *A guide to ground treatment*. CIRIA publication C573.
- Mitchell, JK (1969). Temperature effects on the engineering properties and behavior of soils. *Highway Research Board, Special Report 103*, 9-28.
- O'Brien, PL., DeSutter, TM., Ritter SS., Casey FXM., Wick AF., Khan E & Matthees HL (2017). A large-scale soil-mixing process for reclamation of heavily disturbed soils. *Ecological Engineering*. 109, Part A, 84-91.

- O'Brien, PL., DeSutter, TM., Casey FXM., Khan, E., Wick, AF (2018). Thermal remediation alters soil properties—a review. *Journal of Environmental Management*, 206, 826-835.
- Özaydın, K. (2011). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi.
- Özaydın, K. (2012). Zeminlerin iyileŖtirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnŖaat Fakültesi *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi*.
- Parnas, R., Shaw, M. & Liu, Q. (2007). *Basalt fiber reinforced polymer composites*. Report Prepared for The New England Transportation Consortium.
- Piña, J., Merino, J., Errazu, AF. & Bucalá, V. (2002). Thermal treatment of soils contaminated with gas oil: influence of soil composition and treatment temperature. *Journal of Hazardous Materials*. 94(3), 273-290.
- Rao, KS., Laksmi, P. & Chatterji, Z. (2013). *Handbook of Geosynthetics*.
- Sarsılmaz, OM (2017). Zemin iyileŖtirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi, değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma. [Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi].
- Scombe, BC (2004). Dynamic Compaction. In Moseley, MP., Kirsch, K. (Ed.), *Ground improvement*, Spon Press, New York.
- Shroff, AV. & Shah, DL (1993). *Grouting technology in tunnelling and dam construction*. Rotterdam: AA Balkema.
- Slocombe, BC. & Moseley, MP (1991). *The testing and instrumentation of Stone columns*. ASTM, STP 1089.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F. & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Terashi, M. & Juran, I. (2000). Ground improvement-state of the art. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*.
- Toz, M. (2020). Bazalt geogridin zemin iyileŖtirilmesinde kullanımı. [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi].
- Tumluer, G. (2006). Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. [Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi].

- U.S. Army Corps of Engineers, (1999). Civil Works Program: Congressional submission. Fiscal year 1999.
- Van Santvoort, GPTM. (1994). *Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. Published in 1994 in Rotterdam by Balkema.
- Varaksin, S. (2010). Introduction to soil improvement parameters classification case history of Kaust. *Ground Improvement Workshop*.
- Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting, soil, rock and structures*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Webster SL (1979). Investigation of beach sand traffic ability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concepts, Report 2, Sand Test Sections 3 and 4, Vicksburg, MS U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report GL-79-20.
- Xanthakos, PP., Abramson, LW. & Bruce, DA (1994). *Ground control and improvement*. John Wiley & Sons, Inc.
- Yılmaz, HR., Eskişar, T. & Aklık, P. (2005). *Geofom malzemesinin geoteknik mühendisliğinde kullanım alanları ve önemi*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 14-19.
- Zhou, Y., Chen, S., Guo, W., Ren, Y. & Xu, G. (2022). Recent Developments in the Vacuum Preloading Technique in China. *Sustainability*, 14, 13897.

