



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TABAKALI ZEMİN ORTAMINDA İMAL
EDİLEN ZEOLİT KATKILI DERİN
KARIŞTIRMA KOLONU DAVRANIŞLARININ
MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI**

Furkan ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan ARSLAN tarafından hazırlanan “Tabakalı Zemin Ortamında İmal Edilen Zeolit Katkılı Derin Karıştırma Kolonu Davranışlarının Model Deneylerle Araştırılması” adlı tez çalışması 17/11/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

.....

Danışman

Prof. Dr. Murat OLGUN

.....

Üye

Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 201004031 no’lu proje ile desteklenmiştir.

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.



Furkan ARSLAN

Tarih: 17/11/2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TABAKALI ZEMİN ORTAMINDA İMAL EDİLEN ZEOLİT KATKILI DERİN KARIŞTIRMA KOLONU DAVRANIŞLARININ MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Furkan ARSLAN

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

Danışman: Prof. Dr. Murat OLGUN

2020, 172 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU**

Bu tez çalışmasında; kil ve kum zeminden oluşan tabakalı zemin ortamında, doğal bir puzolanik malzeme olan zeolit kullanılarak oluşturulan derin karıştırma kolonlarının (DKK) davranışları küçük ve büyük ölçekli deney numuneleri üzerinde araştırılmıştır. Küçük ölçekli DKK numunelerinin hazırlanmasında; enjeksiyon karışımını oluşturan 4 parametre olan çimento, zeolit ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarları ile su/bağlayıcı oranı için Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak 17 adet tasarımı içeren bir deney tasarım tablosu oluşturulmuştur. Tasarımda; çimento için %9-30, zeolit için %0-40, akışkanlaştırıcı katkı maddesi için %0.5-4 ve su/bağlayıcı oranı için 0.9-2.5 sınır değerleri seçilmiştir. Her bir tasarım için enjeksiyon karışımları üzerinde Marsh Hunisi Deneyleri yapılarak enjeksiyonların akışkanlığı kontrol edilmiştir. Tüm tasarımlar için hem kil hem de kum zemin kullanılarak hazırlanan küçük ölçekli numuneler üzerinde 28 ve 56 günlük kür sürelerinin ardından Serbest Basınç ve Permeabilite Deneyleri yapılmıştır. Tasarımları temsil edebilecek 7 adet numunenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. Deneysel sonuçların optimizasyonu ile elde edilen optimum tasarımlar için tabakalı zemin yerleşimi de dikkate alınarak model tanklar içerisinde büyük ölçekli DKK imal edilmiştir. Hazırlanan kolonlar 28 günlük kür süresinin ardından kademeli kazık yükleme deneylerine tabii tutulmuş ve oluşan kolonlardan karot numuneleri alınmıştır.

Küçük ölçekli DKK'nda optimum tasarımlar için 28 günlük kür süresi sonunda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar ile tahmin edilen sonuçlar arasında Serbest Basınç Deneylerinde killi zeminde %92 ve kumlu zeminde %83, Permeabilite Deneylerinde ise sırasıyla %71 ve %57 uygunluk değerlerine ulaşılmıştır. Zeolitın ikame şeklinde çimento ile yer değiştirmesi sonucu mukavemet değerlerinde düşük seviyede azalma olmuş ancak elde edilen değerler DKK için kabul edilebilir sınır değerler arasında kalmıştır. Zeolit miktarının artması ile permeabilite katsayısında çok az miktarda artışlar görülmüştür ancak maksimum zeolit ikameli durumda bile permeabilite katsayısı istenilen sınır değerler içerisinde kalmıştır. SEM analizi sonuçları da belli bir miktara kadar zeolitın kullanımının uygun olduğunu, ancak çimento miktarının çok düşük olması durumunda C-H ve C-S-H jellerinin miktarının azaldığını göstermektedir. Büyük ölçekli DKK'nın yükleme deney sonuçları, tabakalı zemin ortamında oluşturulan DKK'nın taşıma gücü ve oturma kriterleri açısından yeterli olduğunu göstermiş ve kolonlardan alınan karot numunelerinin serbest basınç mukavemeti küçük ölçekli DKK'nın mukavemetinin %90'ı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Derin karıştırma kolonu, Permeabilite katsayısı, Serbest basınç mukavemeti, Yanıt yüzey yöntemi, Zeolit

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF DEEP MIXING COLUMN WITH ZEOLITE ADDITIVE MANUFACTURED IN LAYERED SOIL ENVIRONMENT WITH MODEL EXPERIMENTS

Furkan ARSLAN

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

Advisor: Prof. Dr. Murat OLGUN

2020, 172 Pages

Jury

Prof. Dr. Murat OLGUN

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

The aim of conducting this study is to investigate the behavior of deep mixing columns (DMC) created by using zeolite, which is a natural pozzolanic material in a layered soil environment consisting of clay and sand soil. Small- and large-scale test samples were applied in this study to gain reliable results. In preparing small-scale DMC samples, an experimental design table including seventeen designs was created using the Response Surface Method for the cement, zeolite, and plasticizer additive amounts and water/binder ratio, the four parameters that make up the injection mixture. The applied structural design in this study consists of 9-30% for cement, 0-40% for zeolite, 0.5-4% for plasticizer additive and 0.9-2.5 for water/binder ratio. For each design, Marsh Funnel Viscosity Tests were performed on the injection mixtures, and the fluidity of the injections were checked. Unconfined Compressive Strength and Permeability Tests were carried out on small scale samples prepared using both clay and sand soil for all designs after twenty-eight- and fifty-six-days experiment. Scanning electron microscope (SEM) images of seven samples that can represent the designs were taken. For optimum designs obtained by optimizing experimental results, large-scale DMC was employed within model tanks, taking into account the layered soil layout. After twenty-eight days of experiment period, the prepared columns were subjected to staged pile loading tests, and core samples were taken from the formed columns.

