



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KUMLU ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
DOYMAMIŞ POLYESTER KULLANIMI**

Elife Sariye ÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Elife Sariye ÖZEN tarafından hazırlanan “Kumlu Zeminlerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesinde Doymamış Polyester Kullanımı” adlı tez çalışması 05/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç.Dr. Erdal UNCUNOĞLU

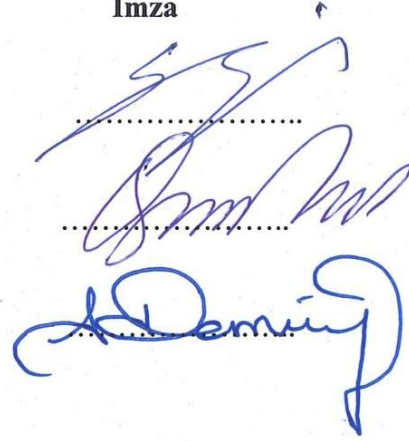
Danışman

Prof. Dr. Özcan TAN

Üye

Dr.Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
LEE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İmza

Elife Sariye ÖZEN
Tarih:05.09.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUMLU ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE DOYMAMIŞ POLYESTER KULLANIMI

Elife Sariye ÖZEN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Özcan TAN

2019, 95 Sayfa

Jüri

**Danışman Prof. Dr. Özcan TAN
Doç. Dr. Erdal UNCUOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ**

Zeminlerin mukavemetini ve fiziksel özelliklerini arttırmak için zemine kimyasal katkı maddeleri (çimento, kireç, bitüm vb.) eklenerek, zemin stabilize edilir. Ancak bu geleneksel iyileştirme malzemeleri uzun kürlenme süresi ve büyük çaplı iyileştirme için fazla miktarda malzeme gerektirirler. Bu yüzden araştırmacılar zemin iyileştirmesinde kullanılmak üzere alternatif malzemelere yönelmişlerdir. Bu malzemelerin en önemlisi de az miktarda kullanımıyla kısa sürede kür etkisi gösteren sıvı haldeki doymamış polyesterlerdir. Bu çalışma kapsamında, kumlu zeminlerin doymamış polyester ile iyileştirmesinde optimum oranları belirlemek amacıyla Taguchi yöntemine göre hazırlanan parametre ve seviyeler kullanılarak laboratuvarında numuneler hazırlanmıştır. Taguchi yönteminin kullanılmasının amacı, deney sayısını azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf etmektir. Taguchi yöntemine göre su, polyester, hızlandırıcı ve hızlandırıcı / sertleştirici oranları olmak üzere 4 parametre seçilmiştir. Parametrelere bağlı olarak da 4 adet seviye belirlenmiştir. L16 ortogonal dizilime sahip tablo oluşturulmuştur. Başlangıç su oranı ve polyester oranı, kuru kum ağırlığının yüzdesi, hızlandırıcı ve sertleştirici oranları ise kullanılan polyester miktarının yüzdesi olarak alınmıştır. Numuneler hazırlanırken sertleşme süreleri kaydedilmiş ve daha sonra bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde ortaya çıkan sonuçlara göre belirlenen oranların dayanımları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda polyester oranındaki artışa bağlı olarak serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür. Serbest basınç deneyi için yapılan optimizasyon çalışmalarına göre yapılan doğrulama deney sonuçlarının yaklaşık %95 oranında doğrulandığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, doymamış polyester, Taguchi yöntemi, sertleşme süresi, serbest basınç mukavemeti, yarmada çekme deneyi

ABSTRACT

MS THESIS

UTILIZATION OF UNSATURATED POLYESTER IN IMPROVING THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF THE SANDS

Elife Sariye ÖZEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Özcan TAN

2019, 95 Pages

**Jury
Prof. Dr. Özcan TAN
Assoc. Prof. Dr. Erdal UNCUOĞLU
Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ**

It is stabilized by adding chemical additives (cement, lime, bitumen etc.) to the soil to increase the strength and physical properties of soils. But, these traditional soil stabilizers usually require long curing time and excess of material for large scale improvement. Therefore, researchers have turned to alternative stabilizers to be used in soil stabilization. The most important of these materials are liquid unsaturated polyesters which have curing effect in a short time and are used in little amounts. In this study, in order to determine the optimum ratio of sandy soils stabilization with unsaturated polyester, samples were prepared in the laboratory by using parameters and levels prepared according to the Taguchi method. The purpose of using the Taguchi method is to save time and cost by reducing the number of experiments. According to Taguchi method, water, polyester, accelerator and accelerator/ hardener ratios are selected as 4 parameters. Depending on these parameters, 4 levels were determined. A table with orthogonal array L16 was made. Water and polyester content were taken as percentage of dry sand weight; accelerator and hardener ratios were taken as percentage of the amount of polyester used. Hardening times were recorded while preparing samples and then unconfined compressive test and split tensile strength test were performed on these samples. According to the results of the experiments, the strength of the ratios determined was compared. As a result of the comparison, it was observed that the unconfined compressive strength increased due to the increase in polyester ratio. According to the optimization studies for unconfined compressive strength, about 95% of the validation test results were verified.

Keywords: Soil stabilization, unsaturated polyester, Taguchi method, hardening time, unconfined compressive strength, split tensile strength test

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması ve sonuçlanması süresi boyunca her aşamasında yardımcı olan, değerli zamanını ve desteğini esirgemeyen, ihtiyacım olan her konuda bana her zaman yardımcı olan ve yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özcan TAN' a teşekkür eder, saygı ve minnetlerimi sunarım.

Gerek lisans gerek yüksek lisans eğitimim boyunca aldığım derslerle, kendimi geliştirmem konusunda bana yardımcı olan ve emekleri olan başta Doç. Dr. Murat OLGUN, Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e ve tüm hocalarıma teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tezimin deneysel çalışma bölümünde deneylerin uygulanışında yardımları ve hoşgörülerinden dolayı Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'ya teşekkürü borç bilirim.

Diğer taraftan sadece bu çalışma sürecinde değil, tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, maddi manevi her zaman yanımda olan ve eğitimci kimliğiyle her zaman benim ve kardeşlerimin arkasında olan, bana sonuna kadar mücadele etmeyi öğreten, yüksek lisans yapmamda bana cesaret veren babam Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Haris Selçuk ÖZEN'e, bizim için her türlü fedakârlığı yapan annem Semra ÖZEN'e, bana önderlik eden ablalarıma ve kardeşime minnettarlığımı bildiririm.

Elife Sariye ÖZEN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Literatür Özeti.....	5
2.2. Zemin Stabilizasyonu	15
2.3. Yüzeysel Stabilizasyon	21
2.3.1. Kompaksiyon	22
2.3.2. Drenaj.....	26
2.3.3. Mekanik Stabilizasyon.....	27
2.3.4. Kimyasal Stabilizasyon.....	29
2.4. Doymamış Polyester	36
2.4.1. Sertleştiriciler (Katalizörler)	40
2.4.2. Hızlandırıcılar (Promotörler)	41
2.5. Polimerlerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması	42
2.6. Taguchi Deney Tasarımı.....	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
3.1. Materyal	50
3.1.1. Kum	50
3.1.2. Polyester.....	51
3.2. Yöntem.....	51
3.2.1. Polyester numunelerinin hazırlanması	51
3.2.2. Kum-Polyester numunelerinin hazırlanması	52
3.2.3. Serbest basınç mukavemeti deneyi	54
3.2.4. Sertleşme süresi tayini	55
3.2.5. Yarmada çekme deneyi.....	56
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	58
4.1. Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri	58
4.2. Kum-Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerinin Değerlendirilmesi.....	60
4.4. Optimum Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Kontrol Deneylerinin Yapılması	67
4.2. Kum-Polyester Numunelerinin Sertleşme Sürelerinin Değerlendirilmesi.....	68

4.3. Kum-Polyester Numunelerinin Yarmada Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
5.1 Sonuçlar	77
5.2 Öneriler	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	95



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ϕ	: Derece
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
D_r	: Rölatif sıkılık
q_u	: Serbest basınç dayanımı
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
G_s	: Zemin özgül ağırlığı
ω_{opt}	: Optimum su muhtevası
γ_{kmin}	: Minimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
δ_τ	: Yarmada çekme dayanımı
$Ca(OH)_2$: Kalsiyum hidroksit
$CaCO_3$: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
SM	: Siltli kum
SP	: Kötü derecelenmiş kum
SW	: İyi derecelenmiş kum
ML	: Düşük plastisiteli silt
MH	: Yüksek plastisiteli silt

Kısaltmalar

H	: Hızlandırıcı
S	: Sertleştirici
H/S	: Hızlandırıcı/Sertleştirici
KP	: Kopolimer
LL	: Likit Limit
PI	: Plastisite İndisi
MSD	: Mean Square Deviation
S/N	: Signal/Noise
UCS	: Serbest Basınç Mukavemeti
UP	: Doymamış Polyester
VHP	: Virgin Homopolimer
PP	: Polipropilen
PE	: Polietilen

1. GİRİŞ

Yapıyı oluşturan temel malzemeler beton ve çelik gibi görünse de yapının üzerine oturtulduğu zeminin özellikleri, yapı davranışını ve emniyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Yapıların kararlılığı ve stabilitesi, üzerine oturtulacak olan zeminin özelliklerine bağlıdır. Zemin, üzerine inşa edilecek yapıyı güvenle taşımalıdır. Zemin; genel olarak masif kaya ve kayaların parçalanarak gelişmesinden doğan ufak taneciklerin yığılmasından oluşmuştur. Bulunulan yerin coğrafik özelliğine bağlı olarak meydana gelen zeminler, birbirinden farklı özelliklere sahiptir. Bu yüzden her zeminin mühendislik özellikleri farklılık gösterir. Bu özellikler, başta zeminin cinsi olmak üzere arazi koşullarına bağlı olarak değişmektedir. İnşaat sahasında karşılaşılan zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler. Bu yüzden yapının oturtulacağı zeminin araştırılması gerekir. Zemin mekaniği ise, zemin kütlelerinin dinamik veya statik iç ve dış yükler altındaki davranışını inceleyen, mekanik ve hidrolik biliminin zemine uygulandığı bir bilim dalıdır.

İnşası yapılacak olan yapının projesine başlanılmadan önce zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenip, yapının amacına uygunluğu test edilmelidir. Ancak her zaman bu durum öngörülmeyle bilinir. Yapının kullanım amacına göre zaman içinde değişebilir. Bu da incelenen zeminin yeniden gözden geçirilmesini gerektirmektedir. Aslında sadece yapının kullanım amacı değil aynı zamanda mevcut zemin durumunda da bazen değişiklikler olmaktadır. Bütün bu durumlar göz önüne alındığında, sonradan meydana gelebilecek hasarların önlenmesi amacıyla mevcut zemin durumunun iyileştirilmesine ihtiyaç duyulur. Zemin stabilizasyonu, zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının ya da zeminde sonradan meydana gelen problemlerin mekanik, fiziksel ve kimyasal yöntemler ile dış kuvvetlere dayanıklı hale getirilerek zemin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesidir. İyileştirme derinlerde olduğu gibi zemin yüzeyinde de olmaktadır. Uygulanacak yöntemin seçilmesi zeminin dane çapına bağlı olmakla birlikte derinliğe de bağlıdır. Ancak hangi yöntemin uygulanacağına karar verilmeden önce iyileştirme yapılacak zeminde problemin tespit edilmesi gerekir.

Zeminlerin stabilizasyonu üzerine son yıllarda yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Yapılan bu çalışmalar, mevcut zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamak amacıyla çeşitli katkı maddelerinin zemine ilave edilerek kullanıldığını göstermektedir. Bu katkı maddeleri geleneksel olarak kullanılan çimento, kireç, uçucu kül ve bitüm olarak bilinmektedir. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte, artan imkânlar dâhilinde zemine alternatif olarak başka katkı malzemeleri de

eklenmektedir. Bu malzemelerden en önemlileri şüphesiz ki polimerlerdir. Polimerler pek çok alanda olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Altyapı ürünlerinden, ev dekorasyon ürünlerine kadar yapı işlerinin her alanında polimer malzemeleri görmek mümkündür.

Geoteknik mühendisliğinde özellikle yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde polimer olarak, polipropilen ve polyesterler tercih edilmektedir. Aynı zamanda ucuz maliyetleri ve kolay elde edilmelerinden dolayı ilgiyi üzerlerine çekmeyi başarmışlardır. Ayrıca yüksek çekme mukavemetine sahip bu malzemeler zemin içinde kullanıldıklarında, gerilmeleri üzerlerine alarak dağıtırlar. Zemin stabilizasyonunda kullanılan doğal malzeme miktarlarının büyük rakamlara ulaştığı düşünüldüğünde, az miktarlarda kullanımlarıyla bile etkilerini gösterdiklerinden, polimerlerin zemin stabilizasyonunda kullanılması sorunun çözümüne büyük katkılar sağlayacaktır. Polimerlerden en önemlisi olan polyesterler, diğer kimyasal katkı malzemelerine göre daha ucuz olup, düşük oranda kullanılması halinde bile yüksek dayanım elde edilebilecek malzemelerdir.

Zemin stabilizasyonunda kullanımı genellikle doymuş halde lif şeklinde olduğu gibi doymamış olarak emülsiyon halde de kullanılmaktadır. Ancak doymamış polyesterler farklı imalat alanlarında kullanılmasına rağmen zemin iyileştirme çalışmalarında kullanımı henüz yaygın değildir. Doymamış polyester kullanılarak iyileştirilen zeminlerin geoteknik özelliklerinin belirlenerek, polyesterin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılıp kullanılmayacağı ve optimum katkı oranları belirlenmelidir.

Taguchi yönteminde, katkı oranlarının belirlenmesi amacıyla kontrol edilebilen parametre ve bu parametrelerin belirlenen seviyelerine bağlı olarak geliştirilmiş standart ortogonal dizinler kullanılmaktadır. Yapılacak olan çalışmaya göre deney tasarım tablosu seçilerek deneylerin yapılmasıyla, deney sonuçları çeşitli analizlerle değerlendirilerek parametrelerin sonuç üzerindeki etkileri ve optimum karışım oranları belirlenebilmektedir.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada zeminde iyileştirme gerektiren durumlar ile kullanılan iyileştirme yöntemleri, başta yüzeysel iyileştirme olmak üzere bu stabilizasyonun çeşitlerinden bahsedilmiştir. Doymamış polyesterlere ilişkin bilgiler ayrıntılı olarak incelenmiş ve

polyesterlerin zemin stabilizasyonunda kullanımının faydalarından bahsedilmiştir. Çalışma kapsamında deneylerin oranlarının hazırlanmasında kullanılan Taguchi Metodu da anlatılmıştır. Yapılan araştırmalarda farklı türleri bulunan polyesterlerin kumlu zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği üzerinde günümüze kadar yapılan çalışmalar araştırılmıştır. Polyesterlerin farklı oranlarda farklı tekniklerle zemin iyileştirmesinde kullanılabileceği, bu konuda çeşitli düzeylerde bilimsel araştırmaların yapıldığı görülmüştür. Oldukça yeni bir yaklaşım olan sıvı haldeki doymamış polyesterin kumlu zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı üzerinde detaylı bilimsel araştırmalar yapılabilir. Bu çalışmanın amaçları aşağıda sıralanmaktadır:

- Kumlu zeminlerin doymamış polyester kullanımı ile mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinin (karışım oranı, doymamış polyester katkısının yüzdesi, su içeriği) araştırılması,
- Doymamış polyester ile kum karışımlarının optimum katkı oranlarının Taguchi yöntemiyle belirlenmesi,
- Doymamış polyester kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde sertleşme sürelerini kaydederek kür süresine etkilerinin araştırılması,
- Doymamış polyester ile iyileştirilmiş tabakaların kalite kontrol deneylerinin (serbest basınç deneyi, yarmada çekme deneyi) yapılması,
- Bu tür iyileştirme tekniklerinin tasarım, imalat ve uygulama kriterlerinin oluşturulması

Çalışma kapsamında deneylerde kullanılan kum, 40 no'lu elekten yıkamalı olarak elendikten sonra hazır hale getirilmiştir. Deney programına göre öncelikle sadece polyester kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımlarının, hızlandırıcı ve sertleştirici etkisine bakmak amacıyla 8 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Burada hızlandırıcı oranı polyester ağırlığının %'si olarak sırasıyla 0.2, 0.5, 1 ve 2 oranlarında; H/S oranı ise 2 ve 4 oranlarında kullanılmıştır. Kum-polyester karışımları hazırlanırken Taguchi optimizasyon metoduna uygun olarak belirlenen oranlara göre su, polyester, hızlandırıcı ve hızlandırıcı/sertleştirici oranları olmak üzere 4 parametre belirlenmiştir. Bu parametrelere göre 4 seviyeli standart L_{16} ortogonal dizin tablosu seçilerek oluşturulmuştur. Başlangıç su oranı ve polyester oranı kuru kumun ağırlığının yüzdesi, hızlandırıcı ve sertleştirici de polyester ağırlığının yüzdesi olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan parametre seviyeleri, kum ağırlığına göre polyester için %15, %30, %45, %60; su için %0, %2, %4, %6 ve polyester ağırlığına göre de parametre seviyeleri

hızlandırıcı için % olarak 0.75, 1.50, 2.25, 3.0 ve H/S için ise 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 seçilmiştir. Toplamda 16 adet deney belirlenmiş olup her bir deney numarası için 4 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanıp kalıplara yerleştirildikten sonra koni penetrasyon aleti yardımıyla sertleşme süreleri kaydedilmiştir. Numuneler 28 gün kür süresinin ardından serbest basınç ve yarmada çekme deneylerine tabi tutulmuştur. MINITAB V17 yazılımıyla oluşturulan deney programına göre serbest basınç, sertleşme süresi ve yarmada çekme deneyleri için gerekli analizler yapılmıştır. Analizlerdeki temel amaç, yüksek dayanımlı numunelerin oluşturulması için optimum polyester içeriğini belirlemektir. Yapılan deneyler neticesinde ortaya çıkan sonuçlara göre hazırlanan numunelerin dayanımları karşılaştırılmıştır. Doymamış polyesterin kumlu zeminlerde kullanılması için öneriler getirilmesi amaçlanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür Özeti

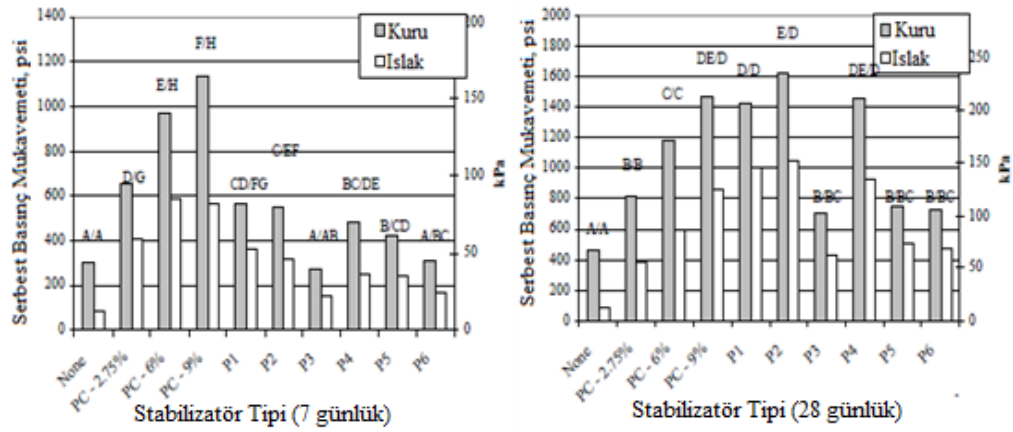
Literatür çalışmaları incelendiğinde katkı maddeleri kullanılarak zemin iyileştirme yöntemlerini konu alan birçok çalışma mevcuttur. Özellikle bağlayıcı madde olarak çimento-kireç-uçucu kül vb. malzemelerinin yanı sıra polimer liflerin kullanımı kum, kil, silt ve organik zeminler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ancak oldukça yeni bir yaklaşım olan doymamış polyesterin ve geleneksel olmayan stabilizatörlerin zemin stabilizasyonunda sağladığı iyi sonuçlara rağmen, bunların kullanımıyla ilgili literatürde sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu bölümde araştırma konusu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar özetlenerek aşağıda verilmiştir.

Santoni ve ark. (2002) siltli-kum (SM) zeminin geleneksel olmayan kimyasal veya sıvı stabilizatörlerle stabilizasyonunu değerlendirmek amacıyla birtakım laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Geleneksel stabilizasyon katkı maddelerinin (1 Tip I portland çimentosu, 1 hidratlı kireç ve 1 katyonik asfalt emülsiyonunu) yanı sıra 1 asit, 4 enzim, 2 lignosülfonat, 1 petrol emülsiyonu, 3 polimer ve 1 ağaç reçinesinden oluşan kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Serbest basınç deneyi ve kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Araştırma kapsamında, kullanılan katkı malzemesinin tipi, katkı miktarı ve kürlenme süreleri gibi değişkenleri içeren kapsamlı bir laboratuvar test matrisinin yürütülmesi amaçlanmıştır. Her bir karışım tasarımından 6 örnek elde edilmiş ve bunlardan üçü kuru koşullarda, geri kalan üç örnek ise ıslak koşullarda UCS testlerine tabi tutulmuştur. Kullanılan üç farklı polimer çeşidi kuru ağırlıkça %0,1 ile %5 oranında test edilmiştir. Polimer katkı maddeleriyle hazırlanan karışımlarda, 28 günlük kürlenme süresi boyunca zamanla önemli bir güç kazandığı görülmüştür (Çizelge 2.1). Polimer karıştırılmış numuneler, kuru koşullarda mukavemet bakımından ortalama % 57, ıslak test koşulunda ise % 221 artış gösterdiği kaydedilmiştir. Maksimum serbest basınç gerilmesi elde etmek için optimum bir polimer ekleme oranı belirlenmiştir. Son olarak, geleneksel olmayan stabilizatörlerin, geleneksel stabilizatörlerden daha kısa bir sürede güç kazandığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 2.1. Polimer oranlarının ve kür süresinin serbest basınç dayanımına etkileri

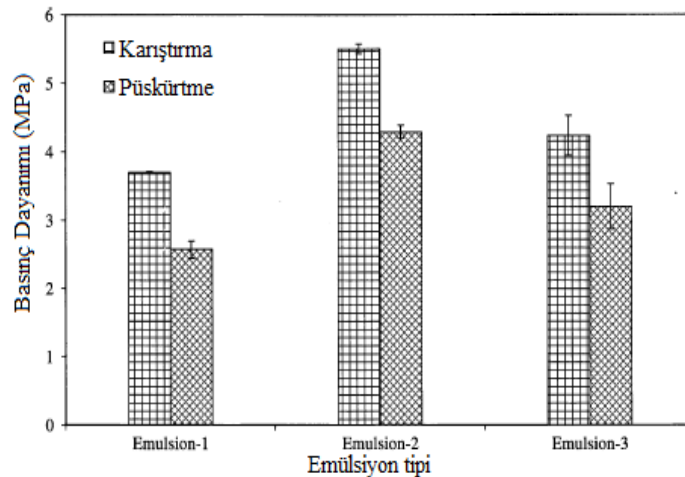
Polimer Adı	Oran	Kür Süresi	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)
Polimer 1	0.055	1	1241
Polimer 1	0.055	7	2429
Polimer 1	0.055	28	3349
Polimer 2	1.028	1	1198
Polimer 2	1.028	7	3064
Polimer 2	1.028	28	6134
Polimer 3	0.827	1	1543
Polimer 3	0.827	7	3697
Polimer 3	0.827	28	6477

Newman ve Tingle (2004) polimer emülsiyonunun zemin stabilizasyonunda kullanımını araştırmak amacıyla özel olarak üretilen siltli kum ile 6 farklı polimer emülsiyonunu (P1, P2, P3, P4, P5, P6) çalışmalarında kullanmışlardır. Emülsiyonların etkisinin yanı sıra çimentonun etkisini de karşılaştırmak amacıyla farklı oranlarda (% 2.75, % 6 ve % 9) portland çimentosunu da deneylerde kullanmışlardır. Numuneler üzerindeki kür süresi (1, 7 ve 28 günlük) de çalışma kapsamında araştırılmıştır. Tüm numuneler serbest basınç testine tabi tutulmuştur. Dayanıklılık, birim hacim başına sistem tarafından emilen noktaya kadar emilen enerjinin bir ölçüsü olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin 24 saatlik sürede, 7 günlük kürlenme süresine kıyasla benzer bir direnç gösterdiği, Portland çimentosu numunelerinin ise mukavemetteki en büyük artışı gösterdiği belirtilmiştir. Polimer emülsiyonlarından P1, P2 ve P4'ün, 28 günlük kür süresi sonrasında %9 çimentoya benzer bir basınç dayanımı sergilediği görülmüştür (Şekil 2.1). Polimer emülsiyonları ile işleme tabi tutulan numuneler 28 günlük kür süresi sonrasında dayanımda belirgin bir iyileşme göstermiş olup, polimerler zemin-çimento karışımlarından daha yüksek dayanım değerleri göstermektedir.



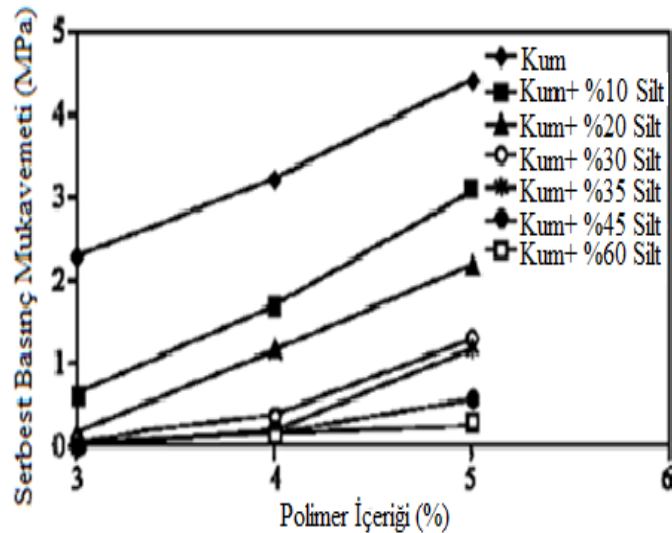
Şekil 2.1. Polimer emülsiyon tiplerinin kür sürelerinin UCS'ye etkisi

Al-Khanbashi ve Abdalla (2006), su bazlı 3 farklı polimerin kumlu zeminlerde stabilizatör olarak kullanımını araştırmak için bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında 3 farklı su bazlı polimer emülsiyon su ilavesiyle seyreltilerek mekanik yoğurma makinesi ve püskürtme yöntemi olmak üzere 2 farklı şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Burada farklı olan diğer bir husus da emülsiyon olarak seçilen polimerlerden ikisi (emülsiyon 1 ve emülsiyon 3) kendi kendine sertleşirken bir tanesi (emülsiyon 3) çapraz bağlanan polimer şeklindedir. Mekanik yoğurma makinesi ile hazırlanan örneklerde kuru ağırlıkça %0,5, %1, %1,5, %2, %3 ve %5 oranlarında polimerler kullanılarak, püskürtme yönteminde ise kuru ağırlıkça %2 oranında polimer içeren numuneler hazırlanmıştır. Farklı emülsiyon sistemlerinin kum stabilizatörü olarak performansını araştırmak üzere numunelere, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sertlik ve dayanıklılık yanında, hidrolik iletkenlik ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Üç tip emülsiyon için hidrolik iletkenlikteki farklılıklar, polimer içeriği arttıkça azalırken daha yüksek polimer içeriklerinde, farklılıklar daha az olmuştur. İncelenen emülsiyonların basınç dayanımı ve elastisite modülü, daha yüksek polimer konsantrasyonuyla artmıştır. Test edilen tüm emülsiyonlar kumun dayanıklılığını ve sertliğini arttırmıştır. Üç emülsiyonun püskürtülmüş örnekleri, mekanik yoğurmayla hazırlanan karışık emsallerine kıyasla daha iyi hidrolik iletkenlik azalması göstermiştir. Bununla birlikte, püskürtme yapılan numunelerin mukavemeti ve sertliği, karışık numunelerinkinden daha düşüktür (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Karıştırma ve püskürtme yöntemleri ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Naeini ve Ghorbanalizadeh (2010) yaptıkları çalışmada, siltli kum (SM) zeminlerde polimer emülsiyon ile stabilizasyonunun ıslak ve kuru koşullardaki etkisini değerlendirmek amacıyla bir takım laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Katkı karışımı, poliamid sertleştiriciyle (1:0.15) epoksi reçineden oluşmuştur. Örnekler, kuru yoğunluğunda silt içeriği %0, 10, 20, 30, 35, 45 ve 60 farklı oranlarda siltli kuma farklı miktarlarda polimer emülsiyonu (%3, 4 ve 5) ilave edilerek hazırlanmıştır. Örneklerin basınç dayanımları, tek eksenli test ile belirlenmiş ve polimer emülsiyonunun siltli kum üzerindeki etkisini belirlemek için aynı karıştırma, sıkıştırma ve sertleştirme koşulu altında birbiriyle karşılaştırılmıştır. Tüm numuneler 24, 96 ve 168 saat boyunca suya doymun hale getirildikten sonra sudan çıkarılarak, serbest basınç dayanımları kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda polimer emülsiyonu eklenmesinin kuru koşullarda numunelerin basınç dayanımını ve elastisite modülünü önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür (Şekil 2.3). Bu gelişmenin, polimer emülsiyonu ve silt içeriğine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, polimer emülsiyonu 7 gün suda bekletildikten sonra numunelerin gücünü önemli ölçüde arttırdığı, ancak ıslak numunelerin gücünün dayanımı kuru numunelerin dayanımdan daha az olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.3. Polimer emülsiyon oranının serbest basınç mukavemetine etkisi

Welling (2012) yaptığı çalışmada polimer ilavesinin zeminlerdeki mühendislik öneminin anlaşılmasını geliştirmek için değişiklik türleri, farklı ilave oranları ve farklı nem içeriğine sahip numuneler hazırlamıştır. Çalışma için farklı plastisiteye sahip 3 farklı kil ve SP sınıfında kum zemine %0,5-%2,5 oranlarında elastik bir kopolimer; %1-%4 çimento ve %8 oranında kireç ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Test programı boyunca belirlenen mühendislik özellikleri arasında, kompaksiyon testi ile kuru birim ağırlık ve nem içeriği ilişkileri; serbest basınç dayanımı testleri ve doğrudan kesme testleri ile kayma dayanımı; donma-çözülme ve yaş-kuru dayanıklılık testleri ile durabilite; ve esnek modulu, serbest basınç dayanımı ve doğrudan kesme testlerinin sonuçlarının yorumlanması ile de sertlik gibi mekanik özellikler tespit edilmiştir. Polimer eklenmesinin optimum nem içeriğini değiştirdiği; tüm zeminler için kuru birim ağırlığın, ara ilaveli bir orandaki ani bir artış haricinde, polimer ilavesi oranı arttıkça azaldığı; serbest basınç dayanımları için polimer değişikliğinin, tüm zemin parçacık yüzeylerini yeterince kaplayacak kadar yüksek oranlarda uygulandığında en yüksek mukavemet artışına sahip olduğu ve bu mukavemet artışının, zemin partiküllerinin yüzeyini kaplayan ve partiküller arası kayma mukavemetini artıran polimerle ilgili olduğu sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların yanında havayla temasın polimer ilaveli zeminlerde kürlenme verimini etkilediğini ve polimerin zeminin mühendislik özelliklerini fiziksel bağlarla değiştirdiğini belirtmiştir.

