

## Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin Doğal ve Sentetik Lifler Kullanılarak İyileştirilmesi

Yaşar Vitoşoğlu<sup>1</sup>

Tayfun Şengül<sup>2</sup>

### Özet

Taşıma gücü düşük zeminler dünyanın birçok yerinde mevcuttur. Zemin takviyesi, özellikle bu tür zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmeye yönelik bir tekniktir. Bu amaç için son zamanlarda yeterli dayanımları, düşük maliyetleri ve kolay bulunabilirliklerinden dolayı doğal ve sentetik lifler yaygınlaşmaya başlamıştır. Zeminlerin liflerle takviye edilmesi, dik şevlerin inşası, şev hasarlarının onarılması ve yol taban zeminlerinin güçlendirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Dolayısıyla, doğal ve sentetik liflerle takviye edilmiş zeminler son zamanlarda geoteknik mühendisliğinde artan bir ilgi görmekte ve zemin-lif karışımlarında liflerin etkilerini anlamaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu nedenle, bu araştırmanın ana amacı, doğal ve sentetik lifler kullanılarak zeminlerin takviyesi üzerine yapılmış bu çalışmaları gözden geçirerek lifin türü, fiziksel ve mekanik özellikleri, miktarı, uzunluğu ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin farklı türdeki zeminlerin mühendislik özellikleri üzerine etkileri hakkında kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirmektir. Ayrıca bu çalışma, zemin güçlendirmede doğal ve sentetik liflerin kullanımının tarihçesini, faydalarını ve uygulamalarını tartışmayı amaçlamaktadır. Daha önceki çalışmaların gözden geçirilmesi, zeminlerin liflerle takviye edilmesinin, çeşitli geoteknik ve çevresel faydalara sahip, etkili ve düşük maliyetli bir zemin stabilizasyon tekniği olduğunu göstermektedir. Literatür incelendiğinde doğal ve sentetik liflerin eklenmesinin Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı değerlerini artırdığı görülmektedir. Ayrıca, lif kullanımı zeminin plastisite indisini düşürmekte ve hacim değişimini de azaltmaktadır. Sonuç olarak, bu literatür çalışması, geoteknik ve ulaştırma mühendislerine taşıma gücü zayıf zeminleri doğal ve sentetik lifler kullanarak stabilize etmelerinde yardımcı olacaktır.

- 1 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, yasar.vitosoglu@dpu.edu.tr, 0000-0002-5543-9673
- 2 Dr.Öğr.Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, tayfun.sengul@dpu.edu.tr, 0000-0003-3473-7724

## 1. Giriş

En genel ifadeyle toprak ya da zemin, minerallerin, organik maddelerin, gazların, sıvıların ve sayısız organizmanın bir karışımı olup çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreç yoluyla sürekli olarak değişime uğrar. Zemindeki mineraller ise, genellikle çakıl, kum, silt ve kil olmak üzere dört temel bileşenden oluşur. Zeminin özellikleri büyük ölçüde çevre koşullarına bağlı olup genellikle düşük çekme ve kesme dayanımına sahiptir. Diğer taraftan takviye, birtakım istenilen özelliklere sahip olmayan bazı malzemelerin, bu özelliklere sahip diğer malzemelerle birleştirilmesidir. Bu nedenle zemin takviyesi, kesme mukavemeti, yoğunluk, sıkışabilirlik ve hidrolik iletkenlik gibi parametrelerin geliştirilmesi için zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirme tekniği olup taş kolonlar, kazıklar, zemin çivisi ile sıkıştırılmış dolgu ve insan yapımı takviye malzemesi ile güçlendirilmiş topraktan oluşabilir [1].

Zemin stabilizasyonu, bir zeminin mühendislik özelliklerini ve performansını iyileştirmek amacıyla bir veya daha fazla zemin özelliğinin değiştirilmesi veya korunması olarak tanımlanabilir ve çeşitli yöntemleri içerir. Bu nedenle, zemin stabilizasyonu teknikleri farklı bakış açılarına göre değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Bununla birlikte, geoteknik mühendisliğinde kullanılan zemin stabilizasyon yöntemleri, genellikle mekanik ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki başlık altında toplanabilir [2]. İki yöntem, değişik açılardan bir zeminin performansını artırmak için bağımsız olarak veya aynı anda kullanılabilir.

Mekanik stabilizasyon, zeminin kimyasını değiştirmeden fiziksel özelliklerinin değiştirildiği bir süreçtir. Bu yöntemde zemin stabilizasyonu, doğal zemin parçacıklarının fiziksel yapısını titreşim veya sıkıştırma yoluyla değiştirerek veya bariyerler ve çiviler gibi diğer nesnelere zemin yapısına ilave ederek gerçekleştirilir. Mekanik stabilizasyon, aynı zamanda nihai karışımın hedeflenen tane dağılımına sahip olması için yerel zeminin çeşitli oranlarda başka bir zeminle karıştırılmasını da içerir. Diğer bir deyişle, iyi derecelenmiş, yoğun bir zemin-agrega karışımı oluşturmak için ilave ince taneler veya agregalar eklenebilir. Son olarak, zeminlerin özelliklerini geliştirmek için sentetik veya doğal katkı maddelerinin kullanılması olan zemin takviyesi de, mekanik stabilizasyon yöntemlerinden birisidir. Zeminin kayma direncini artırmak için yüksek çekme dayanımına sahip ve rastgele dağıtılmış liflerin zemine ilave edilmesiyle zemin stabilizasyonu sağlanabilir. Ayrıca, zayıf zeminlerin takviyesi, donatı çubukları, geosentetik şeritler, geotekstiller veya geogridler gibi düzlemsel donatı elemanlarının zemin içerisine yerleştirilmesi yoluyla da olabilir. Donatı elemanlarının yatay, dikey

veya her iki yönde yönlendirilerek tabaka tabaka yerleştirildiği bu yöntemde, takviyeli düzlemlerde ek sürtünme direnci sağlansa da takviye elemanları olmayan düzlemler nispeten zayıf kalmaktadır [3].

Mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon kadar yaygın olarak kullanılmasa da bazı avantajları vardır. Avantajlardan biri, zemin parçacıklarının sadece fiziksel olarak dönüştürülmesidir; bu da, sonunda etkisi azalacak hiçbir kimyasal değişikliğin meydana gelmediği anlamına gelmektedir. Kimyasal stabilizasyonla karşılaştırıldığında, yağmur ve kar gibi hava etkenlerinden olumsuz yönde çok fazla etkilenmez ve sağlığa zararlı kimyasal maddelerin deşarjına daha az sebep olduğundan çevresel etkiler bakımından daha güvenilirdir. Zeminlerin mühendislik özellikleri kritik kabul edilmediğinde mekanik stabilizasyon uygulaması nispeten daha hızlıdır. Takviye maddeleri dâhil edilmediğinde, zaman alıcı standart laboratuvar deneylerine ihtiyaç duymaz. Uygulama prosedürü nispeten basit olup yüksek eğitimli personel gerektirmez. Diğer taraftan, mekanik stabilizasyonun dezavantajlarının olduğu da bildirilmiştir. Mekanik stabilizasyon teknikleri, genellikle bağımsız teknikler olmayıp çoğu zaman kimyasal stabilizasyon teknikleriyle desteklenmeleri gerekir. Kalite kontrolün temel olduğu ve zaman alıcı olabilecek durumlarda, yerinde uygulanması birtakım gecikmelere sebep olabilir. Şişen zeminlerdeki gibi zemin malzemesinin durumunun kritik olduğu durumlarda mekanik stabilizasyon yeterli görülmebilir. Her ne kadar mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyona göre daha çevreci bir yaklaşım olsa da, dünya çapında geosentetik plastik ürünlerin tüketiminin yıldan yıla artması çevre açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır [2]. Bundan başka, korozyona uğramış çelik çevre için zehirli olduğundan, çelik çubukların toprak takviyesi olarak kullanılmasının, kullanım ömrünün sonunda çevreye zararlı etkileri nedeniyle çevre dostu olmayan bir yaklaşım olduğu bildirilmiştir [4]. Dolayısıyla, geosentetik malzemelere ve çelik donatılara nazaran geoteknik mühendisliği uygulamaları için daha sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir mekanik stabilizasyon tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, doğal ve sentetik liflerin zemin takviyesinde kullanımı yeterli mukavemetleri, düşük maliyetleri ve kolay bulunabilirlikleri nedeniyle ivme kazanmıştır. Ayrıca, doğal lifler sentetik lifler ile karşılaştırıldıklarında daha çevre dostu, enerji tüketimi ve maliyet açısından da daha etkin malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan, doğal liflerin toprak altı koşullarında etkili ömürlerinin daha sınırlı olması bir dezavantajdır. Zeminlerin doğal ve sentetik liflerle güçlendirilmesi nispeten yeni bir teknik olduğundan, zemin-lif kompozitlerinin davranışını anlamak zorunludur. Liflerin miktarı, uzunluğu, en-boy oranı, yüzey pürüzlülüğü, özgül yüzey alanı, yönelimi

ve dağılımı, zemin-lif kompozitlerinin mühendislik özellikleri üzerinde en etkili parametreler olduklarından bunların etkilerini anlayabilmek için laboratuvar veya sahada gerekli araştırmalar yapılmalıdır.

Kimyasal stabilizasyon, zemine çimento, kireç, uçucu kül veya polimer gibi çeşitli katkıları eklenerek zeminin kimyasal yapısının değiştirilmesi suretiyle gerçekleştirilir. Bu katkıları, çoğunlukla ucuz, yerel olarak bulunabilir ve çevre dostu malzemeler olduklarından kullanılmaları birçok avantaj sağlar. Zeminlerin kimyasal stabilizasyonunun amacı, zemin malzemesindeki tanelerin boyutlarını artırarak, plastisite indeksini, şişme-büzülme potansiyelini ve çimentolaşmasını azaltarak stabiliteelerini arttırmaktır.

Pek çok araştırmacı, kimyasal stabilizasyonun yararlarından bahsetmiştir. Öncelikle, mevcut taban zeminini uygun bir toprak malzemesi ile değiştirmek yerine stabilize etmek önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca, taban zemininin stabilizasyonu yol üst yapısı tabakalarının kalınlığını azaltarak maliyetini düşürmektedir. Bundan başka, kimyasal stabilizasyon zeminlerin özelliklerinden bağımsız olarak etkili bir yöntemdir. Prosedür, kimyasal katkının karıştırılmasından hemen sonra başlayan kimyasal tepkiye bağlıdır ve zaman alıcı değildir. Etkili bir stabilizasyon işlemi için gereken kimyasal katkı miktarı az olduğundan çoğu zaman uygun maliyetlidir. Bu yöntem, aynı zamanda endüstriyel yan ürünlerin kimyasal katkı maddesi olarak yeniden kullanımına imkân verir. Son olarak, kimyasal stabilizasyon, uzun ömürlü ve kalıcı olup çoğu zemin türüyle uyumludur. Diğer taraftan, kimyasal stabilizasyonun dezavantajları da vardır. Öncelikle, kimyasal stabilizasyonda kullanılan maddelerin üretiminin çevreye zarar verebileceği ve zaman zaman çok pahalı olabileceği bildirilmektedir. Toksik ürünlerin kullanımının bazı zararlı maddeler üretmesi ve tehlikeli maddelerin sızıntı yoluyla yeraltı suyu kirliliğini daha da artırması söz konusudur. Özellikle çimento ile stabilizasyonda yeterli dayanımın elde edilmesi için beklenen kür süresi, çimento üretimi sırasında yüksek enerjiye ihtiyaç duyulması, ekolojik dengeye ve çevreye verilen zarar bu duruma örnek olarak verilebilir [5]. Ayrıca, saha koşullarının laboratuvar simülasyon testlerindeki koşullardan önemli ölçüde farklılık göstermesi durumunda yerinde uygulama pratik olarak verimsiz olabilir. Son olarak, koşullar elverişli olmadığında, kimyasal stabilizasyon zaman alıcı ve emek yoğunudur.

### **1.1. Zemin iyileştirmenin tarihçesi**

Zeminlerin stabilizasyonu binlerce yıldır uygulanmaktadır. Örneğin, Mezopotamyalılar ve Romalılar, zayıf zeminleri toz haline getirilmiş kireç taşı veya kalsiyum gibi stabilize edici bir maddeyle karıştırarak

yolların trafiği taşıma kabiliyetini geliştirmenin mümkün olduğunu keşfetmişlerdir. Benzer olarak, zeminlerin takviyesinde liflerin kullanılması da, yeni bir kavram olmayıp zemin kütlelerine rastgele gömülen bitki köklerinin zeminlerin dayanıklılığını ve doğal şevlerin stabilitesini artırdığının anlaşılmasıyla ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak zeminlerin takviye edilmesinde, bitki liflerinin kullanıldığı yöntemlerin tarihi 5000 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. Hejazi ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bu yöntemlerin tarihçesi özetlenmiştir [6]. Örneğin, çeşitli eski uygarlıklarda saman, ot ve at kılı gibi maddeler kerpiç içine katılıp güneşte kurutularak güçlendirilmiş yapı elemanları üretilmiştir. Irak'ta bulunan ve 3000 yıldan daha eski olan antik zigguratlar, zemin güçlendirme uygulamasının erken örneklerinden biridir. Yine Romalılar Tiber Nehri boyunca kamış takviyeli toprak setler inşa etmişlerdir. Çin Seddi'nde ağaç dallarının çekme elemanı olarak kullanılmasının yanında, Antik Çin ve Japon barınak inşaatlarında arpa samanı halıların takviye elemanı olarak tercih edilmesi de eski yapılarda liflerin kullanılmasını gösteren diğer örneklerden bazıları olmuştur [7].

Vidal, 1969 yılında bir zemin kütlelerine takviye elemanları eklenmesinin ortamın kayma direncini artırdığını keşfetmiş ve böylece liflerin kullanılması suretiyle zeminin güçlendirilmesi kavramına öncülük etmiştir [8]. Vidal'ın 1969 yılındaki bu buluşundan sonra tüm dünyada zemin güçlendirme konsepti kullanılarak pek çok yapı inşa edilmiştir. Geçmiş araştırmalar, düşük modüllü polimerik malzemelerden yüksek çekme mukavemetli metalik levhalara kadar değişen bir dizi takviye malzemesinin, zeminlerin takviyesinde geosentetik malzemeler olarak kullanıldığını göstermektedir. Bu geleneksel sentetik lifler, çoğunlukla yenilenemeyen ve sınırlı bir kaynak olan petrolün yan ürünleridir. Geosentetik ürünler, işleme sırasındaki esneklikleri, yüksek özgül rijitlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle popülerlik kazanmıştır. Bu ürünlerden biri olan ve kesikli liflerden önce geoteknik mühendisliği pazarına "Texsol" markası altında giren ürün, sürekli polyester liflerden oluşmuş olup istinat duvarları ile şev korumalarında kullanılmıştır. Bununla birlikte, kısa lifli zemin kompozitleri olarak bilinen rastgele dağılmış lif takviyeli zeminler, son zamanlarda birçok geoteknik mühendislik uygulamasında ilgi çekmiştir [9]. Sentetik kesikli lifler, polimerik liflerin kullanıldığı ilk çalışmaların gerçekleştirildiği 1980'lerin sonundan beri zeminde kullanılmaktadır. Son olarak, zemini doğal liflerle güçlendirme kavramı eski zamanlarda ortaya çıksa da, sürdürülebilirliği artırmak için geleneksel geosentetik takviyeler için doğal liflerin kullanılması alternatifi büyük bir potansiyel göstermiş ve geoteknik mühendisliğinde yeniden ilgi çekmeye başlamıştır.

## 1.2 Sınıflandırma

Zemine gömülü lifler biçim, doku, sertlik, içerik, uzunluk, en-boy oranı, yönelim ve benzeri açılardan çeşitlilik gösterebilir; bunlar arasında liflerin içeriği, uzunluğu ve yönelimi geoteknik uygulamalarda karşılaşılan en pratik kaygılardır. Lif takviyeli zeminler, uygulama yöntemlerine göre temel olarak Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin ve Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin olmak üzere iki tipte sınıflandırılabilir [10].

Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, liflerin planlanmış bir sisteme göre dikey, yatay veya her iki yönde yerleştirildiği güçlendirme mekanizmasıdır. Genel olarak Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, uygulamaların gereksinimlerine göre dokuma, bağlama, birleştirme veya delme gibi modifikasyonlar yoluyla liflerin mekanik olarak geliştirilmesine izin verir. Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin'in mekanizması, malzemelerin geohücreler, geogridler, geomatlar ve geotekstillerdekine benzer şekilde zeminin daha zayıf düzlemlerine yerleştirildiği geleneksel geosentetik uygulamalara benzer. Yönlendirilmiş dağıtılmış lif takviyesi ile güçlendirilmiş düzlemler boyunca ek sürtünme direnci sağlanırken, nispeten zayıf takviyesiz bölgelerin kırılmaya kendi mukavemetleri ile direnmesi gerekir. Yönlendirilmiş Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin tekniğinin lif takviyeli düzlemler boyunca ek sürtünme mukavemetini harekete geçirdiği, takviyesiz bölgelerin ise kırılmaya kendi mukavemetleri ile direnmesi gerektiği iyice anlaşılmıştır. Dolayısıyla daha zayıf takviyesiz bölgelerde kırılma düzlemleri oluşma olasılığı hâlâ mevcuttur [2].

Diğer taraftan, Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zemin, istenen özellik ve miktardaki liflerin rastgele düzenlendiği ve sıkıştırıldığı bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bu teknikte, kısa ayırık lifler, çimento, kireç, uçucu kül veya diğer katkı maddeleri gibi zemine basitçe eklenip rastgele karıştırılabilmekte ve böylece sürekli zayıflık düzlemleri oluşturmadan zemin kompozitinin mukavemetinde izotropik artış sağlanabilmektedir [2,3,10,11,12]. Gerilmeye maruz kalan rastgele dağıtılmış liflerin numunelerinin dayanımındaki artışa katkıda bulunduğu, ek sürtünmeler ve kenetlenmeler sağlayarak zemini güçlendiren bitki köklerinin davranışına benzer bir davranış sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, ikinci konseptin birincisi kadar iyi bilinmediği, vurgulanmaktadır. Uygulamada ise lifler genel olarak doğal ve sentetik lifler olarak ikiye ayrılır.

## 2. Literatürde Bulunan Liflerle İlgili Çalışmalardan Bazıları

Zemin takviyesi, istenen özelliklerdeki malzemeleri kullanarak zeminin mühendislik özelliklerini ve davranışını iyileştirme tekniği olarak

tanımlanabilir. Zemin kütesini güçlendirmenin temel amacı, taşıma kapasitesini arttırmak ve böylece zemin deformasyonlarını azaltmaktır. Dolayısıyla, taşıma kapasitesi düşük veya sıkışabilirliği yüksek olan zayıf zeminler üzerine inşa edilen hafif yapılar, yol üst yapıları, kanallar ve istinat duvarları gibi yapıların hasar görmesini önlemek amacıyla zemin güçlendirmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Donma-çözülme çevrimleri altında zeminlerin dayanıklılığını artırmak da zemin güçlendirmesinin önemli amaçlarından birisidir. Lif ilavesi ile zemin güçlendirme tekniğinde, lif-zemin kompozitlerinin mühendislik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler, liflerin uzunluğu, en-boy oranı, miktarı, yapısı, yönelimi, sertliği ve yüzey pürüzlülüğüdür [13,2]. Geleneksel geosentetik malzemelerle karşılaştırıldığında, zeminlerin rastgele dağıtılmış liflerle takviye edilmesi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları, liflerin kolaylıkla zemine eklenebilmesi ve karıştırılabilmesi, rastgele dağıtılmış lifler sayesinde potansiyel zayıflık düzlemleri oluşturmadan mukavemet izotropisi elde edilebilmesi, liflerin eklenmesiyle sadece zeminin fiziksel özelliklerinin değişmesi ve çevre dostu malzemeler olmalarıdır. Bu avantajları nedeniyle literatürde rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminler üzerine daha fazla çalışma gerçekleştirilmiştir. Esas olarak, rastgele dağıtılmış esnek liflerin kullanımı, bitki köklerinin davranışını taklit eder ve efektif gerilmenin düşük olduğu yüzeye yakın zeminlere dayanım katmak suretiyle zemin kütesinin stabilitesine katkıda bulunur.

## 2.1. Doğal lifler

Günümüzde, kirliliğin arttığı ve yenilenemeyen kaynakların tükenmekte olduğu konusunda büyük bir farkındalık vardır. Dolayısıyla, daha çevre dostu malzemelere her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, özellikle son yıllarda, doğal liflerin zeminlerin güçlendirilmesinde potansiyel kullanımına yönelik olarak birçok deneysel araştırma yapılmıştır. Yüksek dayanımları, hafiflikleri, düşük maliyetleri, yüksek sertlikleri, sürdürülebilirlikleri ve çevre dostu olmaları nedeniyle doğal liflerin modern endüstrideki önemini vurgulamak üzere “eko-kompozit” terimi yaygınlaşmaya başlamıştır [6,10].

Esas olarak lifin bitkinin hangi kısmından geldiği, bitkinin yaşı, lifin nasıl izole edildiği, iklim, hasat zamanı, lifin higroskopik yapısı ve depolama koşulları doğal lif takviyeli bir zeminde liflerin performansını etkileyen faktörlerden bazılarıdır [14]. Doğal lifler, bulunabilirlikleri ve düşük maliyetleri nedeniyle birçok ülkede uzun süredir çimento kompozitlerinde ve zemin bloklarında kullanılmaktadır [15]. Burada zemin takviyesinde kullanılan bazı doğal lifler ve özellikleri kısaca anlatılacaktır.



### 2.1.1. Hindistan cevizi lifi

Olgun bir Hindistan cevzinin lifli dış katmanı, Hindistan cevizi meyvesinin ıskartası olup Hindistan cevizi kabuğu olarak bilinir. Normalde 50-350 mm uzunluğunda olan lifler, esas olarak lignin, tanen, selüloz, pektin ve suda çözünebilen diğer maddelerden oluşur. Bununla birlikte, Hindistan cevizi kabuğu lifinin bozunması gömme ortamı ile iklim koşullarına bağlı olup yüksek lignin içeriği nedeniyle diğer doğal liflere göre daha yavaştır. Bu nedenle, lif 4 ila 10 yıl arasında hizmet ömrüne sahiptir. Lifin çapı yaklaşık 0,1-0,6 mm olup su emmesi ise yaklaşık %130-180 arasındadır.

Hindistan cevizi kabuğu lifi, ıslanıldığında çekme dayanımının çoğunu korur. Dayanımı düşük olsa da uzaması daha yüksektir. Hindistan cevizi geotekstilleri, geçici güçlendirme amaçları için ekonomik olarak kullanılabilen çok çeşitli özelliklere sahip olup sentetik liflere göre daha yüksek sürtünme katsayısı ile daha iyi esneklik tepkisi gösterir. Bulgular, Hindistan cevizi lifinin esneklik modülünde veya zeminin dayanımında sentetik olandan %47.50 oranında daha fazla artış sağladığını göstermektedir [13].

Viswanadham ve diğerleri, değişen lif içeriği ( $f = \%0,25$  ve  $\%0,50$ ) ve en boy oranı ( $l/b = 15, 30$  ve  $45$ ) ile takviye edilen şişebilen zemin örneklerinin şişme özelliklerini incelemiştir [16]. Konsolidasyon örnekleri üzerinde tek boyutlu şişme-konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kabarma ve şişme basıncında azalma, hem  $\%0,25$  hem de  $\%0,50$  lif içeriklerindeki düşük en boy oranlarında maksimum olmuştur. Son olarak ayrık ve rastgele dağıtılmış liflerin şişebilen zeminin şişmesini engelleme mekanizması, zemin-lif etkileşimi yardımıyla açıklanmıştır.

Khedari ve diğerleri, düşük termal iletkenliğe sahip Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş yeni bir toprak-çimento bloğu tipi geliştirmiştir [17]. Çeşitli karışım oranları dikkate alınmış ve Tayland'da yaygın kullanımı olan yerel üretim süreci kullanılarak numune başına beş örnek üretilmiştir. Araştırma, numunelerin ısı iletkenliği, basınç dayanımı, ağırlığı ve kütle yoğunluğu ile sınırlandırılmıştır. Hindistan cevizi lifinin katkı maddesi olarak kullanılmasının bloğun termal iletkenliğini ve ağırlığını azaltabileceği sonucuna varılmıştır. İyi özellikler elde etmek için optimum toprak:çimento:kum hacim oranı 5,75:1,25:2 olarak bulunmuştur. Hindistan cevizi lifi oranı, 0,8 kg/blok'a karşılık gelen çimentonun  $\%20$ 'sidir. Ortalama numune özellikleri şu şekilde bulunmuştur: 0,6510 W/mK ısı iletkenliği, 39,55 kg/cm<sup>2</sup> basınç dayanımı, 4,85 kg ağırlık ve 1586,77 kg/m<sup>3</sup> kütle yoğunluğu. Ticari olarak üretilen toprak-çimento bloğu ile karşılaştırıldığında, termal iletkenlik ve ağırlıktaki karşılık gelen azalma sırasıyla  $\%54$  ve 750 g olmuştur.



Kodicherla ve Nandyala, Hindistan cevizi lifi ve uçucu kül ile rastgele karıştırılan killi taban zeminlerinin stabilitesini araştırmıştır [18]. Deneyler, farklı miktarlarda Hindistan cevizi lifi ve uçucu külün rastgele karışımlarından oluşan ve yerel olarak mevcut killi zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Hindistan cevizi lifi ile uçucu kül oranları zeminin kuru ağırlığına göre yüzde olarak ifade edilmiş olup sırasıyla %1, %1,5 ve %2 ile %0, %5, %10, %20 ve %30'dur. Deney sonuçları, uçucu kül ile stabilize edilen killi zeminin dayanımında ve Kaliforniya taşıma oranında (CBR) iyileşme sağlandığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, yalnızca %20 uçucu kül ile işlem görmüş killi taban zemininki ile karşılaştırıldığında, rastgele dâhil edilen %1 Hindistan cevizi lifi ve %20 uçucu kül kombinasyonu, taban zeminin CBR değerini 1,5 kat arttırmıştır. Hindistan cevizi lifinin uçucu küle karıştırılmış zemin numunesine dâhil edilmesi, gelişmiş sertlik ve sürtünme içeriği sağlamıştır. Hindistan cevizi lifi takviye edilmiş uçucu küllü zemin karışımlarının yük penetrasyon grafikleri uçucu küllü zemin karışımı örnekleriyle aynı olmuştur.

Ramesh ve diğerleri, Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş siyah pamuk zeminin sıkıştırma ve mukavemet davranışını açıklamıştır. Hindistan cevizi lifi ile güçlendirilmiş siyah pamuk zemin, mukavemet bakımından yalnızca marjinal bir artış göstermiş ve bu durum zemin iyileştirme için kullanımını engellemiştir. Zemin-Hindistan cevizi lifi kombinasyonunun mukavemetini daha da artırmak için optimum %4 oranında kireç eklenmiştir. En-boy oranının ve lif yüzdesinin kompozit zemin numunesinin davranışı üzerindeki kütleme ile etkisi izole edilmiş ve incelenmiştir. Siyah pamuk zeminin kireçle muamele edilmesi mukavemeti artırmış, ancak zemin numunesinde kırılma sebepleri olmuştur. %4 kireçle muamele edilmiş ve Hindistan cevizi lifi ile takviye edilmiş siyah pamuk zemin, göçmeden önce ve sonra sünek davranış göstermiştir. Siyah pamuk zemini güçlendirmek amacıyla, lif için en-boy oranı 20 olan, ağırlıkça %1'lik bir optimum lif içeriği önerilmiştir [19].

Naresh ve diğerleri laterit zemin kütlelerini güçlendirmek için ağırlıkça farklı oranlarda Hindistan cevizi lifi kullanmıştır [20]. Bu amaçla, laterit zemine %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere değişen yüzdelerde Hindistan cevizi lifleri eklenmiştir. Likit limit, plastik limit, Proctor, serbest basınç dayanımı ile ıslatılmış ve ıslatılmamış Kaliforniya taşıma oranı testleri gibi deneyler, değişen yüzdelerde Hindistan cevizi lifi eklenerek hazırlanan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece likit limit, plastik limit, plastisite indeksi, optimum nem içeriği, maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç dayanımı ile ıslatılmış ve ıslatılmamış Kaliforniya taşıma oranı değerleri elde edilmiştir. Hindistan cevizi lifi oranlarındaki artışın plastik

limiti %25,5'ten %16,4'e düşürdüğü, likit limit üzerindeki etkisinin ise %47'den %42'ye düşürdüğü için nispeten küçük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, plastisite indeksi değeri %21,5'tan %25,5'a çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk 1,84'ten 1,89'a yükselirken optimum nem içeriği %13'ten %11,95'e düşmüştür. Diğer taraftan, lif içeriğindeki her artışla birlikte serbest basınç dayanımının ve Kaliforniya taşıma oranının arttığı belirlenmiştir. Islatılmış durumda ve ıslatılmamış durumda CBR değeri ise sırasıyla %94 ve %36,42 oranında artmıştır. Serbest basınç dayanımı ise, %1 Hindistan cevizi lifi ilave edildiğinde Hindistan cevizi lifsiz durumdaki 35,2 kN/m<sup>2</sup> değerinden 42,8 kN/m<sup>2</sup> değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, Hindistan cevizi lifiyle laterit zeminin güçlendirilmesinin, zeminin özelliklerini iyileştirmek için uygun maliyetli ve çevre dostu bir yaklaşım olduğu bulunmuştur.

Chauhan ve diğerleri, taban zemininde Hindistan cevizi lifi ve sentetik lif takviyesinin etkinliğini, dayanım açısından incelemiştir. Laboratuvarda kalıcı şekil değiştirme, esnek şekil değiştirme davranışı ve taban zemininin esneklik modülü belirlenmiştir. Optimum uçucu kül içeriği ile karıştırılmış siltli kumdan bir taban zemini ile çekme dayanımına ve sürtünme katsayısına göre değişen türde iki farklı lif kullanılmıştır. Optimum lif içeriğinde takviye edilmemiş ve takviye edilmiş numuneler üzerinde tekrarlanan üç eksenli testler, 25, 50 ve 75 kN/m<sup>2</sup>'lik bir hücre basıncında ve 153 ve 204 kN/m<sup>2</sup>'lik gerilme seviyelerinde, altı farklı deviator gerilmesi üreterek gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan, tüm malzemelerde hem kalıcı hem de esnek şekil değiştirmelerin hücre basıncıyla azaldığı, ancak takviye edilmiş ve takviye edilmemiş koşullarda yük döngüsü sayısı ve deviator gerilme ile birlikte arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, esneklik modülü, yük döngüsü sayısı ve deviator gerilme ile azalmış ve hücre basıncıyla artmıştır. Uçucu kül de bu çalışmada kullanılmış olup maksimum kuru yoğunluk için %30 uçucu kül ve %70 kum karışımı çeşitli parametreler için test edilmiştir [13].

Peter ve diğerleri, standart Proctor, statik üç eksenli ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneylerini gerçekleştirerek, çeşitli oranlarda Hindistan cevizi özü (%0-3) ve Hindistan cevizi lifi (%0-1) ile stabilize edilen yumuşak zeminin davranışı üzerine bir araştırma yapmıştır. Deney sonuçları, Hindistan cevizi atıklarıyla stabilizasyonun, sıkıştırma, esneklik modülü ve CBR özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [21].

### **2.1.2. Sisal (sabır ağacı) lifi**

Sisal (sabır ağacı) lifi, %60-70 su emme oranına ve yaklaşık 0.06-0.4 mm çapa sahip olan ve yapı endüstrisinde kullanılan lingo-selülozlu bir elyafır. Sisal lifleri, 6-10 cm genişliğinde ve 50-250 cm uzunluğundaki bitkilerin

yapraklarından elde edilir. Genel olarak, Brezilya, Endonezya ve Doğu Afrika ülkeleri dünyanın başlıca sisal lifi üreticileridir.

Prabakar ve Sridhar tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sabır ağacı lifi, takviye malzemesi olarak seçilmiş olup lif içeriğinin %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere dört farklı yüzdesinde zemine rastgele olarak dâhil edilmiştir. Dört farklı lif uzunluğu da (10, 15, 20 ve 25 mm), bu çalışmanın parametrelerinden biri olarak dikkate alınmıştır. Takviye edilmiş zemin örnekleri, kompaksiyon ve üç eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonuçları, incelenen zeminin kırılma deviatör gerilmesi ve kayma mukavemeti parametrelerinde (C ve Ø) önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Sisal liflerinin zeminin kuru yoğunluğunu azalttığı görülmüştür. Lif uzunluğu ve lif içeriğindeki artış da zeminin kuru yoğunluğunu azaltmıştır. Ayrıca, lif uzunluğundaki 20 mm'ye kadar olan artışın kayma gerilmesini doğrusal olmayan bir şekilde arttırdığı ve uzunluktaki bundan daha fazla bir artışın kayma gerilmesini azalttığı bulunmuştur. Lif içeriğinin yüzdesi de kayma mukavemetini arttırmıştır. Ancak %0,75'lik lif içeriğinin ötesinde, lif içeriğindeki artışla birlikte kayma gerilmesi azalmıştır [22].

Yohanna ve diğerleri farklı yüzdelerde (%0, %0,5, %1, %1,5 ve %2) sisal lifi ilave edilmesi durumunda siyah pamuk zeminin davranışını araştırmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, doğal zeminin likit limiti ve plastisite indeksinin %44,47 ve %18,65 olduğunu ve sisal lifi içeriğinin artmasıyla arttığını göstermiştir. Bulgular ayrıca, maksimum kuru yoğunluğun %0 lif içeriğinde 1,55 Mg/m<sup>3</sup> değerinden %0,5 lif içeriğinde 1,60 Mg/m<sup>3</sup> değerine yükseldiğini ve ardından %2 lif içeriğinde 1,53 Mg/m<sup>3</sup> değerine düştüğünü ortaya çıkarmıştır. Maksimum kuru yoğunluktaki düşüş paterni, sisal lifinin zemine kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olmasına ve dolayısıyla kombinasyondaki katıların birim ağırlığını azaltmasına atfedilmiştir. Optimum nem içeriği ise, doğal zemin için %19'luk bir değerden %1,5 sisal lifi ilave edildiğinde %24,5'lik bir zirve değerine yükselmiş ve ardından azalmıştır. Zeminin lif içeriği arttıkça zemin yüzeyini yağlamak için fazladan su alınmış ve bu da optimum nem içeriğinin artmasına neden olmuştur. Diğer taraftan, modifiye zeminin hacimsel büzülme şekil değiştirmesi doğal zemine kıyasla önemli ölçüde azalmış ve sisal lifi yüzdesi arttıkça sürekli olarak azalma göstermiştir. Serbest basınç dayanımı ise, başlangıçta artmış ve daha sonra azalmıştır [23].

Ghavami ve diğerleri, sisal ve Hindistan cevizi lifleri ile güçlendirilmiş kompozit toprak bloklarının üretimi için bu liflerin yerel olarak uygun olan üç tip toprakla birlikte uygulanmasına ilişkin yeni sonuçlar sunmuştur. Gerçekleştirdikleri çalışmada %4 sisal veya Hindistan cevizi lifi eklenmesinin

toprak bloklara kayda değer oranda süneklik kazandırdığını ve basınç dayanımını biraz artırdığını bulmuşlardır. Ayrıca bitüm emülsiyonunun eklenmesinin zemin ve lifler arasındaki bağları iyileştirmediği de bulunmuştur. Ancak zeminin dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür [15].

Sisal lifinin siyah pamuk zemin üzerindeki etkilerini araştırmak için Santhi ve Sayida [42] tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sisal lifleri farklı uzunluklarda (1,5cm, 2,0cm, 2,5cm ve 3,0cm) kesilerek zeminin kuru ağırlığına göre değişen yüzdelerde (%0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) rastgele zemine karıştırılmış ve maksimuma kuru yoğunluğa kadar sıkıştırılmıştır. Deneysel sonuçları, sisal lifinin eklenmesinin zeminin maksimum kuru yoğunluğunda ve optimum nem içeriğinde bir azalmaya sebep olduğunu göstermiştir. Lif yüzdesindeki artışla maksimum kuru yoğunluğundaki bu azalma, sisal liflerinin zemine kıyasla düşük özgül ağırlığa sahip olmasından kaynaklanmıştır. Böylece zemin-lif kompozitindeki katların ortalama birim ağırlığı azalmıştır. Artan lif yüzdesi ile optimum nem içeriğindeki artış ise, organik doğal liflerin su emme doğasından kaynaklanmıştır. Çalışma, aynı zamanda sisal liflerinin eklenmesinden dolayı zeminin CBR değerinde ve serbest basınç dayanımında bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Optimum CBR ve serbest basınç dayanımı değeri %0,50 lif içeriğine sahip olan 2,5 cm uzunluğundaki lifle güçlendirilmiş zemin için elde edilmiştir [24].

Mattone tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yapı malzemesi olarak çimento veya kaktüs posası ile stabilize edilmiş sisal lifi takviyeli zeminler kullanılmıştır. Eğilme, aşınma direnci, su emme ve erozyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar toprak teknolojilerinde kullanılan geleneksel sıvalar üzerinde elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Çimento ile stabilize edilmiş sisal lifi takviyeli toprağın performans özellikleri, kaktüs posası ile stabilize edilmiş topraktan daha iyi bulunmuştur [25].

### **2.1.3. Palmiye lifi**

Hurma üretiminde yan ürün olarak ortaya çıkan palmiye lifleri, dayanıklılık, hafiflik, düşük maliyet, gerilme kapasitesi ve bozulmaya karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir [26]. Ayrışmış palmiye ağaçlarından elde edilen liflerin ise kırılma olduğu, düşük çekme gerilmesi dayanımı ve esneklik modülü ile çok yüksek su emme özelliğine sahip olduğu bulunmuştur.

Marandi ve diğerleri, rastgele dağıtılmış hurma liflerinin, siltli kum zeminleri güçlendirmek için kullanılması durumunda ortaya çıkan dayanım ve süneklik davranışını incelemiştir. Kompozit zeminler, laboratuvar koşullarında test edilmiş ve serbest basınç dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve kompaksiyon deneyi açısından incelenmiştir. Sonuçlar, maksimum

ve artık (rezidüel) dayanımların, yüzey bozulmalarının oryantasyonunun, sünekliklerin ve numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin, hurma liflerinin dâhil edilmesinden oldukça etkilendiğini göstermiştir. Sabit bir hurma lifi uzunluğunda, lif içeriğindeki %0'dan %1'e kadar artışla birlikte, maksimum ve artık dayanımların arttığını, buna karşın artık ve maksimum dayanımlar arasındaki farkın azaldığını bildirmişlerdir. Benzer bir eğilim, sabit hurma lifi içeriği ve 20 mm'den 40 mm'ye hurma lifi uzunluğundaki artış için gözlenmiştir [27].

Batani ve diğerleri, palmye yağının rafine edilmesi sırasında oluşan sıkılmış palmye salkımı liflerinin akrilonitril bütadien stiren ile kaplandıktan sonraki performansını incelemiştir. Bu lifler, zemin iyileştirmesinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Liflerin güçlendirilmiş zeminde biyolojik olarak parçalanmasını önlemek için akrilonitril bütadien stiren ile kaplanmıştır. Kaplanmış liflerin morfolojik karakterizasyonu ile mekanik ve fiziksel özellikleri lif performansının arttığını göstermiştir. Akrilonitril bütadien stiren ile kaplama işlemi, lifleri su emiliminden korumuş ve liflerin zeminle temas halindeki biyolojik bozunma potansiyelini azaltmıştır. Sıkılmış palmye salkımı liflerinin çekme dayanımı ve esneklik modülleri de kaplama işlemi ile iyileştirilmiştir. Liflerin kaplanması işlemi, artan yüzey alanı nedeniyle lif ve zemin parçacıkları arasındaki ara yüz sürtünmesini artırmaktadır. Sonuçlar, lif takviyeli zeminlerin kayma direnci parametrelerinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir [28].

Al Adili ve Al-Soudany tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, takviye malzemesi olarak hurma lifi seçilmiş ve ham zeminin hacmi esas alınarak dört farklı lif içeriği yüzdesinde (%5, 10, 15 ve 20) zemine rastgele eklenmiştir. Bu çalışma, rastgele eklenen hurma lifi ile güçlendirilmiş zeminin sertlik ve dayanım davranışına odaklanmıştır. Direkt kesme, konsolidasyon ve yer değiştirme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları, tercih edilen bir ilave uzunluğu olarak adlandırılabilen 1 mm uzunlukta liflerin eklenmesinden sonra, incelenen zeminin göçme deviator gerilmesi ve kayma dayanımı parametrelerinde (C ve Ø) önemli bir iyileşme olduğunu açıkça göstermiştir. Ayrıca bu ekleme oranı, zeminin yükleme altında yer değiştirmesini azaltmıştır. Dolayısıyla, hurma lifinin zemin takviyesi için uygun bir malzeme olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır [29].

Ahmad ve diğerleri, rastgele dağıtılmış lifin takviye edilmiş siltli kumun dayanımı üzerindeki tepkisini değerlendirmek için üç eksenli sıkıştırma deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, yağ palmyesi lifleri, üç eksenli sıkıştırma sırasında kayma dayanımındaki artışı araştırmak için siltli kum zemin ile karıştırılmıştır. Numuneler, drenajlı ve drenajsız koşullar altında

farklı uzunluklardaki (15 mm, 30 mm ve 45 mm) %0,25 ve %0,5 oranındaki palmye lifi içeriğiyle test edilmiştir. Ayrıca akrilik bütadien stiren termoplastik ile kaplanmış palmye lifleri, kaplamanın takviye üzerindeki etkisini belirlemek için deneye tabi tutulmuştur. Deneylerden, 30 mm uzunluğunda %0,5 oranında kaplanmış lif içeren takviyeli siltli kumun, takviyesiz siltli kuma kıyasla sürtünme açısının yaklaşık %25 ve kohezyonunun ise %35 artış gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, akrilik bütadien stiren termoplastik ile kaplanmış palmye lifleri, kaplanmamış liflerle kıyaslandığında siltli kumun kayma direncini daha fazla artırmıştır [30].