Verma (2013) zemin stabilizasyonunda çimento ve polimer emülsiyon etkisini araştırmak amacıyla kumlu ve killi zeminlerde yaptığı çalışmalarda stabilize edilmiş kumlu zeminlerin serbest basınç mukavemetini ve killi zeminlerin de CBR değerlerini

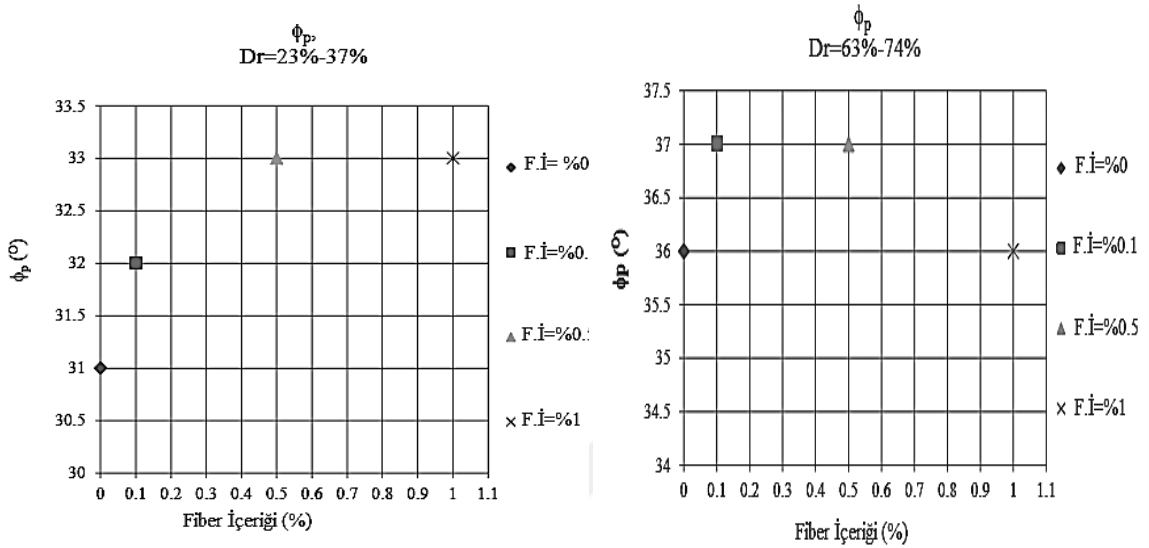
belirlemiştir. Çalışma kapsamında farklı oranlarda çimento karışımı (%20, %30 ve %40) olan kumlu zeminler kullanılmış ve stabilize edilmiş numunelerin basınç dayanımını araştırmak için zeminlere çeşitli oranlarda su bazlı polimer (%2, %3 ve %4) eklenmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde 7 günlük kür süresinden sonra serbest basınç testi yapılmıştır. Testlerin sonuçları, su bazlı polimerin kumlu zeminlerin serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir. Sıvılaştırılabilir kumlu zeminlerin mukavemet yönünden, optimum polimer içeriği %2 olarak tahmin edilmiştir. Kumlu zemin karışımlarının dayanımının, çimento içeriğinin yaklaşık %30 ve %30'un üzerindeki çimento içeriğinin artmasıyla arttığı görülmüş (Çizelge 2.2) ve bunun sebebinin de polimer emülsiyonunun zeminle karıştırılmasıyla birlikte çapraz bağları arttırdığından dolayı olduğu düşünülmektedir. Polimer içeriğindeki artışın, aynı zamanda % 4'ten daha az tutulursa, zeminin serbest basınç dayanımını da arttırdığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.2. Polimer ve çimento oranlarının serbest basınç dayanımına etkileri

Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Çimento Oranları			Polimer Oranları		
	%20	%30	%40	%2	%3	%4
	5.1	8.2	9.7	4.9	7.8	9.56
	8.5	8.8	10.4	8.2	8.6	10.35

Darvishi (2014) yaptığı çalışmada kum zeminlerin statik yükler altındaki davranışlarını katkısız ve Virgin Homopolymer Polypropylene katkılı olarak ele almıştır. Numune hazırlanırken kumlu zemin karışımları, iki farklı rölatif sıklıklarda düşük (23%-37%) ve yüksek (63%-74%) olmak üzere ve kuru kumun ağırlığının 0.1 %, 0.5% ve 1.0% oranlarında fiber karıştırılarak elde edilmiştir. Yapılan deneyler kapsamında kesme kutusu ve permeabilite deneyleri kullanılarak zeminin davranışı değişik fiber oranlarında ve değişik yükler altında incelenmiştir. Deney farklı normal gerilmeler altında tekrarlanarak zeminin kırılma zarfı elde edilmiş ve kayma gerilmesi açısı bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar karşılaştırılarak fiber oranının ve rölatif sıklığın kayma mukavemetine olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan deney sonuçları, fiberle güçlendirilmiş kum zeminlerin statik yükler altındaki davranışlarının, fiber katkısız zeminlere oranla iyileştiğini göstermektedir. Fiber miktarı arttıkça, kayma mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.4). Ayrıca; yüksek rölatif sıklıkta hazırlanmış olan numunelerin daha yüksek bir kayma mukavemeti değeri gösterdiği görülmüştür. Statik deneylerin sonuçlarına bakıldığında; fiber oranı arttıkça zeminin

kayma mukavemeti açısı da arttığını belirlemiştir. 0.1%' lik fiber içeriğinde bu değer çok önemli ölçüde değişmese de %0,5 ve %1,0'lik numunelerde önemli ölçüde kayma mukavemetinin artışı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.4. Farklı rölatif sıklıklarda ve farklı fiber oranlarındaki numunelerin kayma mukavemeti açılarının grafiği

Nasirpur (2014) yaptığı çalışmada, kumlu zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirmesinde polimerlerin kullanılabilirliği araştırmak amacıyla laboratuvarda polimerler ile güçlendirilmiş suya doymuş kum numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme deneyleri yapmıştır. Arazi şartlarında suya doymuş kum zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için %30 rölatif sıklığa sahip suya doymuş kum ile polimer olarak, Stiren Akrilik Kopolimer (SACP) ve Polivinil Asetat (PVA) kullandığı malzemeleri farklı oranlarda karıştırarak deneylere tabi tutmuştur. Hazırlanan polimer karışımlarını ise suya doymuş kumun toplam ağırlığının %5, %10 ve %20' si oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca, bütün deneylerde 0.25 oranında biyopolimer (zantam gum) ve farklı yüzdelerde uçucu külü de deneylerde kullanılmıştır. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarından polimer yüzdesinin ve kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında, donma-çözülme çevrim sayısının artması ile serbest basınç mukavemetlerinde önemli değişiklikler olmamıştır. POL 1 polimerinin, POL 2 polimerine göre yaklaşık 2,5 kat daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerine sahip olduğunu gözlemiştir (Çizelge 2.3). Kür süresinin numunelerin serbest basınç mukavemetleri üzerinde etkisinin bazı numuneler haricinde önemsiz olduğunu ve etkili olanların da yaklaşık %10 miktarında olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte numuneler üzerinde uygulanan

donma-çözülme neticesinde numunelerin yaklaşık %3-10 aralığında dayanım kaybına uğradıklarını gözlemlemiştir.

Çizelge 2.3. Farklı oranlardaki polimerlerin kür süresiyle etkileşiminin basınç dayanımları

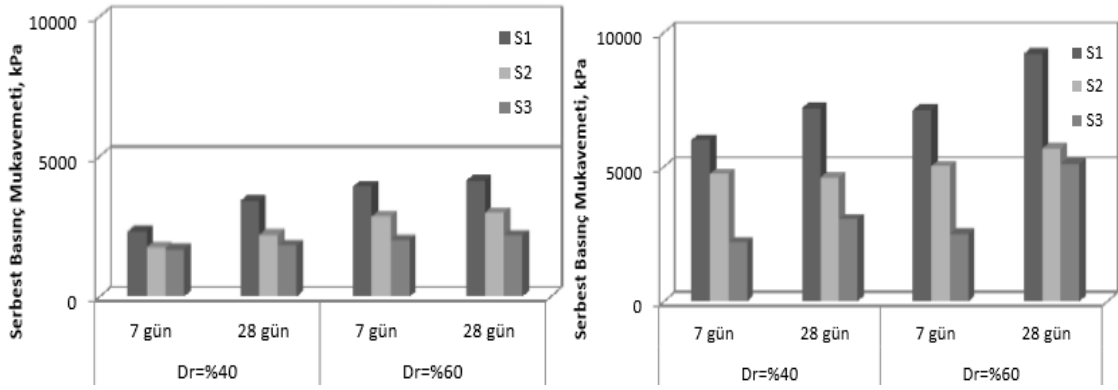
Deney Numarası	POL 1 (%)	POL 2 (%)	Uçucu Kül (%)	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)		
				7 Günlük	14 Günlük	28 Günlük
S1	5		10	0.05	0.11	0.12
S2	5		20	0.07	0.14	0.15
S3	5		30	0.26	0.33	0.29
S4	10		10	0.07	0.11	0.11
S5	10		20	0.31	0.44	0.65
S6	10		30	0.55	0.90	0.89
S7	20		10	3.80	4.87	5.12
S8	20		20	5.67	9.24	10.19
S9	20		30	5.58	9.97	11.01
S10		5	10	0.28	0.27	0.29
S11		5	20	0.68	0.81	1.02
S12		5	30	0.76	0.94	1.12
S13		10	10	0.38	0.41	0.45
S14		10	20	0.81	1.05	1.27
S15		10	30	1.15	1.53	1.65
S16		20	10	0.73	1.25	1.25
S17		20	20	1.95	2.73	3.11
S18		20	30	3.59	4.00	4.32

Uysal (2014) farklı rölatif sıklıklardaki sade kum numunelerinin farklı oranlarda polimerlerle stabilize edilmiş hallerinin kayma mukavemeti değerlerini nasıl etkileyeceğini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışma kapsamında rölatif sıklık değerleri %20, %30 ve %40 olan katkısız zemin numunelerine ek olarak, kuru zemin ağırlığının %0.50, %1.00 ve %1.50 oranlarında Kum-Kopolimer (KP) ve Kum-Virgin Homopolymer (VHP) karışımları hazırlamıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, hazırlanan farklı rölatif sıklıklardaki numunelerde sıklığı fazla olan numunenin daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğu ve hazırlanan numunelerde katkı malzemesi oranı arttıkça kayma mukavemeti açısının da arttığı gözlemlenmiştir. En düşük kayma mukavemeti açısının kum numunesinin %20 rölatif sıklıktaki katkı malzemesi katılmamış durumda; en yüksek kayma mukavemeti açısının ise numunenin %40 rölatif sıklıktaki durumunun kütlece %1,5 Virgin Homopolymer (VHP) fiber içerdiği durumda ortaya çıktığı görülmüştür (Çizelge 2.4). Çalışmaların sonucunda polimer fiberlerin katkı malzemesi olarak kullanılması zeminin kayma mukavemeti açısını arttırarak mühendislik özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 2.4. Farklı rölatif sıklıktaki kum numunelerin farklı oranlarda polimer eklenerek elde edilen kayma mukavemeti açıları

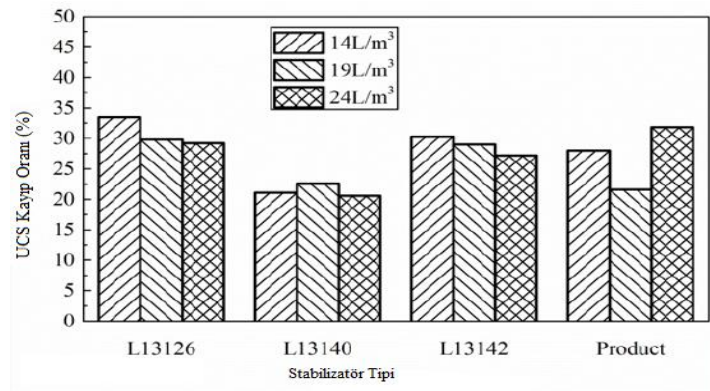
% Dr	Sade	% 0.5 KP	% 1 KP	% 1.5 KP	% 0.5 VHP	% 1 VHP	% 1.5 VHP
20	28°	29	30	32	31	33	34
30	31°	32	33	35	33	34	36
40	33°	34	35	37	36	38	39

Akbulut ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada kumlu zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesinde doymamış polyesterin kullanılabilirliğini araştırmak için laboratuvarında kum numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapmışlardır. Deneylerde SP kumu üç farklı dane boyutunda (S1: 1.18mm-2.00mm, S2: 0.6mm-1.18mm ve S3: 0.3mm-0.6mm aralığında) ve 2 farklı sıklıkta (D_r =%40 ve %60) kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan doymamış polyester ise kum ağırlığının %1, %3 ve %5'i miktarında ilave edilmiştir. Hızlandırıcı ve sertleştirici doymamış polyesterin ağırlığının %2 ve %0,4'ü oranlarında kullanılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Ancak % 1 doymamış polyester katkısı ile hazırlanan numuneler kalıptan çıkarılırken dağıldığı için serbest basınç deneyleri uygulanamamıştır. Bunun sebebinin, %1 doymamış polyester miktarının yeterli olmadığı düşünülmektedir. Sonuç olarak artan doymamış polyester miktarına karşılık numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde belirgin artışların olduğu görülmüştür. Ancak %60 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin %40 rölatif sıklıkta hazırlanan numunelere oranla %6-%69 aralığında daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. Şekil 2.5 incelendiğinde, %5 doymamış polyester katkılı numuneler, %3 katkılı numunelere kıyasla %23-%170 aralığında daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Ayrıca, tüm deney sonuçlarında S1 kumu (D_{10} =1.3) en yüksek değerleri verirken, S3 (D_{10} = 0.34) kumu en düşük değerleri vermektedir. 7 günlük külden sonra hemen hemen tüm numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde büyük bir artışın olmadığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.5. %3 ve %5 doymamış polyester katkıli numunelere kür süresi ve rölatif sıklığın etkisi

Xing ve ark. (2018) kumlu zeminlerin mekanik özelliklerinin polimer emülsiyonu ile etkisinin araştırılması (karışım oranı, dengeleyici katkı maddesinin yüzdesi, su içeriği) amacıyla bir takım çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışma kapsamında 3 farklı polimer emülsiyonunu (L13126, L13140, L13142) ve toz halde polimer malzemeyi (Product A), 1m^3 kumlu zemine sırasıyla 14 L, 19 L ve 24 L miktarlarında ilave ederek kuru ve ıslak durumda serbest basınç mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya ek olarak emülsiyon tiplerinin, kür süresinin ve ıslanma koşulunun stabilize edilmiş zeminlerin mekanik tepkisi üzerindeki etkisini göstermek de amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda stabilizatör ilave miktarındaki artışla birlikte UCS değerinin arttığı da not edilmiştir (Şekil 2.6). Yine stabilize edilmiş kumlu zemin direncinin hem ıslak hem de kuru koşullar altında, polimer katkı maddelerinin kullanılmasıyla önemli ölçüde arttığı vurgulanmıştır. 14 günlük kür süresi sonunda stabilize edilmiş zemin numunesinin maksimum basınç dayanımına ulaştığı, polimer stabilizatörlerle stabilize edilmiş kumlu zemin numunesinin düşük geçirgenlik gösterdiği, stabilize edilmiş zemin örneğinin daha yüksek deforme özelliğine sahip olduğu sonuç olarak ifade edilmişlerdir.



Şekil 2.6. Farklı tür polimer emülsiyonlarının dayanımları

2.2. Zemin Stabilizasyonu

Zemin, yapıların üzerine oturtulduğu, yapı yükünü taşıyan danelerden oluşan karma bir yığındır. Bu danelerden oluşan zemin, malzeme olarak kullanılabilirken aynı zamanda danelerin şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak sürtünme dayanımı ile mekanik kuvvetlere karşı direnç gösterirken yük taşır. Bu direnç, gelen yükleri taşıyamadığında zeminde problemler meydana gelir. Zeminde meydana gelebilecek başlıca problemler şu şekilde sıralanabilir:

1. Zeminin fiziksel özellikleri ile ilgili problemler: Zeminin iri ya da ince daneli oluşuna bağlı olarak değişen boşluk oranı, sıklığı, su ve hava içeriği zeminin dayanım parametrelerini etkilemektedir. Zeminde dayanımın değişmesi de meydana gelebilecek olan problemlerin başlangıcıdır.

2. Temellerle ilgili zemin problemleri: Zemin, kendi ağırlığı dışında üzerine inşa edilecek olan yapının da ağırlığıyla birlikte bu ağırlıklardan dolayı oluşan gerilmeleri de temeller aracılığıyla üzerine alır. Meydana gelen bu gerilmeler eğer zeminin hesaplanan taşıma gücünü aşacak olursa yapılacak olan yapının güvenliği tehlikeye düşer. Üstyapının hizmet ömrünü tamamlaması ve kendinden beklenen performansları güvenli bir biçimde yerine getirebilmesi için temellerin taşıma gücünün hesaplanması gerekir. Bu problemleri çözebilmek için zeminlerin kırılma (göçme) anındaki gerilme koşullarının bilinmesi gereklidir.

3. Zemin içerisindeki suyla ilgili problemler: Nem içeriğindeki artışın zemin davranışı üzerindeki olumsuz etkisi geoteknik ve kaldırım mühendisleri arasında büyük bir endişe kaynağı olmuştur. Zemin, optimum nem içeriğinde veya optimum nem içeriğinin altında (optimumun kuru tarafı) mükemmel performansa sahiptir; bununla birlikte, nem içeriği optimumun (optimum ıslak tarafın) ötesine yükseldikçe, zeminlerin mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde azalır. Bazı bölgelerde zeminin yumuşak yapısından ve yeraltı suyunun varlığından dolayı zemin altı yüklerinin dayanımı düşüktür. Ek olarak, bazı zeminler nem içeriği ile büzülme/şişme eğilimindedir ve çoğu zaman temellerin veya kaldırım katmanlarının inşası sırasında veya sonrasında servis kolaylığı problemleri yaratır (Xing ve ark., 2018).

Zemin taneleri kendi ortamlarındayken %100 sıkı bir dizilime sahip olmadıklarından dolayı danelerin arasındaki boşluklarda hava ya da su bulundurlar. Zemin içerisinde taneler arasında sürekli olarak hareket halinde bulunan bu su zeminde geçirimsizliği etkilemektedir. Killi zeminler yapılarından dolayı suya karşı hassastırlar.

Su muhtevasının artması zemin içindeki taneciklerin şişmesine; azalması da zeminde büzülme gibi hacimsel değişikliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Zeminde killerin bu davranışına bağlı olarak oluşacak olan şişme ve büzülmeden dolayı meydana gelen hacim değişikliğinin büyüklüğü, zemindeki suyun oluşturduğu en büyük problemlerdendir.

4.Stabilite ve elastisite problemleri: Farklı zeminlerde görülen elastisite ve stabilite problemlerinin nedenlerinden en önemlileri zemini etkileyen deprem hareketi ve sıvılaşma gibi olayların meydana gelmesidir. Örneğin; suya doygun zeminlerde, dayanım ve stabilite, deprem anında meydana gelen titreşimler veya hızlı yüklemeler sonucunda azalır. Sıvılaşma potansiyeline sahip kumlu zeminlerde, oluşan sistemik hareketten dolayı yapılarda meydana gelen dönme, zeminde içeri doğru batma veya aşırı boşluk suyu basıncına bağlı olarak istinat duvarları gibi dayanma yapılarının yatayda ve düşeyde hareket ederek eğilmesi gibi ciddi sorunlar ile karşılaşmaktadır (Şekil 2.7) (Ayan, 2009).

5. Kendinden problemlili zeminler: Bazı zeminler ise diğer zeminlerden farklı olarak suyla karşılaştıklarında olağanüstü değişiklikler gösterirler. Genelde yüksek plastisiteli zeminler, içerdiği kilin yüzey enerjisi, mineral yapısı, dane dizilimleri, doğal su muhtevası, boşluk suyu özellikleri ve içinde buldukları çevre basıncına bağlı olarak aşırı hacim artışı veya azalması ve bundan kaynaklanan basınçlar; hareketli veya durağan su da dengelerini kaybetme gibi çok özel ancak olumsuz davranışlar gösterirler. Bu tür zeminlere problemlili zeminler adı verilir. Bunlar şişen zeminler, göçebilen zeminler, dağınık yapıllı killer ve donmaya duyarlı zeminler olarak sınıflandırılabilirler (Önalp, 2002).

Bunların yanında hızlı kentleşmeden dolayı uygun yerleşim alanlarının hızla azalması, komşu yapıların güvenliğini koruma ve yapıların giderek artan boyutlarının getirdiği büyük gerilme limitleri de belli başlı problemlerdendir.



Şekil 2.7. Zeminde meydana gelen sıvılaşmadan dolayı temel göçmesi ve farklı oturma problemleri

Zeminde meydana gelebilecek bu problemlerin, yapıyı güvenli bir şekilde ayakta tutması ve yapıdan beklenen performansı yerine getirebilmesi için kabul edilebilir sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Bu nedenden dolayı problemin varlığının tespit edilerek belirlenen probleme göre onu, tamamen ortadan kaldıracak metodun seçimine karar verilmelidir. Problem tamamen ortadan kaldırılamıyorsa da zeminde iyileştirilmeye gidilmelidir. Çeşitli yöntemlerle zemine stabilizasyon yapılması gerekir. Stabilizasyon, zayıf dayanım özelliklerine sahip zemin yapısının mekanik, fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ile dış kuvvetlere dayanıklı hale gelmesidir (Cömert, 2005).

Zemin stabilizasyonunun üç amacı vardır. Bunlardan ilki; dayanımı geliştirmektir. Bu amaç, taşıma gücü kapasitesini arttırmak için mevcut zeminin dayanımı artırır. İkinci amaç, toz kontrolü içindir. Bu, kuru havalarda veya kurak iklimlerde ekipmanın ve hava aracının çalışmasıyla ortaya çıkan tozu ortadan kaldırmak veya azaltmak için yapılır. Üçüncü amaç, zeminin dayanımını korumak için yüzey suyunun girmesini önleyerek zemin suyunun korunmasını ve yalıtımını sağlamaktır (Manual, 1994).

Mühendislik yapılarına problem teşkil edebilecek zeminlerle karşılaşıldığındaki en temel çözüm yöntemleri; zayıf zeminin yüzeyden kazılarak tamamen ortadan kaldırılması ve yerine yeterli özelliklerde malzeme getirilip sıkıştırılması veya zayıf zeminin yapı yüklerini taşıyabilmesi için büyük temel sistemlerinin seçilmesi olarak söylenebilir (Ingles ve Metcalf, 1972).

İyileştirme yöntemi seçilirken dikkat edilmesi gereken bazı faktörler vardır. Bu faktörlerin en önemlisi, zeminde iyileştirmeyi gerektirecek durumun ne olduğunun

bilinmesi gerekir. Öncelikle zeminde hasar meydana getiren problemin ciddiyetinin ölçüsü belirlenmelidir. Problem tespit edildikten sonra iyileştirme için uygulanabilecek yöntemler alternatifleriyle birlikte karşılaştırılarak en uygun seçim yapılmalıdır. Tek bir yöneme bağlı kalmadan, mümkünse birkaç farklı yöntemi bir arada değerlendirmek, projelendirip maliyet analizlerini yaparak avantaj ve dezavantajlarına göre seçim yapmak uygun olacaktır.

Zemin cinsi, iyileştirme yönteminin belirlenmesinde en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir. Bunun yanında çevresel faktörler, mevcut ekipman, zemin ıslah seviyesi vb. hususlar göz önünde tutularak stabilizasyon yöntemi seçilmelidir. İyileştirme yapılacak zemin etrafındaki yapıların ve temellerinin durumları, belirlenen hesaplarla yapıda izin verilebilecek oturmaların tipi ve büyüklüğü, zemin ve yeraltı suyunun durumu, yapılarda meydana gelebilecek ek yüklerdeki artmalar ve azalmalar, yapının genel stabilitesi (deprem bölgesi ya da heyelan olasılığı), sismik yüklenme gibi durumlar da stabilizasyon yöntemini etkileyen faktörler arasında sıralanabilir (Ayan, 2009).

Ayrıca zemin iyileştirme yöntemine karar verirken zeminin dane çapı göz ardı edilmemelidir. Böylece seçilecek iyileştirme yöntemine karar verilir. İyileştirme yöntemine karar verilirken iyileştirmenin amacı, iyileştirmenin hangi tür zeminde yapılacağı, uygulanacağı derinlik, iyileştirmenin avantajları ve dezavantajları dikkate alınarak bir seçim yapılabilir. İyileştirmenin amacına bağlı olarak da zemin stabilizasyon yöntemleri farklılık gösterir. Belirlenen amaçlar doğrultusunda seçilebilecek iyileştirme yöntemleri (Army, 1999) tarafından önerilen çizelge (Çizelge 2.5) kullanılabilir.

Çizelge 2.5. Zemin iyileştirme amacına göre kullanılabilir yöntemleri (Army, 1999)

Amaç	Kullanılacak yöntem
Sıvılaşmaya karşı güvenliği arttırmak Deformasyonları azaltmak	vibro kompaksiyon, derin karıştırma, taş kolonlar, emdirme enjeksiyonu, dinamik kompaksiyon, patlatma, çakıl dren, jet enjeksiyonu, kompaksiyon enj.
Farklı oturma durumuna maruz kalmış yapıların zeminlerinin iyileştirilmesi Ani oturmaya azaltmak	Jet enjeksiyonu, kompaksiyon enj., emdirme enjeksiyonu, mini kazık Vibro kompaksiyon, derin karıştırma, Dinamik kompaksiyon, jet enjeksiyonu, kompaksiyon enj., Patlatma
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak	Ön yükleme, jet enjeksiyonu, kompaksiyon enj., derin karıştırma, taş kolonlar, elektro-ozmos
Konsolidasyon oturmalarının süresini azaltmak Şevlerin stabilitesini arttırmak	Sürşarjlı veya sürşarjsız düşey drenler Kum ve çakıl kompaksiyon kazıkları Çakıl drenler, Emdirme Enjeksiyonu, Kompaksiyon Enj., Jet Enjeksiyonu, Derin karıştırma, Zemin çivileme
Sızdırmazlık perdesi oluşturmak	Jet Enjeksiyonu, Derin Karıştırma Emdirme Enjeksiyonu, Bulamaç Hendeği
Erozyon direncini arttırmak	Silindire sıkıştırılan beton (RCC), Katkı ile iyileştirme Biyolojik yöntemlerle iyileştirme
Dispersif killeri iyileştirmek	İnşaa sırasında çimento veya kireç katkısı, Koruyucu filtreler, var olan barajlar için kireç katkısı barajın memba yüzüne eklenir ve katkı, akan su ile baraj içerisine girer
Şişebilen zeminleri iyileştirmek	Kireç stabilizasyonu, Çimento stabilizasyon, Zemini değiştirmek, Suyu uzak tutmak
Çökebilir zeminleri iyileştirmek	Ön ıslatma / patlatma, Dinamik kompaksiyon Vibro kompaksiyon, Enjeksiyon

Zemin iyileştirme yöntemine karar verilirken aşağıdaki durumlar göz önüne alınarak bir ayırım yapılmalıdır:

a. Genel Ayırım

1. Zemini geçici olarak iyileştirme teknikleri; zemindeki problemin durumuna göre zeminde geçici olarak bir iyileştirme yapılabilir.

2. Herhangi bir madde katmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri; bu teknikte zeminde uzun süreli devam edecek olan bir iyileştirme yapılıdır. Ancak bu daha çok fiziksel yöntemlerle zemine dışarıdan kimyasal bir malzeme katmadan gerçekleştirilir.

3. Çeşitli maddeler katarak zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri; Katkı malzemesi kullanarak zeminin stabilizasyonunun başlıca amaçları zemini iyileştirmek, yapımı hızlandırmak ve zeminin dayanımını arttırmak olarak sıralanabilir. Bu teknikte de zeminde uzun süreli iyileştirme sağlayacak bir yöntem seçilir. Dışarıdan kimyasal bir malzeme katılarak mevcut zeminin daha iyi bir özelliğe sahip olması sağlanır.

b. Mekanik Ayırım

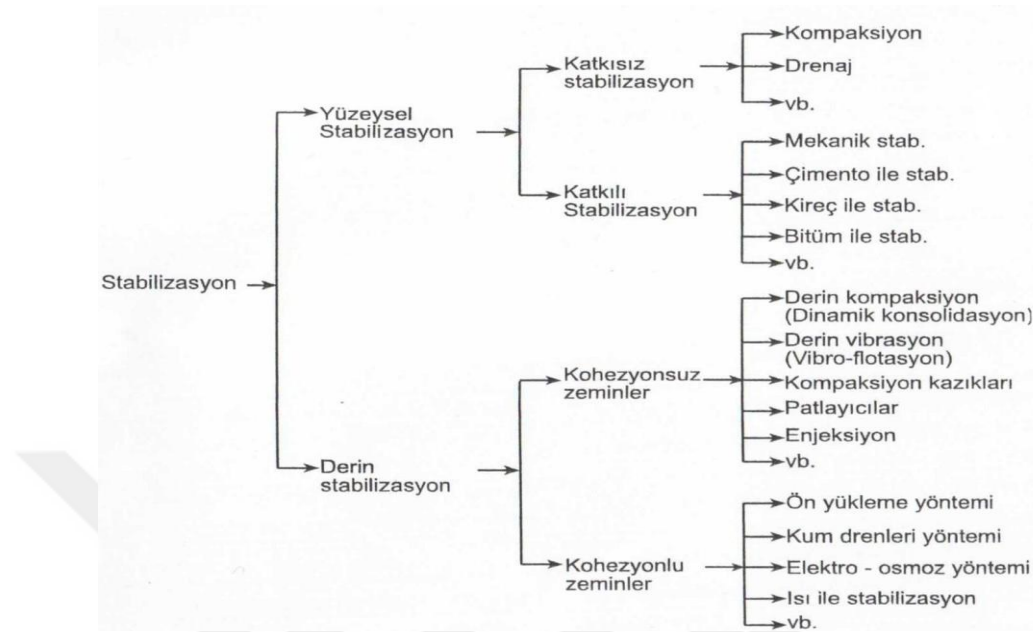
1. Mekanik
2. Hidrolik
3. Fiziksel-kimyasal
4. Katkılı-yapısal destekli
5. Kitleyi kısıtlayarak özellikleri iyileştiren

Zemin stabilizasyonu sonucunda mevcut zeminin;

- Kayma direnci dolayısıyla taşıma gücü artırılır.
- Sıkışabilirlik azaldığından konsolidasyonu hızlandırarak toplam oturmalar azaltılır.
- Killi zeminlerde şişme ve büzülme kapasitesi kontrol altına alınarak en aza indirilir. Böylece don kabarmasının etkileri azaltılır.
- Permeabiliteyi azaldığından zeminde geçirimsizlik sağlanır.
- Oturmaların azaltılması ve hacim stabilitesinin sağlanması ile üst yapıdaki deformasyonlar azaltılır.
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlayarak yapıların güvenliği artırılır.
- İstinat duvarlarının desteklemesi sağlanır.
- Yeraltı suyunun uzaklaştırıldığından boşluk suyu basıncı azaltılır.
- Zeminin potansiyel sıvılaşma riski azaltılır.
- Deprem ve heyelan gibi doğal afetlere karşı önlem alınmış olur.
- Çevre koşullarından dolayı zeminde meydana gelebilecek fiziksel ve kimyasal değişimleri engellenir.

Zemin stabilizasyon yöntemleri genelde zeminde birden fazla özelliği iyileştirmektedir. Bu nedenle bu yöntemleri tek bir sınıflandırma sistemi altında toplamak uygun olmayabilir. Zeminlerin ıslahında farklı amaçlar için farklı stabilizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri farklı araştırmacılar tarafından farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, zemin farklı özellikleri dikkate alınarak stabilizasyonların sınıflandırıldığı görülmüştür. Bazı araştırmacılar yöntemleri, uygulanabilecek zemin türüne göre sınıflarken, bazıları hem zemin türüne hem de zeminde katkı maddesi kullanılıp kullanılmamasına göre, bazıları ise iyileştirme yönteminin zeminde uygulanacağı derinliğe göre sınıflandırma yapmıştır. Bu sınıflandırmalar, zeminin cinsine ve iyileştirmenin amacına göre değişmektedir. Genel olarak zemin iyileştirme

yöntemlerinde en önemli faktörlerden birisi, uygulama derinliğidir. Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine bağlı olarak; derin zemin stabilizasyonu ve yüzeysel zemin stabilizasyonu şeklinde sınıflandırılırlar (Şekil 2.8) (Uzuner, 2012).



Şekil 2.8. İyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Uzuner, 2012)

Bu çalışmada, yüzeysel stabilizasyon yöntemleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

2.3. Yüzeysel Stabilizasyon

İyileştirmenin zemin yüzeyinden onlarca metre derinlere kadar gerekli olmadığı durumlarda yüzeysel zemin stabilizasyonları uygulanır. Yüzeysel zemin stabilizasyonları genelde üstyapı yüklerinin çok fazla olmadığı yapılarda veya demiryolu ve karayolu gibi yol inşaatlarında kullanılır.

Mevcut zeminlerin kendiliğinden problemlili olmaları ve derin zemin stabilizasyonu yöntemlerinin yüksek maliyetlere neden olmasından dolayı alternatif olarak pek çok yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerden bazıları zeminlere çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek, bazıları ise herhangi bir madde katılmaksızın uygulanan yöntemlerdir. Bazı yüzeysel zemin stabilizasyonu yöntemleri şunlardır:

2.3.1. Kompaksiyon

Mevcut zemin şartları; üzerine yapılacak mühendislik yapıları için her zaman istenilen özellikte uygun şartlara sahip olmayabilir. Granüler zeminlerde gevşek, kohezyonlu zeminlerde ise yumuşak durumda bulunan zeminlerin sıkıştırılarak mevcut zeminin geoteknik özellikleri bakımından iyileştirilmesi sağlanır.

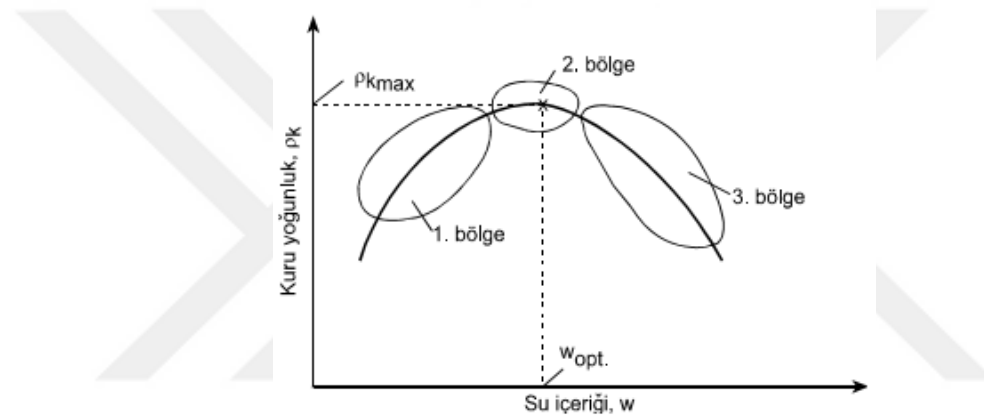
Kompaksiyon, mekanik ekipman ve çeşitli yöntemler vasıtasıyla zemin tanelerinin birbirine yaklaştırılması ile aralarındaki hava boşluklarının azaltılarak daha sıkı bir yapıya sahip olmalarını sağlayan mekanik işlemlere verilen addır. Zeminin sıkıştırılmasıyla birim hacim ağırlık artmakta ve bunun sonucu olarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Zemin daneleri, uygulanan statik veya dinamik yükler altında hareket ederek, aralarındaki boşlukları doldurarak birbirleriyle yakınlaşp sıkılaşabilirler. Tanelerin birbirine göre hareket edebilme yetenekleri ise, uygulanan statik veya dinamik yüklerin şiddetinin (kompaksiyon enerjisi) yanında, zemin boşlukları içerisinde bulunan su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir.

Zemin içerisinde bulunan su, belli bir miktara kadar daneler arasındaki sürtünmeyi azaltarak danelerin sıkışmasını sağlar. Zemin içindeki su miktarının kompaksiyona iki şekilde etkisi vardır. Su muhtevası, belli bir seviyenin üzerine çıkarsa danelerin birbirine yaklaşması zorlaşacağından daneler arasında bulunan hava hapsolür. Dışarı çıkamayan bu hava boşlukları uygulanan enerjinin de etkisiyle basınç artışlarına neden olur ve kompaksiyon zorlaşır. Zeminin bütün boşlukların suyla dolu olması yani zeminin tamamen suya doygun olması halinde ise kompaksiyonda uygulanan yükler altında boşluk suyunda basınç artışları meydana gelecek ve bu hidrostatik basınç artması, tanelerin birbirine yaklaşmasına engel olacaktır. Bu durum da kompaksiyonun oluşturulamamasına neden olur (Aytekin, 2000). Buna göre her iki etkinin bir arada düşünülmesi ile, en iyi sıkışmanın ancak zemin içinde yeterli miktarda (optimum) su bulunması durumunda sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır.

Zeminin en iyi ve en kolay sıkışabileceği su içeriğine "optimum su içeriği" adı verilmektedir. Optimum su muhtevası zeminin özelliğine göre farklı olduğu gibi, aynı zeminlerde kompaksiyon ekipmanına ve enerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla optimum su muhtevası zemini tanımlayan fiziksel özellikler (örneğin tane birim hacim ağırlığı, likit limit, plastik limit) gibi değişmez bir değer değildir. Su muhtevasının kompaksiyonla ilişkisi, kohezyonlu zeminlerde daha açık olarak görülmektedir. Kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerin kompaksiyonu ise su

muhtevastından daha az etkilenmektedir. Bunlara bağlı olarak optimum su içeriği, belli bir kompaksiyon enerjisi altında zeminin sıkışmasının en iyi ve en kolay sağlanabileceği su içeriğini göstermektedir (zaydın, 2011). Kompaksiyon birçok faktöre bağlıdır. Kompaksiyonun bağlı olduğu etmenler:

- **Su içeriği:** Sıkıştırılmış (kompaksiyona tabi tutulmuş) bir yaş zeminde kompaksiyonun (sıkışma durumunun) lus, o zemine ait kuru yoğunluktur. Bir yaş zemine ait kuru yoğunluk ne kadar büyükse, o yaş zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir. Bir zemin, sabit bir kompaksiyon enerjisi ile değişik su içeriklerinde sıkıştırıldığında; Şekil 2.9’da görüleceği gibi artan su içeriklerinde kuru birim hacim ağırlığı önce artmakta, maksimum bir değere ulaşmakta, sonra da azalmaktadır.



Şekil 2.9. Artan su içeriği ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi (Uzuner, 2016)

1. Bölgede: Zeminde yeterli miktarda su bulunmadığından tanelerin aralarındaki boşlukları kapatmak için hareket etmeleri, taneler arası sürtünme kuvvetinden dolayı zordur (Uzuner, 2016).

2. Bölgede: Zemine su ilave edilmesi durumunda zemin tanelerinin çevresinde bulunan su tabakasının kalınlığı artar ve zemin taneleri birbirleri üzerinden kayarak hareket edebilirler. Böylece boşluklar dolarak sıkışma sağlanır. Sıkışma en yüksek değerine ulaştığında, kuru birim hacim ağırlık maksimum değere ulaşmaktadır (Uzuner, 2016).

3. Bölgede: Zemine daha fazla su ilave edilmesiyle zemin içerisindeki boşluklar su ile dolmaya başlar ve suyun pratik olarak sıkışmaz olduğundan bir noktadan sonra yapılan su ilaveleri zeminin yoğunluğunu arttırmayacağı gibi yoğunluğun azalmasına sebep olacaktır. Yani su içeriği artarken, kuru birim hacim ağırlık azalmaktadır (Uzuner, 2016).

- **Zemin cinsi ve granülometresi:** Zemine ait dane boyutları arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri artmakta buna karşılık optimum su içeriği düşmektedir. Zeminin tane dağılımı, zemin tanelerinin şekli, zemin tanelerinin yoğunluğu, zeminde bulunan kil minerallerinin tipi ve miktarının optimum su içeriğine ve maksimum kuru yoğunluğa büyük etkisi vardır. Genel olarak taneli veya iri taneli zeminlerde düşük su içeriği, yüksek kuru yoğunluk değeri elde edilir. İyi derecelenmiş zemin kötü derecelenmiş zemine göre daha yüksek ρ_{maks} değerine sahip olur.
- **Kompaksiyon enerjisi:** Aynı zemin için daha büyük kompaksiyon enerjisi, daha yüksek kuru birim hacim ağırlığı ve daha düşük optimum su içeriğini verir. Daha yüksek maksimum kuru yoğunluk, daha düşük optimum su içeriği verir. Ağır kompaksiyon deneyinde daha büyük kompaksiyon enerjisi uygulanıp, daha yüksek kuru yoğunluk değeri elde edilir.
- **Geçirimsizlik:** Taneciklerden oluşan bir madde olan zeminlerde, içinde bulunan partiküllerin düzensiz şekilleri nedeniyle, katı taneciklerin arasında birçok boşluk veya gözenek bulunur. Çakıllar, kum ve siltler gibi yuvarlak ve kabaca eşit ölçülerde veya levha ya da pul şeklinde olan kil kütlelerinde gözenekler birbirlerine bağlıdır.

Optimum su muhtevası (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{kma}) belirlenmesi için kullanılan standart laboratuvar deneyleri;

Standart Proktor Deneyi: ASTM D-698 standardına uygun olarak yapılır. Bu standarda göre iç çapı 102 mm, yüksekliği 117 mm olan metal bir standart kalıp içine zeminin üç tabaka halinde yerleştirilerek 2,5 kg ağırlığındaki bir çekicinin 12 inç yükseklikten (300 mm) 25 defa düşürülmesi ile zeminin sıkıştırılması deneyidir.

Modifiye Proktor Deneyi: ASTM D-1557 standardına uygun olarak yapılır. Standart kompaksiyon deneyine benzerdir. Standart bir kalıp içine zeminin beş tabaka halinde yerleştirilerek 4,5 kg ağırlığındaki bir çekicinin 18 inç yükseklikten (450 mm) 25 defa düşürülmesi ile zeminin sıkıştırılması deneyidir. Çizelge 2.6'da bu 2 kompaksiyon deneyinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.6. Standart ve modifiye kompaksiyon deneylerinin karşılaştırılması

	Standart Kompaksiyon	Modifiye Kompaksiyon
Standartlar	ASTM D698, AASHTO T-99	ASTM D1557 ve AASHTO T-180
Tokmak Kütleli	2.5 kg	4.54 kg
Tokmak Düşü Yüksekliği	305 mm	457 mm
Zemin Katman Sayısı	3	5
Tokmak Düşüş Sayısı	25	25
Her Numuneye Uygulanan Enerji	600 kN-N/ m ³	2700 kN-N/m ³

Arazide yapılan kompaksiyon uygulamasında sıkıştırma yapılacak olan zemin, kullanılacak sıkıştırma aracının cinsine bağlı olarak 0,2-0,4 m kalınlıklarda serilir. Zemine bir miktar su katılır veya zemin karıştırılarak havada bir miktar kurutulur. Böylece zeminin su içeriği laboratuvarda belirlenen optimum su içeriğine getirilmiş olur. Daha sonra zeminin cinsine göre belirlenen bir sıkıştırma aracıyla uygun sayıda geçişlerle sıkıştırma yapılır. Kompaksiyon işlemini arazide uygulamak için kullanılan sıkıştırma makinelerinin en çok kullanılanları; düz ayaklı, lastik tekerlekli, keçi ayaklı ve titreşim tamburlu silindirlerdir.

Arazide kompaksiyonun en verimli ve en ekonomik olarak sağlanmasında etkili olan faktörlerin iyi tanımlanması gerekir (Özaydın, 2011). Önemli projelerde, sıkıştırılacak olan zemin hacmi, büyük oranlara ulaştığından dolayı pahalı ve büyük makinelerin kullanılması gerektiğinden, bu makinelerin yüksek verimle çalıştırılması, işin en kısa zamanda ve ekonomik olarak yürütülmesinde çok önemli rol oynamaktadır. Arazide kompaksiyonun verimini etkileyen önemli faktörler şu şekildedir:

1. Zemin özellikleri: Zemin granülometresi, su muhtevası, sıklık derecesi
2. Kompaksiyonda kullanılacak makinenin özellikleri:
 - Makinenin toplam ağırlığı, boyutları ve zemine uyguladığı basınç
 - Titreşimli makinelerde uygulanabilir titreşim frekans aralığı
3. Kompaksiyon yöntemleri:
 - Tabaka kalınlığı
 - Makinenin geçiş hızı
 - Makinenin geçiş hızı
 - Titreşim frekansı

Kompaksiyon sonunda; zeminin taşıma gücü artırılır, zeminin geçirimsizliği azaltılır, böylece zeminin su alarak, hacim değişikliklerine uğraması azaltılır, zemin sabit, hareketli, dinamik yükler altında yapacağı oturmalar azaltılır.

2.3.2. Drenaj

Zemin içerisindeki su muhtevasının azaltılması ile zeminde iyileştirme sağlanır. Su içeriğinin artması özellikle killi zeminlerde hacimsel değişmelerin yanında mukavemetin azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple zemindeki mevcut suyun uzaklaştırılması ve zemine dışarıdan suyun girişinin engellenmesi gerekir (Uzuner, 2016). Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zemin içerisindeki suyun, zeminin mühendislik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği koşullarda, zeminin sağlam ve stabil olarak korunması için kanallar, hendekler ve pompalar yardımıyla suyun yüzeyden veya derinden uzaklaştırılması işlemine drenaj adı verilir. Aynı zamanda zemine suyun tekrardan girişi engellenir. Bu iyileştirme metodu yapı temellerinde, yollarda, dolgu ve şevlerde, istinat yapılarında vb. yapı uygulamalarında suyun yapıya zarar vermemesi için sıklıkla uygulanır. Drenaj zeminde iki şekilde uygulanabilir:

Yüzeysel drenajda toprak yüzeyinde biriken yada akış halinde olan yağmur gibi yüzey sularının zemin ortamına girmesini, zemin yüzeyinde erozyona yol açmasını önlemek üzere, toplanarak uzaklaştırılması sağlanır (Uzuner, 2016).

Yüzeysel (sığ) drenajda ise açılan hendeklerle sular toplanarak uzaklaştırılır (Şekil 2.10). Hendekler suların akıp gitmesi için eğimli yapılarak hendek tabanlarında suyun akışını sağlayacak düzenlemeler yaparak içleri uygun filtre malzemesi ile doldurularak oluşturulur (Uzuner, 2016).



Şekil 2.10. Yüzeysel drenaj

2.3.3. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon, birbirinden farklı iki yada daha fazla zeminin belirlenen oranlarda karıştırılarak, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla istenilen şartları sağlayan başlangıçtaki zeminden farklı olarak yeni bir zemin haline dönüştürülmesidir (Aytekin, 2000). Mekanik stabilizasyonda, ince taneli (kohezyonlu) zeminlere belli oranda kaba taneli (granüler, kohezyonsuz) malzeme katılarak zemin ıslah edilmektedir. Bu nedenle çoğunlukla mekanik stabilizasyona granüler stabilizasyon da denmektedir. Mekanik stabilizasyon, fiziksel işlemlerle zeminlerin fiziksel, hidrolik ve mekanik özelliklerini değiştirmeye yarayan yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, zemine ihtiyaca göre ince veya iri boyutlu malzeme karıştırarak iyi derecelenmiş ve sıkı zemin karışımları elde etmeyi sağlarlar. Bu yöntemin amacı, boşlukları dolduracak bağlayıcı malzemeleri zemine ekleyerek zemindeki dane dağılımını değiştirmektir. Granüler zeminde bağlayıcı malzeme zemine bağ sağlar. Kohezyonlu zeminlerde granül yapıştırıcı madde zeminle karıştırılır. Mekanik stabilizasyonla zeminlerde elde edilmesi amaçlanan diğer koşullar şunlardır (Satıroğlu, 2013):

- Zeminin granülometresinin iyileştirilmesi
- Likit limit (LL) veya Plastisite indisinin (PI) azaltılması
- Geçirimsizliğin azaltılması
- Kayma ve taşıma gücü mukavemetinin artırılması
- Zeminin durabilitesinin ve hacimsel değişimlere karşı direncin artırılması
- Yolda oturmaların azaltılması
- Don duyarlılığının azaltılması

Mekanik stabilizasyonda uygulama aşamaları incelendiğinde öncelikle iyileştirilmesi gereken zemin yüzeyden kazılır, ardından mekanik özellikleri istenilen şekilde ıslah edilir ve tekrar yerine yerleştirilir. Zeminin karıştırılması işlemi hem yolda, sabit veya hareketli bir plent ile (yolların alt yapısında kullanılan mekanik malzemeleri hazırlayan sistem) (Şekil 2.11) hem de malzeme ocağında yapılır. Hazırlanan karışım yola serilerek klasik yöntemlerle kontrollü bir şekilde sıkıştırılır.



Şekil 2.11. Mekanik stabilizasyon plenti

Mekanik stabilizasyonda kullanılacak malzemelerin karışım oranı için belli bir sistem ve/veya bir metot yoktur. Farklı zemin sınıfları ile değişik oranlarda sahada ve laboratuvar ortamında deneme yanılma ile karıştırılarak, zeminlerin özellikleri incelenerek karar verilmelidir (Satıroğlu, 2013). Mekanik stabilizasyonda mevcut zeminin granülometrisini istenilen şekilde düzeltmek üzere, farklı zemin katılarak veya bir kısım zemini uzaklaştırarak kompaksiyon uygulanır. İşin amacına göre uygun granülometri seçilir. Zemin içinde bulunacak olan malzemenin cinsine göre bazı durumlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin; zemindeki maksimum dane boyutunun çok büyük olması durumunda işlenebilirliğini azaltmakta ve kaba kısmının çok olması halinde segregasyona neden olmaktadır. Zeminde ince malzeme oranı fazla ise, yüksek su içeriklerinden dolayı yapılacak olan karıştırma işlemi güçleşmekte ve kuru halde topraklanmalara neden olduğundan homojen karışımlar elde edilememektedir. Ayrıca zeminde ince malzemenin fazla olması plastisite ve kohezyonu arttırmaktadır. Uygun olmayan zemine bir başka zemin veya düşük plastisiteli bir malzeme karıştırılarak uygun zeminler elde edilebilmesi için karışımın homojen olması gerekmektedir. Zemin istenilen özellikte karıştırıldığında elde edilen zeminin mekanik stabilitesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Anonim, 2019):

Agreganın mekanik dayanımı: Kullanılan agrega yüksek dayanıma sahipse, karma zemin stabildir. Bununla birlikte, eğer karışım uygun şekilde tasarlanmış ve sıkıştırılmışsa, nispeten düşük mukavemetli agregalar iyi bir mekanik stabiliteyi sağlayabilir.

Mineral bileşimi: Karıştırılmış zeminin mekanik stabilitesi, minerallerin bileşimine bağlı olup, mineraller hava şartlarına dayanıklı olması istenir.

Gradasyon (Derecelendirme): Gradasyon zeminin yoğunluğu, geçirimsizliği, stabilitesi, ve su tutma yeteneği üzerinde doğrudan etkilidir. Karıştırılmış zeminin derecelendirilmesi, daha büyük parçacıkların boşluklarının, daha yüksek bir yoğunluk elde etmek için daha ince parçacıklarla doldurulacağı şekilde olmalıdır.

Plastisite Özellikleri:

- Balçık ve çamurlu yollarda yüzey kaplaması için bağlayıcı olarak plastik zeminler kullanılır. Plastik zeminler nem tutma kapasitesi ve yüzey suyunun aşağı doğru hareket etmesine karşı sızdırmazlık sağlarlar.
- Temeller için, aşırı su birikimini ve buna bağlı olarak mukavemet kaybını önlemek amacıyla zeminin plastikliği düşük olmalıdır.
- Sahada mevcut olan zemin nadiren her iki gereksinimi de karşılayabilir. İstenilen karışımı elde etmek için farklı kaynaklardan zeminleri karıştırmak gerekir.

2.3.4. Kimyasal Stabilizasyon

Geoteknikte dayanımı arttırmak, geçirimsizliği azaltmak, şişme ve büzülmeden kaynaklı hacim değişimini en aza indirmek için pek çok kimyasal madde kullanılarak zemin özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Yüzeydeki tabakalara veya derindeki zemin bloklarına kimyasal katkı malzemesi ilave edilerek fiziksel karıştırma uygulanarak iyileştirme yapılabilir. Katkı olarak doğal zeminler, endüstriyel yan ürünler, zemin ile reaksiyona giren çimentolu ve kimyasal malzemeler kullanılır. Katkı malzemesi zemin yüzeyine eklenebildiği gibi zemin içerisindeki boşluklara da enjekte edilebilir. Kimyasal stabilizasyon katkılı stabilizasyon olarak da bilinir. Katkılı stabilizasyonda zemine yaptıkları etkilerin yanında, ekonomik ve gereksinim duyulduğunda kolayca bulunabilme özelliğine göre; kireç, çimento, bitüm, puzolanlar olarak sıralanabilirler. Bu maddelerden farklı olarak alternatif malzemeler de kullanılabilir. Malzeme seçimi ve kullanılacak katkı maddesinin miktarı zemin sınıfına ve istenen zemin kalitesindeki gelişme derecesine bağlıdır. Genel olarak derecelendirme, işlenebilirlik ve plastisite gibi zemin özelliklerinin iyileştirilmesi istendiğinde az miktarlarda katkı gerekirken, dayanımın ve dayanıklılığı arttırmak istendiğinde daha fazla miktarlarda katkı maddeleri kullanılır. Kimyasal stabilizasyonda homojen bir karışım elde etmek için önemli olan, kullanılacak stabilize malzemenin

zeminin boşluklarından geçmesine izin verilerek, zemine eklenmesi gerekir. Katkı malzemeleriyle stabilizasyonda katkı malzemesi zemine ilave edilerek zeminin partikül yapısı değiştirilmektedir. Bu tür katkı maddelerinin zemin ile meydana getirdiği kimyasal reaksiyonlar sonucunda zeminin mühendislik özelliklerini ıslahına kimyasal stabilizasyon denir. Bu yöntemle zemin içinde daneler arasında bağlar oluşturularak zemin özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Katkı maddeleriyle stabilizasyonun sonunda zeminin dayanımı artırılır, hacimsel stabilite kontrolü (büzülme ve şişme) sağlanmış olur, geçirimsizlik azaltılır ve duraylılık artırılır.

Kimyasal stabilizasyona karar verilmeden önce iyileştirme yapılacak zeminin cinsi, iyileştirme için kullanılacak stabilizatör malzemenin çeşidi, stabilizasyonun ne amaçla yapıldığı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmek istendiği, maliyet ve malzeme temin etme kolaylığı gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

En yaygın kullanılan kimyasal stabilizasyon yöntemleri kireç, çimento, bitüm olup kireç-çimento, kireç-asfalt ve kireç-çimento-puzolan gibi stabilizatör karışımları da tercih edilmektedir. Bu kombinasyonlara ek olarak son zamanlarda kullanılan alternatif katkı maddeleriyle de kimyasal stabilizasyonlar gerçekleştirilmektedir. Zemin katkılarının bu şekilde karışım halinde yeni kombinasyonlar kurularak kullanılmaları tek başına kullanılmalarından daha çok avantaj sağlamaktadır. Katkı türüne göre birkaç özelliğin iyileştirilmesi sağlanmakta ya da katkı maddelerinden dolayı zemin de oluşacak olumsuz durumun önüne geçilmiş olmaktadır. Örneğin kireç zeminde işlenebilirliği artırırken, plastisiteyi düşürmektedir. Daha sonra katılan çimento ise zeminin mukavemetini hızla artırır. Aynı şekilde zemine katılan kireç, asfalt yol kaplamasından zemin tanelerinden soyulmasına engel olmakta ve karışımın stabilitesinin artmasını sağlamaktadır.

Kireç ile stabilizasyon: Kireç eski zamanlardan beri iyileştirmede kullanılan malzemelerinden biridir. Kireç ile yapılan stabilizasyon çalışmalarında sönmüş kireç (hidrate kireç, Ca(OH)₂-kalsiyum hidroksit) veya sönmemiş kireç (CaO-kalsiyum oksit) kullanılmaktadır. Ancak meydana gelebilecek olumsuz bir durumu engellemek amacıyla genellikle stabilizasyon işlemlerinde sönmemiş kireç gibi yakıcı özelliği olmayan hidrate kireç kullanılmaktadır.

Kireç taşının (kalker) öğütülerek 900°C'nin üstünde döner fırınlarda pişirilmesi (kalsinasyon) ile bağıntı 2.1'deki reaksiyon oluşur:



Oluşan CaO, su ile karıştırılınca büyük miktarda ısı (300-400°C) açığa çıkararak bağıntı (2.2)'deki gibi bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyon sonucu oluşan Ca(OH)₂ 'ye ise sönmüş kireç adı verilir.



Kireç ilave edilerek yapılan stabilizasyon, özellikle kil oranı yüksek zeminler için tercih edilen en uygun malzemedir. Kil mineralleri bakımından zengin olan zeminlerin önemli bir bölümü, kireç eklenmesine olumlu cevap verir. Çünkü kireç; orta, ince ve çok ince tanelerle reaksiyona girerek zeminin plastisitesinin azalmasını, şişme-büzülme potansiyelinin azalmasını sağlarken; işlenebilirliğinin ve durabilitesinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kireç ile kil mineralleri arasında ortaya çıkan puzolanik reaksiyon sonucu meydana gelen çimentolanma ile sertleşen zeminin serbest basınç mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Meydana gelen bu reaksiyonun hızının yavaş olduğundan iyileştirme sırasında sorun çıkarmaması bir avantaj olarak kabul edilir. Zaman geçtikçe de bu mukavemet artışı devam eder.

Kireç stabilizasyonu killi zeminlerde daha etkin olurken kumlu zeminlerde etkisi oldukça azdır. Çünkü kumlu zeminler gibi granüler malzemelerde kirecin etkileşime gireceği silika alanların az ve reaksiyon potansiyelleri yetersizdir. Yine de kum-kireç karışımlarında kirecin etkinliği kumun içindeki silika mineraline etki edecek uygun bir kimyasalla arttırılabilir (El-Rawi ve Abdul-Hasan, 1986).

Kireç stabilizasyonu daha yaygın olarak killi zeminlerden yapılan dolgularda kullanılmaktadır. Her %10 kil içeriği için %1 kireç ilave etmek gerekmektedir (Özaydın, 2011). Çizelge 2.7'de farklı zeminler için başlangıç kireç oranları verilmiştir.

Çizelge 2.7. Optimum kireç oranı için kullanılacak başlangıç değerleri (Aytekin, 2000)

Zemin türü	Kireç miktarı*
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Kum, organik zeminler	Tavsiye edilmez.
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10

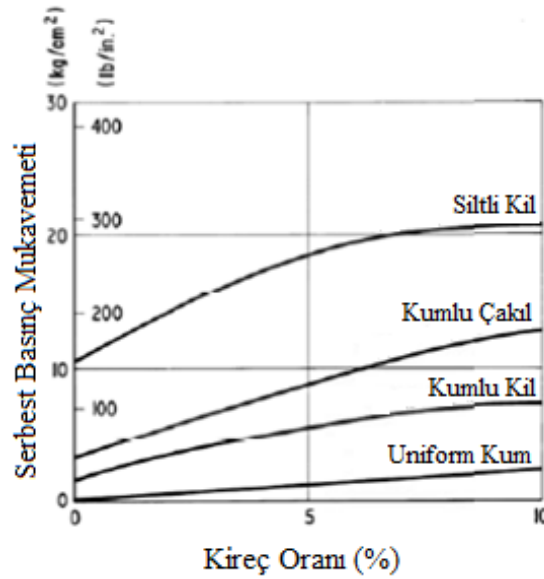
*Kireç miktarı, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesidir.

Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, şişme basınçlarının ve kabarma potansiyelinin azalmasını ve dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. Şekil 2.13'te farklı zemin tipleri için kireç

oranının dayanıma etkisi gösterilmektedir. Plastisite değerlerinin azalmasına neden olduğu için saha çalışma şartlarının da iyileşmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 2.12) (Özaydın, 2011). Kireçle birlikte etkinliği arttırmak için yüksek fırında toz haline getirilmiş cüruf, uçucu kül, şist ve jipsli malzemeler kullanılabilir.



Şekil 2.12. Kireç stabilizasyonu



Şekil 2.13. Farklı zemin tipleri için kireç değişim oranına göre serbest basınç dayanımı (Ingles ve Metcalf, 1972)

Çimento ile stabilizasyon: Yüzeysel zemin stabilizasyonunda özellikle yol inşaatlarında, çimento karışımları kullanımı yaygın bir metottür. Çimento ile stabilizasyonda, kireçte yapılan uygulamadan farklı olarak mevcut zayıf zemin kazılmadan direk olarak çimento ile aktif bir şekilde karıştırılarak stabilize edildiğinden

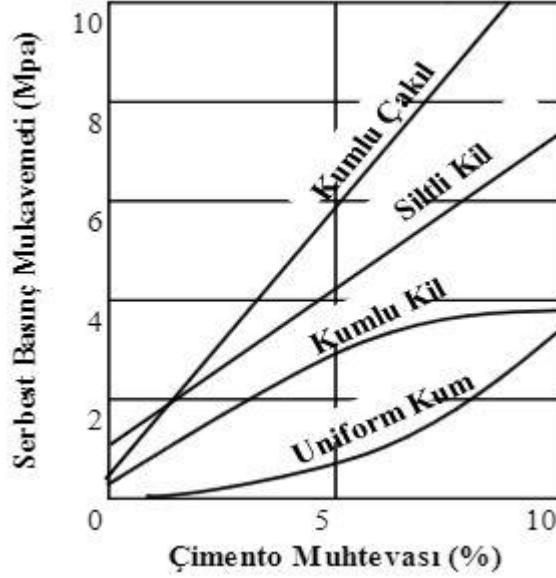
temel altı malzemesi olarak kullanılır. Böylece meydana gelecek olan gereksiz kazı ve dolgu maliyetleri engellenmiş olur.

Çizelge 2.8. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları (Das, 2007)

Zemin sınıflandırması		Hacimsel Oran (%)
AASHTO	USCS	
A-2 ve A-3	GP, SP, SW	6-10
A-4 A-5	CL, ML, MH	8-12
A-6 A-7	CL, CH	10-14

Çimento, zeminle birlikte karıştırıldıktan sonra, zeminin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirir. Zemine eklenen çimento, zeminin plastisitesini ve su tutma kapasitesini düşürürken taşıma gücü kapasitesini ve mukavemetini artırır. Mukavemette, kür zamanı uygulanarak artış meydana gelir. Zeminin çimento ile karışımı sonucu meydana gelen kimyasal olaylar nedeniyle mukavemet artışları sürekli olarak devam eder.

Çimento stabilizasyonunda için en uygun zemin tipleri, iyi derecelendirilmiş granüler zeminler ve düşük plastisiteye sahip killi zeminlerdir (Çizelge 2.8). Killi zeminlerin içlerinde kalsiyum (Ca) mineralini daha fazla bulunduran çeşitleri, çimento ile etkileşime daha kolay girdiklerinden, stabilizasyon için en uygun kil tipleridir. Bunun nedeni, hidrasyon sırasında tıpkı betonda olduğu gibi kil içerisinde bulunan kalsiyum iyonları çimento ile reaksiyona girerek sertleşmeyi başlatırlar. Sertleşme sonucunda zemin-çimento karışımının mukavemeti artmaya devam eder. Doğada yaygın olarak bulunan killer genellikle sodyum (Na) ya da hidrojen (H) iyonlarını daha çok barındırırlar. Ancak bu yapıdaki killer, çimento ile stabilizasyonda verim sağlayamazlar. Bu sebeple hangi tip zeminlerde stabilizasyon yapılacaksa kullanılacak malzemenin seçimine ona göre karar verilmelidir. Şekil 2.14'te farklı zemin tipleri için çimento oranının dayanıma etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Çimento stabilizasyonunun farklı zeminlerde serbest basınç mukavemetiyle ilişkisi

Çimento kullanılarak yüzeysel zemin stabilizasyonu özellikle karayolu ve demiryolu gibi yol inşaatlarında ya da havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin büyük değerler alabildiği yollarda tercih edilmektedir. Çimento stabilizasyonunun zemine etkileri şunlardır:

- Şev stabilitesini sağlamak,
- Derin stabilizasyon sağlamak,
- Derin kazı stabilizasyonu sağlamak,
- Kazıklarda oluşan negatif yüzey sürtünmesini düşürmek,
- Trafik yükleri, patlatma ve kazık çakma sırasında oluşan titreşimleri azaltmak,
- Dolgu altında oluşan konsolidasyon oturmalarını hızlandırmak.

Bitüm ile stabilizasyon: Kireç ve çimento stabilizasyonu, puzolanik reaksiyonlar sonucu zeminin mukavemetini artırırken, bitüm stabilizasyonu zeminde danelerin birbirine yapışmasını böylece zeminin suyun zararlı etkilerinden korunmasını sağlar. Dane yüzeyini kaplayan asfalt, ince daneli zeminlerde suyun etkisi ile meydana gelen yumuşamayı önleyici bir etki gösterirken; iri danelerden oluşan zeminlerin ise kohezyonun artmasına yol açmaktadır. Ayrıca, danelerin birbirine yapışmasını sağlayıcı etkisi sonucu su ve rüzgâr erozyonuna karşı direnci arttırmaktadır (örneğin, yol yüzeylerinde tozlanmayı önlemektedir). Bitümle stabilizasyonun da en yaygın olarak karayollarında kullanıldığı bilinmektedir.

Alternatif katkı malzemeleri ile stabilizasyon: Genel olarak, katkı malzemeleri ile karışım tekniği kullanılarak yapılan stabilizasyon, zemine kolay uyum sağlaması yönünden zemin durumunu iyileştirmek için büyük etkiye sahiptir. Katkı malzemesi olarak kireç, çimento, bitüm kullanılabildiği gibi bunlardan başka bazı kimyasal ve atık maddeler de kullanılabilir. Son zamanlarda tüketici nüfusunun artışına bağlı olarak meydana gelen ham madde ihtiyacına olan talep arttığından insanlar alternatif malzemeleri kullanmaya yönelmişlerdir.