Arifin ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, yumuşak zeminin kayma dayanımını ve taşıma kapasitesini arttırmak için doğal lif kullanımına odaklanmıştır. Kullanılan lif, palmye yağı fabrikalarının bir yan ürünü olarak ortaya çıkan palmye yağı boş meyve salkımlarından elde edilmiştir. Karışımlarda yumuşak zemine %5, 6, 7 ve 8 oranlarında lif ilave edilmiştir. Standart kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, veyn deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi gibi bazı deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan yumuşak zeminin %5'ten daha yüksek lif içeriğinde sıkıştırılabileceğini göstermiştir. Elde edilen maksimum yoğunluk %7 lif içeriğinde  $0,92 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Zemine palmye yağı boş meyve salkımı liflerinin ilave edilmesi, serbest basınç, veyn ve CBR deneylerinin sonuçlarının gösterdiği gibi yumuşak zeminin kayma dayanımını ve taşıma kapasitesini başarılı bir şekilde artırmıştır. Zeminin kıvamı yumuşaktan orta zemine doğru değişmiştir. Maksimum  $q_u$ ,  $s_u$  ve CBR değerleri, %6 ila %7'lik optimum lif içeriğinde sırasıyla  $0,8 \text{ kg/cm}^2$ ,  $0,65 \text{ kg/cm}^2$  ve %6 olarak elde edilmiştir [31].

Jamellodin ve diğerleri, bir zemin güçlendirme yöntemi olarak yağ palmyesi lifinin kullanımını incelemiştir. Çalışmada, ham yumuşak zeminin ağırlığına göre %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 olmak üzere dört farklı lif yüzdesi dikkate alınmıştır. Çalışma, zemindeki yağ palmyesi liflerinin kayma dayanımı davranışı üzerindeki etkisini incelemiş olup palmye lifleri ile güçlendirilmiş yumuşak zeminin göçme saptırma (deviyör) gerilmesi ve kayma dayanımı parametrelerinde (C ve U) önemli bir iyileşme elde edilebileceğini bulmuştur. Liflerin, üniter kohezif bir matriste parçacıkları kilitlemek için hareket ettiği ve böylece zeminin dayanım özelliklerinin artırılacağı gözlemlenmiştir [32].

Sallehan ve Yaacob tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yağ palmyesi boş meyve salkımı lifi içeren, fırınlanmamış ve preslenmiş laterit tuğlalardan oluşan yeni ve düşük maliyetli bir yapı malzemesinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu araştırmanın temel amacı, yağ palmyesi boş meyve



salkımı lifi ile güçlendirilmiş laterit tuğlanın boyut, ağırlık, yoğunluk, su emme ve basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemektir. Bu amaçla, su emme ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol tuğlalarının karışım oranı %70 toprak, %24 kum ve %6 çimento olmuştur. Yağ palmyesi boş meyve salkımı lif içerikleri çimento ağırlığına göre %1 ila %5 arasında değişmiştir. Bu araştırmadan öncelikle laterit tuğlaların yoğunluğunun, tuğlaların lif içeriğindeki artışla azaldığı belirlenmiştir. İkinci olarak, palmye liflerinin eklenmesinin tuğlaların basınç dayanımını artırdığı ve tuğlalar için belirlenen maksimum basınç dayanımının %3 lif içeriği ile elde edildiği bulunmuştur. Son olarak, su emme testi sonuçları, palmye lifi içeriğindeki artışla birlikte su emmede küçük bir artış olduğunu göstermiştir [33].

#### 2.1.4. Jüt lifi

Jüt, Bangladeş, Çin, Hindistan ve Tayland'da bol miktarda yetiştirilmektedir. Taban gövde çapı yaklaşık 25 mm olan ve 2,5 m'ye kadar uzayan jüt bitkilerinin lifli kabuğundan çıkarılan lifler, filtrasyon, drenaj ve zemin stabilizasyonunda yaygın olarak yararlanılan gözenekli tekstillerin üretiminde kullanılır. Jüt, mevcut tüm doğal lifler arasında en yüksek çekme mukavemetine sahip olup özellikle zemin stabilizasyonu için uygun maliyetli bir çözüm sunar. Araştırmacılar, jüt lifi takviyesinin zeminin dayanımını artırdığını ve böylece üst yapı kalınlığını azalttığını göstermiştir.

Bairagi ve diğerleri, jüt liflerinin kireçle muamele edilmiş siyah pamuk zeminin mühendislik ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Stabilize edilmiş zeminin büzülme limiti, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi özelliklerinin jüt lifi içeriğiyle değişimleri incelenmiştir. %0, %1, %2 ila %5 oranlarında jüt lifi içeren zemin numuneleri hazırlanmış ve indeks özellikleri belirlenmiştir. Test sonuçları, siyah pamuk zeminin şişme davranışında önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Siyah pamuk zemin ağırlıkça %5 kireç ve %0'dan %5'e kadar jüt lifleri ile karıştırıldığında büzülme limiti %13,75'ten %28,68'e yükselmektedir. Ayrıca, optimum su muhtevası değerinin %16,2'den %19,6'ya yükseldiğini ve maksimum kuru yoğunluk değerinin ise 1,68 gr/cm<sup>3</sup>'ten 1,58 gr/cm<sup>3</sup>'e düştüğünü bildirmişlerdir. Öte yandan, lif içeriğindeki artışla birlikte CBR değeri %3,1'den %4,95'e ve serbest basınç dayanımı ise 1,09 kg/cm<sup>2</sup>'den 1,35 kg/cm<sup>2</sup>'ye artmıştır [34].

Singh ve Bagra (2013), taban zemininin iyileştirilmesi için jüt lifi kullanımını incelemiştir. Jüt lifi içeriğindeki artışla birlikte taban zemininin CBR değerinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca kullanılan jüt lifinin



uzunluğunun ve çapının artmasıyla CBR değerinin de arttığı sonucuna varmışlardır [35].

Aggarwal ve Sharma, taban zemininin özelliklerinin iyileştirilmesinde jüt lifi uygulamasını incelemiştir. Bu amaçla, farklı uzunluklarda (5-20 mm) ve farklı oranlarda (%0,2-1,0) jüt lifleri kullanmışlar ve bu lifleri mikrobiyal saldırı ve bozunmadan korumak için bitüm ile kaplamışlardır. Jüt lifinin maksimum kuru yoğunluğu azaltırken optimum su içeriğini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Maksimum CBR değeri, 10 mm uzunluğunda ve %0,8 oranında jüt lifi ilavesi ile elde edilmiş olup, ham zemin CBR değerinin 2,5 katından daha fazla bir artış göstermiştir [36].

Alqaissi ve diğerleri yumuşak zeminlerin doğal lifler kullanılarak takviye edilmesi kapsamında deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu amaçla, takviyesiz ve takviyeli numunelerin hazırlanmasında kaolin ve jüt lifi kullanılmıştır. Jüt lifi, takviye malzemesi olarak %0,5, %1, %2 ve %3 olmak üzere farklı içeriklerde kaoline rastgele ilave edilmiştir. Lifler 2 cm ve 4 cm olarak iki farklı uzunlukta kesilmiştir. Jüt liflerinin kilin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla hazırlanan karışım üzerinde standart Proktor sıkıştırma deneyi, tek boyutlu konsolidasyon deneyi ve serbest basınç deneyi olmak üzere toplam 27 laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneylerden, jüt lifinin eklenmesiyle maksimum kuru yoğunluğun azaldığı ve optimum nem içeriğinin arttığı görülmüştür. Jüt lifinin %0,5 oranında dâhil edilmesi maksimum kuru yoğunluğu yaklaşık %5 azaltmıştır. Jüt lifi, kullanılan tüm lif içeriği ve uzunluğu için serbest basınç dayanımını büyük ölçüde etkilemiştir. Jüt lifi ile takviye edilmiş kil numunesinin doğal kilden 4,26 kata kadar daha fazla serbest basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca jüt lifi, özellikle 4 cm'lik bir lif uzunluğunda kopma gerinimini artırmıştır. Diğer taraftan, takviye edilmiş kil numunelerinin gerilme altında yumuşadığı görülmüştür [37].

Islam ve Ivashita, kerpiç malzemenin dayanımını ve sünekliğini artırmak için takviye malzemesi olarak saman, kenevir ve jüt lifleri ile çimento ve alçı kullanmıştır. Saman, basınç dayanımı pahasına kerpiç bloğun sünekliğini artırmıştır. Jüt, kerpiç bloğun sünekliğini ve tokluğunu geliştirmek için seçilen lifler arasında en etkili olanı olmuştur. Alçı, kerpiç bloğun dayanımını arttırmasına rağmen sünekliğini arttırmamıştır. Benzer şekilde, çimento sadece harç dayanımını iyileştirmiştir. Diğer taraftan, jüt liflerinin harç dayanımının yanında blok ve harç arasındaki yapışmanın iyileşmesinde etkili olduğu belirlenmiştir [38].

Hossain ve diğerleri, jüt lifi ile takviye edilmiş zemin üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, zemin numuneleri, takviyeli ve

takviyesiz olarak Kaliforniya taşıma oranı (CBR) kalıbında optimum nem içeriğine karşılık gelen maksimum kuru yoğunlukta hazırlanmıştır. Kuru zemin ağırlığına göre jüt lifi yüzdesi, %0,3, %0,6, %0,9 ve %1,2 olarak alınmıştır. Araştırmada, lif uzunluğu, 15 mm ve 30 mm olarak alınmış ve her lif uzunluğu için 4 mm ve 8 mm'lik iki farklı çap kullanılmıştır. Laboratuvar deneylerinden, jüt lifi içeriğinin zeminin yoğunluğu üzerindeki etkisi, jüt lifinin her bir uzunluğu ve çapı için gözlemlenmiştir. Jüt lifinin her bir uzunluk ve çapı için, jüt lifi içeriğindeki artışla optimum nem içeriğinin arttığı ve maksimum kuru yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Zemin ve lif ile güçlendirilmiş zeminin laboratuvar CBR değerleri belirlenerek jüt lifinin uzunluk/çap oranının zeminin CBR değeri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Deney sonuçları, zeminin CBR değerinin, jüt lifinin uzunluğundaki artışla arttığını göstermiştir. Ayrıca, jüt lifinin çapının arttırılmasının, güçlendirilmiş zeminin CBR değerini daha da arttırdığı gözlemlenmiştir [39].

### 2.1.5. Keten lifi

Keten, dünyanın birçok yerinde lifleri ve tohumları için yetiştirilen bir bitkidir. Keten insanlığın bildiği en eski tekstil liflerinden biri olup Antik çağlardan beri kumaş yapımında kullanılmaktadır.

Segetin ve diğerleri, keten liflerinin eklenmesi suretiyle zemin-çimento kompozitinin sünekliliğini iyileştirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Zeminle ara yüzey bağ dayanımını artırmak için lif yüzeyine bir emaye boya kaplaması uygulanmıştır. 70 ve 85 mm'lik lif uzunlukları, kompozitteki zeminin kuru kütlelerinin yüzdesi olarak ölçülen %0,6 ve %0,8'lik lif içeriği ile birlikte incelenmiştir. Keten lifi takviyesinin eklenmesiyle zemin-çimento kompozitinin sünekliliğinde önemli bir gelişme sağlanmıştır. Yazarlar tarafından %0,6'lık lif içeriği seviyeleri ile birlikte 85 mm'lik lif uzunluğu önerilmiştir [40].

Ayininuola ve Udoh tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, keten lifinin zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Zemin örnekleri Nijerya'nın İbadan kentinde bulunan İbadan Üniversitesi'ndeki ariyet çukurlarından elde edilmiştir. Doğal zeminlerin Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Keten lifleri taban zeminine ağırlıkça %0,3, %0,6, %0,9, %1,2 ve %1,5 oranlarında eklenmiş ve karışımların geoteknik özellikleri ölçülmüştür. Sonuçlar, keten lifi ilavesinin zeminin Kaliforniya taşıma oranını %3,1'den %15'e yükselttiğini ve aynı zamanda serbest basınç dayanımında da muazzam bir artışa sebep olduğunu göstermiştir. Zeminin maksimum Kaliforniya taşıma

oranına ve serbest basınç dayanımına %1,2'lik optimum keten lifi içeriğinde ulaşılmıştır [41].

“Uku”, kırsal Maori topluluklarında yetersiz barınma sorununu çözmek için geliştirilmiş, düşük maliyetli, keten lif takviyeli, stabilize edilmiş ve sıkıştırılmış toprak duvarlı bir konut sistemidir. Bu sistemde, keten yapraklarının keten liflerine hızlı bir şekilde dönüşümünü sağlayan bir mobil keten makinesi kullanılmaktadır. Cheah ve diğerleri mevcut bir Uku test evinde inşa edilmiş, bir pencere ve kapı açıklığı içeren, tam boyutlu 5,5 metre uzunluğundaki bir duvar kesitinde bir dögüsel yük testi gerçekleştirmiştir. Duvar testi, göçme yöntemlerini, yapısal sismik zayıflık alanlarını, duvar panelleri arasındaki etkileşimleri ve duvar sisteminin yapısal performansını belirlemek için yapılmıştır. Test, Uku duvar sisteminin doğrusal olmayan bir kapasiteye sahip olduğunu, ancak duvarın her bir toprak paneli içinde sünek olmayan göçme modları sergilediğini kanıtlamıştır. Test, aynı zamanda gelecekteki Uku konut sistemleri için verimli ve güvenli bir tasarım metodolojisi geliştirmek için bir temel sağlamıştır [42].

### **2.1.6. Bambu lifi**

Bambu lifi, yenilenmiş bir selüloz lifi olup nadiren haşere tarafından yenir veya patojenler tarafından enfekte edilir. Bu özelliğinden yola çıkarak araştırmacılar, bambunun “Bambu Kun” olarak bilinen özel bir antibakteriyel ve bakteriyostatik biyoajana sahip olduğunu keşfetmiştir. Diğer taraftan, bambu köksaplarının erozyonu önleyebilen mükemmel toprak bağlayıcılar olduğu da bir başka önemli konudur [43]. Ayrıca, bambu lifleri çekme gerilmelerine karşı önemli ölçüde dayanıklıdır. Bu özelliklerinden dolayı bambu lifi, sıradan zemin için güçlendirici bir malzeme görevi görebilir. Toprak parçacıklarını birbirine bağlar ve hacimsel özelliklerdeki hızlı değişimin azaltılmasına yardımcı olur.

Coutts ve Ni, bambu lifinin çimento yapı malzemeleri için potansiyel bir takviye malzemesi olarak kullanımını araştırmıştır. Yazarlar tarafından gerçekleştirilen testler, bambu lifinin çimento matrisine dâhil edilmek için tatmin edici bir lif olduğunu göstermiştir [44]. Dolayısıyla, Ramaswamy ve diğerleri de bambu lifleri ile güçlendirilmiş betonun davranışını incelemiştir. Sonuçlar, bu liflerin betonda avantajlı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [45]. Zira bambu lifli betonların basınç ve çekme dayanımları kontrol betonlarından daha yüksek olmamakla birlikte, deformasyon davranışları süneklikte iyileşme ve rötrede azalma göstermiştir. Bu betonların darbe ve kırılma toklukları da belirgin şekilde daha yüksek olmuştur.

Brahmachary ve Rokonuzzaman tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada hem sıradan zemin hem de lif takviyeli zemin kullanılarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Islatılmamış ve ıslatılmış CBR testleri için zemin numuneleri, lifli ve lifsiz durum için optimum nem içeriğine sahip olacak şekilde maksimum kuru yoğunlukta hazırlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan takviye malzemesi, sırasıyla 3 ve 6 mm çapında ve 10 ve 20 mm uzunluğundaki doğal bambu lifleri olmuştur. Bambu lifinin zeminin susuz ağırlığına oranı %0,20, 0,40, 0,60, 0,80, 1,00, 1,20 ve 1,40 olacak şekilde lifler zemine rastgele karıştırılmıştır. Deney sonuçlarından bambu lifinin uzunluğu ve çapı arttıkça zeminin ıslatılmamış ve ıslatılmış CBR değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bambu lifi yüzdesinin artırılmasının güçlendirilmiş zeminin CBR değerini arttırdığı ve bu artışın %1,2 lif dozajında anlamlı olduğu tespit edilmiştir [46].

Kanayama ve Kawamura, zemine %1, %3, %5 oranında bambu lifi katılarak hazırlanan örneklerde, lif içeriği arttıkça likit limit ve plastik limit değerlerinin artma eğiliminde olduğunu, plastisite indeksinin ise değişmediğini gözlemlemişlerdir. Öte yandan kompaksiyon testi sonuçlarına göre, lif içeriğinin artmasıyla maksimum kuru yoğunluğun düştüğü ve optimum nem içeriğinin arttığı sonucuna varmışlardır. Sıkıştırma testi ve serbest basınç testi sonucunda, bambu lifinin karıştırılmasının inşaat için gerekli toprak malzemenin azalmasına ve dayanımın artmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Bambu lifi karıştırılmış zeminin %0, %1, %3 ve %5 karışım oranlarındaki maksimum basınç gerilmesi sırasıyla 115, 108, 130 ve 152 kN/m<sup>2</sup> olmuştur. Kuru bölgede lifli zemin lifsiz zemine göre daha düşük rijitlik ve daha yüksek dayanım gösterdiğinden, lif ilavesinin zemine süneklik kazandırdığı düşünülebilir. Ayrıca su içeriğinin artmasına bağlı olarak numunenin rijitliğindeki azalmanın bambu lifi ilavesiyle bastırıldığı bulunmuştur. Dijital mikroskop ile yapılan gözlem sonuçlarından, esas nispeten kalın lifli yapı ve ikincil kılcal lifli yapıdan oluşan iki katmanlı bir yapının oluştuğu görülmüştür. Böylece, bambu lifinin karmaşık yapısının, lifle takviye edilmiş zeminin dayanımında etkili olduğu bulunmuştur [47].

### 2.1.7. Arpa samanı

Arpa, bütün dünyada yaygın olarak ekilen bir üründür. Arpa samanı ise, kompozit toprak bloklarının üretiminde ve zeminde takviye elemanı olarak kullanılsa da bu kullanımın performansına ilişkin az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde, Bouhicha ve diğerleri, arpa samanı ile güçlendirilmiş kompozit bir zemini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, lif uzunluğu ve lif oranının büzülme ile basınç, eğilme ve kayma dayanımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma, eğer

optimize edilmiş bir takviye oranı kullanılırsa, büzülme ve sertleşme süresini kısaltmada ve basınç dayanımını artırmada saman eklemenin olumlu etkilerini göstermiştir. Ayrıca eğilme ve kesme dayanımları da arttırılmış ve güçlendirilmiş numunelerde daha sünek bir kırılma elde edilmiştir [48].

Ashour ve diğerleri tarafından lif takviyeli toprak sıvaların basınç dayanımına ilişkin deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kohezyonlu toprak ve kumdan oluşan yeni bir sıva malzemesi yapmak için buğday samanı, arpa samanı ve talaş olmak üzere üç tür doğal lif kullanılmıştır. Liflerin sıvaların mukavemeti ve sünekliği üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmasına rağmen, sıvaların esneklik modülü üzerindeki etkilerinin nispeten az olduğu sonucuna varmışlardır [49].

Kazragis, arpa samanı ile çimento karışımının, atmosferik kirliliği de azaltan, sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir yapı malzemesi oluşturabileceğini ifade etmiştir [50]. Bu faydalara ek olarak, samanın hoş iç mekân sıcaklıkları yaratmak üzere bir ısı yalıtım malzemesi görevi görebileceği belirtilmiştir.

### **2.1.8. Mısır püskülü**

Mısır, dünyada en çok ekilen üçüncü üründür. Mısır üretiminden elde edilen büyük miktarda mısır püskülü ise, bir yan ürün olup çoğunlukla imha edilmektedir. Ancak yüksek selüloz içeriğine sahip bir tarımsal atık olan mısır püskülü lifi, günümüzde kâğıt ve ilaç yapımı gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Diğer taraftan mısır püskülü lifi, takviye edilmiş kompozitlerde lif ve matris arasında daha iyi bir temas sağlar ve içeriğindeki yüksek lignin sayesinde hava koşullarına karşı oldukça dayanıklıdır. Dolayısıyla, bu yan ürün kullanılarak gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu, birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar doğal veya çimentolu zemine mısır püskülü eklenmesinin, işlenmiş zeminin basınç ve yarmada çekme mukavemetini iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Bu çalışmalardan birinde Tran ve diğerleri, mısır püskülü lifi ile takviyeli edilmiş düşük plastisiteli silt zeminin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmalarında lif katkı miktarının (%0,5, 1, 1,5 ve 2) yanı sıra lif uzunluklarının (10, 30 ve 50 mm) lif takviyeli zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi ve yarmada çekme deneyi gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, zemine mısır püskülü liflerinin eklenmesinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, süneklik, tokluk ve sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Lif içeriğinin %1,5'a kadar artmasıyla maksimum kuru yoğunluk değerinin arttığını, optimum su muhtevası değerinin azaldığını, %1,5'tan sonraki artışlarda maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığını ve optimum su

muhtevası değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca lif uzunluğundaki artışın maksimum kuru yoğunluk değerinde düşüşe, optimum su içeriği değerinde ise artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan serbest basınç dayanımında en yüksek artışa neden olan lif içeriğinin %1, en etkili lif uzunluklarının ise 10 ve 30 mm olduğunu bildirmişlerdir [51].

Roy ve Mukherjee, sentetik yağla kirlenmiş toprağın sıkışma ve dayanım özelliklerinin, mısır kabuğu liflerinin toprağın ağırlığına göre %1, 2, 3 ve 4'lük farklı yüzdelerde rastgele karıştırılmasıyla iyileştirilmesini ele alan deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma, toprağın ağırlığına göre %5, 10 ve 15 oranlarında sentetik yağ karıştırılarak yapay olarak hazırlanan toprak numuneleri üzerinde yürütülmüştür. Toprağın indeks özellikleri test edilmiş, ardından mısır kabuğu lifi ilavesiyle değişen şablonu gözlemek amacıyla proktor deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar toprağın sıkışma ve dayanım özelliklerinde belirgin bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Toprağın pH değeri de belirlenmiş ve mısır kabuğu lifi ilavesiyle toprak özelliklerinde asidik yapıdan nötralizasyona doğru kayda değer bir değişiklik olduğu gösterilmiştir [52].