Zemin stabilizasyonunda kullanılan geleneksel olmayan katkı maddeleri, marjinal malzemeleri, geleneksel yapı malzemelerine düşük maliyetli bir alternatif olarak stabilize etmek için uygulanabilir çözümler olarak ortaya çıkmıştır. Çimento, kireç, uçucu kül ve bitümlü ürünler gibi geleneksel stabilizatörler yoğun bir şekilde araştırılmış ve temel stabilizasyon mekanizmaları saptanmıştır. Ancak geleneksel olmayan zemin stabilizasyonunda kullanılan alternatif katkı maddeleri, bileşimlerinde ve zeminle etkileşim şekillerinde farklılık gösteren çeşitli kimyasal malzemelerden oluşur. Bunların başında lif halde kullanılan polyester elyaflar ve emülsiyon halde kullanılan doymamış polyesterin zeminde kullanımını görmektedir. Maalesef, geoteknik malzemelerle olan etkileşimleri ve temel istikrar mekanizmaları hakkında henüz kapsamlı bir deneysel inceleme yapılmadığından bu konu hakkında literatürde pek fazla araştırma bulunmamaktadır. Geleneksel olmayan bu alternatif katkı maddeleri, bileşimlerinde ve zeminle etkileşim şekillerinde çeşitlilik göstermektedir. Seçilen geleneksel olmayan stabilizatörler ile zeminde meydana gelen kimyasal ve fiziksel bağlanma mekanizmaları malzemenin çeşidine göre değişmektedir.

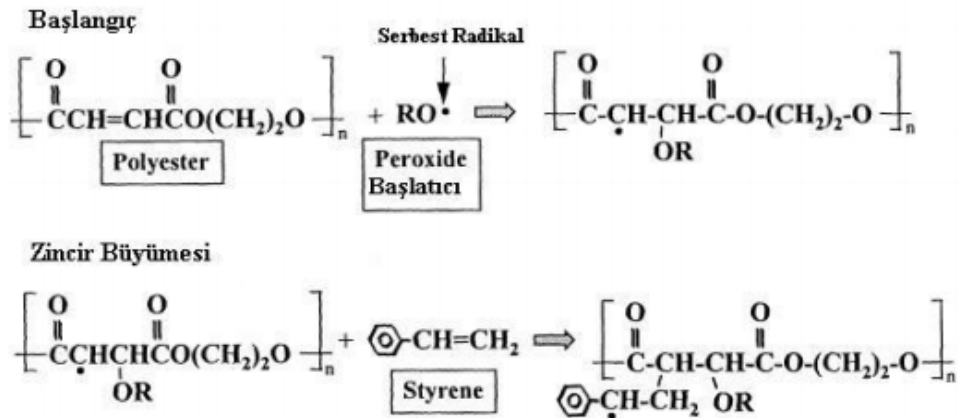
Alternatif katkı malzemeleri ile yapılan zemin iyileştirmede, zemin bir veya birkaç katkı maddesi ile karıştırılarak, mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır. Alternatif malzemelerle yapılan çalışmalar genel olarak karışımli zemin numunesinin kayma mukavemeti açısının iyileşmesi üzerine olsa da diğer mühendislik özelliklerinin de özellikle de serbest basınç mukavemetinin iyileştiğini göstermiştir. Katkı maddelerinin etkisi ve kullanılan optimum miktar, zemini oluşturan minerallerin miktarına bağlıdır. Zemin ve katkı malzemesinin arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon, zemin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Kimyasal reaksiyonlar, bir veya daha çok maddenin kimyasal yollarla birleşmesi ya da ayrışması sonucunda tepkimeye girmesidir.

2.4. Doymamış Polyester

Bu polyesterlere doymamış polyester reçinesi de denir. Doymamış polyesterler ısıtıldığında yumuşayıp yoğun kıvamlı bir akışkan haline gelen, soğutulduğunda ise tekrar sertleşerek katı hale gelebilen termoplastik bir yapı gösterirler.

Doymamış polyesterler (UP), dikarboksilik asitler ve dialkollerden gelen bir polikondensasyon reaksiyonu ile oluşturulan bir makro moleküldür (ortalama molekül ağırlığı 1000-3000). Dikarboksilik asitlerin bazıları, doymamış bağlar olarak adlandırılan karbon-karbon çift bağları içerir. Oda sıcaklığında, doymamış polyesterler yüksek oranda viskoz bir sıvı veya düşük erime noktasına sahip kırılğan bir cam benzeri ürünlerdir. Bir doymamış polyester (UP) reçinesi, doymamış polyesterin, aynı zamanda karbon-karbon çift bağları da içeren düşük viskoziteli monomer içindeki bir çözeltilisidir. Kullanılan en yaygın monomer, stirendir. Doymamış polyesterdeki karbon-karbon çift bağları, monomerdeki karbon-karbon çift bağları ile radikal-başlatılmış bir polimerizasyon reaksiyonu yoluyla reaksiyona girebilir. Sonuç, üç boyutlu (çapraz bağlı) bir ağıdır. Ürün, artık (termoplastik polimerlerin aksine) ısıtma sırasında erimeyen katı ve sert bir materyal haline gelir (Aurer ve Kasper, 2003).

Daha önce bahsedildiği gibi, doymamış polyester reçineleri, içinde buldukları kimyasal dengesizlikten dolayı tam doymamıştır. Karbon molekülleri sürekli olarak bağ kurabileceği bir element arayışı içindedirler. Bu tip moleküller, kimyasal dengesizliği tamamlama eğiliminde olduklarından dengesiz veya reaktif halde bulunurlar. Bu moleküllerin birbirine bağlanma reaksiyonuna polimerizasyon (cross-link) adı verilir. Moleküllerin “CROSS LINK” adı verilen bu şebeke yapısı oluşturması sonucunda, üç boyutlu matriks bir yapı oluşur ve polyester sıvı halden katı hale dönüşerek sertleşir. Cross-link, radikal olarak başlatılmış bir polimerizasyon reaksiyonudur (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Doymamış polyesterin Cross link olması

Polyesterin reaktörden çıkışından, kullanımına kadar geçen sürede polimerizasyon reaksiyonu kendi kendine devam eder ancak bu reaksiyon, katkı maddeleri kullanılarak kontrol altına alınır. Reaksiyonun başlaması için bir serbest radikal kaynağı gerekir ve serbest radikal kaynağı olarak da katalizörler kullanılır. Doymamış polyesterler genellikle II-A grubu metal oksit veya hidroksitlerle birlikte reaksiyon başlatıcı olarak kullanılarak katılaştırılır. Bu reaksiyon başlatıcıları öncelikle zincirde karboksilik asitler ile reaksiyona girer ve daha sonra diğer zincirdeki karboksilik asitleri tetikleyerek bir karmaşık bir radikal zincir yapısı oluşturarak viskoziteyi düşürür.

Aktivatörün reaksiyonu başlatmasıyla ortaya çıkan enerji, polyesterin çapraz bağlanması için gerekli eşik enerjisini aştığında reaksiyon ekzotermik olduğu için gerekli diğer enerji buradan karşılanarak reaksiyon devam etmektedir. Dolayısıyla sıcaklığın artırılması ile de reaksiyonda artırılmış olacaktır. Diğer taraftan yapıda sertleşme veya difüzyon zorlaşmasından dolayı polimerizasyon tam anlamıyla tamamlanmaz (Doğanay ve Ulçay, 2007). Burada kullanılan katalizörler peroksit yapıdadırlar. Reaksiyonun birinci basamağı peroksitin parçalanmasıdır. Peroksit parçalanması ısı ile veya kimyasal maddelerle oluşur. Peroksit parçalanması ısı ile meydana gelmişse sıcak sertleşme, kimyasal maddelerle meydana getirilmişse soğuk sertleşme denir. İkinci basamak ise bir çifte bağ ile reaksiyona girebilecek radikaller ile zincir büyümesinin oluşumudur (Balçık Tamer, 2008). Bu polimerizasyon reaksiyonu geri dönüşümsüzdür. Sertleştikten sonra ürün tekrar eritilemez 2 çeşit sertleşme vardır. Polyester reçinenin polimerizasyonu ekzotermik bir reaksiyondur. Sıcaklığa bağlı olarak farklı hızlarda ve farklı oranlarda gerçekleşir. Polimerizasyon sürekli olarak devam

etmektedir. Sulu ortamda bekletilirken reaksiyon devam etmekte ve buradaki su bir soğutucu gibi görev yaparak reaksiyon sonucu çıkan ısıyı soğurmaktadır.

1. Soğuk Sertleştirme:

Doymamış polyester + Sertleştirici + Hızlandırıcı + 300 °C'ye kadar çevre sıcaklığı

Soğuk sertleşmede doymamış polyestere sertleştirici ve hızlandırıcı ilave edilip 300 °C'ye kadar çevre ısı verildikten sonra reaksiyon başlatılır. Soğuk sertleşme, jelleşme süresi, polyester sıcaklığının 25°C'den 35°C'ye ulaşması için geçen süredir. Sertleşme süresi de oda sıcaklığından maksimum sıcaklığa ulaşmaya kadar geçen süredir (Balçık Tamer, 2008).

Doymamış polyester reçinelerinin oda sıcaklığında (soğuk sertleştirme) sertleşme reaksiyonu, organik peroksit ve kobalt tuzu çözeltisi ilave edilerek başlar. Şiddetli bir bozunma reaksiyonuna neden olacağından, hızlandırıcı ve sertleştiricinin saf bir şekilde karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Hızlandırıcı ile polyesterin karışım esnasında oluşabilecek herhangi bir dengesizlik, patlamaya da neden olabilir. Çoğunlukla, polyester reçine üreticileri hızlandırıcıyı önceden reçinenin içine karıştırmaktadır, bu nedenle reaksiyon, sadece uygun miktarda sertleştirici ilave edilerek başlatılabilir. Metil etil keton peroksit, soğuk sertleştirme işlemlerinde en çok kullanılan sertleştiricidir (Aurer ve Kasper, 2003). Çok fazla sertleştirici katılması çok kısa sürede jelleşmeye neden olur, çok az katılırsa da çapraz bağlanma yeterli olmaz. Her iki bileşen eklendiğinde, molekül üzerinde reaktif yerler oluşturmak için karbon-karbon çift bağlarıyla reaksiyona giren radikaller oluşur. Polimer zincirlerinin stiren molekülleri ile çapraz bağ kurmaya başlaması biraz zaman alır. Bu aşamada, polyester hala sıvı kalır ve uygun şekilde işlenebilir. Çapraz bağlama reaksiyonu yeterince ilerlediğinde, reçine, ısı üretimi altında bir jel oluşturur. Sertleştirme sisteminin seçimi, reaksiyonun hızını ve jel zamanını belirler. Jelasyondan sonra, reçine artık işlenemez durumdadır.

Çapraz bağlama reaksiyonunun ekzotermik davranışı sıcaklığın artmasına neden olur ve bu da polimerizasyon reaksiyonunu daha da hızlandırır. Jel aşamalı olarak katı bir malzeme haline alarak katılaştır. Sıcaklık, maksimuma ulaşılan kadar artar. O andan itibaren, malzeme soğur çünkü ısı gelişimi ısının çevreye yayılmasından daha düşüktür. Polimerizasyon reaksiyonu hala devam eder, ancak bu işlem nihai polimer ağı oluşana kadar yavaş yavaş yavaşlar. Bu durumdan sonra jel halindeki malzeme tamamen katılaşmıştır. Sertleşme reaksiyonunu etkileyen faktörler, kullanılan sertleştirme sistemi,

sertleşme süresi, reaksiyon sırasında mevcut olan malzemenin sıcaklığı ve kütlesidir. Sertleşme derecesi, genellikle nihai malzemedeki artık stiren monomer içeriğinin ölçülmesiyle belirlenir. Çapraz bağlama reaksiyonundan sonra, %2-4 arasında stiren monomeri genellikle üründe hala mevcuttur. Birçok uygulamada, düşük artık stiren içeriği gereklidir. Genellikle bir kürlenme sonrası döngü 60-100° C arasındaki sıcaklıklarda 6-24 saat sürer (Aurer ve Kasper, 2003).

Soğuk sertleşmede maksimum sıcaklığa ulaşıldığında sertleşme bitmiş değildir. Buradan itibaren başlayan nihai sertleşme oda sıcaklığında çok uzun sürebilir ve hatta tamamlanmayabilir. Sıvı haldeki doymamış polyesterin katı hale geçmesi için meydana gelen kimyasal olayda kullanılan sertleştirici (katalizör) ve hızlandırıcılar (promotör) farklılık gösterebilir (Balçık Tamer, 2008).

2. Sıcak sertleşme

Doymamış polyester + Sertleştirici + 700 °C'nin üstünde sıcaklık

Polyester reçinenin sertleştirilmesinin bir başka yolu, sertleştiricinin ayrıştırılması için ısı kullanılmasıdır. Doymamış polyesterin sertleşmesi sırasında reaksiyonunun başlaması için gereken peroksit parçalanması ısı yoluyla olduğu zaman sıcak sertleştirme meydana gelir. Sıcak sertleşme jelleşme süresi, polyester sıcaklığının 65°C'den 90°C'ye çıkması için geçen süre olarak tanımlanır. Bu ayrışma 50°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda mümkündür, ancak çoğu durumda 120-160°C arasındaki sıcaklıklarda yeterli radikallerin üretilmesi için kullanılır. Daha sonra, kimyasal reaksiyon, tarif edilen soğuk sertleştirme ile aynı şekilde ilerler. Bu sertleştirme reaksiyonu için uygun sertleştirici türleri, üçüncül butil perbenzoat gibi peresterler ve 1,1-di- (tert. Butil peroksi) 3, 3,5-trimetil sikloheksan gibi perketallerdir. Doymamış polyester reçinenin bu peroksitlerle karışımları oda sıcaklığında uzun süreli bir stabilite gösterir (Aurer ve Kasper, 2003).

Bu proste hızlandırıcı kullanılmadığı için polyester sıcaklığının 65°C'ye ulaştığı an jelleşmenin başlangıcı olarak alınabilir. Çünkü katalist yüksek sıcaklıkta etkisini gösterir. Sertleşme süresi ise polyester sıcaklığının 65°C'dan sonra ulaşabileceği maksimum sıcaklığa kadar geçen süredir (Balçık Tamer, 2008).

Sıcak sertleşmede jelleşme ve sertleşme süreleri; kullanılacak olan polyesterin cinsine, sertleştirici cinsi ve miktarına, çalışma sıcaklığına, ortama sıcaklığın iletiliş şekline, kalıbın ısı iletkenliğine bağlıdır. Jelleşme süresi aynı zamanda polyesterin işlenme süresidir. Yani en geç bu sürenin sonunda doymamış polyester kalıp üzerinde alacağı en son şekle getirilmiş olmalıdır.

Doymamış polyesterler camsı yapıda ve hidrofobik bir özelliktedirler. Sulu ortamlarda su molekülleri polimer zincirleri arasına girerek bağları koparıp yapının yumuşamasına neden olur (Marais ve ark., 2000). Ancak diğer taraftan polimerizasyon devam ettiği için sulu ortamda reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı dışarı verilmekte ve reaksiyon daha da yavaşlamaktadır (Doğanay ve Ulcay, 2007).

Su difüzyonu ve geçirgenliği sıklıkla, malzemelerin çevresindeki ortamda su buharı ve sıvı su bulunması nedeniyle polimer filmlerden (veya malzemelerden) meydana gelir. Polimerin doğasına ve mutlak su buharı basıncına bağlı olarak, geçirgenlik akışı çok düşük olabilir. Aslında, doymamış polyesterler, neme maruz kaldıklarında veya uzun süre sıvı su ile temas ettiğinde kimyasal değişikliklerden ve bozulmalardan zarar görebilirler. Bu durum, yapışkan mukavemeti kaybına, bir çatlak üretimine, bir polimer parçalarının sızmasına ve metal alt tabakaların bir aşınmasına yol açabilir. Bu hasarlar su moleküllerinin plastikleşme, lokal zorlanma, zincir kopması ve kimyasal reaksiyonlara neden olan polimer zincirleri boyunca yayılmasından kaynaklanmaktadır (Sargent ve Ashbee, 1984; Belliard ve ark., 1988). Doymamış polyesterin matrislerinde ve bileşiklerinde su yayılma ve geçirgenlik bilgisi çok önemli olmasına rağmen, literatürde, özellikle malzemeler doğrudan su ile doğrudan temas halindeyken çok az veri vardır (Marais ve ark., 2000).

2.4.1 Sertleştiriciler (Katalizörler)

Doymamış polyesterin polimerleşmesi, katalizör yardımıyla zincirlerin ağ şeklinde birleşmesi ve polyesterin sıvı halden katı hale geçmesidir. Normal ısıda çalışıldığında bu reaksiyondan ısı çıkar. Kopolimerizasyonu başlatmak için gerekli olan aktivasyon enerjisini sertleştiriciler verir. Bunlara (sertleştiricilere) peroksit bileşikler de denir. Polyesteri sertleştirmek için kullanılan peroksitler katı, sıvı veya pasta halinde bulunurlar. Oksijenin varlığı nedeniyle organik peroksitler tehlikeli olabilir. Bu sebepten dolayı peroksitler kullanılırken dikkatli olunmalı, darbeye ve ısıya karşı korunulmalıdır.

Ketonperoksitler; Başlıca keton peroksitler Metil-Etil-Keton Peroksit (MEK-P) ve ftalatsız metil-etil-keton peroksittir. Sertleştirmede en çok kullanılan peroksit grubudur. Doymamış polyester içerisine değişkenlik göstermekle birlikte genellikle %1-2 oranlarında katılır. Sıvı halde bulunan ketonperoksitler havadan ve nemden

etkilenirler. Bu nedenle de polyester içerisinde uzun süre bekletilmemesi gerekir. Çünkü hızlandırıcı olmadan da polyesteri jel kıvamına getirebilirler (Balçık Tamer, 2008).

Açılperoksitler; Başlıcaları, benzoil peroksit, asetil benzoil peroksit ve lauril peroksittir. Benzoil peroksit (BPO), polyesterin sıcak kalıpta sertleştirilmesi amacıyla kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda tek başına, oda sıcaklığında ise hızlandırıcılarla beraber uygulanır. Bu peroksitin kullanıldığı durumlarda sertleşme çok hızlı olur ancak tam bir sertleşme meydana gelmez. Asetil benzoil peroksit ise 90°C'nin üzerinde sıcak sertleşmelerde kullanılır (Balçık Tamer, 2008).

Kullanılan diğer peroksit grupları; hidroperoksitler, alkil peroksitler, peresterler ve ketalperoksitlerdir. Hangi peroksitin kullanılacağı seçilirken, işlem sıcaklığı, jelleşme ve sertleşme süresi, doymamış polyesterin cinsi ve polyesterin çapraz bağlanma süreleri dikkat edilecek hususlar arasındadır.

2.4.2. Hızlandırıcılar (Promotörler)

Peroksitlerin parçalandıktan sonra radikal oluşturmaları için kendilerine gerekli olan aktivasyon enerjisinin düşürülmesini sağlayan kimyasal maddeler, hızlandırıcılardır. Doymamış polyestere ilave edilen hızlandırıcı, yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaksızın düşük sıcaklıklarda radikallere ayrılmasını, doymamış polyesterin reaksiyona girmesini (polyester moleküllerinin cross link şebeke yapısı oluşturmaya) ve sertleşmesini sağlar.

Doymamış polyesterin sertleşmesinde kullanılan hızlandırıcılar başlıca; Kobalt ve vanadyum metallerinin birleşikleri ile azotlu bileşiklerdir. Bu yüzden hızlandırıcılar; kobalt hızlandırıcısı, vanadyum hızlandırıcısı ve amin hızlandırıcısı diye adlandırılır (Yılmaz, 2006).

a) Kobalt hızlandırıcıları; organik kobalt tuzlarıdır. Genellikle ya kobalt oktoat veya kobalt naftanat şeklindedirler. Yumuşatıcılarda veya stiren içerisinde çözülmüş durumdadırlar. Genellikle %1-6 veya %10 metal içeren çözeltiler halinde bulunurlar. Doymamış polyestere %0,1-%3 arasında değişen oranlarda eklenirler. Kobalt hızlandırıcılar ketonperoksitlerle oda sıcaklığında, hidroperoksitlerle biraz daha yüksek sıcaklıklarda, peresterlerle 70°C'nin üstündeki sıcaklıklarda sertleşme verirler. Kobalt hızlandırıcı miktarları farklı oranlarda eklenerek işlem süresi geniş sınırlar içinde ayarlanabilir. Kalıptan çıkarma süresi genellikle aminli hızlandırıcılara nazaran daha

uzundur. Kobalt yüzeyde kurutucu etki yapar. Bu sebeple kobalt hızlandırıcı ile ince tabakalarda bile yapışkan olmayan yüzey elde edilebilir (Yılmaz, 2006)

b) Vanadyumlu hızlandırıcılar; oktoat veya naftanat şeklinde bulunurlar. Vanadyum daha etkili bir hızlandırıcıdır. Ancak düşük kararlılığa sahip olduğundan zamanla bozunur. Bu yüzden kullanımı pek yaygın değildir. Vanadyumlu hızlandırıcılar sadece ketonperoksitlerle değil, aynı zamanda hidroperoksitlerle, perketallerle, peresterlerle de birlikte kullanılabilirler. Vanadyumlu hızlandırıcılar kobalta göre kimyasal dayanımı daha yüksek ve daha iyi sertleşebilen ürünler verirler. Ancak bu hızlandırıcıların depolama ömürlerinin kısa olması bunların dezavantajıdır (Yılmaz, 2006).

c) Amin hızlandırıcılar; %10'luk çözeltiler halinde stiren içinde veya ftalatlı yumuşatıcılar içinde bulunurlar. En çok kullanılanlar dietilanilin ve dimetilanilin cinsleridir. Normal jelleşme süresine karşılık süratli bir sertleşme verirler ve polyestere hafif sarımtırak bir renk verirler. Bu hızlandırıcılar sıcaktan çok fazla etkilenmezler. Bu yüzden oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda bile sertleşme sağlayabilirler. Ancak aminli hızlandırıcılar sertleşme reaksiyonu sonucunda tükenirler. Bu yüzden başta hızlı olan sertleşme, reaksiyonun sonuna doğru yavaşlar (Yılmaz, 2006).

2.5. Polimerlerin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması

Mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için zeminlerin stabilizasyonu genellikle geleneksel olarak çimento, kireç, uçucu kül ve bitümlü malzemelere dayanır. Bu malzemeler ucuzdur, nispeten kolay temin edilebilir ve birçok farklı zemin tipine göre farklı fayda sağlarlar. Ancak geleneksel olarak bilinen bu stabilizasyon katkı malzemeleri, sıklıkla uzun kürlenme süresi ve önemli miktarda mukavemet iyileştirmeleri için nispeten fazla miktarlarda katkı ilavesi gerektirir. Bazı durumlarda çoğu zaman stabilize edilmiş malzemelerin yeterli miktarda kürlenmesini sağlamak veya inşaat malzemeleri için önemli nakliye hacmi tahsis etmek için fazla zaman olmayabilir. Bu durumda hızlı bir stabilizasyon yapılması ve durumun düzeltilmesi gerekebilir (Santoni ve ark., 2002)

Son zamanlarda zemin stabilizasyonu için yeni ve hızlı mühendislik malzemeleri geliştirilmekte olup bunların başlıcaları, polimer emülsiyonu, asitler, enzimler, silikatlar ve ağaç reçinesi emülsiyonları gibi geleneksel olmayan malzemelerdir. Bu katkı maddeleri sıvı ya da katı halde olup her türlü zeminde uygulanacak şekildedir.

Polimerler kolayca değiştirilebilmekte ve farklı endüstrilerde kullanılan potansiyel olarak sonsuz polimer kombinasyonları ile sonuçlanmaktadır. Katyonik, anyonik ve iyonik olmayanları içeren zemin stabilizatörleri olarak birçok farklı polimer önerilmiştir (Ingles ve Metcalf, 1972). Çalışmalar, çoğu kimyasal stabilizatörün zeminle iki farklı yoldan reaksiyona girdiğini belirlemiştir; katkı maddesi, zemin parçacıkları ile spesifik kimyasal reaksiyonlara dayanır veya katkı maddesi, bağlayıcı ajanların kullanımı yoluyla fiziksel stabilizasyon sağlar. Polimerler ikinci kategoriye girer (Tingle ve ark., 2007).

Geleneksel stabilizasyonlarla karşılaştırıldığında, bu stabilizasyon malzemelerinin aşağıdaki avantajları vardır:

- Kararlı kimyasal özelliklere sahiptirler.
- Daha az şişlik ve kabarma meydana getirirler.
- Daha az malzeme miktarı gerektirirler.
- Daha düşük kürlenme süresine sahiptirler.
- Daha az kirlilik sağlarlar.
- Doğal kaynakları korurlar.

Yukarıda belirtilen faydaların yanı sıra, bu stabilizasyon malzemelerinin başka bir avantajı da sıvı yoğunluğunun suyla seyreltilebilmesi ve böylece seyreltme oranının kontrol edilerek istenen katkı miktarının elde edilmesinin kolay olmasıdır. Taşıtlar ve gevşek zeminle birlikte rüzgâr, olumsuz çevresel ve insan sağlığı etkileriyle bilinen toz oluşturur. Zeminin mukavemetini arttırmanın yanı sıra, bu stabilizatörler tozu kontrol etmenin bir yolu olarak da kullanılabilir (Santoni ve ark., 2002; Xing ve ark., 2018).

Lignosülfonat gibi çeşitli doğal polimerlerin yanında polipropilen (PP), polyester (PET), polietilen (PE) ve cam elyafları gibi sentetik polimerlerin zemin stabilizasyonunda kullanımı mevcuttur. Polimerlerin hidrokarbon zincirlerinden oluştuğu bilinmektedir. Bu zincirlerin zemin parçacıkları içinde iç içe geçtiği, böylece dengeleyici bir etki yaptığı düşünülmektedir. Aslında, polimerler, zemin parçacıklarını bir araya getirerek zemin içinde yeni bir zemin matrisi oluşturduklarından bağlayıcılık özellikleri sayesinde fiziksel stabilizasyon sağlayarak zemini iyileştirirler.

Polimer emülsiyonları, polimerin genellikle emülsiyon halinde imal edilirler ve çok çeşitli özelliklere sahiptirler. Asitli, bazik veya nötr pH ve katı içeriği değişebilen emülsiyonlar iyonik durum, anyonik, katyonik veya iyonik olmayan halde bulunmaktadır. Tipik bir polimer emülsiyonu, yaklaşık %40-45 polimer, %1-2

emülgatör ve kalan miktar da sudur. Polimer emülsiyonları (yani stiren-bütadien veya polietilen-vinil asetat), moleküler ağırlık, dallanma derecesi, yan zincir büyüklüğü ve bileşimi vb. yüksek çekme, eğilme ve basınç dayanımı, zemin parçacıklarına iyi yapışma ve su, kimyasal ve ultraviyole etkilerine karşı yüksek direnç gibi çeşitli kimyasal özelliklere sahip olmalıdır (Newman ve Tingle, 2004; Tingle ve ark., 2007).

Zemin stabilizasyonu için kullanılan polimer ürünlerinin çoğu, vinil asetat veya akrilik bazlı kopolimerlerdir. Polimer emülsiyonu kullanarak zeminlerin stabilizasyonu, sıvının basit bir şekilde uygun miktarda seyreltildiği bir işlemdir. Seyreltme miktarı, zeminin en verimli şekilde sıkıştırılması için gereken istenen nem içeriğinde hedef katkı miktarına ulaşmak için seçilir. Polimer stabilizatörü zemin parçacıklarını kaplar ve emülsiyon suyu buharlaştığında fiziksel bağlar oluşur ve böylece bir zemin-polimer matrisi kalır. Emülsiyon haline getirilen malzeme, topik uygulamalar için penetrasyonu artırmak ve karışım koşulları için partikül kaplamayı iyileştirmek için bir yüzey aktif cismi olarak da görev yapabilir. Birincil stabilizasyon mekanizması fiziksel bağ olduğundan, mukavemetteki artış ya da azalış, zemin parçacıklarının yeterince kaplanması ve polimerin fiziksel özellikleri üzerindeki yeteneğine bağlıdır. Bu nedenle bazı polimerler belirli zemin tiplerinde veya belirli bir ortamda iyi çalışabilir, ancak başka bir zemin tipinde veya başka bir ortamda zayıf performans gösterirler. Polimer emülsiyonları ile stabilizasyon granül materyaller için uygundur. Yüksek spesifik yüzey alanlarından kaynaklanan azalan karıştırma verimi nedeniyle kohezyonlu zeminlerde daha az etkili olur (Tingle ve ark., 2007). Polimerler suya dayanıklı olduklarından yüzeyini kapladıkları parçacıkların su geçirmezliğini sağlar ve neme duyarlılığı azaltırlar. Böylece zeminde sudan kaynaklanan problemleri azaltırlar.

Zeminlerin iyileştirilmesine yönelik polimer değişikliği, büyüyen bir endüstridir ve son saha uygulamalarında özellikle ilgi çekmektedir. Saha uygulamaları için, kullanılacak olan sıvı, en iyi şekilde stabilizatör makinesine monte edilmiş bir püskürtme çubuğu ile uygulanır. Uygulama koşulları, uygun miktarda stabilizatörün zemine verilmesini sağlamak ve sıkıştırma için uygun nem içeriğini sağlamak için iyi kontrol edilmelidir.

Polimerler dâhil, geleneksel olmayan katkılarla yapılan laboratuvar ve saha deneylerinin çoğu, mekanizma değerlendirmesinden ziyade performans değerlendirmesine odaklanmıştır. Ayrıca, ticari stabilizasyon katkı maddelerinin özel doğası gereği, kesin kimyasal bileşimler genellikle açıklanmamaktadır. Bu nedenle, geleneksel olmayan stabilizatörler ve geoteknik malzemeler arasındaki temel dengeleme

mekanizmaları ve bilinenlerin öznel olma eğilimi hakkında nispeten az çalışma yayınlanmaktadır (Rauch ve ark., 1993; Tingle ve ark., 2007; Muhunthan ve Sariosseiri, 2008).

Polimerin tescilli niteliği bugüne kadar yayınlanan test verisinin miktarını sınırlamıştır. Bugüne kadar yayımlanan verilerin bir kısmı, akrilik kopolimer ilavesiyle zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha fazla araştırma yapılmasının sağlanması için potansiyel göstermektedir. Bununla birlikte, polimerle stabilize edilmiş zeminin test edilmesi için standardizasyon eksikliği, çeşitli test düzenlemeleri ve karşılaştırma için temel oluşturmuştur. Ayrıca, bu önceki test programlarının her birindeki sınırlı kapsam, gelişmiş performans sunan ürünler ile yapmayanları ayırt etmek için yeterli veri sağlamaz.

Bu nedenle, tek bir polimer ürününü değerlendiren ve endüstride tipik olarak karşılaşılan koşullar aralığında polimerle stabilize edilmiş zeminin performansı hakkında karşılaştırılabilir veriler elde etmek için sistematik ve kapsamlı bir dizi mühendislik özellik testi yapan bir test programına ihtiyaç vardır. Her şey dâhil olarak hazırlanan bir test programı, polimer değişikliğine uğramış zemin performansını tipik saha koşullarında karşılaştırmak için standart bir temel sağlayacaktır. Ayrıca, bu test programı, doğru sonuçlar çıkarılmasına ve polimer ilavesiyle mühendislik özelliklerinde değişimi kolaylaştıran mekanizmaların anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

2.6. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi (1991) kendi adıyla anılan yaklaşımı ile deneylerin yapılmasında ve sonrasında değerlendirilmesindeki verimliliği artırmak amacıyla bir çözüm getirmiştir. Böylece deney öncesi yapılan çalışmalar sonucunda, deney sayılarında önemli derecede azalma gözlenmiştir. Taguchi yöntemi, çözümün en az sayıda deneyle elde edilmesinin yanında yüksek kalitede ürün ve süreç geliştirilmesini de her açıdan desteklemektedir. Hedeflenen kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında hesaplanabilir olması, deney sayısının azalması sonucu zamandan tasarruf sağlanması bu yöntemin avantajlarındanır.

Taguchi yönteminin esas amacı, hedeflenen kaliteye göre yapılacak deney sayısının azaltılmasıdır. Böylece hem hedeflenen kalitede ürün elde edilmiş olacak hem de deney sayısı azaltılarak maliyet düşürülmüş olacaktır. Taguchi tasarımında, hedeflenen değerler (tahmin edilen) kontrol edilebilen parametreleri ve seviyeleri içeren

ortogonal dizinler sayesinde belirlenmektedir. Seçilen ortogonal dizini ile oldukça az sayıda deney yapılarak parametrelerin sonuca etkileri de araştırılabilmektedir. Ayrıca bu yöntem ile yapılmamış olan diğer deney sonuçları ile maksimum ve minimum değerler de tahmin edilebilmektedir (Zaimoglu, 2003).

Taguchi deney tasarımı uygulanırken belirlenen parametre ve seviyelere göre ortogonal dizinler oluşturulur. En basit ortogonal dizini 2^2 dizinidir. Bu dizinde tüm deneylerin birer tane örneği bulunur. Çizelge 2.9'da 4 parametrelilik ve 4 seviyeli bir ortogonal dizisi gösterilmiştir. Çizelgedeki F1, F2, F3 ve F4 çalışmada seçilen parametreleri gösterirken, her deney numarası satırındaki rakamlar ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir. Bu tablo ile $4^4=256$ deney yapılması yerine 16 adet deney yapılarak elde edilen sonuçlar üzerinde beklenen kaliteye göre değerlendirme yapılabilir.

Çizelge 2.9. L16 ortogonal dizin

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri			
	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

Taguchi yöntemi kullanılarak yapılacak optimizasyonlar aşağıdaki adımlarda gerçekleştirilir:

- 1- Değerlendirilecek parametrelerin belirlenmesi: Deneye başlamadan önce ilk olarak neyin araştırılacağı belirlenmesi gerekmektedir. Parametreler seçilirken hedeflenen ürün kalitesini neyin etkileyip neyin etkilemediği

araştırılmak istenebilir. Buna göre parametre sayısı isteğe göre artırılır ya da azaltılır.

- 2- Belirlenen parametrelere göre seviyelerin seçilmesi: Parametrelerin seviyeleri en az iki olarak belirlenebilirken, daha fazlası için bir sınırlama yoktur. İki'den fazla seviye belirlendiğinde farklı kademelerde değerler verilir. Seviye sayısı arttıkça deney tasarımıdaki gözlem sayısı artar ve buna bağlı olarak da rastgele etkiler oluşabilir.
- 3- Uygun ortogonal dizinin belirlenmesi: Ortogonal diziler temel olarak hangi denemede hangi parametreye hangi seviyenin kullanılacağını belirler. Ortogonal dizin, ürün ortalaması ve varyansında etkili olan birçok faktörle aynı anda daha kısa sürede çalışmayı sağlamaktadır. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün minimum sayıda test ile değerlendirilmesini sağlamasıdır. Ortogonal dizin belirlenirken deneylerin maliyeti, yapılış sırası göz önünde bulundurulmalıdır.
- 4- Kontrol faktörleri ve etkileşimlerin sütunlara atanması: Belirlenen parametre ve seviyelere göre oluşturulacak olan ortogonal dizin için parametreler ve seviyelerinin sütunlara atanması aşamasıdır.
- 5- Deneylerin yapılması: Ortogonal dizinler sütunlara yerleştirildikten sonra deney planı kurulmuş olur. Belirlenen parametre ve faktörlere göre koşullar sağlanarak deneyler gerçekleştirilir. Bu aşamadan sonra deneylerin hangi sırayla yapılacağına karar vermek gerekir.
- 6- Optimum seviyelerin seçilmesi: Faktörlerin incelenip, en uygun faktör seviyelerinin tespit edilmesi gerekmektedir.
- 7- Doğrulama deneylerinin yapılması: Deney tasarımı sonucunda belirlenen kritik faktör veya etkileşimlerin ürün performansını etkileyip etkilemediğine bakılarak, faktörler için uygun seviyeler belirlenmekte ve deneyler yapılmaktadır. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, yapılan optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır
 - Eğer doğrulama deneyi sonucunda elde edilen değerler, tahmini hedeflenen değerlere yakınsa, daha doğrusu deney istenilen sonuçları vermeye başlamışsa çalışma sonlandırılır. Bulunan sonuçlar en uygun değerler olarak kabul edilir.
 - Eğer doğrulama deneyi sonucunda elde edilen değerler, tahmini hedeflenen değerlerden uzaksa o zaman modelde bir başarısızlık var demektir. Bu durumda proses yeni baştan tekrar incelenip hatalar tespit edilmeye çalışılır.

Modelde geri besleme ile elde edilen bilgiler doğrultusunda uygun değişikler yapılarak model tekrar çalıştırılır (Canyılmaz, 2001).

Taguchi, deney tasarımında analiz değişkeni ya da performans kriteri olarak kullanılması amacıyla, ‘‘sinyal/gürültü (signal/noise) oranı’’ denilen, kriter tanımlamıştır. Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla, deney tasarımında performans kriteri olarak kullanılmak üzere, sinyal/gürültü (S/N) oranı olarak bir dizi istatistik geliştirmiştir. S/N oranının kullanılmasının asıl amacı, deneylerin tekrarlanması ile dış koşulların veya kontrol edilemeyen değişkenlerin alınan sonuçlar üzerindeki etkisini görebilmektir. Bu aşamada, her bir yanıt için sinyal gürültü oranı hesaplanır. Taguchi yetmişten fazla sinyal-gürültü oranı geliştirmiştir. Bunlardan geniş ölçüde uygulanan üç tane Sinyal/Gürültü oranı aşağıda verilmiştir (Zaimoglu, 2003):

En küçük en iyi yanıt için;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2.3)$$

En büyük en iyi yanıt için;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2.4)$$

Nominal en iyi yanıt için;

$$S/N = 10 \log(Y^2/S^2) \quad (2.5)$$

Taguchi yönteminde kullanılan S/N oranı aşağıdaki bağıntı ile bulunmaktadır:

$$S/N = -10 \log (MSD) \quad (2.6)$$

Burada MSD, ortalama değerlerden ziyade hedef değer etrafındaki sapma karelerinin ortalaması olarak tanımlanmaktadır.

Hedef değerin maksimum olması için;

$$MSD = \left(\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n \quad (2.7)$$

Hedef değerin minimum olması için;

$$MSD = \frac{Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2}{n} \quad (2.8)$$

Hedefin bilinen belirli bir değer olması için;;

$$MSD = \left[\frac{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2}{n} \right] \quad (2.9)$$

bağıntılarını kullanılmaktadır.

Yukarıda S/N oranları için belirtilen eşitliklerde ‘‘n’’ bir deneydeki tekrar sayısı ‘‘y’’ performans karakteristiği değerini ifade etmektedir.

En küçük en iyi yanıtı için kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır. En büyük en iyi yanıtı için kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sonsuzdur. Nominal yani hedef değer en iyi durumdayken Y için belli bir hedef değer verilmiştir.

Bu yöntemle göre yapılmış bir deney tasarımında, optimum deney koşullarında beklenen hedef değerler ile deneylerin yapılmadığı durumlar için beklenen değerler (Y_{bek}) hesaplanabilir. Bu değer, optimum koşullardaki faktör seviyelerinin ortalama S/N değerleri ve bütün tasarımın ortalama S/N değeri göz önüne alınarak belirlenmektedir.

$$Y_{\text{beklenen}} = \sqrt{\frac{1}{\text{MSD}}} \quad (2.10)$$

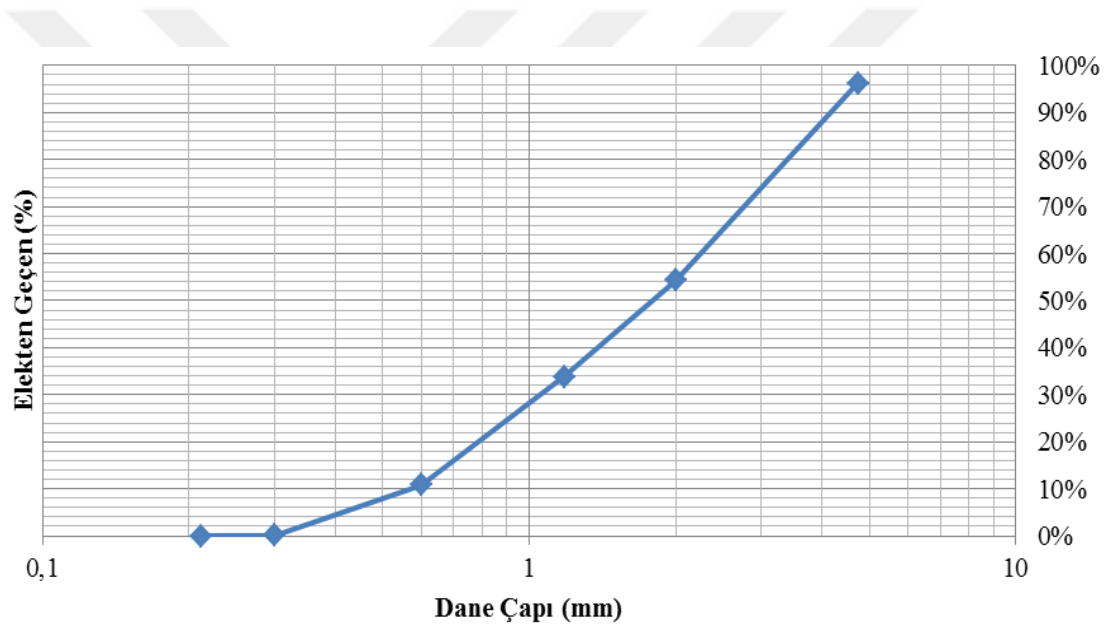


3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kum

Çalışma kapsamında deneylerde kullanılacak olan kum öncelikle 40 nolu (0.420 mm çaplı) elek yardımı ile yıkamalı analiz yapılarak elenmiştir. Yıkanan kumlar etüvde 100 °C’de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kullanılan kumun bazı geoteknik özellikleri Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kum numunelerine ait dane dağılımı eğrisi Şekil 3.1’ de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kuma ait granülometre eğrisi

Çizelge 3.1. Kuma ait bazı geoteknik özellikler

Kumun Özellikleri	Değer
Tane birim hacim ağırlığı (kN/ m^3)	26.50
γ_{kmin} (kN/ m^3)	15.20
γ_{kmax} (kN/ m^3)	19.40
Max. Boşluk Oranı, e_{max}	0.74
Min. Boşluk Oranı, e_{min}	0.36

3.1.2. Polyester

Deneyleerde yapıştırma ve mukavemetinin yanı sıra tabaka ile bağlanmayı arttıran doymamış polyester (Turkuaz Polyester - TP100 Döküm Tipi Polyester Reçine) kullanılmıştır. Doymamış polyesterin sertleşmesinde; hızlandırıcı (H) olarak Kobalt Naftanat, sertleştirici (S) olarak da Metil Etil Keton Peroksit kullanılmıştır. Doymamış polyesterin üretici firma katalogundan temin edilen bazı özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Deneyleerde doymamış polyester Taguchi yöntemine göre belirlenen oranlarda kullanılmış, buna bağlı olarak da hızlandırıcı ve sertleştiricinin oranları değişiklik göstermiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan doymamış polyestere ait özellikler

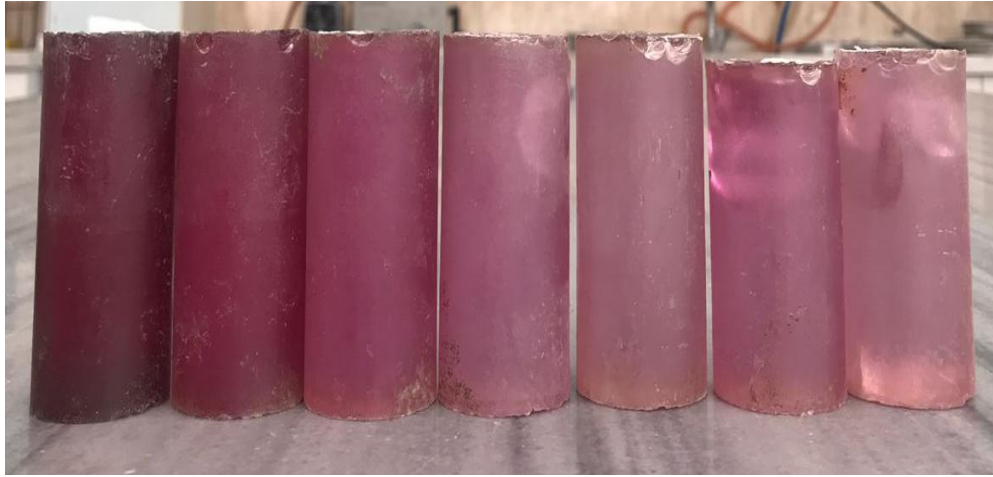
Özellikler	Polyester
Adı	TP100 Döküm tipi
Yoğunluk	1.17 t/m ³
Renk	şeffaf
Asit Değerı	<24 mg KOH/gr
Viskozite	350-500 cp
Monomer Oranı	%31-%36
Pik Derecesi	160°C -170 ° C
Jel Süresi	400-600
Çekme Dayanımı	65 MPa
Eğilme Dayanımı	120 MPa
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı	60 °C

3.2. Yöntem

3.2.1. Polyester numunelerinin hazırlanması

Doymamış polyesterin tek başına serbest basınç mukavemetini ve etkin H, S oranlarını belirlemek amacıyla ön deneyler yapılmıştır. Her bir numune için 100 gr doymamış polyester ile sırasıyla %0,2, %0,3, %0,5 ve %1 oranlarında hızlandırıcı, 2 ve 4 oranlarında H/S kullanılmıştır. İlk olarak 100 gr doymamış polyester içerisine sırasıyla H ve S ilave edilmiştir.

Karışımın homojen olması için karıştırma işlemi her aşamada devam ettirilmiştir. Karıştırma süresi 3-5 dakika olarak uygulanmıştır. Karıştırma tamamlandıktan sonra karışım, 38 mm çaplı ve 76 mm yüksekliğe sahip silindirik kalıplara dökülmüştür. H ve S’nin oranlarına göre numunelerin rengi açık pembe, pembe ve koyu pembe olarak elde edilmiştir (şekil 3.2.). H ve S oranları arttıka reaksiyon ısısının arttığı görülmüş ve sertleşme sonra numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Polyester numuneleri

3.2.2. Kum-Polyester numunelerinin hazırlanması

Çalışmada su, polyester, hızlandırıcı ve hızlandırıcı/sertleştirici oranları olmak üzere 4 parametre seçilmiş ve bu parametrelere bağlı olarak da 4 adet seviye belirlenmiştir. Başlangıç su oranı ve polyester oranı, kuru kum ağırlığının %'si, hızlandırıcı ve sertleştirici oranları ise kullanılan polyester miktarının %'si olarak alınmıştır. Seçilen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Seçilen parametreler ve seviyeleri

Seviyeler	Parametreler			
	F1 Başlangıç Su Oranı (%)	F2 Polyester Oranı (%)	F3 Hızlandırıcı Oranı (%)	F4 H/S Oranı (%)
1	0	15	0.75	1.5
2	2	30	1.50	3.0
3	4	45	2.25	4.5
4	6	60	3.00	6.0

F1 ve F2 kuru kum ağırlığının yüzdesi (%), F3 ve F4 polyester ağırlığının yüzdesidir (%).

Deneyler için seçilen 4 parametrelili ve 4 seviyeli L16 ortogonal dizin çizelge 3.4.'te gösterilmiştir. Seçilen ortogonal dizine göre hazırlanan kum-polyester karışımları laboratuvarında her bir deney numarası için 4 adet numune olacak şekilde hazırlanmıştır.

Çizelge 3.4. Taguchi yöntemine göre belirlenen L16 ortogonal dizin

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1	0	15	0.75	1.5
2	1	2	2	2	0	30	1.50	3.0
3	1	3	3	3	0	45	2.25	4.5
4	1	4	4	4	0	60	3.00	6.0
5	2	1	2	3	2	15	1.50	4.5
6	2	2	1	4	2	30	0.75	6.0
7	2	3	4	1	2	45	3.00	1.5
8	2	4	3	2	2	60	2.25	3.0
9	3	1	3	4	4	15	2.25	6.0
10	3	2	4	3	4	30	3.00	4.5
11	3	3	1	2	4	45	0.75	3.0
12	3	4	2	1	4	60	1.50	1.5
13	4	1	4	2	6	15	3.00	3.0
14	4	2	3	1	6	30	2.25	1.5
15	4	3	2	4	6	45	1.50	6.0
16	4	4	1	3	6	60	0.75	4.5

Numunelerin hazırlanması, şu aşamalarda gerçekleştirilmiştir:

- Zemin hazırlama
- Katkı hazırlama
- Zemin-katkı karıştırma
- Kalıplama, sıkıştırma ve kütleme

Zemin hazırlanırken ilk olarak 40 nolu (0.420 mm çaplı) elek yardımı ile yıkamalı analiz yapılarak elendikten sonra kurutulan kum, su ile yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırılmış, karıştırma sonunda kum-su çamuru elde edilmiştir. Çamurun akışkanlığı içine katılan suyla orantılı olarak değişmektedir.

Katkı hazırlama aşamasında ayrı bir kapta, belirlenen parametre seviyelerine göre polyester-H-S karışımı hazırlanmıştır. Yapılan deneylerde, oluşabilecek beklenmedik durumları önlemek amacıyla polyester üzerine önce hızlandırıcı daha sonra sertleştirici ilave edilmiştir.

Zemin-katkı karıştırma aşamasında oluşturulan bu karışım, kum-su karışımına ilave edilip sertleşme sürelerine göre, homojen bir karışım sağlanacak şekilde karıştırılmıştır. Buradaki karıştırma işleminin süresi de polyesterin, H-S oranlarına ve su muhtevasına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Karışımlar, 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde kalıplara sıkıştırılarak konulmuştur. Kalıpların iç kısımları, numunelerin ekstrüzyonunu kolaylaştırmak için

ince bir film tabakası şeklinde yağlanmıştır. Alt kısımları da geçirimsiz olacak şekilde kapatılmıştır. Sertleşme süreleri kaydedilmiştir. Sertleşmesi biten numuneler kalıptan çıkarılarak deneylere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3. Kalıpta bekletilen ve kalıptan çıkarılan numuneler

3.2.3. Serbest basınç mukavemeti deneyi

Numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri için kalibrasyonu laboratuvarında yapılan plaka yükleme deney aleti kullanılmıştır. Plaka yükleme deneylerinde zemine normal yükün verildiği hidrolik kriko (10-20 ton kapasiteli), pompa bölümü ve piston bölümü (Şekil 3.4.) olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Bu iki parçanın arası hidrolik hortum ile bağlanarak pistonu yağ basma sırasındaki hidrolik

deney düzeneği sarsılması en düşük seviyeye indirilmiş olmakta, ölçülen düşey deformasyon verilerini pompa titreşiminin etkilemesi önlenmektedir. Pompa üzerindeki dijital ekrandan uygulanan yük okunabilmektedir. Ölçümün doğruluğunu sağlamak için krika düzeneği sık aralıklarla kalibre edilmelidir.

Silindir kalıplardan çıkartılan kum-polyester numuneleri 10 ton kapasiteli plaka yükleme deney aletine yerleştirildikten sonra belli aralıklarla yükleme - boşaltma işlemi yapılmış ve bu değerlerde elde edilen deformasyonlar kaydedilmiştir (Şekil 3.4). Kırılma anındaki en yüksek basınç değerleri dijital yük okuma aparatından okunmuştur.



Şekil 3.4. Kalibre edilen plaka yükleme deney aleti

3.2.4. Sertleşme süresi tayini

Hazırlanan numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra, sertleşme sürelerinin belirlenmesi için koni penetrasyon aleti kullanılmıştır. Süre tayinin belirlenmesinde 2 mm oturmaya karşılık gelen süre esas alınmıştır. Kalıplara konulan numuneler, koni penetrasyon aletine yerleştirildikten sonra (Şekil 3.5) batma düğmesine 5 sn süreyle basılı tutulmuş ve deplasman sayacında 2 mm batmaya karşılık gelen süreler kaydedilmiştir.



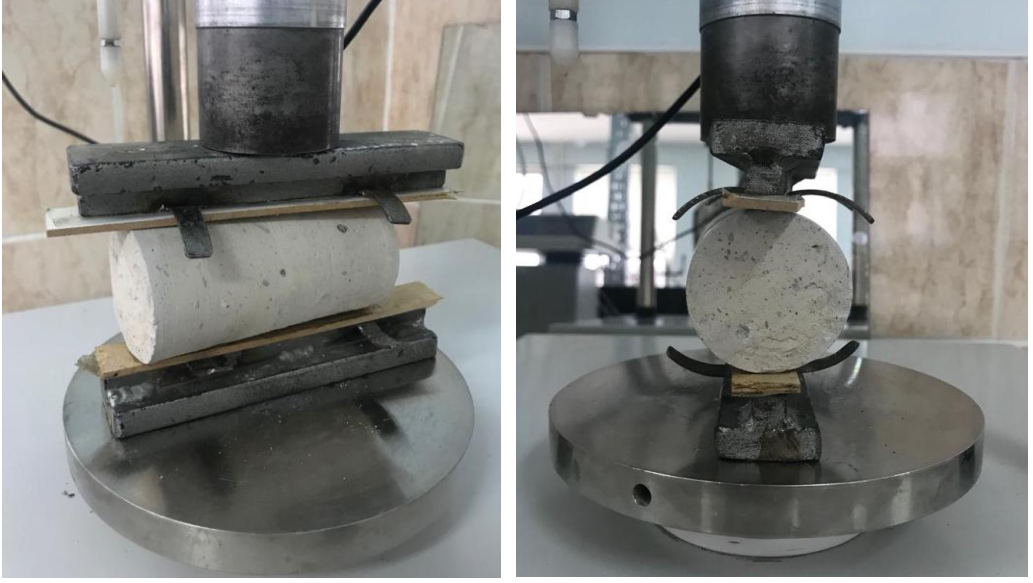
Şekil 3.5. Sertleşme sürelerinin tayininde kullanılan koni penetrasyon aleti

3.2.5. Yarmada çekme deneyi

Yarmada çekme dayanımı (Brazilian test) malzemelerin çekme dayanımını indirek bir yaklaşımla bulmada kullanılır. Deney prosedürüne göre silindirik numuneler basınç altında kırılırken, kırılma anındaki gerilme aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır:

$$\delta_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.1)$$

δ_t , yarmada çekme dayanımı, P uygulanan maksimum yük, l ve d sıkışmış numunenin uzunluğu ve çapıdır. Bu bağıntı beton gibi kırılğan malzeme için tasarlanmıştır. ASTM D3967-08 standart yöntemine uygulanan çekme deneyi, 5 cm çap ve 10 cm boyda numunelerin Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yatay yerleştirilerek gerçekleştirilir. 4.00 mm/dk gerilme oranı için ayarlanan 5 mm kalınlığında, 5 mm genişliğinde ve 50 mm uzunluğunda çelik şeritler sıkıştırma test makinesinin yatak blokları arasına yatay olarak yerleştirildi. Yatay yüzeye yerleştirilen ince metal bir yüzeyin yüklenmesiyle ve yük deformasyon ölçümlerini monitör ederek gerçekleştirilir.



Şekil 3.6. Yarmada çekme deneyinde kullanılan aparatlar ve deney aleti

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Kumlu zeminlerin doymamış polyester ile iyileştirilmesini araştırmak için 8 adet polyester numunesi ve 16 farklı polyester-kum numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra sertleşme süreleri kaydedilmiştir. İyileştirilmiş numunelerin 28 günlük serbest basınç mukavemetleri ve yarmada çekme mukavemetleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

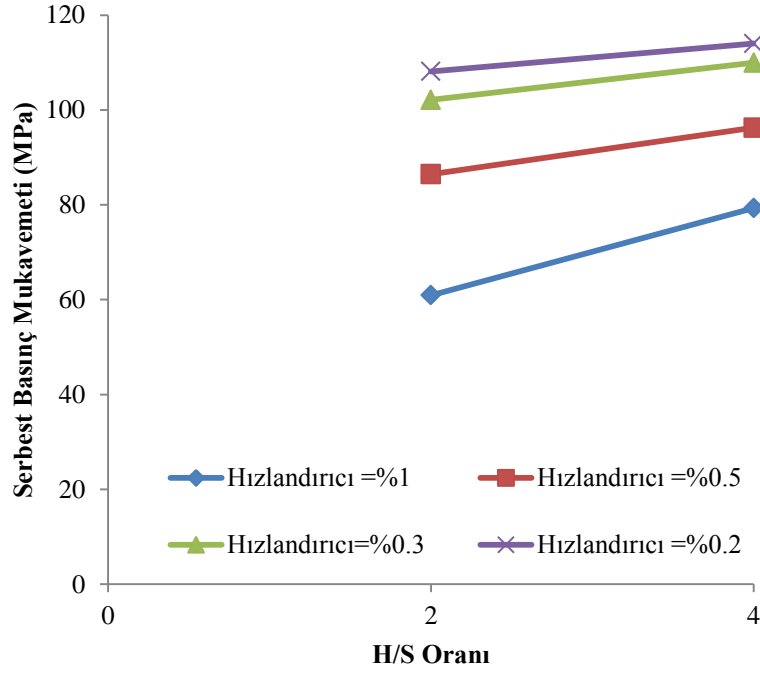
4.1. Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetleri

Polyester numunelerinin farklı hızlandırıcı ve sertleştirici oranlarında hazırlanan 28 gün sonundaki serbest basınç mukavemeti değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

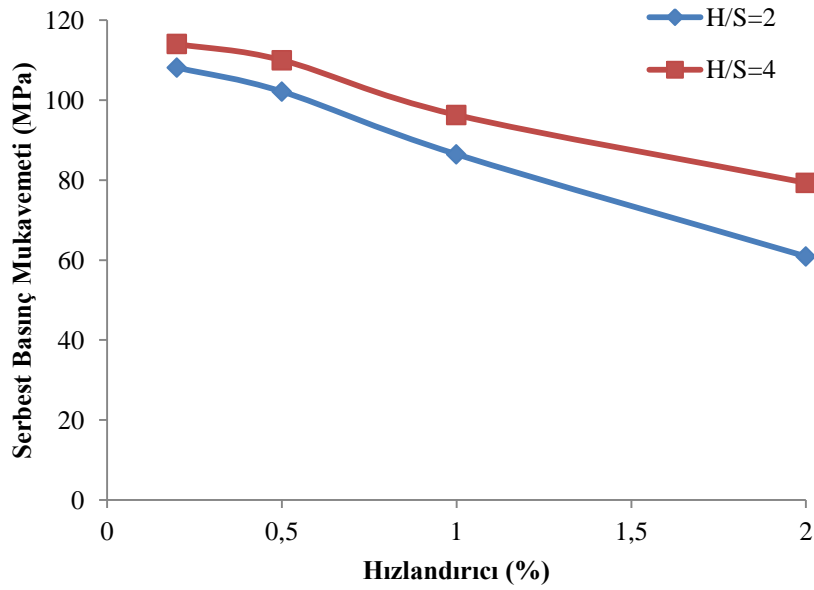
Çizelge 4.1. Farklı hızlandırıcı ve sertleştirici oranlarında hazırlanan polyester numuneleri

Deney Numarası	Hızlandırıcı Oranı	H/S Oranı	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)
1	2	2	60.91
2	2	4	79.32
3	1	2	86.45
4	1	4	96.28
5	0.5	2	102.14
6	0.5	4	109.98
7	0.2	2	108.12
8	0.2	4	114.02

28 günlük polyester numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1 sonuçları kullanarak çizilen grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.1’de farklı H ve S yüzdelerinde hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri verilmiştir. Serbest basınç mukavemetleri 60.94 MPa ile 114.02 MPa aralığında değişmektedir. En yüksek mukavemet değeri H’nın %0,2 ve H/S oranının 4 olduğu oranlarda 114.02 MPa olarak elde edilmiştir. H/S oranının artışına bağlı olarak tüm H yüzdelerinde serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.2’de, H yüzdesinin azalmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Bagherinia (2013)’nin yaptığı çalışmada da benzer bulgular elde edildiği görülmektedir. H yüzdesinin azalması ile serbest basınç mukavemetinin artması maliyet açısından da olumlu bir sonuçtur.



Şekil 4.1. H/S oranının serbest basınç mukavemetine etkisi



Şekil 4.2. Hızlandırıcı yüzdesinin serbest basınç mukavemetine etkisi

4.2. Kum-Polyester Numunelerinin Serbest Basınç Mukavemetlerinin Değerlendirilmesi

Çizelge 3.3' te verilen seviye ve parametrelere göre hazırlanan polyester ile iyileştirilmiş kum numunelerinin 28 gün sonunda elde edilen serbest basınç mukavemetleri Çizelge 4.2' de verilmektedir. Çizelgeye bakıldığında serbest basınç mukavemeti değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. %60 polyester oranında su katılmadan hazırlanan 4 nolu numunenin serbest basınç mukavemetinin 53.64 MPa' ya kadar çıktığı görülmektedir. En düşük serbest basınç mukavemeti değeri ise 5 nolu deneyde 9.83 MPa olarak elde edilmiştir.

Su eklendikten sonra mukavemetlerde düşüş meydana gelmiştir. Su ilavesiz olarak yapılan deneylerde ortalama basınç değeri 42.14 MPa iken, başlangıç su oranı %2 iken yapılan deneylerde ortalama basınç değeri 20.33 MPa'dır. Başlangıç su oranı %4 iken yapılan deneylerde ortalama 24.23 MPa; başlangıç su oranı %6 iken yapılan deneylerde ortalama 20.33 MPa'dır. Su katkısız olarak yapılan deneyler ile su ilave edilerek yapılan deneyler arasında mukavemet bakımından yaklaşık %50 oranında bir düşüş meydana gelmiştir.

Çizelge 4.2. 28 günlük numunelerin serbest basınç mukavemeti değerleri

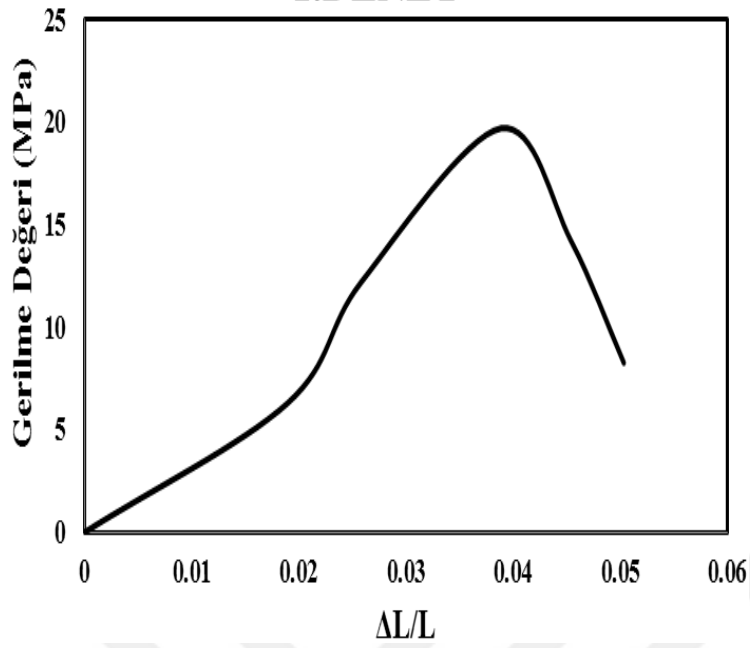
Deney Numarası	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları				Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	
1	1	1	1	1	0	15	0.75	1.5	19.70
2	1	2	2	2	0	30	1.50	3.0	43.77
3	1	3	3	3	0	45	2.25	4.5	51.47
4	1	4	4	4	0	60	3.00	6.0	53.64
5	2	1	2	3	2	15	1.50	4.5	9.83
6	2	2	1	4	2	30	0.75	6.0	16.54
7	2	3	4	1	2	45	3.00	1.5	26.01
8	2	4	3	2	2	60	2.25	3.0	28.97
9	3	1	3	4	4	15	2.25	6.0	11.21
10	3	2	4	3	4	30	3.00	4.5	22.46
11	3	3	1	2	4	45	0.75	3.0	27.39
12	3	4	2	1	4	60	1.50	1.5	35.88
13	4	1	4	2	6	15	3.00	3.0	17.13
14	4	2	3	1	6	30	2.25	1.5	20.09
15	4	3	2	4	6	45	1.50	6.0	25.02
16	4	4	1	3	6	60	0.75	4.5	19.10

Şekil 4.3'te numunelerin serbest basınç mukavemeti deneyinden sonraki halleri gösterilmektedir. Şekilde görüleceği gibi, deneyden sonra numunelerde gözle görülür bir kırılma ve parçalanma olmadığı açıktır. Testteki bu durum, polyesterin hızlı kürlenme ve yapışma özelliklerine bağlanmaktadır. Benzer bir şekilde, araştırmacılar çalışmalarında kullanılan polimerlerin daha kısa kürlenme süreleri için serbest basınç dayanımını arttırdığını bulmuşlardır (Al-Khanbashi ve Abdalla, 2006; Ateş, 2013). Bu dayanım artışının nedeni, kum parçacıklarının polyester ile yeni bir katı yapı oluşturmasından dolayı olduğu kabul edilir. Polyesterin kum parçacıklarıyla çapraz bağlanması (polyester kum parçacıklarına yapışması) bu yeni katı yapı ile sonuçlanır. Hem polimer hem de polyester üzerinde çalışmış araştırmacılar tarafından da benzer bulgular bildirilmiştir (Al-Khanbashi ve Abdalla, 2006; Ateş, 2013; Akbulut ve ark., 2015).