### 2.1.9. Kenaf lifi

Kenaf, otsu bir bitki olup 1,5-3,5 metreye kadar uzayabilen sapları 1-2 cm çapındadır. Yaprakları 10-15 cm uzunluğunda olup şekil olarak değişkendir. Hindistan, Bangladeş, Orta Asya, Afrika ve bazı Orta Amerika ülkeleri, kenafın en çok yetiştirildiği bölgelerdir. Kenaf, jüt ile benzer özellikler göstermektedir.

EsmacilpourShirvani ve diğerleri tarafından, kenaf lifi ile takviye edilmiş zeminin sıkışma ve kayma dayanımı özelliklerini büyük ölçekli direkt kesme deneyi ile araştırmak için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, takviye edilmemiş ve edilmiş kum-kil karışımları üzerinde toplam 128 deney yapılmıştır. Sonuç olarak, kenaf lifi takviyesinin zeminin gerilme-gerinim ilişkisi, hacim değişimi, sünekliği ve göçme durumu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kum-kil karışımına belirli bir miktar kenaf lifi eklenmesi, karışımın sünekliği ile kayma dayanımını arttırmış ve böylece üst yapı tabakalarında, şevlerin korunmasında, dolgularda ve bina temellerinde kullanılmasını mümkün kılmıştır [53].

Maguesvar ve diğerleri, pirinç kabuğu küllü ve kenaf lifi ilavesinin zeminin yoğunluk, optimum nem içeriği, kayma dayanımı, serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) gibi özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır. Killi zemini stabilize etmek için pirinç kabuğu küllü %0 ila %12,5 oranları arasında %2,5 artışla ve kenaf

lifi ise %0 ila %1 oranları arasında %0,25 artışla zemine ilave edilmiştir. Standart proktor sıkıştırma, serbest basınç dayanımı, direkt kayma dayanımı, Kaliforniya taşıma oranı ve geçirgenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piring kabuğu külünün optimum yüzdesi %10 olarak belirlenmiştir. Zemine kenaf lifi ilave edilmesiyle geçirgenlik katsayısı artmıştır. Serbest basınç dayanımı, kayma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı, zemin karışımlarında kenaf lifi kullanılmasıyla artan bir eğilim göstermiştir [54].

Ghadakpour ve diğerleri, çimento ve kenaf lifinin kumlu zemin üzerindeki etkilerini, değerlendirme kriterleri olarak çimento içeriği, kenaf lifi içeriği ve uzunluğu açısından incelemiştir. Bu amaçla, serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ultrasonik dalga hızı dâhil olmak üzere çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Test edilen numunelerde, çeşitli çimento içerikleri (%3 ve %6) ile 8 mm ve 16 mm uzunluğundaki liflerin yine çeşitli içeriklerinin (%0, 0,25, 0,5 ve 0,75) çimentolu kumun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, söz konusu tüm lif içerikleri için %50 (8 mm) + %50 (16 mm) oranında 8 mm ve 16 mm'lik liflerin aynı anda “hibrit” olarak uygulanmasının etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çimento içeriğinin artmasıyla serbest basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, enerji absorpsiyon kapasitesi, ultrasonik dalga hızı ve kırılgenlik indeksi değerlerinin arttığını göstermiştir. Numunelere rastgele dağıtılmış kenaf lifi eklenmesi sadece gevreklik indeksini, elastisite modülünü ve ultrasonik dalga hızını azaltmakla kalmamış, aynı zamanda serbest basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve enerji absorpsiyon kapasitesini de artırmıştır. Ayrıca, kenaf liflerinin uzunluğu arttıkça serbest basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı artarken, esneklik modülü azalmaktadır. Bundan başka, “hibrit” karıştırma planının uygulanmasıyla, 8 mm'lik lif içeren numunelere kıyasla serbest basınç dayanımının, yarmada çekme dayanımının ve enerji absorpsiyon kapasitesinin artması ve gevreklik indeksinin azalmasının yanı sıra, 16 mm'lik lif içeren numunelere kıyasla pik gerilmenin %50'sindeki sekant modülü (E50) ve ultrasonik dalga hızı artmıştır [55].

Doğal kenaf liflerinin kullanılmasının zayıf taban zeminlerinin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini göstermek için Mittal ve Shukla tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip silt (MH) ve orta sıkıştırılabilirliğe sahip kil (CI) olarak sınıflandırılan iki tip zemin kullanılmıştır. Zemin ağırlığına göre %0,0625, %0,125, %0,25 ve %0,50 olmak üzere dört farklı yüzdede kenaf lifleriyle güçlendirilmiş zemin numuneleri üzerinde laboratuvar kompaksiyon, ıslatılmış Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Siltli zemin kenaf lifleriyle güçlendirildiğinde Kaliforniya taşıma oranında %150



ve serbest basınç dayanımında %84'lük maksimum iyileşme rapor edilirken, killi zemin durumunda bu artışlar sırasıyla yalnızca %18 ve %40 olmuştur. Çeşitli yüzdelerde kenaf lifleri ile takviye edilmiş zemin numuneleri için pik sonrası daha küçük mukavemet kaybı ve daha büyük göçme gerinimi gözlemlenmiştir. Siltli zemin durumunda ise daha belirgin etki görülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri, siltli zemin durumunda zemin parçacıkları ve lifler arasında önemli bir bağ oluştuğunu, dolayısıyla zeminden takviye malzemesine stres transferinin meydana geldiğini ve bunun da dayanım artışına yol açtığını göstermiştir. Ancak, killi zeminde bu etki daha az olmuştur. Sıkıştırma özellikleri ve lif içeriği açısından ıslatılmış CBR ve serbest basınç dayanımı için tahmin modelleri geliştirmek amacıyla çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir [56].

### 2.1.10. Papirüs lifi

Papirüs sulak alanlarda yetişen bir bitkidir. Papirüs, erozyon kontrolü, toprak setlerin performansının artırılması ve zeminin taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi için farklı uygulamalarda kullanılmaktadır.

Al-Adili ve diğerleri, papirüs lifi ilavesinin kumlu ve killi silt zeminin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Papirüs lifi, ham zeminin hacimce %5, 10, 15, 25 gibi dört farklı lif yüzdesinde rastgele zemine karıştırılmıştır. Çeşitli lif içeriklerine sahip papirüs takviyeli numuneler üzerinde direkt kesme, konsolidasyon ve yer değiştirme testleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, direkt kesme deneyi sonuçlarına dayanarak, %10 lif ilavesi ile en yüksek içsel sürtünme açısı, kohezyon ve elastisite modülü değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, lif ilavesiyle zeminin rijitliğinin önemli ölçüde arttığını ve sonuç olarak zeminin ani oturmasının azaldığını bildirmişlerdir [57].

### 2.1.11. Pamuk samanı lifi

Pamuk samanı, katma değerli biyokompozit ürünler üretmek için kullanılır. Ayrıca saman lifinin dayanımı için önemli bileşimler olan yüksek kaliteli selüloz ve lignini büyük miktarda içerir ve doğal bir polimer malzemedir [58]. Pamuk samanından hazırlanan lifler, içi boş bir yapıya sahiptir, bu da yumuşak zeminlerin performansını etkili bir şekilde artırabilir. İlave olarak, saman liflerinin biyobozunurluk özelliklerine rağmen, saman lifi takviyesinin neden olduğu zeminin artan dayanımı uzun süre tamamen ortadan kalkmadığından birçok araştırmacı bu malzemelerle çalışmıştır [59].

Liu ve diğerleri, donma-çözülme döngülerinin doğal liflerle güçlendirilmiş zeminin dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmak için pamuk samanı lifi

ile güçlendirilmiş zemin üzerinde serbest basınç dayanımı, tek lif çekme ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneylerini 0, 3, 5, 10, 15 ve 20 donma-çözülme döngüsü altında gerçekleştirmiştir. Zemin %0,2 ve %0,4 oranlarında pamuk samanı lifi ile takviye edilmiştir. Donma-çözülme döngüleri için, numuneler 12 saat boyunca  $-20^{\circ}\text{C}$ 'deki bir dondurma kabına yerleştirilmiş, ardından çıkarılmış ve 12 saat boyunca  $20^{\circ}\text{C}$ 'deki çözülme kabına koyulmuştur. Deneylerden, lif takviyeli zeminin serbest basınç dayanımının, donma-çözülme döngüsü sayısı ile birlikte üstel olarak azaldığı bulunmuştur. İlave olarak, lif takviyesi, serbest koşullar altında donmuş ve çözülmüş zeminin yumuşama derecesini zayıflatmıştır. Bundan başka, donma-çözülme koşulları altında lifle güçlendirilmiş zemindeki serbest basınç dayanımının azalması, lif-zemin arayüzündeki dayanım azalmasından daha küçük bulunmuştur. Bunun sebebi, lif takviyesinin esas olarak sadece lif-zemin arayüzü tarafından değil aynı zamanda ayrı lifler tarafından oluşturulan uzaysal gerilme ağı tarafından da yönetilmesidir. Liflerin takviyesini artıran karmaşık uzaysal gerilme ağı, donma-çözülme döngülerinden sonra taramalı elektron mikroskobu tarafından izlenmiştir [60].

Brahmachary, hem uçucu kül hem de pamuk lifinin zemini iyileştirmek için stabilize ve takviye edici malzeme olarak kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada tüm deneyler, zeminin maksimum taşıma kapasitesi için uçucu kül yüzdesinin %10 olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Pamuk lifinin %0,3, %0,5 ve %0,7 oranlarında ilave edildiği üç tip numune hazırlanmıştır. Örneğin, normal lif ilavesiz zemin numunesi için kuru yoğunluk yaklaşık  $22 \text{ KN/m}^3$  iken, pamuk lifi ilavesi ile kuru yoğunluk  $48,05 \text{ KN/m}^3$ 'e kadar artmıştır. Nihai taşıma kapasitesi donatılı zemin için  $80,65 \text{ kPa}$ 'a kadar çıkarken, donatısız zemin numunesi için nihai taşıma kapasitesi  $35 \text{ kPa}$  değerini vermiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyinin sonucu, donatısız zeminde %17 iken donatılı zeminde %23 değerine yükselmiştir. CBR deneyi, yalnızca maksimum gerilmenin elde edildiği pamuk lifinin ilave edilme oranının %0,7 olduğu durum için yapılmıştır. Bu çalışmanın en önemli kısmı, zemin iyileştirmesinde pamuk lifinin farklı oranlarda kullanılmasının etkisini ortaya koymak olmuştur. Bu makale, pamuk lifinin uçucu kül ile karışma yüzdesindeki artışa bağlı olarak serbest basınç dayanımı deneyleri için deviyör gerilmenin kademeli olarak arttığını göstermiştir [61].

### **2.1.12. Kenevir lifi**

Kenevir, özellikle endüstriyel veya tıbbi kullanım için yetiştirilen bir bitki olup çok çeşitli ürünlerin yapımında kullanılabilir. Bambu ile birlikte kenevir, dünyada en hızlı büyüyen bitkiler arasındadır. Ayrıca, 50.000 yıl önce kullanılabilir life dönüştürülen ilk bitkilerden biridir. Kenevir lifleri ise, doğal

lifler ailesinin en güçlü üyelerinden biri olup biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve yapay liflere kıyasla düşük yoğunlukları nedeniyle kompozit malzemelerde takviye olarak geniş kabul görmüştür. Ayrıca bu malzemeler doğal mekanik, termal ve akustik özelliklere sahiptir.

Kalkan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, doğal ve çevre dostu özelliklerinden dolayı kenevir lifi tercih edilmiştir. Kenevir lifinin killi zeminin basınç dayanımı üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla laboratuvar koşullarında serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kenevir lifinin killi zeminlerin basınç dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [62].

Bir başka çalışmada, Najjar ve diğerleri, sıkıştırılmış kilin yük tepkisini iyileştirmede doğal kenevir liflerinin potansiyel kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla kapsamlı bir laboratuvar deney programı tasarlanmıştır. Deney programı, kenevir lifleriyle güçlendirilmiş kil numuneleri üzerinde gerçekleştirilen bir dizi konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli deneyden oluşmuştur. Takviye edilmiş kil numunelerinin çapı 7,1 cm ve yüksekliği ise 14,2 cm olup, lif içerikleri %0 ile %1,0 arasında değişen 25 mm uzunluğunda liflerle güçlendirilmiştir. Lif yüzdesinin artmasıyla kilin sünek davranışının arttığı tespit edilmiştir. Bu davranışta %0,4'ten daha büyük lif içeriklerinde daha belirgin bir iyileşme olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, lif içeriği arttıkça zeminin drenajsız kayma dayanımının arttığı, en yüksek dayanım artışının ise özellikle %0,3 ile %0,5 arasındaki lif içeriğinde elde edildiği belirtilmiştir [63].

Vafaei ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada kenevir lifleriyle güçlendirilmiş zeminin davranışı araştırılmıştır. Rastgele dağıtılmış kenevir lifleriyle güçlendirilmiş Babolsar kumunun dayanım davranışını değerlendirmek için bu çalışmada çeşitli statik üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir. Kenevir lifleri kuru ağırlığa göre %0,3, 0,6 ve 0,9 oranlarında ve 6, 10 ve 14 mm uzunluklarda zemine karıştırılmıştır. Statik üç eksenli deneyler 50, 100 ve 200 kPa hücre basıncında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, liflerin varlığının kumun davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kenevir takviyeli kum üzerinde yapılan incelemelerin sonuçları, liflerin kumun kayma dayanımı parametrelerini, tepe dayanımını, akma gerinimini ve rijitliğini iyileştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Zemine 6 mm lif eklenmesi, lif ağırlık oranı %0,9 ve hücre basıncı 50 kPa iken tepe dayanımında en yüksek artışa (%331) neden olurken lif ağırlık oranı %0,3 ve hücre basıncı 200 kPa iken tepe dayanımında en düşük artışa (%21) sebep olmuştur. 10 mm ve 14 mm uzunluğundaki lifler için maksimum ve minimum mukavemet artış oranları, 6 mm liflerle aynı koşullar altında ortaya

çıkıştırılmıştır. Böylece 10 mm'lik lifler için maksimum ve minimum mukavemet kazanımları sırasıyla %499 ve %39 bulunmuştur. 14 mm uzunluğundaki lif için bu rakamlar sırasıyla %845 ve %49 olmuştur. Takviyesiz zemin durumunda içsel sürtünme açısının  $43^{\circ}$ 'ye eşit olduğu görülmüştür. Bu değer, 6 mm uzunluğunda %0,3 lif içeren donatılı zemin için  $49^{\circ}$ 'ye eşit olup, 10 mm uzunluğunda %0,9 lif içeren donatılı zemin için çoğu durumda  $57^{\circ}$ 'ye ulaşmıştır. 6 mm uzunluğunda %0,3 lif içeren güçlendirilmiş zeminin kohezyon miktarı 65 kPa'a eşit olmuş ve çoğu durumda %0,9 lif içeren ve 14 mm uzunluğa sahip güçlendirilmiş zemin numunesi için 385 kPa olarak bulunmuştur [64].

Yazıcı ve Keskin tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 olmak üzere farklı lif içeriklerinin, ham ve kaplanmış olarak güçlendirilmiş düşük plastisiteli killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, güçlendirilmiş numuneler, konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyinde farklı hücre basınçları (50, 100 ve 200 kPa) altında aksel olarak yüklenmiştir. Deney sonuçları, güçlendirilmemiş zeminin gerilme-gerinim davranışının, zemine kenevir lifi eklenmesinden sonra gerinim yumuşamasından gerinim sertleşmesine doğru değiştiğini göstermiştir. Genel olarak tüm numunelerde şişkinlik kırılması meydana gelmiştir. En yüksek deviatör gerilmesi, enerji absorpsiyon kapasitesi ve içsel sürtünme açısı değerleri ağırlıkça %0,10 kenevir lifi kullanılan numunede elde edilmiştir. Lifler, ham kenevir liflerini biyolojik bozulmaya karşı korumak için üç farklı su geçirmez malzemeyle kaplanmıştır. Ham kenevir lifinin %218 olarak ölçülen su emme kapasitesi, Akrilonitril Bütadien Stiren, epoksi ve Kristal PIB 907 kaplanmasından sonra sırasıyla %127, %213 ve %159 oranında azalmıştır. Ham kenevir liflerinin kaplanmasıyla liflerin çapları, sürtünme yüzey alanları ve yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. Sonuç olarak, ağırlıkça %0,10 oranında kaplanmış kenevir lifi içeren numunelerin, ham kenevir lifi içeren numunelerle karşılaştırıldığında deviatör gerilmesi, içsel sürtünme açısı ve enerji absorpsiyon kapasitesi değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir [65].

Diab ve diğerleri, sıkıştırılmış kilin yük tepkisinin iyileştirilmesinde doğal kenevir lifinin kullanımını araştırmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, 18 tane konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyden oluşan bir laboratuvar deney programı tasarlanmıştır. Kontrol kili ve çeşitli oranlarda eklenen kenevir lifleriyle karıştırılmış kil numuneleri, bir dizi su içeriğinde hazırlanmış ve standart proktor prosedürü kullanılarak sıkıştırılmıştır. Çapı 7,15 cm, yüksekliği 14,3 cm olan numuneler %14, %18 ve %20 olmak üzere değişen nem içeriklerinde hazırlanmış ve %0,5 ile %1,5 arasında değişen gravimetrik içeriklerde 4 cm uzunluğundaki liflerle karıştırılmıştır.

Sonuçlar, kenevir takviyeli numuneler için kayma mukavemetinde %100'e kadar iyileşmelerin gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. İyileşme yüzdesi, %1,25'lik bir eşik değerine kadar lif içeriğiyle birlikte artmış ve matris kilinin optimum nem içeriğine göre sıkıştırmada kullanılan su içeriğinin büyüklüğüne bağlı olarak farklılık göstermiştir [66].

### 2.1.13. Kamış lifi

Kamış veya şeker kamışı, 6 m yüksekliğe ve 6 cm çapa kadar büyüyebilir. Küspe ise, şeker kamışı üretiminde kamış sapından özsuyunun çıkarılmasından sonra elde edilen lifli artıktır olup bu artıkların çapları 0,2-0,4 mm arasındadır. Bununla birlikte, atık kamış lifi, lif içindeki artık şekerler ve sınırlı yapısal özellikler nedeniyle sınırlı kullanıma sahiptir.

Danso ve diğerleri, şeker kamışı küspesi liflerinin toprak blokların dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, %0,25-1 oranında lifle güçlendirilmiş toprak bloklar üzerinde yoğunluk, su emme, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve erozyon deneyleri yapılmıştır. Zemin matrisinde optimum (%0,5) şeker kamışı küspe liflerinin kullanılmasının toprak blokların dayanımını iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca, güçlendirilmiş toprak blokların daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek su emme özelliğine sahip olmalarına rağmen, erozyona karşı daha iyi bir direnç gösterdikleri bulunmuştur [67].

Asher ve Sarang tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada zemin %6 oranında sönmüş kireç ile stabilize edilerek şişme ve kıvam limitleri azaltılmıştır. Daha sonra, zemin-kireç karışımı %2, %4 ve %6 oranında şeker kamışı küspesi lifi ilave edilerek daha da stabilize edilmiştir. Sonuçta elde edilen karışımlar, yoğunluk ve Kaliforniya taşıma oranı bakımından gelişme göstermiştir. Araştırmadan, özellikle zeminin taban zemini malzemesi olarak kullanılabileceği üst yapı açısından, hidratlı kireç ve şeker kamışı küspesi lifi kullanılarak stabilize edilebileceği sonucuna varılmıştır [68].

Dang ve diğerleri tarafından, şeker kamışı küspesi lifleri ile sönmüş kireç ilavesinin, stabilize edilmiş şişebilen zeminlerin mühendislik özellikleri ve büzülme-şişme davranışı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bir çalışma yapılmış ve bu amaçla bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Şeker kamışı küspesi lifi, bu çalışmada şişebilen zeminlerin stabilizasyonu için takviye bileşeni olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan şişebilen zeminler Queensland, Avustralya'dan elde edilmiştir. Şeker kamışı küspesi liflerinin şişebilen zeminin mühendislik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için, şişebilen zemine ve sönmüş kireç-şişebilen zemin karışımlarına %0,5, %1,0 ve %2,0'lik değişen oranlarda rastgele dağıtılmış küspe lifleri eklenmiştir.

İşlem görmemiş ve işlem görmüş şişebilen zemin numuneleri üzerinde 3, 7 ve 28 günlük çeşitli kür periyotlarından sonra gerçekleştirilen doğrusal büzülme ile serbest basınç dayanımı deneylerinin sonuçları sunulmuştur. Bu deneysel araştırmanın bulguları, sönmüş kireçle harmanlanan şeker kamışı küspesi lifi takviyesinin, kür süresi ve katkı maddesi içeriğinin artmasıyla şişebilen zeminin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Buna karşılık, sönmüş kireç ile şeker kamışı küspesi lifi oranlarının ve kürün artmasıyla stabilize şişebilen zeminlerin doğrusal büzülmesinin azaldığı görülmüştür. Deneysel sonuçlarına dayanarak, şişebilen zeminlerin sönmüş kireç ve şeker kamışı küspesi liflerinin kombinasyonu ile başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği belirtilmiştir [69].