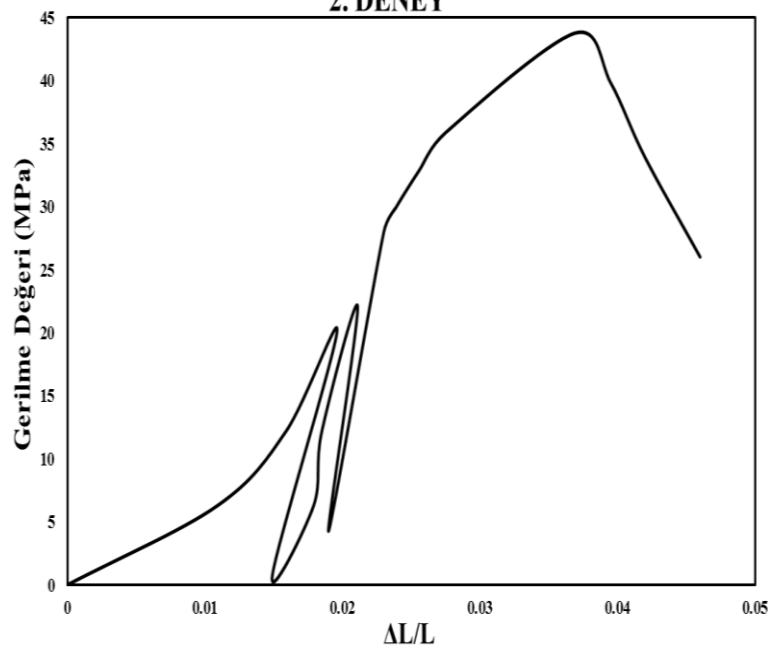


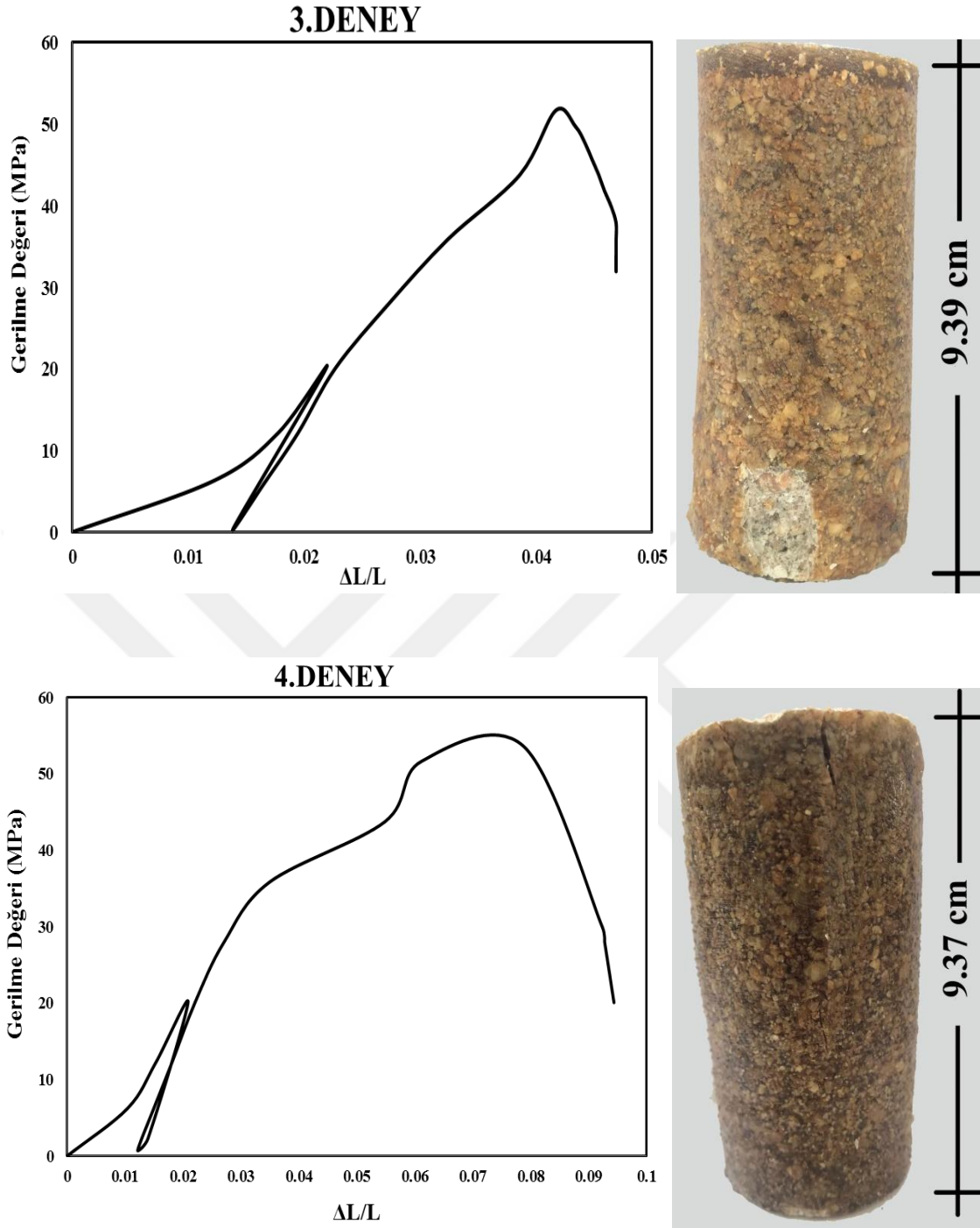
Şekil 4.3. Serbest basınç deneyinden sonra bazı numunelerin görünümü

1.DENEY



2. DENEY





Şekil 4.4. 1-4 nolu deneyler için gerilme-birim deformasyon grafikleri ve numunelerin kırılmadan sonraki boyları

Şekil 4.4'e bakıldığında numunelerde polyester oranı arttıkça birim deformasyonlarının arttığı görülmüştür. Grafikler sünek bir kırılmanın meydana geldiğini göstermektedir. Sünek kırılmada, kırılma öncesinde numuneler önemli ölçüde plastik deformasyona uğrar. Bu nedenle kırılan parçaların birleştirilmesiyle elde edilen şekil orijinal numune şeklinden çok farklıdır. Sünek kırılmada parçada büyük ölçüde

kesit daralması (büzülme) meydana gelmekte ve bu sırada büyük oranda enerji absorbe edilmektedir. Sünek kırılma, boşlukların çekirdeklenmesi ile başlar. Çatlak ilerlemesi ve kırılma söz konusu boşlukların büyüyerek birbirleri ile birleşmesi sonucu meydana gelir (Pürçek, 2014).

Aynı malzeme içerisindeki boşluklar ve istenmeyen kalıntı miktarının varlığı da erken kopmaya neden olur ve malzemenin sünekliğini azaltır. Polyester oranına bağlı olarak kum tanecikleri arasındaki boşluklar polyesterle dolduğundan, numunelerdeki erken kopma önlenmiş böylece süneklik artmıştır. Sünek kırılmada, kırılma anındaki birim kısalmalar diğerlerine oranla daha büyüktür. Sünek malzemeler deney sırasında kırılmadan deforme olur ve şişme göstererek yığılırlar (Pürçek, 2014). Sünekliğe bağlı olarak da numunelerde birim deformasyonu arttığından dolayı 1 nolu deneyden 4 nolu deneye doğru numunelerin son boyları azalmıştır.

Çizelge 4.2’de verilen karışımların 28 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları kullanılarak L16 ortogonal dizin için S/N analizleri yapılmıştır. S/N değerleri ile aynı zamanda parametre ve seviyelerin sonuca etkileri belirlenebilir. Veri tablosu (Çizelge 4.3.) incelenirken, “en büyük” değer aranır. Çünkü burada hesaplanan ifadeler, parametrelerin S/N yanıt değerlerini vermektedir. Hesaplanan en yüksek S/N değerleri; Başlangıç su oranı 1. seviyesinde 31.88; polyester oranı 4.seviyesinde 30.14; hızlandırıcı oranı 4. seviyesinde 28.65 ve H/S oranı 2.seviyesinde 28.87 olarak elde edilmiştir.

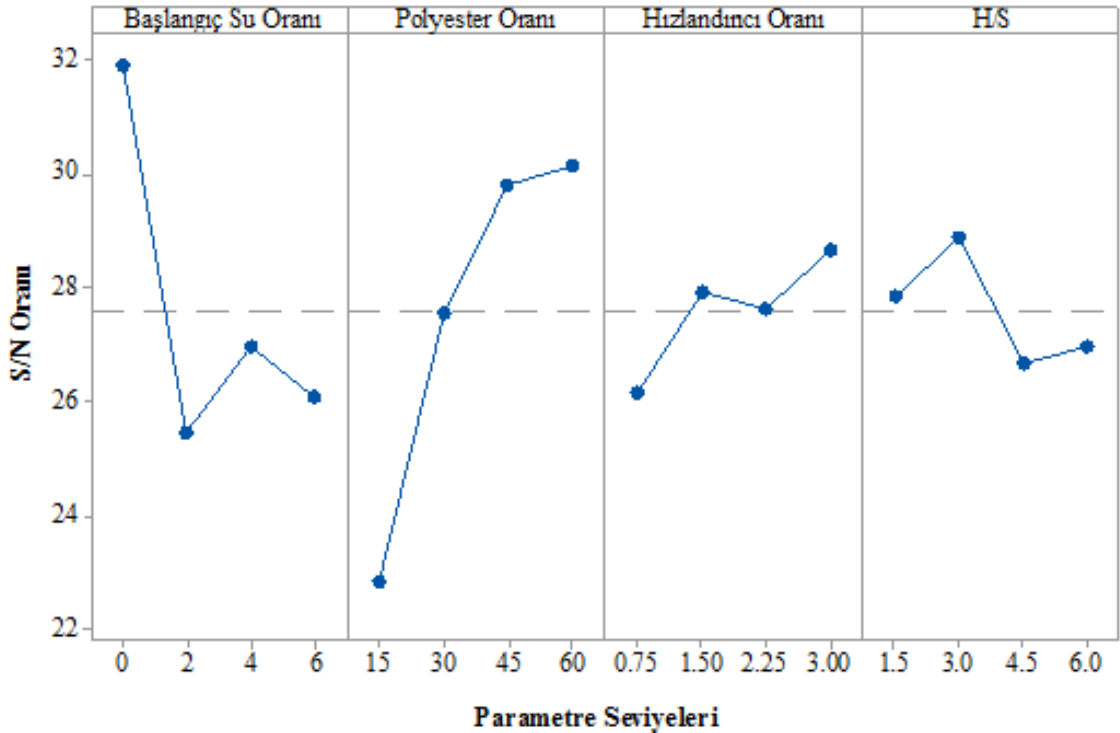
Çizelge 4.3. Parametre seviyelerinin serbest basınç mukavemeti için S/N değerleri

Parametre	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye	4.Seviye
Başlangıç Su Oranı	31.88	25.44	26.97	26.08
Polyester Oranı	22.85	27.57	29.81	30.14
Hızlandırıcı Oranı	26.16	27.94	27.63	28.65
H/S Oranı	27.84	28.87	26.68	26.98

Parametrelerin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren grafik Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Grafikteki yatay doğru, deneylerdeki ortalama S/N değerini göstermektedir. Başlangıç su oranı 1.seviyesindeyken grafik pik noktasında olup genel ortalamadan oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu değerden sonra serbest basınç mukavemeti hızla azalarak ortalamanın altına düşmüştür. Su oranına bağlı olarak

serbest basınç mukavemetinde meydana gelen bu ani düşüşün sebebinin, polyesterin, neme maruz kaldıklarında veya uzun süre su ile temas ettiğinde kimyasal değişikliklerden ve bozulmalardan zarar gördüklerinden dolayı yapışkan mukavemeti kaybına neden olduğundan dolayı meydana geldiği düşünülmektedir (Sargent ve Ashbee, 1984; Belliard ve ark., 1988). Ayrıca polyester sulu ortamlarda bulunduğu su moleküllerinin polimer zincirleri arasına girerek bağları koparıp yapının yumuşamasına neden olduğundan (Marais ve ark., 2000) dolayı olduğu düşünülmektedir.

Polyester oranının etkisine bakıldığında, polyesterin katkı miktarı arttıkça numunelerin serbest basınç dayanımları da artmaktadır (Al-Khanbashi ve Abdalla, 2006; Ateş, 2013; Xing ve ark., 2018). Bunun sebebinin polyester oranı artırılarak, polimer ağı arasındaki çapraz bağlanma arttığından (Ateş, 2013; Verma, 2013) ve kum-polyester ara yüzünün bağlanma mekanizmalarının artırılmasına yol açtığından (Ateş, 2013) dolayı olduğu düşünülmektedir. Polyester oranının 1. seviyesi ile 4. seviyesi arasındaki farkın büyüklüğü etki derecesini göstermektedir. Hızlandırıcı ve H/S oranlarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi çok fazla olmayıp ortalamaya yakın değerlerdir.



Şekil 4.5. Parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri

Kum-polyester karışımlarının 28 günlük serbest basınç mukavemetine, polyester, su, hızlandırıcı ve H/S oranının etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmış ve sonuçlar çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Parametrelerin serbest basınç mukavemeti için varyans analizi tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki oranı (%)
Başlangıç Su Oranı	3	1302.19	434.06	13.8	0.029	49.86%
Polyester Oranı	3	972.88	324.29	10.31	0.043	37.25%
Hızlandırıcı Oranı	3	204.39	68.13	2.17	0.271	7.83%
H/S Oranı	3	37.8	12.6	0.4	0.764	1.45%
Hata	3	94.35	31.45			3.61%
Toplam	15	2611.62				100.00%

Serbestlik derecesi n-1 olup burada her parametre için 4 seviye olduğundan serbestlik derecesi tüm değerler için 3'tür.

Burada her bir parametre için "P" değerleri incelenir. Modeldeki yanıt ve her terim arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek ve hipotezi değerlendirmek için terimin p-değeri anlamlılık düzeyiyle karşılaştırılır. Hipotez, terimin katsayısının sıfıra eşit olduğu ve terim ile yanıt arasında bir ilişki olmadığı anlamına gelir. Eğer herhangi bir parametre için hesaplanan P değeri 0.05' ten küçük ise bu durumda bu parametre, incelenen kalite karakteristiği üzerinde etkilidir. Eğer herhangi bir faktör için hesaplanan P değeri 0.05' ten büyük ise bu durumda bu parametre, incelenen kalite karakteristiği üzerinde etkili olmadığını ya da etkisinin az olduğunu gösterir.

Çizelge 4.4'te görüleceği gibi başlangıç su oranına karşılık gelen P değeri 0.029 ve polyester oranına karşılık gelen P değeri 0.043 olup, P değerleri 0.05'ten küçüktür. Bu durum incelenen kalite karakteristiği olan serbest basınç mukavemet değeri üzerinde başlangıç su oranı ve polyester oranlarının etkili olduğunu gösterir. Hızlandırıcı ve H/S oranlarına karşılık gelen P değerleri 0.05'ten büyük olduğu görülmektedir. Bu durumda bu iki parametrenin serbest basınç mukavemetine etkisinin çok az olduğunu göstermektedir.

F değerleri etki derecelerini gösterir. En büyük F değeri en etkili parametreyi işaret eder. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sırasıyla başlangıç su oranı 13.8, polyester oranı 10.31, hızlandırıcı oranı 2.7 ve H/S oranı 0.4 şeklinde sıralanır.

Serbest basınç oranına etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak görülmektedir. Çizelgede hata satırı deneylerde kontrol edilemeyen etkenlerin tümünün etki değerini göstermektedir. Serbest basınç mukavemetinde etki eden parametreler incelendiğinde en etkili parametrenin %49.86 ile başlangıç su oranı olduğu görülmektedir. Başlangıç su oranının kumun ağırlıkça %0, %2, %4, %6 oranlarında az bir miktarda kullanılmasına rağmen etkisinin büyük olmasının sebebinin, hidrofobik özellikte olan polyesterle aralarındaki etkileşimden kaynaklandığı (Marais ve ark., 2000) düşünülmektedir. Polyester oranının %37.25, hızlandırıcı oranının %7.83, H/S oranının ise % 1.45 oranında etkili olduğu görülmektedir.

4.4. Optimum Karışım Oranlarının Belirlenmesi ve Kontrol Deneylerinin Yapılması

Taguchi optimizasyon metodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmada serbest basınç mukavemeti için optimal sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar bazen mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen de yapılan deneylerin haricinde bir deney sonucu olabilmektedir. Nitekim bu çalışmada da optimum oranları veren deney kombinasyonu, yapılan 16 deneyden farklı olacak şekilde elde edilmiştir. Optimum oranlar belirlenirken hem S/N değer çizelgesi (Çizelge 4.3), hem de parametrelerin etki grafiği (Şekil 4.5) kullanılabilir.

S/N değer çizelgesine (Çizelge 4.3) bakıldığında, S/N değeri en büyük olan sonuç, optimum değeri veren seviyedir. Bu durumlar dikkate alındığında optimum değeri sağlayan seviyelerin; başlangıç su oranı için en büyük değer, 1. seviyede %0 oranı ile, polyester oranı için en büyük değer; 4. seviyede %60 oranı ile, hızlandırıcı oranı için en büyük değer; 4. seviyede %3 oranı ile, H/S oranı için en büyük değer; 2. seviyede 3 oranı ile sağlandığı görülmektedir.

Parametrelerin etki grafiği (Şekil 4.4) incelendiğinde ise her bir parametre için işaretli her bir nokta farklı seviyeleri göstermektedir. Bu noktalardan grafiksel değeri en büyük olan, optimum şartı gerçekleştiren seviyeyi vermektedir. Grafik incelenip en büyük değeri gösteren noktalar belirlendiğinde; başlangıç su oranının 1. seviyedeyken, polyester oranının 4. seviyedeyken, hızlandırıcı oranının 4. seviyedeyken ve H/S oranının 2. seviyedeyken en yüksek değerde olduğu görülmektedir.

Taguchi metodu ile yapılan optimizasyon sonucunda başlangıç su oranı 1. seviyede, polyester oranı 4. seviyede, hızlandırıcı oranı 4. seviyede, H/S oranı 2. seviye

kombinasyonuna sahip deneyin optimum sonuçları sağladığı tespit edilmiştir. Tüm deneylerin tamamlanmasının ardından aynı deney koşulları altında, tespit edilen kombinasyona göre deney bir kez daha tekrarlanır. Bu deneyler kontrol deneyleridir.

Çizelge 4.5. Taguchi yöntemi ile optimize edilmiş deney tasarımı

Parametreler	Seviye	Değer
Başlangıç Su Oranı	1.seviye	%0
Polyester Oranı	4.seviye	%60
Hızlandırıcı Oranı	4.seviye	%3
H/S Oranı	2.seviye	3
Beklenen Basınç Muk. (MPa)		55.38
Doğrulama Deney Sonucu (MPa)		56.60

Doğrulama deneylerinin sonucu incelendiğinde, optimum koşullarda beklenen serbest basınç mukavemeti 55.38 MPa, bu koşullarda yapılan doğrulama deneylerine ait serbest basınç mukavemeti değerine (56.60 MPa) oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, serbest basınç mukavemeti için elde edilen sonuçların yeterli olduğunu ve Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığını göstermektedir.

4.2. Kum-Polyester Numunelerinin Sertleşme Sürelerinin Değerlendirilmesi

Çizelge 3.3'te verilen seviye ve parametrelere göre hazırlanan polyester ile iyileştirilmiş kum numunelerinin kalıplara döküldükten sonra kaydedilen sertleşme süreleri Çizelge 4.6'da verilmektedir.

Çizelge 4.6. Numunelerin sertleşme süreleri değerleri

Deney Numarası	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları				Sertleşme Süreleri (dk)
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	
1	1	1	1	1	0	15	0.75	1.5	1440
2	1	2	2	2	0	30	1.50	3.0	7
3	1	3	3	3	0	45	2.25	4.5	11
4	1	4	4	4	0	60	3.00	6.0	9
5	2	1	2	3	2	15	1.50	4.5	24
6	2	2	1	4	2	30	0.75	6.0	4320
7	2	3	4	1	2	45	3.00	1.5	6
8	2	4	3	2	2	60	2.25	3.0	12
9	3	1	3	4	4	15	2.25	6.0	22
10	3	2	4	3	4	30	3.00	4.5	4
11	3	3	1	2	4	45	0.75	3.0	2880
12	3	4	2	1	4	60	1.50	1.5	27
13	4	1	4	2	6	15	3.00	3.0	10
14	4	2	3	1	6	30	2.25	1.5	8
15	4	3	2	4	6	45	1.50	6.0	18
16	4	4	1	3	6	60	0.75	4.5	7200

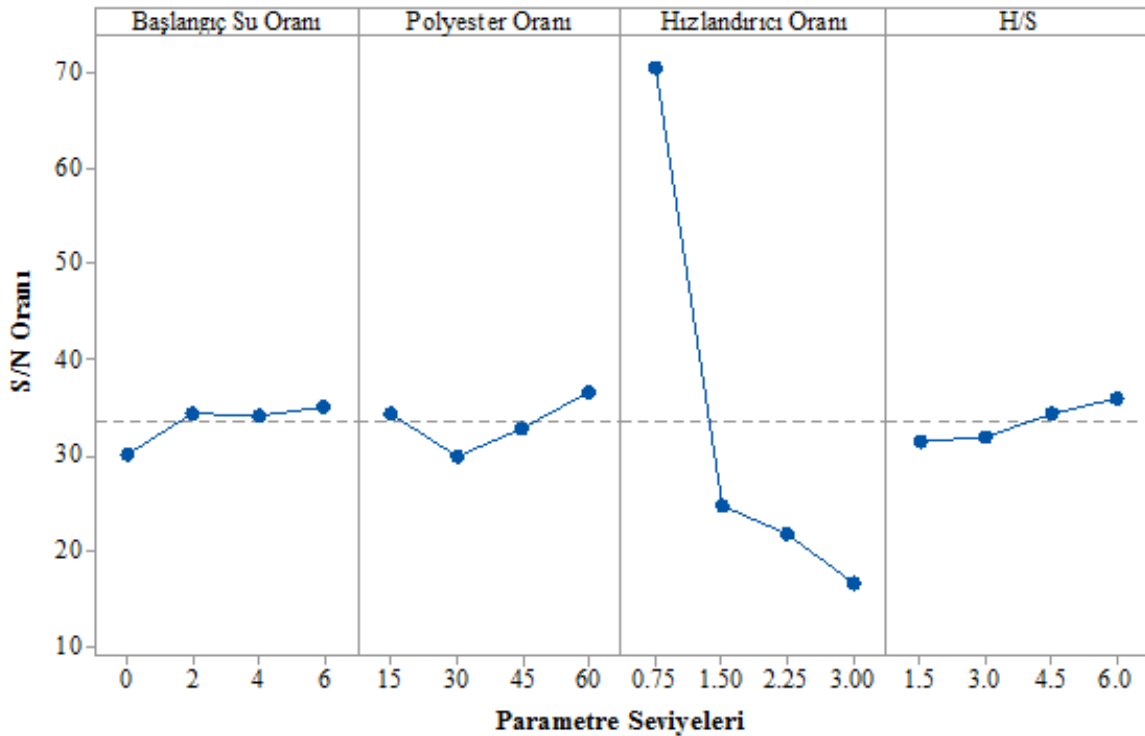
Çizelgeye bakıldığında bazı numunelerin kalıplara döküldükten kısa bir süre sonra sertleştiği, bazı numunelerin de 5 gün gibi fazla bir süre zarfında sertleştiği görülmüştür. En düşük sertleşme süresi 10 no.lu deneyde 4 dk içinde gerçekleşmiştir. En yüksek sertleşme süresi ise 16 no.lu deneyde 7200 dakikada (5 gün) gerçekleşmiştir. Polyesterin kimyasal yapısına bakıldığında, sulu ortamda reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı dışarı verildiğinden, devam eden polimerizasyon için gerekli ısı azalmış olup reaksiyon daha da yavaşlamaktadır (Doğanay ve Ulcay, 2007). Bu yüzden başlangıç su oranının en fazla olduğu deney numaralarından biri olan 16 no.lu deneyde sertleşme süresi bu kadar uzun olmuştur.

Çizelge 4.6'da verilen numunelerin sertleşme sürelerinin sonuçları kullanılarak L16 ortogonal dizin için S/N analizleri yapılmıştır. Hesaplanan en yüksek S/N değerleri; başlangıç su oranı 4. seviyesinde 35.08; polyester oranı 4.seviyesinde 36.61; hızlandırıcı oranı 1. seviyesinde 70.55 ve H/S oranı 4.seviyesinde 35.94 olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Parametre seviyelerinin sertleşme süreleri için S/N değerleri

Parametre	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye	4.Seviye
Başlangıç Su Oranı	30.00	34.37	34.18	35.08
Polyester Oranı	34.40	29.93	32.67	36.61
Hızlandırıcı Oranı	70.55	24.56	21.83	16.67
H/S Oranı	31.35	31.92	34.40	35.94

Parametrelerin sertleşme süreleri üzerindeki etkilerini gösteren grafik şekil 4.6'da gösterilmiştir. Başlangıç su oranı ve polyester oranlarının sertleşme süresi üzerindeki etkisinin ortalamaya yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Hızlandırıcı oranı 1.seviyesindeyken grafik pik noktasında olup genel ortalamadan oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu değerden sonra sertleşme süreleri hızla azalma göstermektedir. Hızlandırıcı oranının arttıkça sertleşme süresinin azaldığı görülmektedir. Hızlandırılmış emülsiyonların, katalizör seviyesine, sıcaklığa, hızlandırıcı konsantrasyonuna ve benzerlerine bağlı olarak yaklaşık 3 ve 30 dakika kadar kısa bir sürede kürlendiği bilinmektedir (Najvar ve ark., 1972). Hızlandırıcı konsantrasyonunun artmasıyla, polyesterin çapraz bağlanması için gerekli enerji sağlanmış olduğundan tepkime süresinin kısaldığı düşünülmektedir. H/S oranının da ortalamaya yakın olduğu görülmektedir.

**Şekil 4.6.** Parametrelerin sertleşme sürelerine etkileri

Numunelerin sertleşme sürelerine; polyester, su, hızlandırıcı ve sertleştiricinin etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmış ve sonuçlar çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Parametrelerin sertleşme süresi için varyans analizi tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki oranı (%)
Başlangıç Su Oranı	3	4539329	1513110	1	0.5	7.00 %
Polyester Oranı	3	4527916	1509305	1	0.501	6.98 %
Hızlandırıcı Oranı	3	46732756	15577585	10.3	0.043	72.03 %
H/S Oranı	3	4540731	1513577	1	0.5	7.00 %
Hata	3	4536391	1512130			6.99 %
Toplam	15	4539329	1513110			100 %

Çizelge 4.4’te görüleceği gibi hızlandırıcı oranı parametresine karşılık gelen P değeri 0.05’ten küçüktür. Bu durum incelenen kalite karakteristiği olan sertleşme süresi üzerinde hızlandırıcı oranının etkili olduğu gösterir. Su, polyester ve H/S oranlarının süre üzerindeki etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında hızlandırıcı oranının 10.3 ile en etkili parametre olduğu görülür. Diğer parametrelerin etki dereceleri birbirine oldukça yakındır.

Sertleşme süresine etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak görülmektedir. Sertleşme sürelerine etki eden parametreler incelendiğinde en etkili parametrenin %72.03 ile hızlandırıcı oranı olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerin etki yüzdeleri birbirine oldukça yakındır.

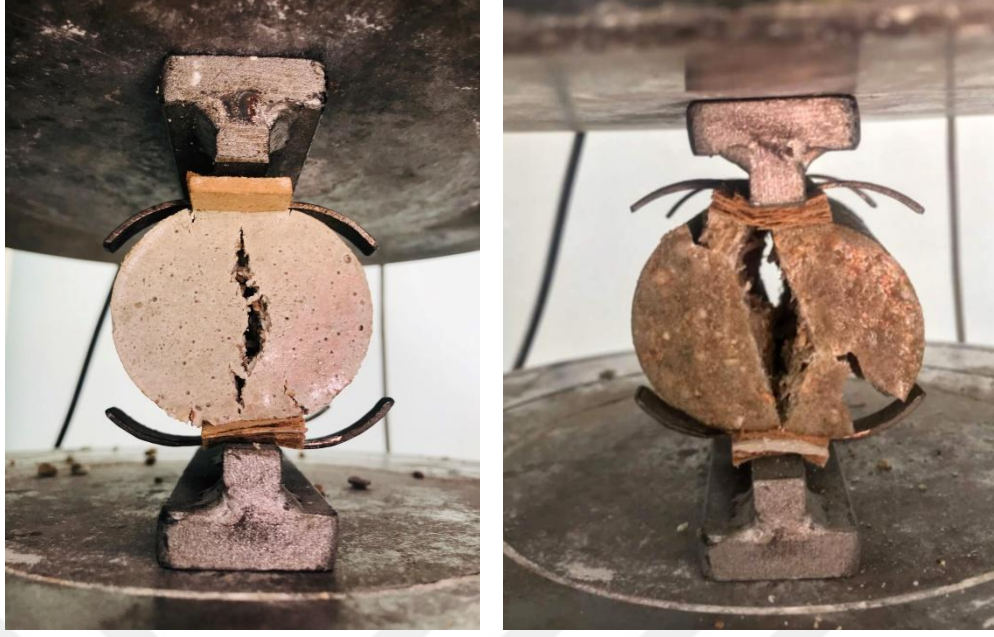
4.3. Kum-Polyester Numunelerinin Yarmada Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 3.3’ te verilen seviye ve parametrelere göre hazırlanan polyester ile iyileştirilmiş kum numunelerinin 28 gün sonrasında elde edilen yarmada çekme mukavemetleri Çizelge 4.9’da verilmektedir.

Çizelge 4.9. 28 günlük numunelerin yarmada çekme mukavemeti değerleri

Deney Numarası	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları				Yarmada Çekme Mukavemeti (MPa)
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	
1	1	1	1	1	0	15	0.75	1.5	5.29
2	1	2	2	2	0	30	1.50	3.0	6.29
3	1	3	3	3	0	45	2.25	4.5	7.32
4	1	4	4	4	0	60	3.00	6.0	7.99
5	2	1	2	3	2	15	1.50	4.5	1.84
6	2	2	1	4	2	30	0.75	6.0	3.49
7	2	3	4	1	2	45	3.00	1.5	4.87
8	2	4	3	2	2	60	2.25	3.0	6.83
9	3	1	3	4	4	15	2.25	6.0	1.75
10	3	2	4	3	4	30	3.00	4.5	3.28
11	3	3	1	2	4	45	0.75	3.0	4.43
12	3	4	2	1	4	60	1.50	1.5	5.97
13	4	1	4	2	6	15	3.00	3.0	1.09
14	4	2	3	1	6	30	2.25	1.5	3.08
15	4	3	2	4	6	45	1.50	6.0	4.09
16	4	4	1	3	6	60	0.75	4.5	4.36

Çizelge incelendiğinde en yüksek yarmada çekme değeri 4 nolu deneyde 7.99 MPa olarak ortaya çıkmıştır. En düşük değer ise 13 nolu deneyde 1.09 MPa olarak elde edilmiştir. Su katkısız numunelerde ortalama çekme gerilimi 6.72 MPa iken, % 2 su ilaveli numunelerde ortalama çekme gerilimi 4.25 MPa'dır. Başlangıç su oranı % 4 olan numunelerde ortalama çekme gerilimi 3.85 MPa ve başlangıç su oranı % 6 olan numunelerde ortalama çekme mukavemeti 3.15 MPa'dır. Su ilave edildikten sonra çekme gerilmesinin düştüğü görülmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında, hem farklı kum sınıfları için verilen standart maksimum çekme gerilmelerinden (Lu ve ark., 2007) hem de kireç, uçucu kül ve polyester lifleri ile yapılan diğer stabilizasyon çalışmalarında bulunan çekme mukavemetlerinden yüksek olduğu görülmektedir (Kumar ve ark., 2007; Li ve ark., 2014).