#### **2.1.14 Pirinç Kabuğu Lifi**

Pirinç kabuğu, düşük fiyatı ve biyolojik olarak parçalanma potansiyeli olan, bol miktarda bulunan bir gıda atığıdır. Pirinç kabuğunun bileşimi diğer lifli malzemelerden daha karmaşıktır. Silika, pirinç kabuğunda %91,1 oranında dağılılı durumdadır ve silika asidinin canlı organizmalar tarafından polimerizasyonu yoluyla biyosentezlenen hidratlı taneler halinde oluşur.

Baldin ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, Brezilya'nın Alegeyte şehrindeki bir işletmenin endüstriyel atığı olan pirinç kabuğu lifini ekleyerek yine Brezilya'nın Curitiba şehrindeki killi zeminin davranışını değerlendirmiştir. Doğal pirinç kabuğu lifinin sıkıştırılmış zeminin mekanik davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için, lif içeriğinin etkisi ve zeminin drenajlı ve drenajsız davranışları gibi hususlar, serbest üç eksenli basınç deneyleri aracılığıyla araştırılmıştır. Ayrıca, zeminin granülometrisinin, özgül kütlelerinin ve Atterberg limitlerinin belirlenmesi için başka deneyler de gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç dayanımını belirlemek için %0,5, %0,75, %1 ve %1,5 oranlarında pirinç kabuğu lifi eklenerek oluşturulan karışımlar için numuneler dört kopya halinde üretilmiştir. Üç eksenli basınç deneyleri, saf zemin numunesi ve %1 oranında pirinç kabuğu lifi eklenmiş numuneler üzerinde 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa hücre basınçları altında gerçekleştirilmiştir. Kabuk yüzeyi ile zemin arasında yer alan arayüzdeki etkileşimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Serbest basınç dayanımı deneylerinde, pirinç kabuğu lifi içeriği %1 ve %1,5 olan numuneler, pirinç kabuğu lifi içermeyen zemine göre %36 artışla en yüksek sonuçları vermiştir. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneylerinin sonuçları, efektif gerilme açısından, sıkıştırılmış saf zemin ile pirinç kabuğu lifi ilave edilmiş zemin numunelerinin dayanımında küçük bir fark olduğunu göstermiştir. Drenajsız testler için, pirinç kabuğu lifi ilavesi olmayan zemine kıyasla, pirinç kabuğu lifi içeren numunelerde

kohezyonda %50'lik bir azalma ve sürtünme açısından %22'lik bir artışla birlikte, dayanımın arttığı görülmüştür [70].

### 2.1.15 Su Sümbülü Lifi

Su sümbülü dünyanın en istilacı türlerinden biri olup çok çabuk yayılması ve kitlesel olarak büyümesi nedeniyle küresel farkındalık kazanmıştır. Bu yabancı otun yönetiminin maliyetli olduğu ve bu atık otun katma değeri yüksek bir alanda değerlendirilmesinin faydalı olacağı bildirilmektedir. Atık yönetiminin alternatif bir yolu olarak su sümbülü lifinin muhtemel kullanımları üzerine çok az geoteknik çalışma yapılmıştır.

Bol miktarda bulunan, çevre, eko-turizm ve biyolojik çeşitlilik açısından zararlı bir yabancı ot türü olan su sümbülünün sınırlı ömürlü geotekstil üretimi için kullanılabilirliğini göstermek amacıyla Bordoloi ve diğerleri tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Su sümbülü lifinin selüloz, hemiselüloz, lignin ve kül içeriği açısından biyokimyasal bileşimi ile su sümbülü filamentlerinin ve geotekstillere gerilme mukavemeti belirlenmiştir. Su sümbülünden imal edilen geotekstillere gerilme mukavemetinin, diğer Hindistan cevizi, jüt, bambu ve sisal gibi tarım ürünlerinden elde edilen liflerin mukavemeti ile karşılaştırıldığında daha yüksek veya karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Su sümbülü geotekstiline kısa vadeli mukavemet iyileştirmesi konusundaki etkinliği, geotekstil ile güçlendirilmiş zeminin CBR değeri ile güçlendirilmemiş zemininki karşılaştırılarak gösterilmiştir. Su sümbülü geotekstili ile güçlendirilmiş zeminin ortalaması  $8,48 \pm 0,2$  olan CBR değerlerinin, donatısız zeminin ortalaması  $6,13 \pm 0,07$  olan CBR değerlerine göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu çalışmadan, su sümbülünden elde edilen sınırlı ömürlü geotekstil malzemenin karayolu altyapı projelerinde kullanımının teşvik edilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır [71].

## 2.2. Sentetik (insan yapımı) lifler

Sentetik lifler, korozyona karşı dirençleri, toksik olmamaları, yüksek çekme mukavemetleri ve rijitlikleri nedeniyle takviye malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Plastik üretim teknolojisinin gelişimi, zemin takviyesinde özellikle plastikten yapılan liflere karşı artan bir ilgiye yol açmıştır.

### 2.2.1. Naylon lif

Polyamid lifler olarak da adlandırılan naylon lifler, termoplastik, güçlü ve elastik malzemelerdir. Ayrıca, bu lifler, mükemmel tokluğa ve aşınma direncine sahip olup yıkanmaları ve boyanmaları kolaydır.



Kumar ve Tabor, naylon lif takviyeli siltli kilin farklı sıkıştırma derecelerindeki dayanım davranışını incelemiştir. Numuneler, %0, 0,05, 0,15 ve 0,30 oranında naylon liflerle takviye edilerek serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Çalışma, %93 sıkıştırma için numunelerin tepe ve artık dayanımının daha yüksek yoğunluklarda sıkıştırılan numunelerden önemli ölçüde daha fazla olduğunu belirlemiştir. Sonuçlar ayrıca, naylon lif ilavesinin, zeminlerin artık dayanımını tepe dayanımındaki artıştan önemli ölçüde daha fazla arttırdığını göstermiştir [72].

Salim ve diğerleri (2018), atık naylon torbalardan elde edilen geri dönüştürülmüş naylon lifler kullanmak suretiyle düşük taşıma kapasitesine ve yüksek sıkıştırılabilirliğe sahip yumuşak killi bir zemini stabilize etmiştir. Bunun için %1-5 oranında 6 mm uzunluğunda lifler kullanmışlardır. Sonuç olarak lif ilavesi ile zeminin likit limitinin düştüğünü ve plastik limitinin bir miktar arttığını belirtmişlerdir. Böylece zeminin plastisite indeksinin düştüğünü ve zeminin işlenebilirliğinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca lif içeriğindeki artışla birlikte zeminin optimum su içeriği değerinin arttığını ve maksimum kuru yoğunluk değerinin azaldığını bildirmişlerdir. Öte yandan, lif içeriği arttıkça, lif-kil kompozitinin özgül ağırlığının azaldığını ve drenajsız kayma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ancak artan lif içeriği ile sıkıştırma indeksinin düştüğünü ve %5 naylon lif içeriğinde yaklaşık %35 azalma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [73].

Murray ve diğerleri, naylon halı atığı lifi takviyeli kumlu silt zeminin özelliklerini değerlendirmek için laboratuvar sıkıştırma ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrık, rastgele dağıtılmış lif inklüzyonları, tepe kesme mukavemetini önemli ölçüde artırmış, tepe sonrası mukavemet kaybını azaltmış ve kırılmaya kadar eksenel gerinimi artırmıştır. Ayrıca yazarlar, üç eksenli basınç dayanımının %3 halı atığı lifi ile %204 oranında arttığını ve zeminin sünekliğinin yükseldiğini bildirmişlerdir [74].

Gosavi ve diğerleri, rastgele karıştırılmış lifler ile güçlendirilmiş yerel olarak mevcut siyah pamuk zeminin mukavemet davranışını araştırmıştır. Çalışmada, naylon ve jüt liflerinin karıştırılmasıyla zeminin CBR değerinin takviyesiz zemine göre yaklaşık %50 arttığı, Hindistan cevizi lifinin ise CBR değerini %96'ya kadar artırdığı bulunmuştur. Zemine karıştırılacak optimum lif miktarı %0,75 olarak bulunmuş olup, bu miktarın ötesinde herhangi bir lif ilavesi CBR değerinde önemli bir artışa neden olmamıştır [75].

### **2.2.2. Polipropilen (PP) lifler**

Polipropilen lifler, toksik olmamaları, düşük maliyetleri, yüksek asit ve alkali dirençleri, hidrofobik ve kimyasal olarak inert bir malzeme olmaları

ve yüksek çekme dayanımları nedeniyle zeminleri takviye etmek için yaygın olarak kullanılan katkı maddelerinden birisidir [76]. Günümüzde, polipropilen lifler, zeminin mukavemet özelliklerini arttırmak, büzülme özelliklerini azaltmak ve kimyasal ve biyolojik bozulmasının üstesinden gelmek için kullanılmaktadır [77]. Polipropilen lifler dünyanın her yerinde büyük miktarlarda üretildiğinden büyük miktarlarda çöp olarak atılmakta ve büyük bir çevresel etki bırakmaktadır. Sonuç olarak, zemin stabilitesini sağlamak ve ekosistemdeki kirliliği en aza indirmek için bu tür atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir [78].

Lif takviyesinin derin veya radye temeller için bir alternatif olarak kullanılabilirliğini ve etkinliğini araştırmak üzere, Balagoudra ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, çeşitli testler zemin ağırlığına göre sabit %4 oranında kireç ve %0,25'in katları olarak %1'e kadar artan oranlarda polipropilen lif içeren siyah pamuk zemin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, maksimum dayanım, %0,75 oranında polipropilen lif ve %4 oranında kireç içeren zeminde elde edilmiştir [79].

Gaspard ve diğerleri, hem fibrile polipropilen lifli hem de fibrile polipropilen liffsiz çimento ile stabilize edilmiş zemin karışımlarının değerlendirmesini yapmışlardır. Louisiana eyaletindeki yedi sahadan üç zemin tipi seçilmiştir. Yapılan deneyler, dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve gerilmesi ile dolaylı çekme direnci modülü deneylerini kapsamıştır. Sonuçlar, fibrile polipropilen lifin zemin çimento karışımına dâhil edilmesinin, dolaylı çekme dayanımını, dolaylı çekme gerilmesini ve tokluk endeksini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, kür süresini arttırmanın yanı sıra liflerin ilavesi, karışımların esneklik modülünü korumuş ya da önemli ölçüde arttırmıştır [78].

Puppala ve Musenda, ayrık ve rastgele yönlendirilmiş polipropilen lif takviyesinin iki tür şişebilen kil zeminin üzerindeki etkisini araştırmıştır. İki tür lif ve zeminin kuru ağırlığına göre %0, 0,3, 0,6 ve 0,9 olmak üzere dört lif dozajı dikkate alınmıştır. Hem ham hem de lif takviyeli killi numuneler serbest basınç dayanımı, hacimsel büzülme, üç boyutlu serbest şişme ve şişme basıncı deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışmada, polipropilen lif takviyesinin serbest basınç dayanımını arttırdığı ve şişen killerin hem hacimsel büzülme şekil değiştirmelerini hem de şişme basınçlarını azalttığı bulunmuştur [77].

Tiwari ve diğerleri, endüstriyel atık bir madde olan silika dumanını kimyasal stabilizatör olarak ve polipropilen lifini ise mekanik stabilizatör olarak kullanmayı amaçlayarak şişebilen bir zeminin mekanik ve kimyasal stabilizasyonunu gerçekleştirmiştir. Silika dumanının stabilizatör olarak performansını değerlendirmek için, işlem görmüş ve görmemiş numuneler

üzerinde kompaksiyon, Atterberg limitleri, serbest şişme indeksi, elektriksel iletkenlik, pH, şişme basıncı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Şişebilen zemini stabilize etmek için kuru zeminin ağırlığına göre %2, %4 ve %8 oranlarında silika dumanı ve %0,25, %0,5 ve %1 oranlarında polipropilen lif kullanılmıştır. Sonuçlar, silika dumanı ve polipropilen lif ilavesiyle CBR değerinin arttığını ve büzülme alanının azaldığını göstermiştir. Deneysel sonuçlardan, aynı zamanda silika dumanı ve polipropilen lif ilavesiyle Atterberg limitinde bir azalma olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda killi zeminin büzülme davranışı katlanarak azalmıştır [80].

Consoli ve diğerleri, polipropilen lifler ile güçlendirilmiş ve sıkıştırılmış kumlu zeminin kalın ve homojen bir tabakası üzerindeki yük-oturma tepkisini araştırmıştır. Polipropilen lif takviyeli numuneler, testlerin sonuna kadar, %20'den daha büyük eksenel gerilmelerde belirgin bir sertleşme davranışı gösterirken, takviye edilmemiş numuneler, büyük gerilmelerde neredeyse mükemmel bir plastik davranış sergilemiştir. Bu gelişme, sıg temellerde, zayıf zeminler üzerindeki toprak setlerde ve aşırı deformasyona uğrayabilen diğer toprak işlerinde lif takviyesinin potansiyel uygulamasını önermektedir [81].

Çimento ve polipropilen lif takviyesinin kum üzerindeki etkisini belirlemek için Hamidi ve Hoopes tarafından geleneksel üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Çimento içeriği, kuru ağırlıkça kumun %3'ü olup numuneler yedi gün süreyle kürlenmiştir. 12 mm uzunluğunda ve 23  $\mu$ m kalınlığındaki lifler, kum-çimento karışımının kuru ağırlıkça %0,0, %0,5 ve %1'i oranında ilave edilmiştir. Numuneler %50 ve %70 bağıl yoğunluklarda hazırlanmış ve 100, 300 ve 500 kPa hücre basınçlarında üç eksenli deneyler yapılmıştır. Gerilme-gerinim ve hacim değişimi davranışı ile zeminin rijitliği ve enerji absorpsiyonu ölçülmüş ve önceki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Liflerin eklenmesi, çimentolu zeminin tepe ve artık kayma dayanımlarını arttırmış ve kırılma davranışını daha sünek bir davranışa dönüştürmüştür. Lif içeriği arttıkça %0,1'lik eksenel gerinim için başlangıç rijitliği azalmıştır. Lif eklenmesi enerji absorpsiyonunu %20-50 oranında arttırmıştır. Lifler %70 bağıl yoğunlukta kayma dayanımı parametreleri üzerinde daha etkili olmuştur [82].

Santoni ve Webster, kumlu bir zeminin polipropilen lifler ile stabilize edildiği saha testleri için deneyler gerçekleştirmiştir. Deneylerden, tekniğin askeri hava alanı ve yol uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olduğu ve 203 mm kalınlığındaki bir lifli kum tabakasının önemli miktarda askeri kamyon trafiğini taşımak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır. Saha deneyleri ayrıca, trafik altında liflerin kopmasını önlemek için emülsiyon bağlayıcı kullanarak yüzeyin sabitlenmesinin gerekli olduğunu göstermiştir [83].

Uçucu kül ve polipropilen liflerin kombinasyonunun şişme ve büzülme özelliklerini azaltmadaki etkinliği de bildirilmiştir [77]. Mevcut raporlar, polipropilen lif takviyelerinin şişen killerin şişme potansiyelini azalttığını göstermiştir.

Ali ve diğerleri, polipropilen liflerle güçlendirilmiş yerel olarak mevcut killi zeminin konsolidasyon davranışı üzerine bir çalışma yapmıştır. İyileştirilmiş konsolidasyon özelliklerini bulmak için, orta plastisiteli killi zemin, 5-10 mm'lik farklı uzunluktaki liflerle zeminin kuru ağırlığına göre %0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4 ve 0,5'lik değişen yüzdelerde rastgele karıştırılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş zemin numunelerinin konsolidasyon davranışı gözlemlenmiş ve takviyesiz zemin numunesi ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, sıkıştırma indeksinin ( $C_c$ ), sıkıştırılabilirlik katsayısının ( $a_v$ ) ve hacim değişim katsayısının ( $m_v$ ), polipropilen liflerin eklenmesiyle belirli bir yüzdeye kadar azaldığını ve daha sonra artmaya başladığını göstermiştir. Araştırmada, ortalama 5-10 mm uzunluğunda polipropilen liflerin killi zemine kuru ağırlığının %0,35'i oranında ilave edildiğinde çeşitli konsolidasyon parametreleri için optimum sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır [84].

Tang ve diğerleri, ayrıık kısa polipropilen lifin çimentosuz ve çimentolu killi zeminin dayanımı ve mekanik davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, üç farklı yüzdelikte polipropilen lif içeriğine ve iki farklı yüzdelikte çimento içeriğine sahip 12 farklı zemin numunesi grubu hazırlanmış ve 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç ve direkt kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, liflerin çimentosuz ve çimentolu zemin içerisine dâhil edilmesinin, serbest basınç ve kayma dayanımları ile kopmadaki eksenel gerilmede bir artışa sebep olduğunu, rijitliği ve tepe noktası sonrası dayanım kaybını azalttığını ve çimentolu zeminin kırılma davranışını daha sünek olacak şekilde değiştirdiğini göstermiştir. Lif yüzeyi ve zemin matrisi arasında yer alan ara yüzdeki etkileşimler, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir [85].

Ali ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, yerel şişebilen zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için polipropilen lifler kullanılmıştır. %0, 0,2, 0,4, 0,6 ve %0,8 oranlarında polipropilen liflerle işlem görmüş zeminin nem-yoğunluk ilişkisi, serbest basınç dayanımı, elastisite modülü (E50), Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve tek boyutlu konsolidasyon davranışı araştırılmıştır. Bu çalışmada, daha ağır zemin parçacıklarının hafif liflerle yer değiştirmesi nedeniyle güçlendirilmiş zeminin maksimum kuru yoğunluğunun %2,8 oranında hafifçe azaldığı ve

liflerin emici olmayan doğasından dolayı optimum nem içeriğinin neredeyse hiç etkilenmediği bulunmuştur. %0,4 oranında lifle güçlendirilmiş zeminin serbest basınç dayanımı, elastisite modülü (E50) ve Kaliforniya taşıma oranı değerlerinde önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. Zeminin serbest basınç dayanımı %279 oranında artış gösterirken elastisite modülünde %113,6 artış olmuştur. CBR değerinde ise ıslatılmamış koşullarda %94,4 oranında artış gözlenirken, ıslatılmamış koşullarda %55,6 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca %0,8 oranında lif ilavesi ile zeminin serbest şişme ve şişme basıncında sırasıyla %94,4 ve %87,9'luk olmak üzere önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir. Benzer şekilde, sıkıştırma ve geri tepme endeksleri de %0,8'lik elyaf içeriğiyle sırasıyla %69,9 ve %88 oranında azalmıştır. Deneysel değerlendirmelerden, polipropilen lifin yaygın olarak şişen zeminler için düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir stabilizasyon malzemesi olduğu ortaya çıkmıştır [86].

Kapsamlı bir çalışmada Yetimoğlu ve diğerleri, polipropilen lif ile güçlendirilmiş zemin altında yumuşak kil üzerinde uzanan geotekstil ile güçlendirilmiş kum numuneleri üzerinde bir dizi CBR testi gerçekleştirmiştir. Lif takviyesi içeriğinin, lif takviyeli kum dolgu-yumuşak kil sisteminin taşıma kapasitesi, rijitliği ve sünekliliği üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Piston yükünün en yüksek olduğu penetrasyon değerinin, lif takviyesi içeriği arttıkça artma eğiliminde olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, test sonuçları, lif takviyesi içeriğinin arttırılmasının, lif takviyeli kum dolgu-yumuşak kil sisteminin kırılma dayanımında daha yüksek kayba neden olarak arttırabileceğini göstermiştir [11].

Consoli ve diğerleri, rastgele yönlendirilmiş polipropilen liflerle güçlendirilmiş yapay çimento kum numuneler üzerinde bir dizi drenajlı standart üç eksenli deney gerçekleştirmiştir. Çimento kum numuneler, çimento içerikleri ağırlıkça %0 ile %10 arasında değişen kuru kum ile hazırlanmış ve yedi gün süreyle kürlenmiştir. Ağırlıkça %0 ve %0,5 kuru kum-çimento karışımı içeriğinde lif uzunluğu ve çapı sırasıyla 24 mm ve 0,023 mm olmuştur. Lif takviyesi, tepe dayanımını sadece belirli bir çimento içeriğine kadar yaklaşık %5 yükseltmiş, nihai dayanımı arttırmış, rijitliği azaltmış ve çimento kumun kırılma davranışını daha sünek hale getirmiştir. Lif ilavesine bağlı üç eksenli tepe dayanımı artışı, daha az miktarda çimento için daha etkili olurken, nihai dayanımdaki artış, daha yüksek çimento içerikleriyle iyileştirilmiş kuma lif eklendiğinde daha etkili olmuştur [87].

Murthi ve diğerleri tarafından, silika dumanının polipropilen lifle güçlendirilmiş siyah pamuk zeminin dayanım özelliklerinin arttırılması

üzerindeki etkisini incelemek için bir araştırma gerçekleştirilmiştir. %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı ile %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında polipropilen lif zeminle karıştırılarak deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, %20 silis dumanı ve %1,5 polipropilen ilavesiyle zeminin şişme potansiyeli özelliklerinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Zeminin serbest basınç dayanımı ise, yine %20 silis dumanı ve %1,5 polipropilen lif ilavesiyle önemli ölçüde iyileştirilmiştir [88].

Diambra ve diğerleri, polipropilen lif takviyeli kum malzemeyi, geleneksel üç eksenli sıkıştırma ve çekme deneyinde test etmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, liflerin dayanıma katkısının, sıkılaşmada dikkate değer olduğu, çekmede ise sınırlı olduğu, bunun da esasen çekme gerilmelerine göre oryantasyonlarına bağlı olduğu doğrulanarak bildirilmiştir [89].

Ghazavi ve Roustaie, donma-çözülme döngülerinin lif takviyeli kilin basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, çelik ve polipropilen liflerle güçlendirilmiş kaolinit kil bir laboratuvarda sıkıştırılmış ve en fazla 10 kapalı sistem donma ve çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Daha sonra güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş numunelerin serbest basınç dayanımı belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, incelenen zemin için, donma-çözülme döngülerinin sayısındaki artışın kil numunelerinin serbest basınç dayanımının %20-25 oranında azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Bundan başka, 12 mm uzunluğunda %3 polipropilen lif ilavesinin, donma-çözülme döngülerinin uygulanmasından önce ve sonra zeminin serbest basınç dayanımının %60-160 oranında artmasına ve donma kabarmasının %70 oranında azalmasına neden olduğu belirlenmiştir [12].

Sengul ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sorunlu taban zeminini temsil eden bölgesel yüksek plastisiteli bir zemin %10, %20, %30 ve %40 olmak üzere farklı oranlarda uçucu kül ile stabilize edilmiş ve bu zemin karışımlarının plastisite, sıkışabilirlik ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deney yapılmıştır. Killi zemin ve uçucu külün yanı sıra bu karışımların mikro yapıları da X-ışını floresans (XRF) spektrometrisi, X-ışını kırınım (XRD) spektrometrisi, fourier-dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile incelenerek mekanik davranış ile mikro yapı arasındaki ilişkiler açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, kuru kütlelerin %0,5'i kadar zemine eklenen polipropilen liflerin ve donma-çözülme döngülerinin taban zemininin dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sonuçlar, uçucu kül ile stabilizasyon için etkili uçucu kül karışım oranının %10 olduğunu, uçucu kül karışımı ile doğal zeminin 28 günlük serbest basınç dayanımları karşılaştırıldığında uçucu kül karışımının



dayanımı %85,8 artırdığını göstermiştir. Bundan başka, lif katkılarının kayma mukavemetini %3,0 ile %21,0 arasında değişen oranlarda arttırdığı ve doğal zeminde donma-çözülme döngüsü nedeniyle yaklaşık %80 civarında dayanım kaybı meydana geldiği belirlenmiştir. Ayrıca, uçucu kül ve sentetik lif katkılarının donma-çözülme döngülerinin neden olduğu dayanım kaybını telafi ederek kayma dayanımını artırabileceği belirtilmiştir [90].

Zaimoğlu, rastgele dağıtılmış polipropilen liflerin, donma-çözülme döngülerine maruz kalan ince taneli bir zeminin dayanımı ve dayanıklılık davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Dayanım davranışı için, bir dizi serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kütle kayıpları, dayanıklılık davranışı kriterleri olarak donma-çözülme döngülerinden sonra hesaplanmıştır. Deneylerde, polipropilen lif içeriği, kuru zemin ağırlığının %0,25 ile %2'si arasında değiştirilmiştir. Takviye edilmiş numuneler için deney sonuçları, takviye edilmemiş örnek için olanla karşılaştırılmıştır. Takviye edilmiş zeminlerdeki kütle kaybının, takviye edilmemiş zemindekenden yaklaşık %50 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, donma-çözülme döngülerine maruz kalan numunelerin serbest basınç dayanımının, artan lif içeriği ile genellikle arttığı da bulunmuştur [91].

Li ve diğerleri (2014) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, lifle güçlendirilmiş zeminin çekme dayanımı özelliklerini belirlemek için yenilikçi bir çekme aparatı geliştirilmiştir. Lif içeriği, kuru yoğunluk ve su içeriğinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takviye malzemesi olarak 12 mm uzunluğunda ayırık polipropilen lif kullanılmıştır. Sonuçlar, geliştirilen test cihazının zeminlerin çekme dayanımının belirlenmesinde uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Çekme dayanımı, artan lif içeriği ile genel olarak yükselmiştir. Lif içeriği %0'dan %0,2'ye çıktıkça çekme dayanımı %65,7 oranında artmıştır. Lifle güçlendirilmiş zeminin çekme dayanımı, kuru yoğunluğun artmasıyla artmış ve artan su içeriği ile azalmıştır. Örneğin, 1,7 Mg/m<sup>3</sup> kuru yoğunluktaki çekme dayanımı, 1,4 Mg/m<sup>3</sup>tekinden 2,8 kat daha yüksektir. Ayrıca, su içeriği %14,5'tan %20,5'e çıktıkça çekme dayanımı %30 azalmıştır. Bundan başka, lif takviyeli zeminin çekme dayanımında, lif yüzeyi ile zemin matrisi arasındaki ara yüzey mekanik etkileşimine bağlı olarak lif çekme direncinin hâkim olduğu gözlemlenmiştir [92].

Tang ve diğerleri, zemin parçacıkları ile polipropilen lifler arasındaki mikromekanik etkileşim davranışını araştırmıştır. Lif/zemin ara yüzey kayma direncinin öncelikle zemin parçacıklarının yeniden düzenlenme direncine, etkili ara yüzey temas alanına, lif yüzey pürüzlülüğüne ve zemin bileşimine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yazarlar tarafından bir zemin-lif çekme test aparatı geliştirilmiştir [93].



Khattak ve Alrashidi tarafından gerçekleştirilen bir araştırma, işlenmiş selüloz ve polipropilen lifler ile takviye edilmiş zemin-çimento karışımlarının laboratuvar dayanıklılığı ve mekanistik değerlendirmesi üzerine odaklanmıştır. Louisiana eyaletindeki çeşitli proje sahalarından dört zemin türü elde edilmiştir. Dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve dolaylı çekme döngüsel yük testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, zemin-çimento-lif karışımlarının mekanik özelliklerinin, dozaj, zemin tipi ve kürlenme süresinin işlevleri olduğunu göstermiştir. Genel olarak, zemin-çimento-lif karışımlarının dayanıklılık, serbest basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve kırılma tokluğu ile esneklik modülü değerleri ya aynı kalmıştır ya da zemin-çimento karışımlarından daha büyük olmuştur [94].

### 2.2.3. Polyester (PET) lifler

Polyester lifler tüm kimyasal lifler arasında lider konumdadır. Bu liflerin benzersiz özellikleri, makromoleküler zincirlerde alifatik ve aromatik kısımların varlığından ve düzenli moleküler yapıdan kaynaklanmaktadır. Poli(etilen tereftalat) (PET), yalnızca son kullanım özelliklerinin ve üretim ekonomisinin iyi olması nedeniyle değil, aynı zamanda özellikle PET'in olumlu özelliklerini artıran fiziksel ve kimyasal modifikasyon kolaylığı nedeniyle lif üretiminde kullanılan baskın polyesterdir. PET lifler geniş çapta araştırılmış olmasına rağmen, yapı veya üretim parametrelerine dayalı olarak mekanik davranış ve çekmedeki göçmeyi tahmin etmek için hala tam olarak tanımlanmış bir kural yoktur. Bunun ana nedenlerinden biri, lif üretimi sırasındaki değişikliklerin karmaşık karakteri ve gerilme alanı, sıcaklık, zaman ve çevresel faktörlerin etkisi sırasında yapıda meydana gelen değişikliklerdir [95].

Üniform bir ince kumun mühendislik davranışını iyileştirmek amacıyla Consoli ve diğerleri, atık plastik şişelerin geri dönüşümünden elde edilen rastgele dağıtılmış polietilen tereftalat lifinin tek başına veya hızlı sertleşen Portland çimentosu ile birlikte kullanılmasının faydasını değerlendirmek için serbest basınç deneyleri, yarmada çekme deneyleri ve lokal gerinim ölçümlü doymuş drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, polietilen tereftalat lif takviyesinin hem çimentolu hem de çimentosuz zeminin hem tepe hem de nihai dayanımını artırdığını ve çimentolu kumun kırılma dayanımını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, ilk rijitlik liflerin dâhil edilmesiyle önemli ölçüde değişmemiştir [96].

Maheshwari ve diğerleri, rasgele dağıtılmış polyester liflerle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş killi zeminlerden elde edilen sonuçları birbirleriyle karşılaştırmak için bu zeminler üzerinde küçük ölçekli üç eksenli testler

ve konsolidasyon testleri ile bu zeminler tarafından taşınan kare temeller üzerinde büyük ölçekli laboratuvar modeli testleri gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, 12 mm uzunluğundaki polyester lifleri yüksek oranda sıkıştırılabilir killi zemin ile %0 ila %1 arasında değişen oranlarda karıştırmıştır. Sonuçlar, yüksek oranda sıkıştırılabilir killi zeminin rastgele dağıtılmış liflerle güçlendirilmesinin nihai taşıma kapasitesinde artışa ve nihai yükteki oturmada azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Zemin taşıma kapasitesinin ve güvenli taşıma basıncının her ikisinin %0,50'ye kadar lif içeriğindeki artışla birlikte arttığı ve daha sonra liflerin daha fazla dâhil edilmesiyle azaldığı sonucuna varmışlardır [97].

Changizi and Haddad tarafından yapılan bir araştırma, düşük plastisiteli killi zemin (CL) ve yüksek plastisiteli killi zemin (CH) kullanarak, geri dönüştürülmüş polyester lif ilavesinin başta kayma dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) olmak üzere zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Geri dönüştürülmüş polyester lifler, zeminin net ağırlığına bağlı olarak %0,1, %0,3 ve %0,5 olmak üzere üç farklı yüzdede zeminle karıştırılmıştır. İşlem görmüş numunelerin kayma dayanımları, CBR değerleri ve atterberg limitleri doğrudan kesme deneyi, CBR deneyi ve atterberg limitleri deneyi ile belirlenmiştir. Deney sonuçları, geri dönüştürülmüş polyester lif kullanımının, kayma dayanımı ve CBR değerlerinin artmasına, plastisite indeksinin ise azalmasına yol açtığını göstermiştir. En büyük dayanımı elde etmek için kullanılması gereken geri dönüştürülmüş polyester lifin optimum katkı oranı %0,5 olarak bulunmuştur [98].

Kumar ve diğerleri, serbest basınç dayanımı deneyinde yüksek oranda sıkıştırılabilir kili %0, %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranında düz ve kıvrımlı polyester liflerle test etmiştir. Düz lifler için 3 mm, 6 mm ve 12 mm olmak üzere üç boy seçilirken, kıvrımlı lifler 3 mm uzunluğunda kesilmiştir. Sonuçlar, lif uzunluğu ve/veya lif içeriği arttıkça serbest basınç dayanımı değerinin iyileştiğini göstermiştir. Liflerin kıvrılması, serbest basınç dayanımının hafifçe artmasına neden olmuştur [99]. Bu sonuçlar, Tang ve diğerleri tarafından bulunanlarla oldukça karşılaştırılabilir [100].

Kaniraj ve Havanagi, uçucu kül-zemin karışımlarının geoteknik özellikleri üzerinde rastgele yönlendirilmiş lif katkıların ve çimento stabilizasyonunun tek tek ve birleşik etkilerini incelemek için Hindistan'da deneysel bir program yürütmüştür. Bu amaçla, bir Hint uçucu külü farklı oranlarda silt ve kum ile karıştırılmıştır. Ham uçucu kül-zemin numunelerinin ve %1 rastgele yönlendirilmiş polyester lif içeren uçucu kül-zemin numunelerinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Yalnızca %3 çimento içeriğiyle ve

ayrıca %3 çimento ve %1 lif içeriğiyle hazırlanan uçucu kül-zemin numuneleri üzerinde farklı kür sürelerinin ardından serbest basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma, çimento stabilizasyonunun ham uçucu kül-zemin numunelerinin mukavemetini artırdığını göstermiştir. Lifin ilave edilmesi, ham uçucu kül-zemin numunelerinin yanı sıra çimento ile stabilize edilmiş numunelerin mukavemetini artırmış ve gevrek davranışlarını sünek davranışa dönüştürmüştür [101].

Uçucu kül-zemin karışımlarının geoteknik özellikleri üzerinde polyester lif katkılarının ve kireç stabilizasyonunun etkilerini incelemek için Kumar ve diğerleri tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bir Hint uçucu külü, farklı oranlarda şişebilen zemin ile karıştırılmıştır. Farklı oranlarda rastgele yönlendirilmiş liflerle karıştırılan uçucu kül-zemin numuneleri, kireç-zemin numuneleri ve kireç-uçucu kül-zemin numunelerinin geoteknik özellikleri incelenmiştir. Kireç ve uçucu kül, sırasıyla %1-10 ve %1-20 oranlarında şişen zemine eklenmiştir. Test numuneleri 7, 14 ve 28 gün boyunca kürlendikten sonra serbest basınç ve yarmada çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Kireç ve uçucu kül için bulunan optimum değerlere dayanarak, 28 günlük külden sonra uçucu kül-şişen zemin-kireç-lif karışımından hazırlanan test numuneleri üzerinde testler yapılmıştır. Numuneler kuru ağırlık olarak %0, 0,5, 1,0, 1,5 ve %2 oranında düz ve kıvrımlı polyester lif ile karıştırılmıştır. Elde edilen olumlu sonuçlardan, şişen zeminin lif, kireç ve uçucu külün birleşik etkisiyle başarılı bir şekilde stabilize edilebileceği anlaşılmıştır [102].

Mishra ve Gupta, killi taban zeminine uçucu külle birlikte geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET) liflerinin dâhil edilmesinin zeminin mühendislik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Özellikle incelenen mühendislik özellikleri, kayma mukavemeti, CBR, dolaylı çekme mukavemeti ve Atterberg limitleridir. Geri dönüştürülmüş PET lifi ve uçucu kül, killi toprakla çeşitli oranlarda karıştırılmıştır. Oranlar, PET lifi için zeminin ağırlığınca %0 ila %1,6 arasında %0,4 artışla, uçucu kül için ise zeminin ağırlığınca %0 ila %20 arasında %5 artışla değişmiştir. Deneysel araştırmalar, kayma dayanımında ve CBR değerinde bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Plastisite indeksinde ise bir azalma meydana gelmiştir. Optimum oranlar, uçucu kül ve PET lifi için sırasıyla %15 ve %1,2 olarak bulunmuştur [103].

Kaniraj ve Gayathri, Hindistan'daki iki uçucu külün geoteknik davranışı üzerine rastgele yönlendirilmiş lifin dâhil edilmesinin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneylerde iki farklı tipte polyester lifi ve kuru ağırlıkça %1'lik sabit bir lif içeriği kullanılmıştır. Çalışmada, kompaksiyon deneyleri, üç eksenli kesme deneyleri ile ham ve lif takviyeli

uçucu küller üzerinde gerçekleştirilen diğer geoteknik tanımlama deneylerinin sonuçları verilmiştir. Lif katkısı, ham uçucu kül örneklerinin dayanımını arttırmış ve kırılma davranışlarını sünek davranışa dönüştürmüştür [104].

Furumoto ve diğerleri, polyester veya polipropilen kısa lifleri toprağa karıştırarak toprağın mukavemet ve tokluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Ayrıca 64 mm uzunluğundaki kısa PET lifi takviyeli zeminin yüksek borulanma direncine sahip olduğunu ve kısa lif takviyeli zemin tabakasının yağış ve sel sızıntısına karşı su setinin stabilitesini artırdığını tespit etmişlerdir [105].

#### **2.2.4. Polietilen (PE) lifler**

Polietilen lifler düşük özgül ağırlığa sahip olup suda yüzebilirler. Diğer polimer lifler gibi, sadece çekme gerilmesi alabilirler. Polietilen düşük yüzey yapışkanlığına sahip olduğundan polietilen lifleri kaplamalı uygulamalarda kullanmak zordur. Özel bir ön kaplama ile işlem gördüğünde bu mümkün olmaktadır [106].

Zeminlerin polietilen (PE) şeritler ve liflerle güçlendirilmesinin fizibilitesi de sınırlı ölçüde araştırılmıştır [107]. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) liflerin küçük bir miktarının bile zeminin kırılma enerjisini artırabileceği bildirilmiştir [108]. Günümüzde 1-2 inç uzunluğunda ayrık polipropilen ve/veya polietilen fibrile veya bant telleri olan GEOFIBERS®, kum veya kil zeminlere karıştırılmakta veya harmanlanmaktadır. Ancak, bazı araştırmacılar zemin güçlendirmede kullanılan polipropilen fiberler için “Geofiber” terimini kullanmaktadırlar [109].

Sobhan ve Mashand, çimento ve uçucu kül ile kimyasal olarak stabilize edilmiş ve geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerle güçlendirilmiş granüler bir zeminin yarmada çekme yükü-deformasyon dayanımı ilişkisini ve tokluk özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir araştırma yürütmüştür. Araştırma, eklenen yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerle çekme mukavemetinde artışların gerçekleşmediğini, ancak artan gerinim kapasitesinden kaynaklanan toklukta büyük artışlar gözlemlendiğini göstermiştir. Artan toklukla birlikte, lif ilavesinden dolayı beklenen performans faydalarının çoğu, gerilme-gerinim davranışının tepe yük sonrası kısmındadır. Böylece, lifler gerilme geliştirdikçe, gelişmiş bir gerilme-gerinim tepkisi ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, yorulma davranışında iyileşmeler kaydedilmemiştir [107].

Hassan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, polietilen ve polipropilen lifler kullanılmıştır. Güçlendirmenin etkisi, standart laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Bu deneyler, zemin ağırlığına

göre dört lif içeriğine (%1, %2, %3 ve %4) sahip olan doğal ve güçlendirilmiş zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, standart proctor deneyi, serbest basınç dayanımı deneyi, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi ile esneklik (resilient) modülü ( $M_r$ ) deneyini içermiştir. Tüm bu deneylerde, lifler 1,0 cm ve 2,0 cm olmak üzere iki uzunlukta ilave edilmiştir. Laboratuvar deney sonuçları, plastik liflerin takviye edilmiş zeminlerin maksimum kuru yoğunluğunu ve optimum nem içeriğini azalttığını ortaya çıkarmıştır ve bu durum hafif malzemelerden dolguların inşası için gerekli görülmektedir. İlave olarak, zeminlerin serbest basınç dayanımında, polietilen liflerinin her iki uzunluğu için sırasıyla %76,4 ve %96,6 oranında, polipropilen liflerinin her iki uzunluğu için de sırasıyla %57,4 ve %73,0 oranında önemli bir iyileşme olmuştur. Kaliforniya taşıma oranı deneylerinin sonuçları, killi zeminlere plastik liflerin dâhil edilmesinin, özellikle %4'lük lif içeriğinde 1,0 cm ve 2,0 cm'lik her iki uzunluk için zeminin dayanımı ile deformasyon davranışını iyileştirdiğini ve polietilen ve polipropilen lifler için sırasıyla %185 ila %150'lik bir değere ulaştığını göstermiştir. Bundan başka, esneklik modülü deneylerinin sonuçlarından, mekanik özelliklerin bir miktar iyileştiği gözlemlenmiştir. Örneğin, lif içeriğindeki bir artış olduğunda, polietilen lif için %4'lük lif içeriğinde esneklik modülü yaklaşık %120 artmıştır. Bununla birlikte, polipropilen lif için esneklik modülündeki iyileşme %3 lif içeriğinde azalmıştır. Bu nedenle, lif malzemesi ile zeminin takviye edilmesinde optimum lif içeriğinin aranması gerektiği sonucuna varılmıştır [110].

Choudhary ve diğerleri, geri kazanılmış yüksek yoğunluklu polietilen şeritlerinin yerel kuma eklenmesinin CBR değerini ve sekant modülünü artırdığını bildirmiştir. CBR ve sekant modülündeki maksimum iyileşme, şerit içeriği %4 ve en-boy oranı 3 olduğunda elde edilmiştir. Bu da takviyesiz sistemin yaklaşık üç katıdır. Ayrıca, yüksek yoğunluklu polietilen şerit takviyeli kumun üstyapı mühendisliğinde taban zemini malzemesi olarak kullanılması durumunda temel tabakasının kalınlığının önemli ölçüde azaltılabileceği ifade edilmiştir [108].

Kim ve diğerleri, dip tarama işleminden elde edilen takviyeli ve takviyesiz hafif toprağın dayanım özelliklerini ve gerilme-gerinim davranışını araştırmıştır. Test numuneleri, değişen çimento içeriği (işlenmemiş toprağın ağırlığına göre %8, %12, %16 ve %20), başlangıç su içeriği (%125, %156, %187, %217 ve %250), hava-köpük içeriği (%1, %2, %3, %4 ve %5) ve atık balık ağı (%0, %0,25, %0,5, %0,75 ve %1) ile hazırlanmıştır. Daha sonra birkaç seri serbest basınç ve tek boyutlu sıkıştırma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, serbest basınç dayanımının çimento içeriğindeki artışla arttığını, ancak artan su içeriği ve hava-köpük içeriği ile azaldığını göstermiştir. Gerilme-gerinim ilişkisi ve serbest basınç dayanımı, atık balık

ağı yüzdesinden etkilenmiştir. Basınç dayanımındaki maksimum artışın yaklaşık %0,25'lik atık balık ağı içeriği için elde edildiği bulunmuştur [111].

### 2.2.5. Cam lifleri

Cam lifi, çok sayıda ince cam lifinden oluşan bir malzeme olup polimerler ve karbon lif gibi diğer liflerle kabaca karşılaştırılabilen mekanik özelliklere sahiptir. Karbon lif kadar sert olmasa da, kompozitlerde kullanıldığında çok daha ucuzdur ve daha az kırılımandır. Cam lifi takviyeli kompozitler, iyi çevresel dirence, yüksek özgül mukavemete ve sertliğe sahip olduklarından pek çok alanda kullanılmaktadır.