Şekil 4.7. Bazı numunelere ait yarmada çekme görüntüleri

Çizelge 4.9’da verilen karışımların 28 günlük yarmada çekme mukavemeti deney sonuçları kullanılarak L16 ortogonal dizin için S/N analizleri yapılmıştır (Çizelge 4.10). Hesaplanan en yüksek S/N değerleri; başlangıç su oranı 1. seviyesinde 16.44; polyester oranı 4.seviyesinde 15.76; hızlandırıcı oranı 1. seviyesinde 12.76 ve H/S oranı 1.seviyesinde 13.38 olarak elde edilmiştir. Başlangıç su ve hızlandırıcı oranı için 1. seviyeden 4. seviyeye doğru gidildikçe S/N değerinin azaldığı görülmektedir. Başlangıç su ve hızlandırıcı oranındaki seviye artışı çekme mukavemetini düşürmüştür. Polyester oranı için ise 1. seviyeden 4. seviyeye doğru S/N değeri artmaktadır. Bu durum polyesterdeki seviye artışına bağlı olarak çekme mukavemetinin arttığı göstermektedir. S/N analiz çizelgesine bakarak çekme mukavemeti için optimum değerler belirlemek mümkündür. Bu durumda başlangıç su oranı 1. Seviyede, polyester oranı 4. Seviyede, hızlandırıcı oranı 1. Seviyede ve H/S oranı 1. Seviyesindeyken çekme mukavemeti optimum değerine ulaşacaktır.

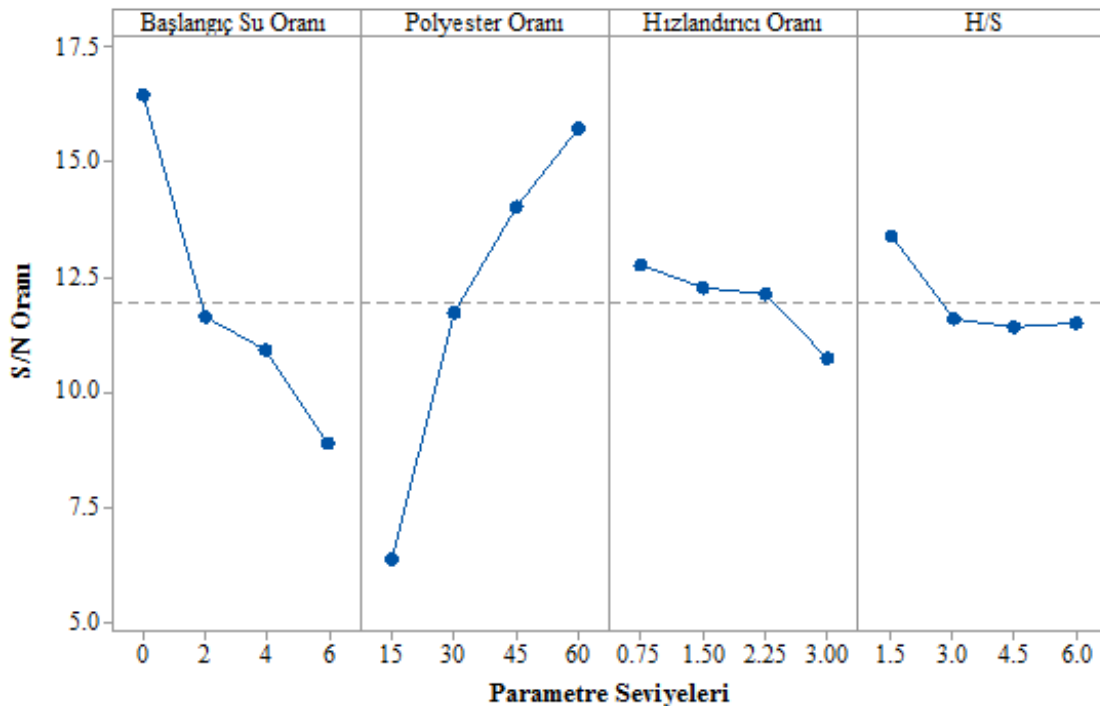
Çizelge 4.10. Parametre seviyelerinin yarmada çekme mukavemeti için S/N değerleri

Parametre	1.Seviye	2.Seviye	3.Seviye	4.Seviye
Başlangıç Su Oranı	16.44	11.65	10.91	8.91
Polyester Oranı	6.365	11.73	14.05	15.76
Hızlandırıcı Oranı	12.76	12.26	12.16	10.73
H/S Oranı	13.38	11.60	11.42	11.50

Parametrelerin yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini gösteren grafik şekil 4.8’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde serbest basınç mukavemetine benzer durumlar olduğu görülmektedir. Başlangıç su oranı 1.seviyesindeyken grafik pik noktasında olup genel ortalamadan oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu değerden sonra çekme mukavemetinde hızla azalma görülmektedir. Su içeriği artışının çekme gerilmesinde bir azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bunun nedeni zemin parçacıkları arasındaki bağların ve polyester-zemin matrisi arasındaki ara yüzey mekanik etkileşimlerinin su ilave edilerek zayıflatılmış olmasıdır (Li ve ark., 2014).

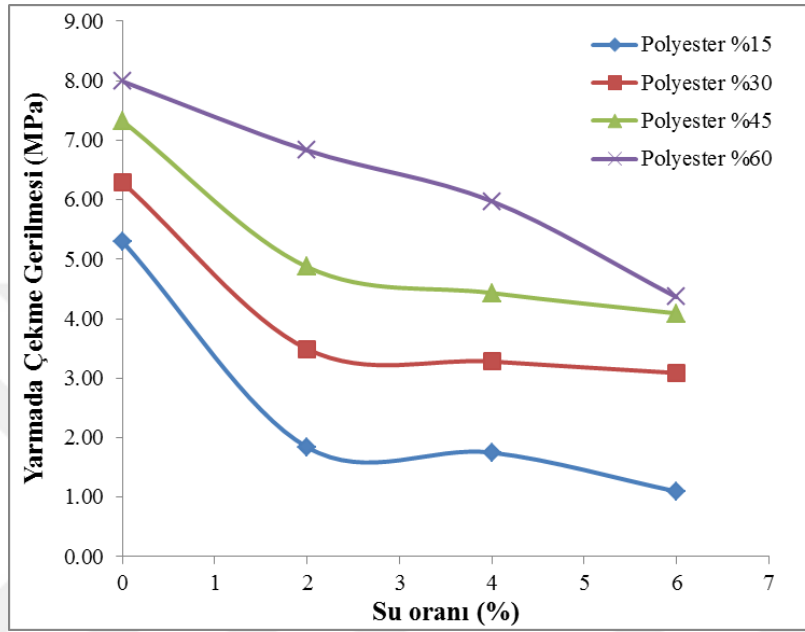
Artan su içeriği ile polyester ve zemin arasındaki kohezyon (birleşme) ve emme azaldığından zemin parçacıkları arasındaki bağlar zayıflayarak mukavemeti düşürmüştür (Li ve ark., 2014). Polyester oranının etkisine bakıldığında ise oran arttıkça çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir (Şekil 4.8). Çekme gerilmesinin makroskopik olarak tezahürü, granüler ortamda yaygın olarak görülen, kohezyon davranışıdır (Lu ve ark., 2007; Li ve ark., 2014).

Polyesterin kimyasal yapısı düşünüldüğünde, parçacıklar arasında yapışma özelliği (kohezyon) sağladığından dolayı çekme gerilmesini arttığı düşünülmektedir. Hızlandırıcı ve H/S oranlarının yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkisi çok fazla olmayıp ortalamaya yakın değerlerdir.

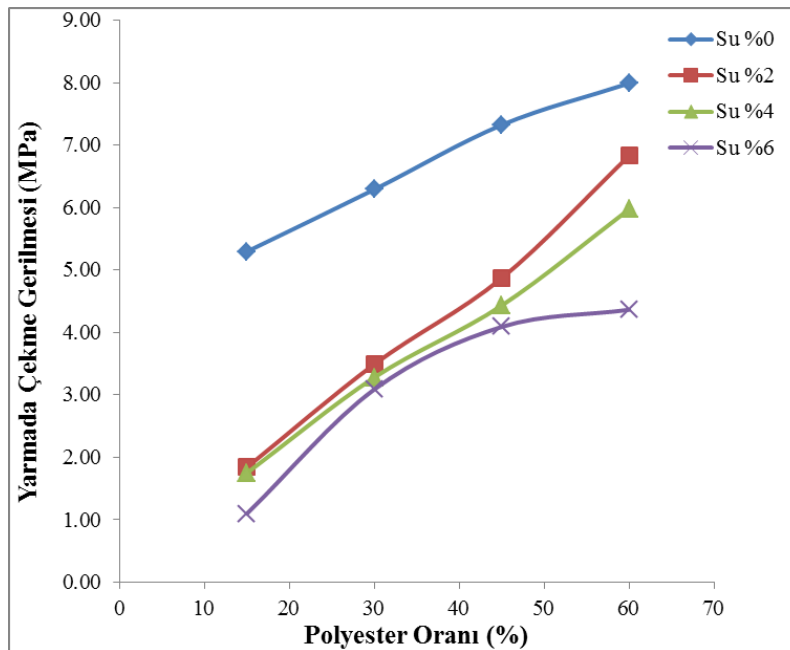


Şekil 4.8. Parametrelerin yarmada çekme mukavemetine etkileri

Şekil 4.8'e bakarak çekme mukavemeti için optimum değerleri belirlemek mümkündür. Bu durumda başlangıç su oranı 1. Seviyede, polyester oranı 4. Seviyede, hızlandırıcı oranı 1. seviyede ve H/S oranı 1. Seviyesindeyken grafikler maksimum değerine ulaşmışlardır. Bu seviyeler çekme mukavemeti için optimum seviyeleri gösterir. Böylece S/N analiz çizelgesinde (Çizelge 4.10) belirlenen değerlerle aynı seviyeler elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Başlangıç su oranının yarmada çekme gerilmesine etkisi



Şekil 4.10. Polyester oranının yarmada çekme gerilmesine etkisi

Şekil 4.9’da başlangıç su oranının çekme mukavemetine etkisi polyester miktarına bağlı olarak gösterilmektedir. Şekil 4.8’de olduğu gibi su içeriğindeki artış, çekme mukavemetini azaltmıştır (Farrag ve Griffin, 1993). Su içeriğindeki bir artışın, numunenin çekme direncinin azalmasına neden olabileceğini keşfetmişlerdir. Daha yüksek bir kuru yoğunluk zemin parçacıkları arasında daha fazla temas yol açarak, polyester ile zemin arasındaki ara yüzey temas alanı artışına yol açmaktadır. Ancak ilave edilen suyla birlikte kuru yoğunluk azaldığından dolayı temas alanı da azalır. Bu da çekme mukavemetinin azalmasına sebep olur (Li ve ark., 2014). Su içeriğinin artması, zemin matrisi arasındaki ara yüzeyde mekanik ve polyester ile kum arasındaki kimyasal etkileşimleri zayıflatmıştır. Kum-polyester karışımlarının 28 günlük yarmada çekme mukavemetine, polyester, su, hızlandırıcı ve sertleştiricinin etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmış ve sonuçlar çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Parametrelerin yarmada çekme mukavemeti için varyans analizi tablosu

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri	Etki oranı (%)
Başlangıç Su Oranı	3	28.85	9.61	36.11	0.007	46.08%
Polyester Oranı	3	31.56	10.52	39.51	0.007	50.41%
Hızlandırıcı Oranı	3	0.44	0.14	0.56	0.679	0.71%
H/S Oranı	3	0.95	0.31	1.19	0.444	1.52%
Hata	3	0.79	0.26			1.28%
Toplam	15	62.61				100.00%

Çizelge 4.11’de görüleceği gibi polyester ve başlangıç su oranlarına karşılık gelen P değeri 0.05’ten küçüktür. Bu durumda yarmada çekme mukavemet değeri üzerinde etkili parametreler, polyester ve başlangıç su oranıdır.

F değerleri etki derecelerini gösterir. En büyük F değeri en etkili parametreyi işaret eder. F değerlerine bakılarak parametreler etki derecelerine göre sıralandığında polyester oranının ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Başlangıç su oranı da polyestere yakın bir değerde olup 2. sıradadır. Daha sonra sırasıyla H/S oranı ve hızlandırıcı yer almaktadır.

Yarmada çekme mukavemetine etki eden parametrelerin etki oranları da yüzde (%) olarak görülmektedir. Yarmada çekme mukavemetine etki eden parametreler incelendiğinde en etkili parametrenin %50.41 ile polyester oranı olduğu görülmektedir. Başlangıç su oranının % 46.08 ile polyestere yakın bir değerde olduğu görülmektedir. H/S oranı ise % 1.52 ve hızlandırıcı oranı % 0.71 oranında etkilidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Çalışmada polysterin kumlu zeminlerin stabilizasyonunda kullanımı araştırmak ve optimum katkı oranlarını belirlemek amacıyla numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemeti ve yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Numuneler hazırlanırken sertleşme süreleri de kaydedilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar da dikkate alınarak deney sonuçlarının daha sağlıklı ve kabul edilebilir değerlerde olmasına yardımcı olacağı ve optimal değerlere daha kısa zamanda ulaşarak zaman ve maliyetten kazanımların olacağı düşünülerek Taguchi yöntemi kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Polyesterle hazırlanan karışımların serbest basınç dayanımlarında en yüksek değer; %0 su, %60 polyester, %3 hızlandırıcı ve H/S oranının 6 olduğu 4 nolu deneyde elde edilmiş olup, bu değer 53.64 MPa'ya kadar çıkmıştır. Diğer geleneksel iyileştirme yöntemler (kireç, çimento) düşünüldüğünde bu değer oldukça yüksek olduğu görülmüştür.
2. Seçilen parametreler ve seviyelerine göre hazırlanan kum-polyester numunelerinin serbest basınç dayanımları üzerindeki etkileri incelendiğinde; numuneler için en etkili parametrenin, su oranı olduğu görülmüştür.
3. Deneylerde doğal zemin ortamında suyun durumu dikkate alındığından dolayı hem kuru koşullarda hem de ıslak koşullarda suyun serbest basınç mukavemetine etkisi açıkça görülmektedir. Su katıldıktan sonra serbest basınç mukavemetinde oldukça belirgin bir düşüş meydana gelmektedir.
4. Karışımlardaki polyester oranı arttıkça artan çapraz bağlanmalara bağlı olarak numunelerin serbest basınç dayanımları da artmıştır.
5. Optimum karışım oranlarını ve beklenen en büyük serbest basınç dayanımını belirlemek için yapılan analizlerde, Taguchi metodu ile yapılan optimizasyon sonucunda başlangıç su oranı 1. seviyesindeyken (%0), polyester oranı 4. seviyesindeyken (%60), hızlandırıcı oranı 4. seviyesindeyken (%3), H/S oranı 2. seviyesindeyken (3) optimum koşulların sağlandığı tespit edilmiştir. Bu durumda beklenen serbest basınç mukavemeti, 55.38 MPa olarak hesaplanmıştır. Optimum koşullarda yapılan doğrulama deney sonuçlarında ise 56.60 MPa

olarak çıkmıştır. Bu değer, %90 güven aralığı içerisinde olup ve beklenen serbest basınç mukavemetine oldukça yakın bulunmuştur. Bu durum serbest basınç mukavemeti için elde edilen sonuçların yeterli olduğunu ve Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığını göstermektedir.

6. Taguchi, geliştirdiği ortogonal dizinler sayesinde yapılacak olan deneyleri önemli ölçüde azaltmış, bu da zaman ve maliyet kaybının artmasını engellemiştir. Bu metot ile işleme şartlarında istenmeyen faktörlerin etkisi kısa zamanda tespit edilmiş, zaman ve maliyet düşürülerek ürün kalitesi artırılmıştır.
7. Sertleşme süreleri için en yüksek değer 7200 dk, en düşük değer de 4 dk olarak belirlenmiştir.
8. Sertleşme süresi üzerinde en etkili parametre; hızlandırıcı oranı olup, oran arttıkça sertleşme süresi azalmaktadır. Kireç ve çimento ile stabilizasyonun kür süreleri düşünüldüğünde doymamış polysterin sertleşme sürelerine bağlı olarak daha hızlı güç kazandığı görülmektedir. Gereken sertleşme süresindeki bu azalma, inşaat süresini ve gecikmeleri en aza indirebilir.
9. Hızlı stabilizasyonun gerekli olduğu durumlarda doymamış polyster ile stabilizasyon avantajlı hale gelmektedir.
10. Yarmada çekme dayanımı için en yüksek değer 4 nolu deneyde başlangıç su oranı %0, polyster oranı %60, hızlandırıcı oranı %3 ve H/S oranı 6 iken 7.99 MPa olarak elde edilmiştir.
11. Karışımlardaki polyster oranı arttıkça numunelerin yarmada çekme dayanımları da artmıştır. En etkili parametrenin ise polyster olduğu belirlenmiştir. Çekme gerilmesinde kohezyonun etkisi yüksek olduğundan dolayı, polysterin kimyasal yapısına uygun olan bu kohezyon, kum ile yapışma özelliği göstererek çekme dayanımını arttırmıştır.
12. Su içeriği arttıkça yarmada çekme mukavemeti azalmaktadır. Bunun nedeninin zemin parçacıkları arasındaki bağların ve polyster-zemin matrisi arasındaki ara yüzey mekanik etkileşimlerinin su ilave edilerek zayıflatılmış olması olduğu düşünülmektedir.
13. Yarmada çekme dayanımları için optimum değerlerin tasarımının başlangıç su oranı 1. seviyede, polyster oranı 4. seviyede, hızlandırıcı oranı 1. seviyede ve H/S oranı 1. seviyesindeyken olduğu düşünülmektedir. Bunun için kontrol deneylerinin yapılması gerekir.

Bu çalışma, zemin stabilizasyonlarında belirli oranlarda doymamış polyester kullanılabileceğini göstermiştir. Kumlu zemin numunelerinin serbest basınç mukavemeti değerinin, doymamış polyester ile stabilize edilmiş zemin özelliklerinin sertleşme koşulları ve katkı miktarı ile düzeldiğini göstermektedir. Doymamış polyester ilavesinin uygun bir zemin iyileştirme tekniği olduğunu, zeminin dayanımını arttırdığını göstermiştir. Kısa süreli kür etkisi ile hızlı stabilizasyon gerektiren durumlarda ve çekme çatlamasının etkilerini önlemek ve çatlama mekanizmasını ortaya çıkarmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

5.2 Öneriler

Doymamış polyesterin kumların iyileştirilmesinde kullanımında daha kesin yargılara varabilmek için farklı gradasyonlarda, farklı rölatif sıklıklarda ve farklı malzeme oranlarında detaylı benzer çalışmalar tekrarlanmalı ve hidrolik iletkenlik gibi diğer geoteknik deneyler de yapılmalıdır. Ayrıca söz konusu polyester ile suya doymuş kum davranışını açıklayabilmek için bazı elektro kinetik (pH, EC, zeta potansiyeli, BET gibi) deneyler, XRD, SEM ve TGA analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Doymamış polyesterin kayma mukavemeti ve zemin-polyester bağlanma kuvvetini belirlemek için uygun testler yapılmalı, polyester katkılı zeminlerde kayma kırılmasının polyesterin içinde olup olmayacağını veya zemin-polyester ara yüzünde kırılıp kırılmadığını belirlemede yardımcı olacaktır. Bu bilgi, ilave oranların spesifikasyonunu artırabilir, ayrıca daha fazla polimer gelişimi için değerli bilgiler sağlayabilir.

Yine de çimentonun polimerlerden ucuz olması dikkate alınarak ayrıntılı bir maliyet analizinin de yapılması ileri çalışmalar için önerilmektedir.

Önerilen stabilizasyon mekanizmaları hala büyük ölçüde yetersizdir, ancak literatürden ve son laboratuvar testlerinden elde edilen sınırlı veriler bunları destekleme eğilimindedir. Polyester kimyasal bir malzeme olduğu için zemin türüne göre farklı etkileşimler gösterebilir. Genel olarak, küçük parçacık boyutlarına, geniş yüzey alanlarına ve yüksek su içeriğine sahip kil ve siltli zeminlerde doymamış polyesterin davranışı araştırılabilir. Bu etkileşimin temel bir anlayışı, polyesterin endüstride zemin değişikliği olarak kullanılması için şartnamelerin hazırlanmasına yardımcı olacaktır.

Tüm test programından elde edilen veriler zemin-polyester arasında çapraz bağlanmadan dolayı kimyasal bir etkileşimin olduğunu göstermiştir. Daha detaylı

mikroskobik bir inceleme, zemin-polyester etkileşiminin ve genel sistem davranışının anlaşılmasını geliştirebilir.

Genel olarak, polyesterin zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için uygun bir değişiklik seçeneği olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, başarılı bir saha ölçeğinde uygulama için, standartların ve yöntemlerin daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Sertleşme süresinin bir fonksiyonu olarak UCS ve dayanıklılık değerleri, polyester katkı maddelerinin birçoğunun 28 günlük sertleşme süresinden sonra nihai özelliklere ulaşmadığını göstermektedir. İleri ki çalışmalarda farklı kür sürelerine 56 günlük serbest basınç dayanımları da eklenebilir.

Gelecekteki çalışmalar daha iyi performans gösteren doymamış polyester için nem-yoğunluk ilişkileri kurmaya, polyester ve diğer katkı malzemelerinin (çimento, kireç gibi) kombinasyonları kurmaya odaklanabilir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ő. ve Arasan, S., 2015, Kumların derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesinde doymamış polyesterin kullanılabilirliği. 5. Geoteknik Sempozyumu. ukurova Üniversitesi, Adana.
- Al-Khanbashi, A. ve Abdalla, S. W., 2006, Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil, *Geotechnical Geological Engineering*, 24 (6), 1603-1625.
- Anonim, 2019, <https://www.slideshare.net/safiullahkha/soil-stabilisation-1>,
- Army, U., 1999, Guidelines on ground improvement for structures and facilities, *US Army Corps of Engineers, ETL*, 1110, 1-185.
- Ateş, A., 2013, The effect of polymer-cement stabilization on the unconfined compressive strength of liquefiable soils, *International Journal of Polymer Science*, 2013.
- Aurer, J. H. ve Kasper, A., 2003, Unsaturated Polyester Resins: Polymers with unlimited possibilities, Verlag Moderne Industrie, p. 69.
- Ayan, E., 2009, Derin zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Aytekin, M., 2000, Deneysel zemin mekaniği, *Ankara*, Akademi Yayınevi, p. 264.
- Balçık Tamer, Y., 2008, Doymamış poliester esaslı polihipe malzemelerinin özellikleri üzerine reaksiyon koşullarının etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Belliard, P., Foussard, T., Gaudin, D. ve Morel, J., 1988, Comportement des gelcoats polyesters en contact avec l'eau. Analyse de la phase aqueuse après vieillissement, *Composites*, 28 (6).
- Canyılmaz, E., 2001, Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir örnek uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Cömert, A., 2005, Uçucu küllerin zemin stabilizasyonuna etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Das, B. M., 2007, Principles of Foundation Engineering, Thomson, p. 743.
- Doğanay, S. ve Ulcay, Y., 2007, Farklı oranlarda takviye edilmiş cam lifi polyester kompozitlerin deniz suyu etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 12 (2).
- El-Rawi, N. ve Abdul-Hasan, M., 1986, Effect of chemical additives on the strength of some Iraqi soils-lime mixtures, *Journal of Building Research center, Scientific Research Council, Baghdad, Iraq*.

- Farrag, K. A. ve Griffin, P., 1993, Pull-out Testing Of Geogrids in Cohesive Soils, *American Society for Testing and Materials*, 76-89.
- Ingles, O. G. ve Metcalf, J. B., 1972, Soil stabilization principles and practice, *Butterworths, Sydney*, p. 374.
- Kumar, A., Walia, B. S. ve Bajaj, A., 2007, Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil, *Journal of materials in civil engineering*, 19 (3), 242-248.
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X. ve Shi, B., 2014, Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength, *Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering*, 6 (2), 133-137.
- Lu, N., Wu, B. ve Tan, C. P., 2007, Tensile strength characteristics of unsaturated sands, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 133 (2), 144-154.
- Manual, A. F., 1994, Soil stabilization for pavements, *Technical Manual* (5-822), 14.
- Marais, S., Metayer, M., Nguyen, T. Q., Labbe, M. ve Saiter, J. M., 2000, Diffusion and permeation of water through unsaturated polyester resins—influence of resin curing, *European polymer journal*, 36 (3), 453-462.
- Muhunthan, B. ve Sariosseiri, F., 2008, Interpretation of geotechnical properties of cement treated soils, Research Report FHWA-DTFH61-05-C-00008, Compaction Control of Marginal Soils in Fills, Washington State Transportation Center (TRAC), Washington State University, USA., p.
- Najvar, D. J., Parks, C. F., Bennett, G. A. ve Nimerick, K. H., 1972, U.S. Patent No. 3, *U.S. Patent and Trademark Office.*, Washington, DC: , p. 651,649.
- Newman, K. ve Tingle, J. S., 2004, Emulsion polymers for soil stabilization, *Presented for the 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*.
- Önalp, A., 2002, Geoteknik Bilgisi 1 Zeminler ve Mekanik Çözümlü Problemlerle, *İstanbul*, Birsen Yayınevi Ltd Şti., p. 461.
- Özaydın, K., 2011, Zemin mekaniği, *İstanbul*, Birsen Yayınevi, p.
- Pürçek, G., 2014, Metalik Malzemelere Uygulanan Mekanik Deneyler (Ders Notları), *Trabzon*.
- Rauch, A. F., Katz, L. E. ve Liljestrand, H. M., 1993, An analysis of the mechanisms and efficacy of three liquid chemical soil stabilizers: VOLUME, *Work*, 1.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S. ve Webster, S. L., 2002, Stabilization of silty sand with nontraditional additives, *Transportation research record*, 1787 (1), 61-70.
- Sargent, J. ve Ashbee, K., 1984, Very slow crack growth during osmosis in epoxy and in polyester resins, *Journal of applied polymer science*, 29 (3), 809-822.

- Satroğlu, Y. S., 2013, İnşaat molozlarının yol alt yapı malzemesi olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A. ve Rushing, J. F., 2007, Stabilization mechanisms of nontraditional additives, *Transportation research record*, 1989 (1), 59-67.
- Uzuner, B. A., 2012, Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği, *Derya Yayınevi*, Trabzon, p. 397s-400s.
- Uzuner, B. A., 2016, Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği, *Teknik Yayınevi*, Ankara, p. 376.
- Verma, N., 2013, Effectiveness of using polymers and cement for soil stabilization, Master Thesis, *Thapar University*, India.
- Xing, C., Liu, X. ve Anupam, K., 2018, Response of sandy soil stabilized by polymer additives, *Open Access Journal Of Environmental Soil Science*, 1 (3), 64-71.
- Yılmaz, M., 2006, Cam elyaf katkılı doymamış polyester malzemelerde mineral katkıların mekanik ve tribolojik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Zaimoğlu, A., 2003, Bentonit uçucu kul ve silis dumani katkılı çimento enjeksiyonu karışımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin Taguchi metodu ile incelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.

EKLER**EK-1**

1.DENEY			2.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.189	0.0189	6.28	0.109	0.0109
12.20	0.258	0.0258	12.20	0.159	0.0159
19.70	0.388	0.0388	20.09	0.196	0.0196
14.17	0.454	0.0454	0.754	0.149	0.0149
8.25	0.503	0.0503	6.28	0.179	0.0179
			12.20	0.185	0.0185
			22.06	0.211	0.0211
			4.30	0.19	0.019
			27.98	0.23	0.023
			29.96	0.239	0.0239
			32.92	0.256	0.0256
			35.88	0.275	0.0275
			43.77	0.369	0.0369

3.DENEY			4.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.122	0.0122	6.28	0.105	0.0105
12.20	0.178	0.0178	12.20	0.153	0.0153
20.09	0.219	0.0219	20.09	0.209	0.0209
0.75	0.14	0.014	2.33	0.14	0.014
6.28	0.167	0.0167	0.75	0.122	0.0122
12.20	0.195	0.0195	6.28	0.15	0.015
20.09	0.227	0.0227	12.20	0.181	0.0181
27.99	0.273	0.0273	20.09	0.221	0.0221
35.88	0.324	0.0324	27.99	0.271	0.0271
43.78	0.386	0.0386	35.88	0.35	0.035
51.67	0.417	0.0417	43.78	0.549	0.0549
49.70	0.434	0.0434	51.67	0.612	0.0612
47.72	0.442	0.0442	53.64	0.788	0.0788
45.75	0.448	0.0448	29.96	0.924	0.0924
43.78	0.454	0.0454	27.99	0.928	0.0928
41.80	0.459	0.0459	26.02	0.932	0.0932
39.83	0.465	0.0465	24.04	0.936	0.0936
37.86	0.469	0.0469	22.07	0.94	0.094
35.88	0.469	0.0469	20.09	0.944	0.0944
33.91	0.469	0.0469	18.12	0.948	0.0948
31.94	0.469	0.0469	-	-	-

5.DENEY			6.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.85	0.085	6.28	0.18	0.018
9.83	1.022	0.1022	12.20	0.411	0.0411
4.31	1.138	0.1138	16.54	0.485	0.0485
-	-	-	10.23	0.602	0.0602

7.DENEY			8.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.226	0.0226	6.28	0.236	0.0236
12.20	0.396	0.0396	12.20	0.39	0.039
20.09	0.792	0.0792	20.09	0.667	0.0667
0.75	0.473	0.0473	2.33	0.536	0.0536
6.28	0.568	0.0568	0.75	0.47	0.047
12.20	0.705	0.0705	6.28	0.521	0.0521
20.09	0.941	0.0941	12.20	0.612	0.0612
26.02	1.158	0.1158	20.09	0.801	0.0801
20.09	1.216	0.1216	27.99	1.031	0.1031
18.12	1.216	0.1216	28.98	1.08	0.108
16.15	1.216	0.1216	24.04	1.125	0.1125
14.17	1.216	0.1216	20.09	1.208	0.1208

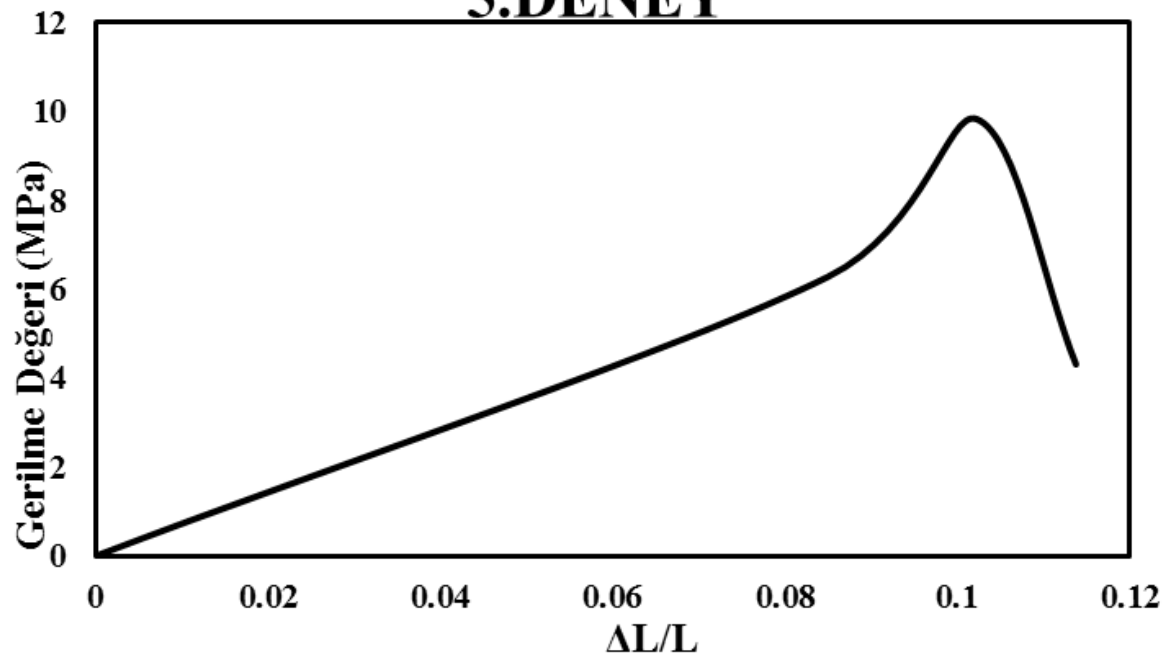
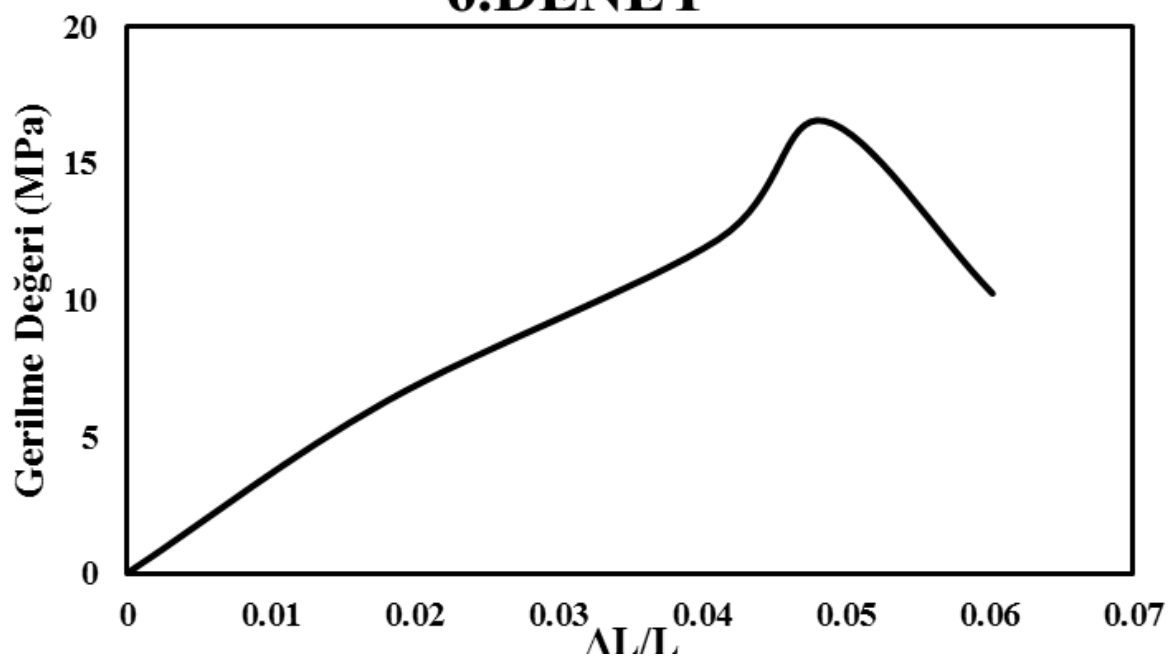
9.DENEY			10.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.46	0.046	6.28	0.198	0.0198
2.33	0.446	0.0446	12.20	0.406	0.0406
0.75	0.425	0.0425	0.75	0.264	0.0264
11.21	0.708	0.0708	6.28	0.337	0.0337
8.25	0.823	0.0823	12.20	0.47	0.047
6.28	0.901	0.0901	22.46	0.86	0.086
			14.17	0.853	0.0853
			12.20	0.86	0.086
			10.23	0.87	0.087
			9.24	0.875	0.0875
			8.25	0.88	0.088
			7.27	0.883	0.0883