Consoli ve diğerleri cam liflerinin siltli kuma dâhil edilmesinin tepe mukavemetini etkili bir şekilde iyileştirdiğini göstermiştir [112]. Bir başka çalışmada, Maher ve Ho, kaolinit-lif (polipropilen ve cam lifleri) kompozitlerinin davranışını incelemiş ve serbest basınç dayanımındaki artışın cam lifi takviyeli numunelerde daha belirgin olduğunu bulmuştur [113].

Consoli ve diğerleri polipropilen, polyester ve cam liflerin çimento ile stabilize edilmiş üniform ince kum zeminlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla, lokal gerinim ölçümüne sahip konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Liflerin yapısına ek olarak, lif içeriğinin (ağırlıkça %0,5'e kadar), lif uzunluğunun (36 mm'ye kadar), çimento içeriğinin (ağırlıkça %0 ila %7 arasında) ve başlangıçtaki ortalama efektif gerilmenin (20, 60 ve 100 kN/m<sup>2</sup>) zeminin deformasyon ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Sonuçlar, polipropilen lifin dâhil edilmesinin çimentolu zeminlerin gevrek davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini, kırılma anındaki saptırılmış (deviatorik) gerilmeleri ise hafifçe azalttığını göstermiştir. Polipropilen lif durumundan farklı olarak, polyester ve cam liflerin dâhil edilmesi, kırılmadaki saptırılmış gerilmeleri hafifçe artırmış ve kırılma anındaki hafifçe azaltmıştır [114].

Maher ve Ho, rastgele dağıtılmış cam lifi takviyesinin çimentolu kumun yüke tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için üç eksenli statik sıkıştırma, döngüsel sıkıştırma ve yarmada çekme gerilmesi deneyleri gerçekleştirmiştir. Test sonuçları, lif takviyesinin çimentolu kumun basınç ve yarmada çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Basınç ve çekme mukavemetindeki artışın, daha yüksek cam lifi içeriklerinde ve daha uzun lif uzunluklarında daha belirgin olduğu görülmüştür [115].

Patel ve Singh cam lifle güçlendirilmiş kohezyonlu zeminin stabilitesini incelemiştir. Bu amaçla, taban zemini malzemesi olarak uygunluğunu araştırmak için cam lif takviyeli kohezyonlu zemin üzerinde Proktor ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Değişen lif içeriği,



lif uzunluğu, nem içeriği ve ıslatma süresinin CBR değeri ve sekant modülü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçları, cam lif takviyeli numunelerde maksimum kuru yoğunluk ve optimum nem içeriğinin marjinal değişimini göstermiştir. Islatılmamış CBR testi, optimum nem içeriğinde ve optimum nem içeriğinin %2 ıslak ve kuru taraflarında sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilirken, ıslatılmış CBR testi yalnızca optimum nem içeriğinde sıkıştırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. CBR değeri, ıslatılmamış ve ıslatılmış koşullarda sırasıyla 5,08 ve 7,62 mm'ye kadar penetrasyon derinliği ile artmıştır. Hem CBR değeri hem de sekant modülü, herhangi bir sıkıştırılmış durumda lif içeriği ve lif uzunluğu ile birlikte yükselmiştir. Optimum nem içeriğinin her iki tarafında ve ayrıca ıslatma süresinin artmasıyla birlikte azalmışlardır. Takviyenin faydası, herhangi bir lif uzunluğu ve deney koşulu için lif içeriğinin %0,75'e kadar artırılmasıyla artmıştır. CBR değerindeki maksimum artış, ıslatılmamış ve ıslatılmış koşullar altında, 20 mm uzunluğunda %0,75 fiber takviyesiyle sırasıyla 2,77 ve 2,85 kat olmuştur [116].

Ahmad ve diğerleri, özellikle yumuşak zeminlerin güçlendirilmesinde uzun süreli bir güçlendirme tekniği olarak cam lif kullanımının, kolay bulunabilirliği, hafifliği, yüksek mukavemeti ve biyolojik olarak parçalanamayan yapısı nedeniyle bir avantaj olduğunu belirtmiştir [117].

Mahdi ve Al-Hassnawi, zayıf bir zeminin plastisite, dayanım, konsolidasyon, kayma mukavemeti ve diğer özelliklerini iyileştirmek için ezilmiş atık cam kullanmıştır. Bu amaçla, öncelikle Amerikan Eyalet Karayolu ve Ulaştırma Görevlileri Birliği Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre A-7-5 veya Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Yöntemi'ne göre ML olarak sınıflandırılan zemine, zeminin kuru ağırlığına göre %3, 5, 7 ve 9 oranlarında 75 µm elek boyutundan geçen atık cam katkı maddesi eklenmiştir. Daha sonra, zemine cam tozu eklenmesinin etkisini incelemek için elek analizi, Atterberg limitleri, Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımı gibi bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesinin zemine olumlu etkisinin olduğu ve zemin özelliklerini iyileştirdiği bulunmuştur. Cam tozu katkı oranının artmasıyla likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi azalmıştır. Diğer taraftan, serbest basınç ve kayma mukavemetinin, cam tozu oranının %7'ye kadar artmasıyla artan orandan sonra ise azalmaya başlayan bir eğri gibi davrandığı tespit edilmiştir. Böylece, %7'lik cam tozu katkısının serbest basınç ve kayma mukavemeti bakımından optimum katkı oranı olduğu belirlenmiştir. Cam tozu oranının %4'ün üzerine çıkmasıyla CBR değerlerinde ciddi artışlar görülmüştür. Bu artışlar, cam tozunun %3, 5, 7, 9 oranlarında eklenmesi durumunda işlem görmemiş zeminin CBR değerinden sırasıyla 2,5, 3,3, 5,2, 9,4 kat daha yüksek olmuştur [118].



Baruah, kırmızı killi toprağa %0,5-1,5 oranında 10 mm uzunluğunda cam lifi malzemesi ilave edilerek elde edilen numunelerin serbest basınç dayanımının lif içeriğinin artmasıyla arttığını belirtmiştir. Ayrıca, cam lifi zeminin mukavemetini arttırdığından ve plastisite indeksini azalttığından cam lifi takviyeli kırmızı killi toprağın yol yapımı ve şev stabilitesi için taban zemini tabakasında kullanılabilirliğini bildirmiştir [119].

Al-Refeai, laboratuvar verilerinin, cam lifi, polipropilen hamur lifi ve ağ elemanları ile güçlendirilmiş yuvarlak parçacıklara sahip ince kum ve yarı köşeli parçacıklara sahip orta kum üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli deneylerden elde edildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneyler, değişen uzunluk ve içerikteki inklüzyonlara sahip kum numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve farklı hücre gerilmelerinde test edilmiştir. Sonuçlar, kısa inklüzyonların, kum tipine rağmen bağ kopmasını önlemek için büyük bir hücre gerilimi gerektirdiğini göstermiştir. Yuvarlak parçacıklara sahip ince kum, yarı köşeli parçacıklara sahip orta kuma göre lif takviyesine daha iyi bir tepki vermiştir. Polipropilen ağ elemanları, özellikle ince kum durumunda dayanımı artırmada cam liflerden daha üstün performans göstermiştir [120].

#### **2.2.6. Polivinil alkol (PVA) lifler**

Polivinil alkol (PVA) lif, dayanıklılık, kimyasal direnç ve çekme dayanımı bakımından polipropilen liften daha üstün olduğu için lif takviyeli betonlarda kullanılmaktadır. Polivinil alkol lif, naylon ve polyesterlere göre ısıdan kaynaklanan daha düşük bir büzülme, 1,3 g/cm<sup>3</sup>lük bir spesifik ağırlığa ve çimentoya iyi yapışma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, polivinil alkol lifin zemin takviye malzemesi olarak kullanılması uygundur [121].

Park ve diğerleri, %4 çimentolu kuma %1 polivinil alkol (PVA) lif eklenmesinin, lif takviyeli olmayan numuneye kıyasla hem serbest basınç dayanımında hem de tepe mukavemetindeki aksel gerilmelerde iki kat artışa neden olduğunu bulmuştur [121]. Ayrıca Park, lif takviyeli çimentolu kum numuneleri üzerinde bir dizi serbest basınç deneyi gerçekleştirerek lif ilavesinin çimentolu kumun ölçülen mukavemet ve süneklik özelliklerini nasıl etkilediğini değerlendirmiştir. Çalışmada, %1'lik lif dozajında, çimento oranlarından bağımsız olarak süneklik değerlerinin dörtten daha büyük olduğu bildirilmiştir [122].

Raju ve diğerleri kum üretimi sırasında oluşan kum imalat tozunun üstyapı uygulamalarında potansiyelini araştırmıştır. Zayıf taban zemininin özelliklerini polivinil alkol (PVA) lifleri ile birlikte kum imalat tozu ilave ederek iyileştirmeye çalışmışlardır. Taban zeminin daha iyi performans göstermesi için zemine eklenecek optimum kum imalat tozu ve PVA lifi yüzdesini tahmin

etmişler ve üstyapı yapımında kullanıma uygunluğunu göstermişlerdir. Zemine %10 oranında kum imalat tozu ilavesinin California taşıma oranı (CBR) açısından daha iyi performans sağladığını gözlemlemişlerdir. %10 kum imalat tozu, %3 çimento ve değişen lif yüzdeleri (%0, %0,5, %1 ve %1,5) ile bir dizi test gerçekleştirmişlerdir. Performansı, CBR ve serbest basınç dayanımı (UCS) testleri ile birlikte ayrıık çekme testleri ve döngüsel üç eksenli test açısından değerlendirmişlerdir. Test sonuçları, kum imalat tozu ve PVA lifleri ile stabilize edilen zeminin hem statik hem de dinamik yükler altında daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [123].

### 2.2.7. Çelik lifler

Beton yapılarında bulunan çelik lif donatılar, zemin-çimento kompozitlerinin güçlendirilmesi için de kullanılmaktadır [124]. Buna ek olarak, çelik lifler zeminin mukavemetini artırabilir, ancak bu iyileşme diğer lif türlerinin kullanılması durumuyla karşılaştırılmaz [12].

Praveen ve diğerleri, çimento ile modifiye edilmiş ve/veya uçucu kül ile karıştırılmış çelik lif takviyeli killi kumdan marjinal bir zeminin etkinliğini değerlendirmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Uçucu kül ile veya uçucu kül olmadan karıştırılan çelik lif takviyeli çimento ile modifiye edilmiş marjinal zeminin özellikleri, taban zemini inşaatı amacıyla Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değerini iyileştirme açısından incelenmiştir. Bu nedenle çalışma, üst yapı inşaatı için kompozit bir taban zemini malzemesi sağlamayı amaçlamıştır. Sonuçlar, çimento ve uçucu kül içeren kompozit marjinal zeminin CBR değerinde yeterli iyileşme olduğunu göstermiştir. Böylece stabilize edilmiş kompozit marjinal zeminin, üst yapılar için taban zemini olarak kullanılan alternatif bir inşaat malzemesi olabileceği gösterilmiştir [125].

Boominathan ve diğerleri, çelik teller gibi yüksek modüllü malzemeler, geotekstillere gibi düşük modüllü malzemeler ve her ikisinin bir kombinasyonu uygulanarak taban zemininin dinamik özelliklerini iyileştirmenin fizibilitesini standart bir zorlanmış dikey blok rezonans testinde incelemiştir. Bu çalışmada (i) yüksek mukavemetli tellerle güçlendirilmiş yumuşak çelik çerçeveden, (ii) ince bir sürtünme kumu tabakası içeren kum kaplı geotekstillere ve (iii) kaynaklı ağ ile güçlendirilmiş kum kaplı geotekstillere oluşan güçlendirilmiş temellere sahip "Güçlendirilmiş Toprak"ın uygulanabilirliği ve üstünlüğü ortaya konmuştur [124]. Ancak Ghazavi ve Roustaie, zeminin donma-çözülme döngülerinden etkilendiği soğuk iklimlerde, polipropilen liflerin çelik liflere tercih edilmesini tavsiye etmiştir [12].

### 3. Uygulamalar

Geoteknik mühendisliğinde doğal ve sentetik lifler, yol yapımı, istinat duvarları, şevlerin korunması, demiryolu dolguları, deprem ve zemin-temel mühendisliği gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Burada bazı vakalar hakkında kısa bir tartışma sunulmaktadır.

ABD Silahlı Kuvvetleri Mühendisler Birliği, yol üstyapılarında işlem görmemiş ve kimyasal olarak stabilize edilmiş zemin katmanlarının performansının GEOFIBERS® zemin takviyesi kullanılarak artırılabilceğini bildirmiştir. 30 cm kalınlığındaki lif takviyeli siltli kum kesit, aynı kalınlıkta takviyesiz kesitle kıyaslandığında trafik geçiş sayısında %33'lük bir artış sağlamıştır [109]. Polipropilen Geofiberler yol taban zeminleri ile kolaylıkla karıştırılabilir. Bu liflerin dâhil edilmesi maksimum yoğunluğu yaklaşık %5 artırırken sıkıştırılmış zemin karışımının optimum nem içeriğini de yaklaşık %5 azaltmaktadır. Ayrıca, tam ölçekli saha testlerinden, lifle stabilize edilmiş kumların geçici veya düşük hacimli yollar için geleneksel yol yapım malzemelerine uygun bir alternatif olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [83]. Son olarak, bazı araştırmacılar, yol yapımında sentetik veya doğal liflerin kullanılmasının, zayıf bir taban zemini üzerinde stabilize edilmemiş üstyapının direncine kıyasla, üstyapının tekerlek izine karşı direncini önemli ölçüde artırabileceğini bulmuştur [13].

Park ve Tan, 60 mm güçlendirilmiş siltli kum-toprak duvarda polipropilen lif kullanımının duvarın stabilitesini artırırken duvarın toprak basınçlarını ve yer değiştirmelerini azalttığını göstermiştir. Ayrıca, geogridler kısa lifle takviye edilmiş zeminde kullanıldığında bu etkinin daha anlamlı olduğunu belirtmiştir [126].

Esas olarak, rastgele dağıtılmış liflerle takviye edilmiş topraklar, arızalı şevlerin düzensiz şekline uyum sağladığından, bu şevlerin yerel onarımında yama olarak kullanılabilir. Depolama alanı örtüleri gibi toprak kaplamaların güçlendirilmesinde lif donatı, düzlemsel donatıda var olan ankraj ihtiyacını ortadan kaldırır [127]. Ayrıca kum ve lif karışımı, püskürtme beton gibi sorunlu bir şev üzerine püskürtülerek bir istinat yapısı oluşturulabilir.

Lif takviyesi, şevleri veya duvarları güçlendirmek için düzlemsel geosentetiklerle birlikte de kullanılmıştır. Lif takviyesi, dolgu malzemelerinin kayma dayanımını artırdığından gerekli düzlemsel takviye miktarını azaltır ve ikincil takviye ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Lif takviyesinin şev yüzeyindeki sığ göçmeyi ortadan kaldırmaya ve bakım maliyetini azaltmaya yardımcı olduğu bildirilmiştir [128].

İnşaat mühendisliğinde liflerin kullanılmasına ilişkin başka bir uygulama, derin temel yapım maliyetinin düşük bütçeli bina projeleri için uygunsuz olduğu, zayıf taşıma kapasitesine sahip zeminlerde temellerin inşasıdır. Bu durumlarda, çimentolu maddelerin eklenmesi veya lifler gibi yönlendirilmiş veya rastgele dağıtılmış ayırık elemanların dâhil edilmesi yoluyla yerel zeminin iyileştirilmesi için çeşitli alternatifler geliştirilebilir [129]. Bundan başka, lifler, yüksek su içeriğine sahip endüstriyel atık veya tarama çamurlarının susuzlaştırılmasının yanında, susuzlaştırılarak depolanan bu atıkların dayanımını ve uzun dönem stabilitesini arttırmak için de kullanılmaktadır [130].

Lif takviyeli zeminlerin tokluğunun ve sünekliğinin artması, depreme karşı oluşturulan için faydalıdır. Makiuchi ve Minegishi'ye göre, Japonya'da sentetik liflerin kullanıldığı iki tür zemin güçlendirme tekniği vardır [131]. Birinci teknikte, kohezif olmayan granüler zeminler için sürekli filamanlı iplikler kullanılmaktadır. Örneğin, TEXSOL ürünü ilk olarak Fransa'da geliştirilen bu gruba aittir [104]. İkinci zemin güçlendirme tekniği, 1997 yılında Japon Bayındırlık Araştırma Enstitüsü tarafından tanıtılan kısa boylu zımba kesikli liflerin kullanılmasıdır [104,132].

#### 4. Rastgele Dağıtılmış Lif Takviyeli Zeminlerin Üstünlükleri

Sistematik olarak güçlendirilmiş zeminlerle kıyaslandığında, rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminler bazı üstünlüklere sahiptir. Rastgele dağıtılmış lif takviyeli zeminin hazırlanması, genel olarak katkılar ile zeminlerin stabilize edilmesine benzer. Ayırık lifler, çimento, kireç, uçucu kül veya diğer katkı maddeleri gibi zemine eklenir ve karıştırılır. Rastgele dağıtılmış lifler, dayanım izotropisi sağlar ve sistematik olarak güçlendirilmiş zeminlerde ortaya çıkabilecek potansiyel zayıflık düzlemlerini sınırlar [99].

Lif malzemelerin maliyeti, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha uygundur. Kimyasal stabilizasyon yöntemlerinin aksine, lif donatı kullanılarak yapılan güçlendirme hava koşullarından çok fazla etkilenmez [128]. Ayrıca, lif takviyesi için kullanılacak malzemeler yaygın olarak bulunabilir [74,128].

Lif takviyesinin temel faydalarından biri, ilk oluşumdan sonra gerilme çatlağının ilerlemesini engellemesidir. Liflerin eklenmesi, çekme çatlaklarının oluşumunu önleyerek kırılma mekanizmasını değiştirmektedir. Ancak, çatlaklar oluşmadan önce, liflerin malzeme davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığına inanılmaktadır [87]. Miller ve Rifai, sıkıştırılmış kil zeminin büzülme çatlağı azalmasının ve hidrolik iletkenliğinin lif içeriğindeki artışla birlikte arttığını bildirmiştir [133].

Çimento harcı ile birlikte kullanılan bitkisel liflerden, yüksek performanslı lifli levhalar yapılabilmektedir. Bitkisel lifler, toprakla birlikte yük taşıyıcı yapılar oluşturmak için kullanıldığında daha yüksek bir ekonomi elde edilebilir [15].

Lif ilavesinin kumun sıvılaşma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür [134]. Bu, lif inklüzyonlarının drenajsız yükleme sırasında sıvılaşmaya neden olması için gereken döngü sayısını artırdığı anlamına gelmektedir [89]. Ayrıca, katkı maddesi olarak bazı bitkisel liflerin kullanılması, yapı bloklarının termal iletkenliğini ve ağırlığını azaltmaktadır [17]. Bundan başka, rastgele dağıtılmış liflerin şişen zeminlerin şişme eğilimini sınırlamada faydalı olduğunu belirtilmektedir [16].

Bazı araştırmacılar, liflerin kumlu silt için gerilme-şekil değiştirme davranışını şekil değiştirme yumuşamasından şekil değiştirme sertleşmesine doğru değiştirdiğini bildirmiştir. Lif kalıntıları ayrıca sıkıştırma işlemini engelleyerek, artan lif içeriği ile güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluğunda bir azalmaya neden olmaktadır.

## 5. Sonuç

Burada, daha çok zeminde ayırık rastgele dağıtılmış liflerin, yani kısa lifli zemin kompozitlerinin kullanımı ele alınmış olup zeminleri takviye etmek için kullanılan doğal ve sentetik liflerin çoğu incelenmiştir.

Bahsedilen çalışmalar, genel olarak kompozit zeminin dayanım ve sertliğinin lif takviyesi ile iyileştiğini göstermiştir. Dayanım ve rijitlikteki artışın (i) en-boy oranı, yüzey sürtünmesi, ağırlık oranı ve elastisite modülü gibi lif özelliklerinin; (ii) şekil, tane boyutu ve gradasyon gibi zemin özelliklerinin; (iii) hücre gerilimi gibi test koşullarının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılabilir. İncelenen çalışmalar esas alınarak, lif takviyeli zeminin dayanımının en-boy oranı, lif içeriği ve zemin ile lif arasındaki yüzey sürtünmesinin artmasıyla arttığı söylenebilir.

Direkt kesme, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri, ayırık lifler zemine ilave edildiğinde kayma dayanımının arttığını ve tepe sonrası dayanım kaybının azaldığını göstermiştir. Diğer bir deyişle, ayırık ve rastgele dağıtılmış lif inklüzyonları tepe kesme dayanımını önemli ölçüde artırmakta, tepe sonrası dayanım kaybını azaltmakta, kırılmaya kadar eksenel gerinimi artırmakta ve bazı durumlarda gerilme-şekil değiştirme davranışını şekil değiştirme yumuşamasından şekil değiştirme sertleşmesine doğru değiştirmektedir. Lif inklüzyonları ayrıca sıkıştırma işlemini engelleyerek, artan lif içeriği ile güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuru yoğunluğunda azalmaya neden

olmaktadır. Servisteki doygunluk ile ilişkili dayanım kayıpları, lif takviyesi ile önemli ölçüde azalmaktadır.

Liflerin kohezyonlu zeminlerde kullanımına ilişkin araştırmaların daha sınırlı olduğu görülmüştür. Her ne kadar liftakviyesinin kohezyonlu zeminlerin dayanımını artırdığı bildirilmiş olsa da, lifler ve killi zeminler arasındaki ara yüzeyde yük aktarım mekanizmaları net olarak anlaşılmadığından, bu tür takviyelerin ek değerlendirmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

Son zamanlarda birçok araştırmacı, lif ve diğer kimyasal bağlayıcıların granüler veya killi zeminler üzerindeki birleşik etkisini incelemeye çalışmıştır. Bunun temel nedeni, kimyasal bağlayıcıların zeminin stabilitesini artırırken, aynı zamanda zeminin sünek davranışını azaltmasıdır. Lifler, bu şekilde, kompozit zeminin kırılma faktörünü azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Kullanılabilirlik, ekonomiklik, kolay işlenebilirlik, hızlı gerçekleştirilebilirlik ve her türlü hava koşulunda yapılabilirlik kısa lifli kompozit zeminlerin genel üstünlükleridir. Zemin güçlendirmesinde lif kullanımının teknik faydaları arasında çekme çatlaklarının oluşumunun önlenmesi, hidrolik iletkenliğin ve sıvılaşma dayanımını artırılması, yapı malzemelerinin ısı iletkenliğinin ve ağırlığının azaltılması, şişen zeminlerin şişme eğiliminin sınırlandırılması ve zemin kırılma faktörünün azaltılması yer almaktadır.

## 6. Kaynaklar

1. Kazemian S, Barghchi M. Review of soft soils stabilization by grouting and injection methods with different chemical binders. *Scientific Research and Essays* 2012; 7(24):2104-2111.
2. Gowthaman S, Nakashima K, Kawasaki S. A state of the art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: past findings, present trends and future directions. *Materials* 2018;11(4):553.
3. Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi AA. Mechanical behaviour of a clay soil reinforced with nylon fibers, *Geotechnical and Geological Engineering* 2011;29:899-908.
4. Gaw B, Zamora S, Albano LD, Tao M. Soil reinforcement with natural fibers for low-income housing communities. Bachelor's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, USA, 2011, 147p.
5. Dilrukshi RAN, Watanabe J, Kawasaki S. Strengthening of sand cemented with calcium phosphate compounds using plant-derived urease. *International Journal of Geomate* 2016;11(25):2461-2467.
6. Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials* 2012;30:100-116.
7. Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika Journal of Science and Technology* 2011;19(1):33-43.
8. Vidal H. The principle of reinforced earth. *Highway Research Record* 1969;282:1-16.
9. Leflaive E. Soil reinforced with continuous yarns: Texol. *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 1985;1787-1790.
10. Yazıcı MF, Keskin SN. A review on soil reinforcement technology by using natural and synthetic fibers. *Erzincan University Journal of Science and Technology* 2021;14(2):631-663.
11. Yetimoglu T, Inanir M, Inanir E. A study on bearing capacity of randomly distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes* 2005;23:174-83.
12. Ghazavi M, Roustaei M. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 2010;61:125-31.
13. Chauhan MS, Mittal S, Mohanty B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes* 2008;26:429-435.



14. Rowell M, Han S, Rowell S. Characterization and factors effecting fiber properties. *Natural Polymers and Agrofibers Composites* 2000;115-34.
15. Ghavami K, Filho R, Barbosa P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. *Cement and Concrete Composites* 1999;21:39-48.
16. Viswanadham BVS, Phanikumar B, Mukherjee RV. Swelling behaviour of a geofiber-reinforced expansive soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2009; 27:73-76.
17. Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J. Development of fiber-based soil-cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:111-6.
18. Kodicherla SPK, Nandyala D.K. Influence of randomly mixed coir fibres and fly ash on stabilization of clayey subgrade. *International Journal of Geo-Engineering* 2019; 10(1): 1-13, <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0099-1>.
19. Ramesh N, Krishna V, Mamatha V. Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil. *Geomechanics and Engineering* 2010;2:19-28.
20. Naresh J, Kiran VK, Jayaram M. An investigation on stabilization of laterite soil using coconut coir fibres. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2022; 982(1); 012041. DOI 10.1088/1755-1315/982/1/012041.
21. Peter L, Jayasree PK, Balan K, Raj SA. Laboratory investigation in the improvement of subgrade characteristics of expansive soil stabilised with coir waste. *Transportation Research Procedia* 2016;17: 558-566.
22. Prabakar J, Sridhar RS. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials* 2002;16:123-131.
23. Yohanna P, Johnson P, Victor BP, Badamasi A. Evaluation of Geotechnical Properties of Black Cotton Soil Reinforced with Sisal Fibre for Waste Containment Application. *Engineering Science and Technology* 2022; 3(2): 151-168, <https://doi.org/10.37256/est.3220221354>.
24. Santhi K, Sayida MK. Behaviour of black cotton soil reinforced with sisal fibre, *National Conference on Technological Trends* (6th7th Nov 2009,) 88-93
25. Mattone R. Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in baha-reque technique. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:611-6.
26. Yusoff M, Salit M, Ismail N, Wirawan R. Mechanical properties of short random oil palm fiber reinforced epoxy composites. *Sains Malaysiana* 2010;39(1):87-92.
27. Marandi M, Bagheripour H, Rahgozar R, Zare H. Strength and ductility of randomly distributed palm fibers reinforced silty-sand soils. *American Journal of Applied Sciences* 2008;5(3):209-220.

28. Bateni, F, Ahmad F, Yahya AS, Azmi M. Performance of oil palm empty fruit bunch fibres coated with acrylonitrile butadiene styrene. *Construction and Building Materials* 2011;25:1824-1829.
29. Al Adili A, Al-Soudany K. Effect of random inclusion of date palm leaf fibers on some soil properties. *Journal of Earth Sciences and Engineering* 2018; 11(01): SSN 0974-5904. DOI:10.21276/ijee.2018.11.0105
30. Ahmad F, Bateni F, Azmi M. Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:93-99.
31. Arifin YF, Misnawati, Normelani E. The use of natural fiber from oil palm empty fruit bunches for soft soil stabilization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2019; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 669 012026.
32. Jamellodin Z, Talib Z, Kolop R, Noor N. The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil. 3rd SANREM Conference, Kota Kinabalu, Malaysia 2010;68-72.
33. Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. *Pertanika Journal of Science and Technology* 2011;19(1):33-43.
34. Bairagi H, Yadav RK, Jain R. Effect of jute fibres on engineering properties of lime treated black cotton soil. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2014;3(2):1550-1552.
35. Singh, HP, Bagra, M. Improvement in cbr value of soil reinforced with jute fiber. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2013; 2(8): 3447-3452.
36. Aggarwal P, Sharma B. Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. In *Proceedings of International Conference on Advances in Civil Engineering*, Trabzon, Turkey 2010.
37. Alqaisi ZH, Al-Soud MS, Dawood ZM, Faleh JM, Ahmed AA. Assessment of geotechnical properties of clay stabilized with jute fiber. *Journal of Applied Science and Engineering* 2022; 26(1): 61-68, [https://doi.org/10.6180/jase.202301\\_26\(1\).0007](https://doi.org/10.6180/jase.202301_26(1).0007).
38. Islam M, Iwashita K. Earthquake resistance of adobe reinforced by low cost traditional materials. *Journal of Natural Disaster Science* 2010;32:1-21.
39. Hossain A, Hossain S, Hasan K. Application of jute fiber for the improvement of subgrade characteristics. *American Journal of Civil Engineering* 2015;3(2):26-30.
40. Segetin M, Jayaraman K, Xu X. Harakeke reinforcement of soil-cement building materials: manufacturability and properties. *Building and Environment* 2007;42:3066-3079.

41. Ayininuola GM, Udoh EG. Geotechnical properties of flax fiber stabilized soil. *Journal of Earth Science and Engineering* 2018; 8: 75-82 doi: 10.17265/2159-581X/2018.02.003.
42. Cheah JS, Morgan TKB, Ingham JM. Cyclic testing of a full-size stabilized, flax-fibre reinforced earth (uku) wall system with openings. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China 2008.
43. Lin D, Huang B, Lin S. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. *Ecological Engineering* 2010;36:992-1006.
44. Coutts RSP, Ni Y. Autoclaved bamboo pulp fiber reinforced cement. *Cement and Concrete Composites* 1995;17:99-106.
45. Ramaswamy S, Ahuja M, Krishnamoorthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. *Cement and Concrete Composites* 1983;5:3-13.
46. Brahmachary TK, Rokonuzzaman M. Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value, *International Journal of Geo-Engineering* 2018; 9(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0079-x>.
47. Kanayama M, Kawamura S. Effect of waste bamboo fiber addition on mechanical properties of soil. *Open Journal of Civil Engineering* 2019;9:173-184.
48. Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites* 2005;27:617-21.
49. Ashour T, Bahnasawey A, Wu W. Compressive strength of fiber reinforced earth plasters for straw bale buildings. *Australian Journal of Agriculture Engineering* 2010;1:86-92.
50. Kazragis A. Minimization of atmosphere pollution by utilizing cellulose waste. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 2005;13:81-90.
51. Tran KQ, Satomi T, Takahashi H. Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft Soils. *Transportation Geotechnics* 2018;16:76-84.
52. Roy P, Mukherjee P. Stabilization of contaminated soil by mixing of corn husk fibers. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019*; pp 701-716. Part of the Lecture Notes in Civil Engineering book series (LNCE, volume 136).
53. EsmailpourShirvani N, TaghaviGhalesari A, Tabari MK, Choobbasti AJ. Use of kenaf fiber reinforced soil (kfrs) to improve the engineering behavior of sand-clay mixtures. *Transportation Research Board 98th Annual Meeting Location: Washington DC, United States Date: 2019-1-13 to 2019-1-17*.

54. Magesvar MU, Muthaiyan P, Yugasini S. Stabilization of soil using kenaf fibre and rice husk ash. *Materials Today: Proceedings 2023*; xxx(xxxx) xxx.
55. Ghadakpour M, Choobasti AJ, Kutanaei SS. Investigation of the kenaf fiber hybrid length on the properties of the cement-treated sandy soil. *Transportation Geotechnics 2020*;22:85-96.
56. Mittal A, Shukla S. Effect of random inclusion of kenaf fibres on strength behaviour of poor Subgrade soils. *Jordan Journal of Civil Engineering 2020*; 14(1).
57. Al-Adili A, Azzam R, Spagnoli G, Schrader J. Strength of soil reinforced with fiber materials (papyrus). *Soil Mechanics and Foundation Engineering 2012*;48(6):241-247.
58. Zhou XY, Zheng F, Li HG, Lu CL. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings 2010*;42:1070-1074.
59. Sarsby RW. Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes 2007*;25:302-310.
60. Liu C, Lv Y, Yu X, Wu X. Effects of freeze thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes 2020*;48(4):581-590.
61. Brahmachary TK. Soil stabilization using fly ash and cotton fiber. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) International Open Access Journal 2017*; ISSN No: 2456 - 6470 1(6) [www.ijtsrd.com](http://www.ijtsrd.com)
62. Kalkan E, Kartal HO, and Kalkan OF. Experimental study on the effect of hemp fiber on mechanical properties of stabilized clayey soil. *Journal of Natural Fibers 2022*; 19(16): 14678-14693 <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2068725>.
63. Najjar SS, Sadek S, and Taha H. Use of hemp fibers in sustainable compacted clay systems. *Geo-Congress, Atlanta, 2014*:1415-1424.
64. Vafaei A, Choobasti AJ, Koutanaei RY, Vafaei A, Afrakoti MTP, Kutanaei SS. Experimental investigation of the mechanical behavior and engineering properties of sand reinforced with hemp fiber. *Arabian Journal of Geosciences 2022*; 15: 1679 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10966-x>.
65. Yazici ME, Keskin SN. Enhancing mechanical properties of low plasticity clay soil using hemp fibers: effects of fiber content and fiber surface coating. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 2023*. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01208-5>.
66. Diab AA, Sadek S, Najjar S, Daya MHA. Undrained shear strength characteristics of compacted clay reinforced with natural hemp fibers. *Internati-*

- onal Journal of Geotechnical Engineering 2016; 10(3): 263-270, DOI: 10.1080/19386362.2015.1132122.
67. Danso H, Martinson DB, Ali M, Williams JB. Effect of sugarcane bagasse fibre on the strength properties of soil blocks. The 1st International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France 2015.
  68. Asher JD, Sarang G. Soil stabilization using hydrated lime and randomly distributed bagasse fibers. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) 2017; 8(1): 512-518. Article ID: IJCIET\_08\_12\_057.
  69. Dang LC, Fatahi B, Khabbaz H. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. Procedia Engineering 2016; 143: 658-665.
  70. Baldin CRB, Kawanami MY, Costa WGS, Bordignon VR, da Luz CC, Izzo RLdS. Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2023; 15(10): 2676-2686.
  71. Bordoloi S, Garg A, Sreedeeep S. Potential of Uncultivated, Harmful and Abundant Weed as a Natural Geo-Reinforcement Material. Advances in Civil Engineering Materials 2016; 5: 276-288.
  72. Kumar S, Tabor E. Strength characteristics of silty clay reinforced with randomly oriented nylon fibers. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 2003;127:774-782.
  73. Salim N, Al-Soudany K, Jajawi N. Geotechnical Properties of Reinforced Clay Soil Using Nylons Carry's Bags by Products. MATEC Web of Conferences 2018; 162: 1-6.
  74. Murray J, Frost D, Wang Y. The behavior of sandy soil reinforced with discontinuous fiber inclusions. Transportation Research Record 2000;1714:9-17.
  75. Gosavi M, Patil A, Mittal S, Saran S. Improvement of properties of black cotton soil subgrade through synthetic reinforcement. Journal-Institution of Engineers India Part CV Civil Engineering Division 2004;84:257-62.
  76. Yetimoglu T, Salbas O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. Geotextiles and Geomembranes 2003;21:103-10.
  77. Puppala J, Musenda C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils. Transportation Research Board. In: 79th Annual Meeting, Washington, USA; 2000.
  78. Gaspard K, Mohammad LN, Wu Z. Laboratory mechanistic evaluation of soil cement mixtures with fibrillated-polypropylene-fibers. 82th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA; 2003.

79. Balagoudra RS, Krishna V, Yaligar HS, Jayasurya T, Shwetha GC. Soil stabilization using lime and polypropylene fiber material. *International Journal of Engineering Science and Computing* 2017;7(5): 11299-11303.
80. Tiwari N, Satyam N, Patva J. Engineering characteristics and performance of polypropylene fibre and silica fume treated expansive soil subgrade. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 2020; 6(2): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00199-x>.
81. Consoli C, Casagrande T, Prietto M, Thome A. Plate load test on fiber-reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2003;129:951-5.
82. Hamidi A, Hooresfand M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes* 2013; 36: 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.10.005>.
83. Santoni L, Webster L. Airfields and road construction using fiber stabilization of sands. *Journal of Transportation Engineering ASCE* 2001;127:96-104.
84. Ali T, Khan MA, Ali K. Consolidation behavior of clayey soil reinforced with geofiber, in: *Advances in Geotechnis and Structural Engineering*, Springer, Singapore, 2021: 119-129, [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_12).
85. Tang C, Shi B, Chen W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2007;25(3):194-202.
86. Ali M, Aziz M, Hamza M, Madni MF. Engineering properties of expansive soil treated with PP fibers. *Geomechanics and Engineering* 2020; 22(3): 227-236. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2020.22.3.227>.
87. Consoli C, Vendruscolo A, Fonini A, Rosa D. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes* 2009;27:196-203.
88. Murthi P, Saravanan R, Poongodi K. Studies on the impact of polypropylene and silica fume blended combination on the material behaviour of black cotton soil, *Materials Today: Proceedings* 2021; 39: 621-626, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.004>.
89. Diambra A, Ibraim E, Wood M, Russell A. Fiber reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:238-50.
90. Sengul T, Akray N, Vitosoglu Y. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils. *Construction and Building Materials* 2023; 400: 132590.

91. Zaimoglu A. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions and Science Technology* 2010;60:63-5.
92. Li J, Tang C, Wang D, Pei X, Shi B. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2014; 6: 133-137.
93. Tang C, Shi B, Zhao L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:54-62.
94. Khattak M, Alrashidi M. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering* 2006;7(1):53-62.
95. Militky J. Tensile failure of polyester fibers” in *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*, 2018, Second Edition. The Textile Institute Book Series, Pages 421-514.
96. Consoli C, Prietto M, Pasa S. Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2002;128:462-472.
97. Maheshwari KV, Solanki CH, Desai AK. Performance of fiber reinforced clayey soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2011;16:1067-1087.
98. Changizi F, Haddad A. Stabilization of subgrade soil for highway by recycled polyester fiber. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 2014; 2(1): 93-105. <https://doi.org/10.22075/jrce.2014.215>.
99. Kumar A, Walia B, Mohan J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials* 2006;20:1063-8.
100. Tang C, Shi B, Chen W. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2007;25(3):194-202.
101. Kaniraj R, Havanagi G. Behavior of cement stabilized fiber reinforced fly ash soil mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 2001;127:574-84.
102. Kumar A, Walia, Bajaj A. Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* 2007;19:242-8.
103. Mishra B, Gupta MK. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials* 2018;190:95-107.
104. Kaniraj SR, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* 2003;21:123-149.



105. Furumoto K, Miki H, Tsuneoka N, Obata T. Model test on the piping resistance of short fiber reinforced soil and its application to river levee. In *Geosynthetics - 7th ICG-NICE, France; 2002*.
106. Houtman R. Materials used for architectural fabric structures in *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing Series in Textiles 2015:101-121.
107. Sobhan K, Mashnad M. Tensile strength and toughness of soil-cement-fly ash composite reinforced with recycled high density polyethylene strips. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* 2002;14:177-84.
108. Choudhary K, Jha J, Gill S. A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates Journal of Engineering Research* 2010;15:51-7.
109. Tutumluer E, Kim I, Santoni L. Modulus anisotropy and shear stability of geofiber-stabilized sands. *Transportation Research Record* 2004;1874:125-35.
110. Hassan HJA, Rasul J, Samin M. Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology* 2021; 8(3):390-413, <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00145-4>.
111. Kim T, Kim J, Lee G. Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. *Geotextiles and Geomembranes* 2008;26:512-8.
112. Consoli C, Prietto M, Ulbrich A. Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 1989;124:1211-4.
113. Maher H, Ho C. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering* 1994;120:1381-93.
114. Consoli C, Montardo P, Donato M, Prietto M. Effect of material properties on the behavior of sand-cement-fiber composites. *Ground Improvement* 2004;8:77-90.
115. Maher H, Ho C. Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads. *Geotechnical Testing Journal* 1993;16:330-8.
116. Patel SK, Singh B. Experimental investigation on the behaviour of glass fibre-reinforced cohesive soil for application as pavement subgrade material. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 2017; 3(2): 1-12, <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0090-x>.
117. Ahmad F, Mujah D, Hazarika H, Safari A. Assessing the potential reuse of recycled glass fibre in problematic soil applications. *Journal of Cleaner Production* 2012; 35: 102-107.
118. Mahdi Z, Al-Hassnawi N. Assessment of subgrade soil improvement by waste glass powder. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 2018; 9: 12-21.

119. Baruah H. Effect of glass fibers on red soil. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science* 2015; 3(1): 217-223.
120. Al-Refeai T. Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* 1991;10:319-33.
121. Park S, Kim Y, Choi S, Shin E. Unconfined compressive strength of cemented sand reinforced with short fibers. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 2008;28:213-20.
122. Park S. Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. *Construction and Building Materials* 2011;25:1134-8.
123. Raju S, Kolathayar S, Sharma AK. Strength behavior of subgrade soil mixed with sand manufacturing dust and fiber. *Journal of GeoEngineering* 2018; 13(2): 79-84. [http://dx.doi.org/10.6310/jog.201806\\_13\(2\).4](http://dx.doi.org/10.6310/jog.201806_13(2).4).
124. Boominathan S, Senathipathi K, Jayaprakasam V. Field studies on dynamic properties of reinforced earth. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1991;10:402-6.
125. Praveen GV, Kurre P, Chandrabai T. Improvement of CBR value of Steel Fiber reinforced Cement modified Marginal Soil for pavement subgrade admixed with Fly Ash, *Materials Today: Proceedings* 2021; 39: 639-642, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.814>.
126. Park T, Tan A. Enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber. *Geotextiles and Geomembranes* 2005;23:348-61.
127. Zornberg G, Kavazanjian E. Prediction of the performance of a geogrid-reinforced slope founded on solid waste. *Soils and Foundations* 2002;42:129-130.
128. Li C. Mechanical response of fiber-reinforced soil, PhD thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin; 2005.
129. Consoli C, Bassani A, Festugato L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils. *Geotextiles and Geomembranes* 2010;28:344-51.
130. Şengül T, Çetin D, Bhatia SK, Khachan M. Polimer ve lif kullanımının geotüp içindeki C sınıfı bir külün susuzlaştırma ve sıkışma davranışları üzerindeki etkileri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi*, 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
131. Makiuchi K, Minegishi K. Strain-induced toughness and shearing characteristics of short-fiber reinforced soils. In *International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japan; 2001.
132. Medjo R, Riskowski G. Effects of fibers and cement on the mechanical behavior of soil-cement reinforced with sugar cane bagasse. *Housing Science* 1994;18:79-89.
133. Miller J, Rifai S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. *Journal of Environmental Engineering ASCE* 2004;130:981-5.

134. Ghiassian H, Ghazi F. Liquefaction analysis of fine sand reinforced with carpet waste fibers under triaxial tests. In 2th International Conference of New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus, 2009.