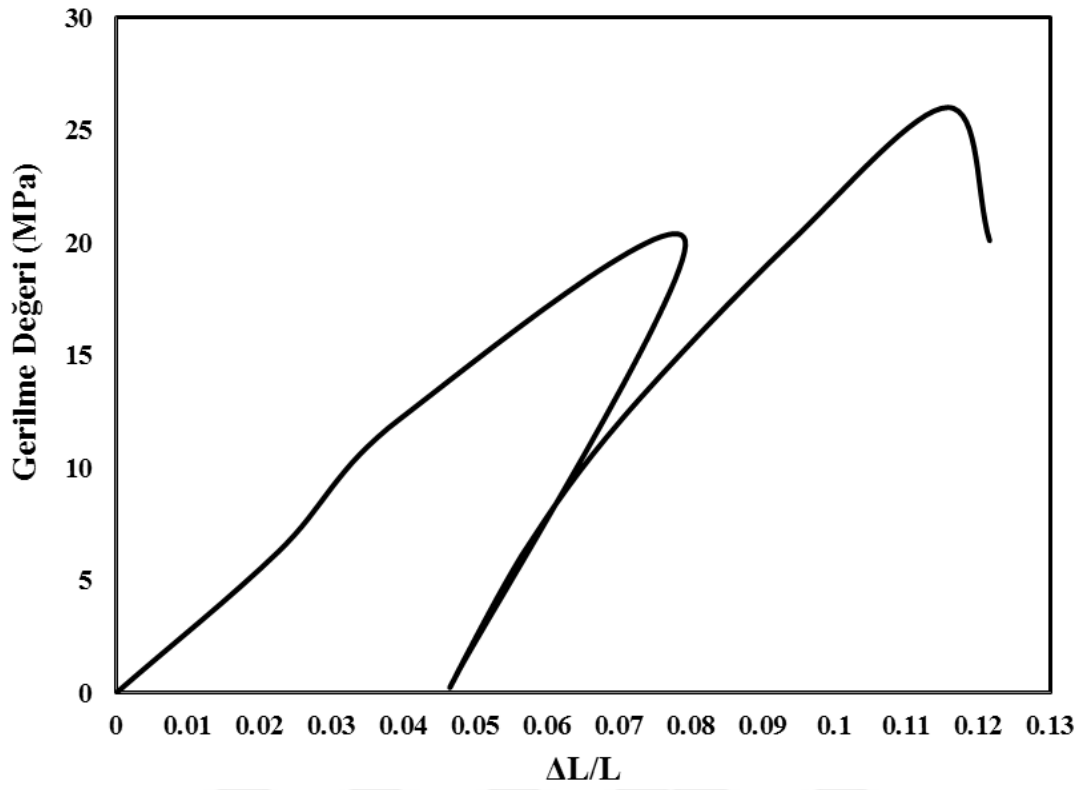
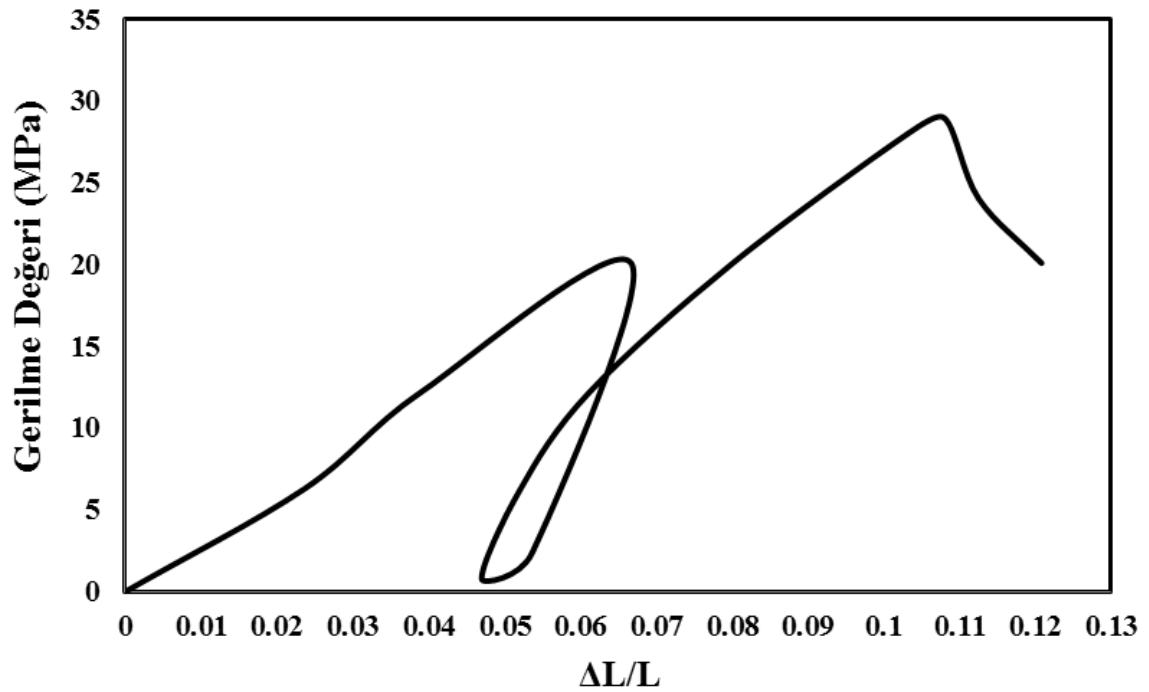
11.DENEY			12.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.203	0.026	6.28	2.67	0.0267
12.20	0.322	0.042	12.20	3.96	0.0396
0.75	0.253	0.033	20.09	5.49	0.0549
6.28	0.281	0.036	2.33	4.13	0.0413
12.20	0.359	0.047	0.75	3.53	0.0353
20.09	0.726	0.094	6.28	4.19	0.0419
27.40	0.86	0.112	12.20	4.88	0.0488
18.12	0.917	0.119	20.09	5.9	0.059
16.15	0.923	0.120	27.99	8.9	0.089
14.17	0.929	0.121	35.88	10.73	0.1073
12.20	0.936	0.122	31.94	11.2	0.112
10.23	0.944	0.123	24.04	12.86	0.1286

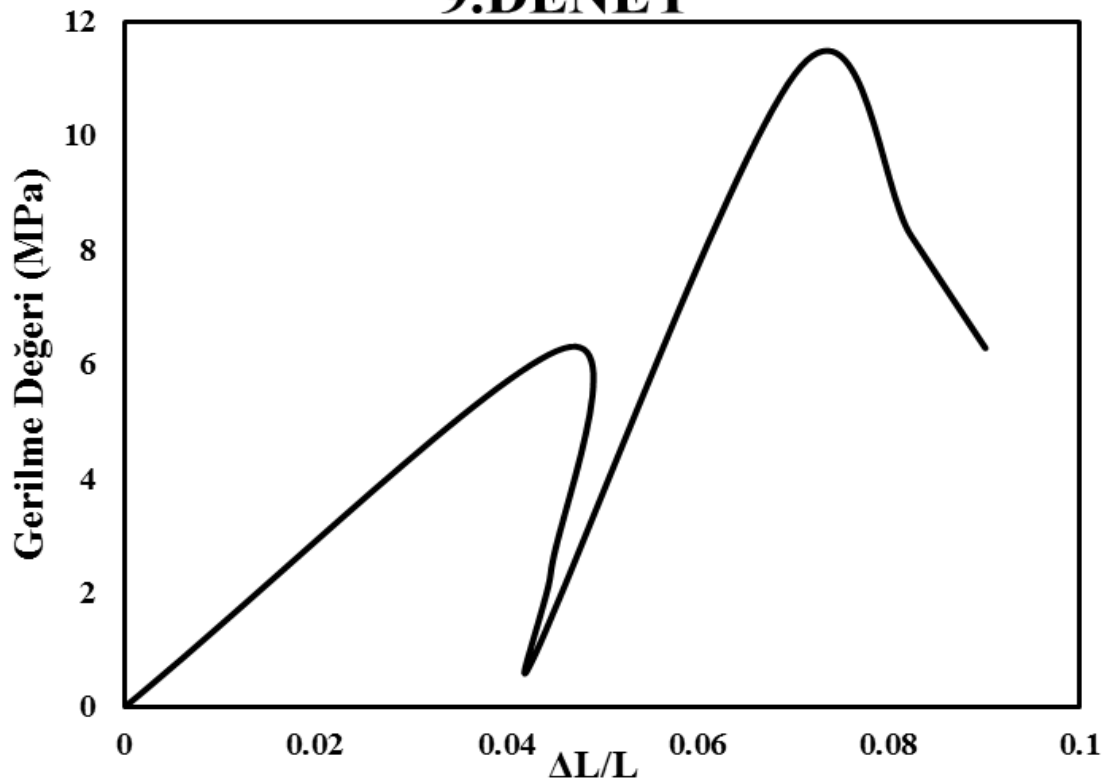
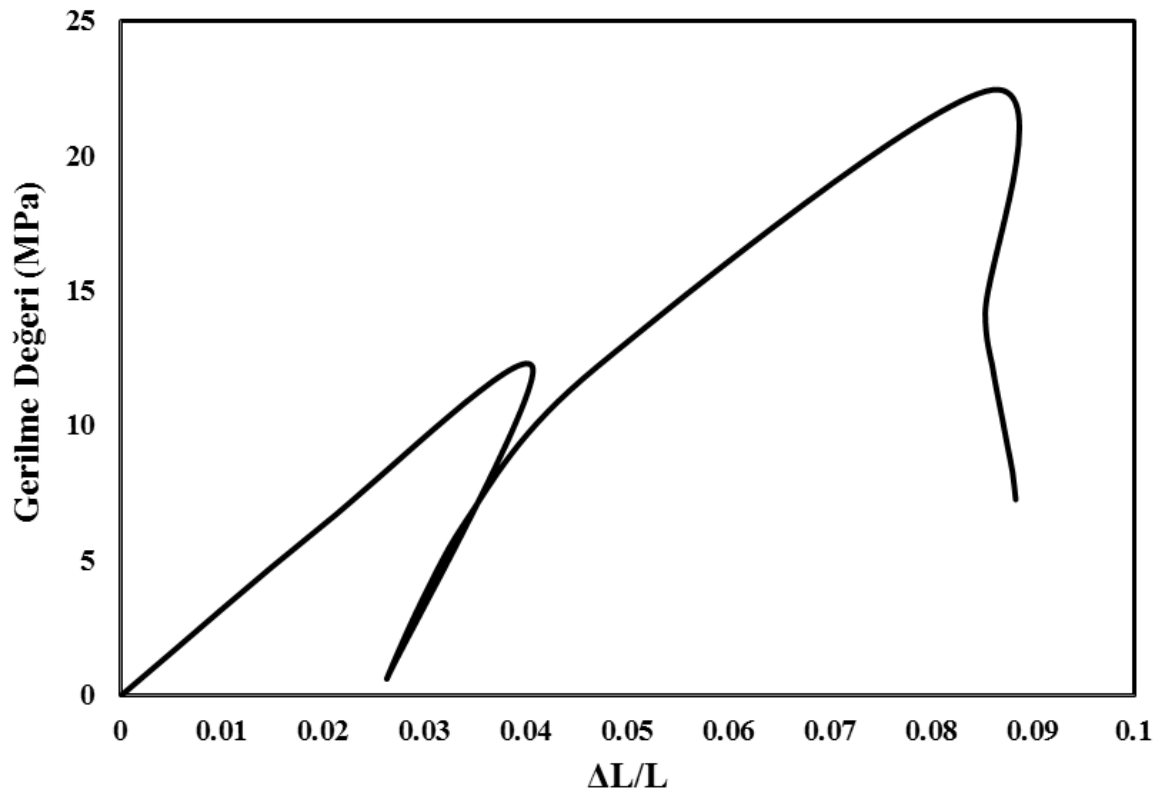
13.DENEY			14. DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0	0	0	0	0	0
6.28	0.213	0.0213	6.28	0.213	0.0213
12.20	0.43	0.043	12.20	0.381	0.0381
0.75	0.321	0.0321	20.09	0.873	0.0873
6.28	0.383	0.0383	2.33	0.707	0.0707
12.20	0.475	0.0475	0.75	0.616	0.0616
17.13	0.576	0.0576	6.28	0.711	0.0711
10.23	0.659	0.0659	12.20	0.821	0.0821
8.25	0.665	0.0665	20.09	0.873	0.0873
6.28	0.675	0.0675	10.23	1.362	0.1362
5.29	0.68	0.068	8.25	1.377	0.1377
-	-	-	7.27	1.404	0.1404
-	-	-	6.48	1.414	0.1414
-	-	-	4.31	1.414	0.1414

15.DENEY			16.DENEY		
Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon	Gerilme (MPa)	ΔL (mm)	Birim Deformasyon
0.00	0	0	0.00	0	0
6.28	0.231	0.0231	6.28	0.305	0.0305
12.20	0.39	0.039	12.20	0.43	0.043
2.33	0.309	0.0309	19.11	0.48	0.048
0.75	0.238	0.0238	12.20	0.56	0.056
12.20	0.423	0.0423			
20.09	0.76	0.076			
25.03	0.867	0.0867			
12.20	1	0.1			
10.23	1.01	0.101			
8.25	1.019	0.1019			
6.28	1.016	0.1016			

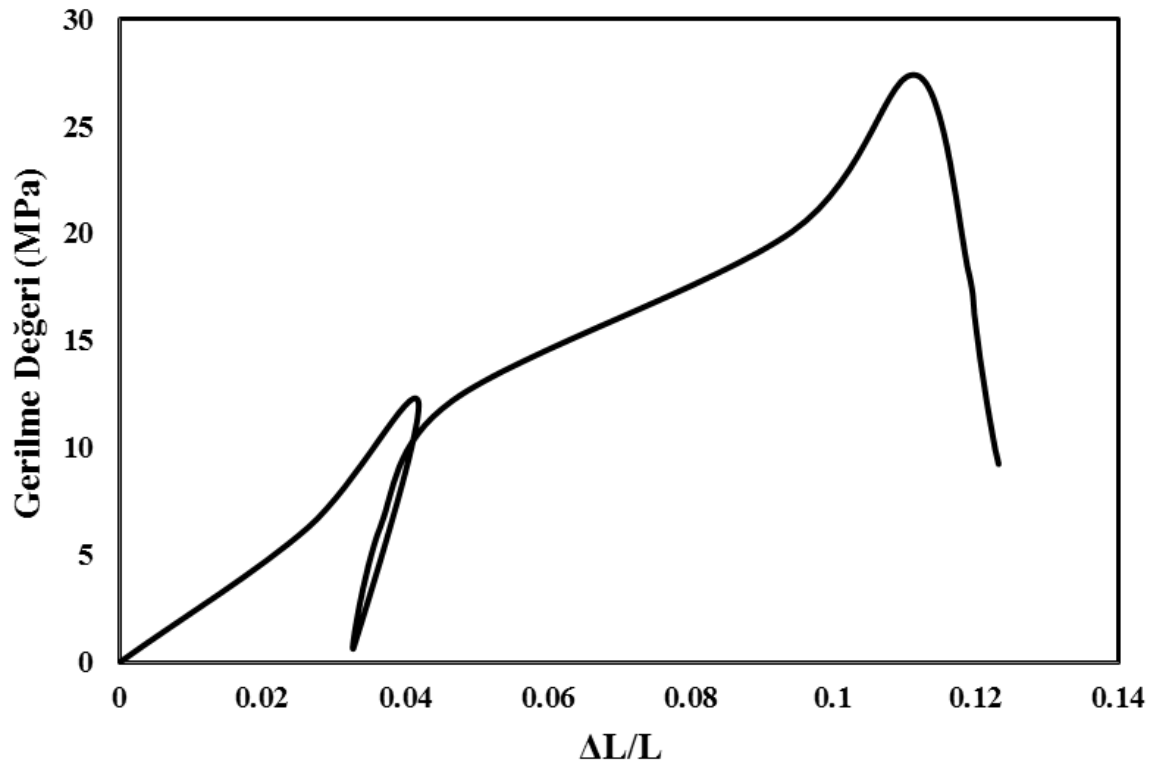
EK-2

5.DENEY**6.DENEY**

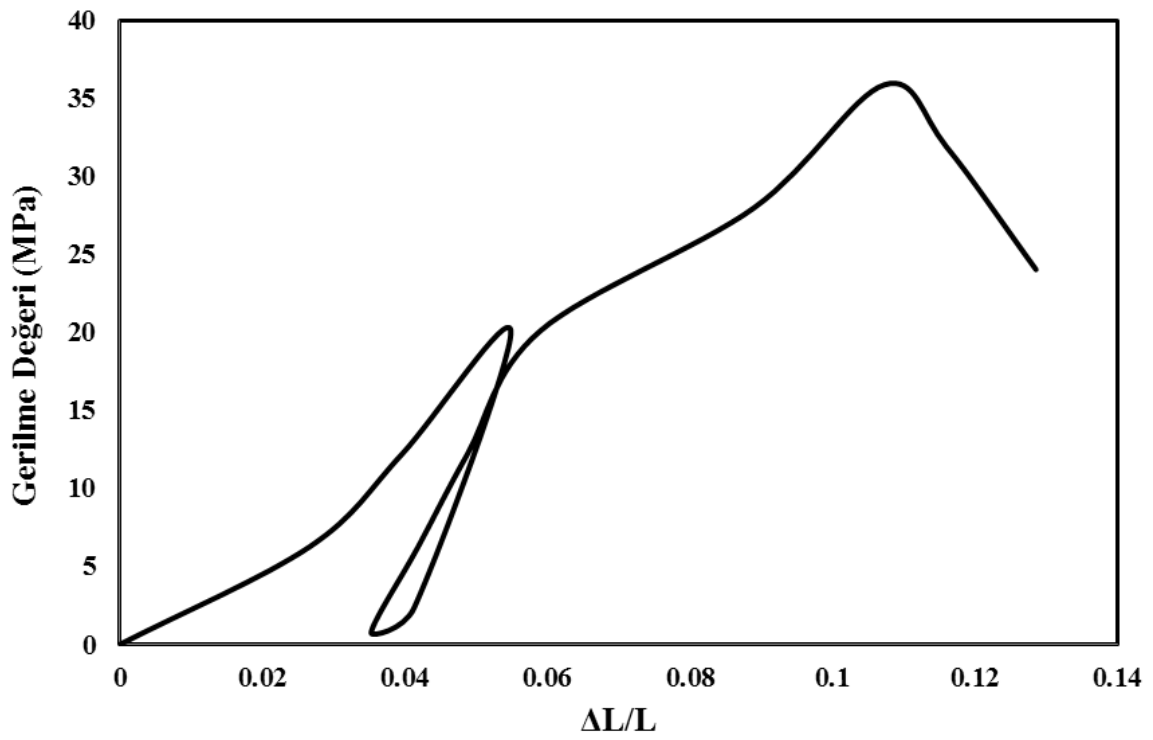
7.DENEY**8.DENEY**

9.DENEY**10.DENEY**

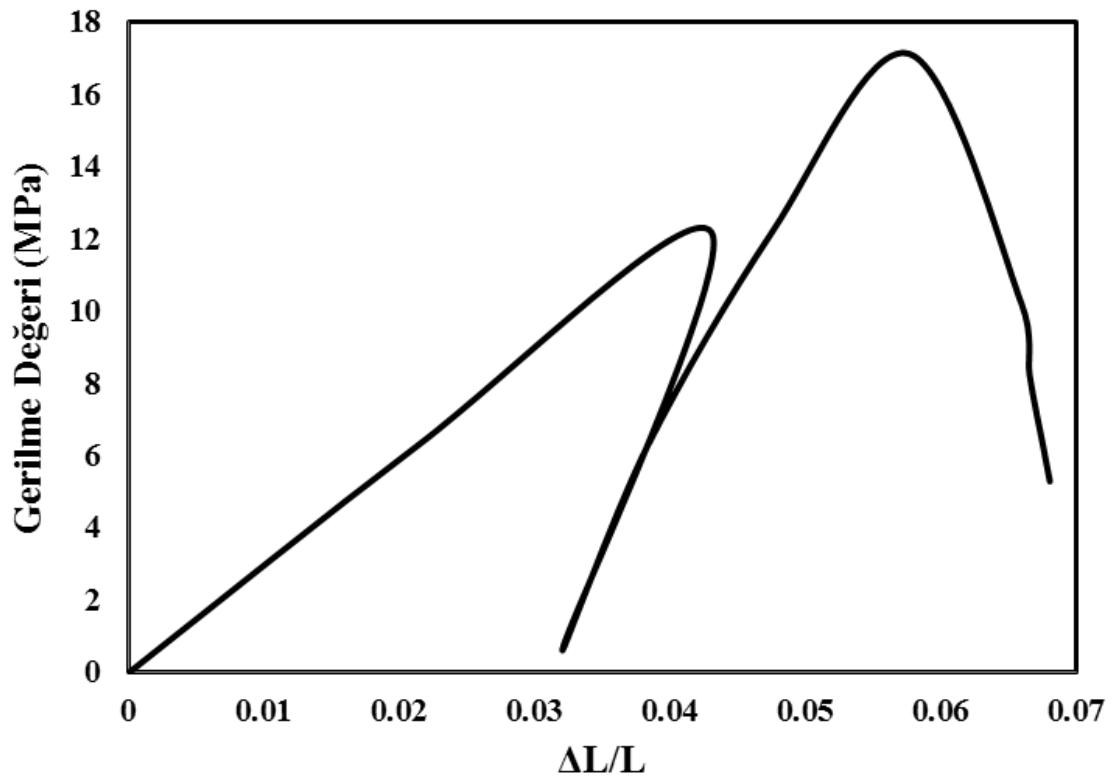
11.DENEY



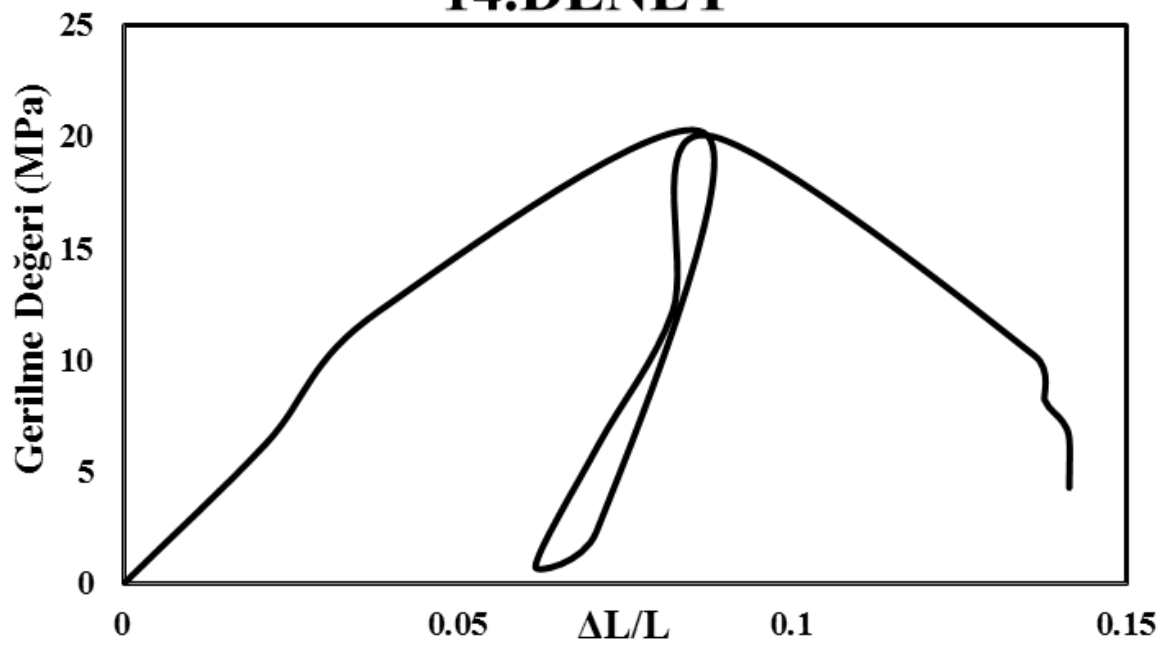
12.DENEY



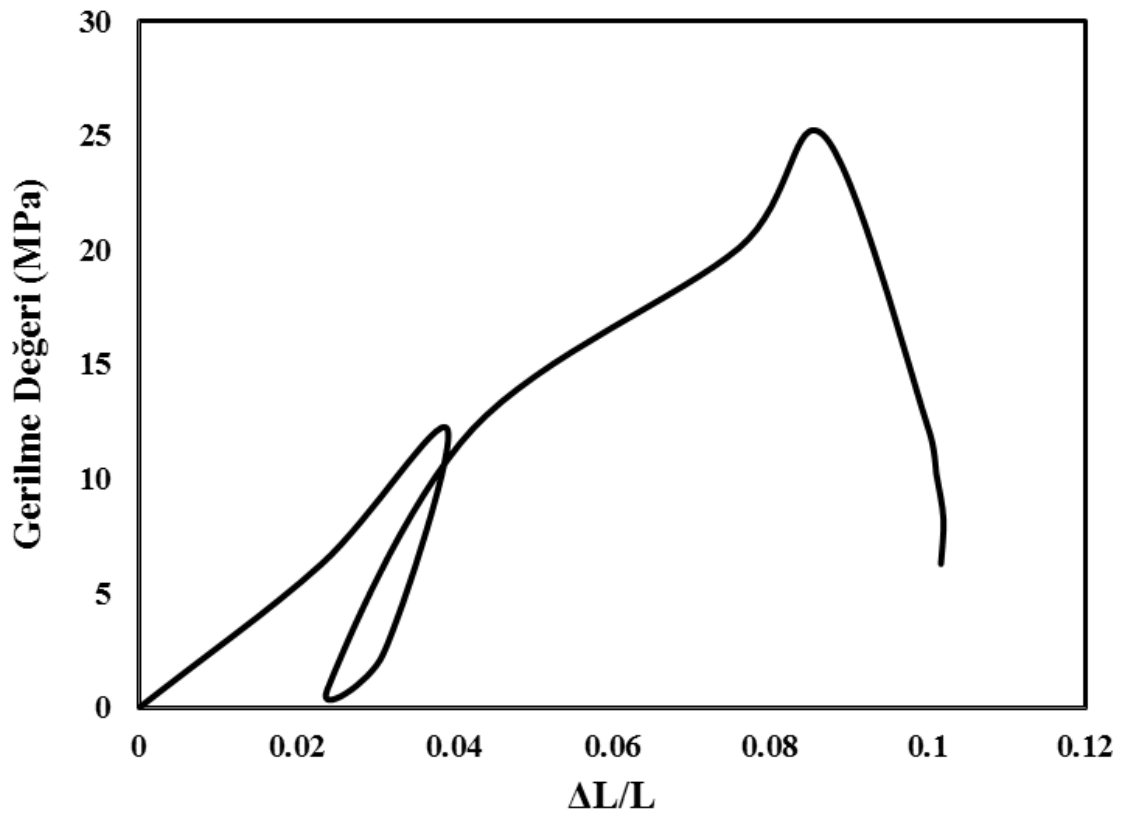
13.DENEY



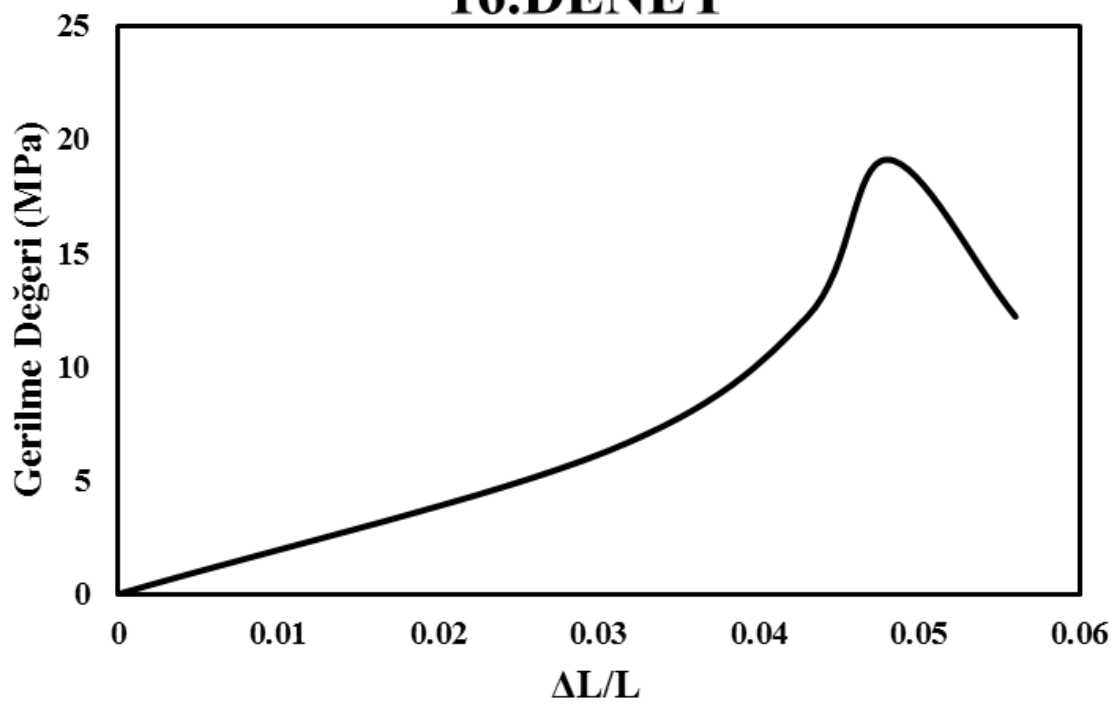
14.DENEY



15.DENEY



16.DENEY



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Elife Sariye ÖZEN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Kütahya-01.07.1994
Telefon : 05415053896
Faks : -
e-mail : elifesariyeozen@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Ali Güral Lisesi, Merkez, KÜTAHYA	2012

Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Müh. Mim.Fak. İnşaat Müh. Bölümü, Selçuklu, KONYA	2016
------------	---	------

Yüksek Lisans :

UZMANLIK ALANI

C Sınıfı İş güvenliği Uzmanı

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Özen Elife Sariye, Tan Özcan (2019) ‘Utilization Of Unsaturated Polyester In Improving The Geotechnical Properties Of The Sands’ International Symposium for Environmental Science and Engineering Research (ISESER) Konya, Turkey, May 25-27, 2019.

Öztürk Oğuzhan, Özen Elife Sariye, Turgutlu İsmail, Keskin Ülkü Sultan (2017) ‘Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Incorporating Waste Aggregates’ 2.International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE) Nevşehir, Turkey, May 8-10, 2017.