For optimum designs in small scale DMC, the estimated results at the end of the twenty-six days of experimenting were 92% on clayey soil and 83% on sandy soil in Unconfined Compressive Strength Tests, and 71% and 57% in Permeability Tests, respectively. The results of replacing the zeolite with cement indicate a slight decrease in the strength value; as these results are considered within the acceptable limits, they are considered satisfactory DMC values. The results revealed that increasing the amount of zeolite leads to a slight increase in the permeability coefficient, and even if the zeolite is used in the maximum possible replacement, the permeability coefficient will remain within the required limit values. Furthermore, the SEM analysis results indicated that the possibility of utilizing zeolite up to a certain amount as a replacement with cement. However, the small amount of cement leads to a decrease in C-H and C-S-H gels. The load test results of large-scale DMC have shown the DMC's sufficiency formed in the layered soil environment in terms of bearing capacity and settlement criteria, and the unconfined compressive strength of the core samples taken from the columns was 90% of the strength of the small-scale DMC.

Keywords: Deep mixing column, Permeability coefficient, Response surface method, Unconfined compressive strength, Zeolite

ÖNSÖZ

Öncelikle bu günleri bana nasip eden Rabb'ime hamd ederim. Yüksek Lisans eğitimim boyunca yardımını ve bilgi birikimini benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Murat Olgun'a saygımı ve teşekkürlerimi sunarım. Bu günlere gelmemde maddi ve manevi olarak desteğini benden esirgemeyen değerli aileme sonsuz saygı ve sevgimi sunarım. Çalışmam esnasında yardımlarını benden esirgemeyen Öğretim Görevlisi Alican Şenkaya'ya, Yüksek İnşaat Mühendisi Bekir Fidan'a, Yüksek İnşaat Mühendisi Mohanad Alkwanadoli'ye ve İnşaat Mühendisi Sadeq Al-Shalif'e çok teşekkür ederim. Yüksek Lisans eğitimim boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tez çalışmama desteklerinden ötürü Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Furkan ARSLAN
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Zemin Stabilizasyonu ve Stabilizasyon Yöntemleri.....	3
2.1.1. Derin Karıştırma Yöntemi	4
2.1.1.1. Derin Karıştırma Yönteminin Tarihsel Gelişimi	4
2.1.1.2. Derin Karıştırma Yöntemi Temel Çalışma Prensipleri.....	6
2.1.1.3. Derin Karıştırma Yöntemi Çeşitleri	6
2.1.1.4. Derin Karıştırma Yöntemi Uygulama Alanları	9
2.1.1.5. Derin Karıştırma Yöntemi Uygulamasında Önemli Parametreler	10
2.1.1.7. Derin Karıştırma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	11
2.2. Zeolit	12
2.2.1. Başlıca Zeolit Türleri.....	14
2.2.2. Zeolitlerin Oluşumu ve Türkiye’deki Zeolit Yatakları.....	15
2.2.3. Zeolitlerin Kullanım Alanları	16
2.2. Literatür Özeti	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Malzeme Özellikleri.....	23
3.1.1. Zeminler.....	23
3.1.2. Çimento	26
3.1.3. Zeolit.....	27
3.1.4. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi	30
3.2. İstatiksel Deney Tasarım Yöntemi.....	31
3.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi.....	31
3.3. Küçük Ölçekli DKK’ların Deney Tasarım Tablosunun Oluşturulması	32
3.3.1. Tablo Girdilerinin Sınır Değerlerinin Belirlenmesi.....	32
3.4. Marsh Hunisi Deneyi	34
3.5. Küçük Ölçekli DKK Numunelerinin Hazırlanması ve Kürde Bekletilmesi	36
3.6. Küçük Ölçekli Deneylerin Programı.....	39
3.7. Serbest Basınç Deneyi.....	41
3.7.1. Kiriş Modülü Yöntemi.....	43
3.8. Permeabilite Deneyi	43
3.9. Optimizasyon Çalışmaları	48
3.9.1. Optimizasyonun Yapılışı	50
3.10. SEM Analizi	53

3.11.	Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları	54
3.11.1.	Büyük Ölçekli DKK İmalatında Kullanılan Ekipmanlar.....	55
3.11.2.	Tankların Zemin ile Doldurulması	59
3.11.3.	Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonu İmalatı	61
3.11.4.	Tank İçerisinde DKK'ların Yüklenmesi.....	65
3.11.4.1.	Teğet Yöntemi	67
3.11.5.	DKK'dan Karot Alınması.....	68
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	70
4.1.	Mars Hunisi Deneyi	70
4.2.	Küçük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları.....	73
4.2.1.	Serbest Basınç Deneyi	73
4.2.2.	Permeabilite Deneyi	102
4.2.3.	SEM Analizleri	116
4.3.	Optimum Tasarım Deneyleri.....	130
4.4.	Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları.....	131
4.4.1.	Tank İçerisinde Yüklenen Derin Karıştırma Kolonları	131
4.4.1.1.	DKK'ların Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı.....	134
4.4.1.1.1.	1 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı	134
4.4.1.1.2.	2 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı	138
4.4.1.1.3.	3 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı	140
4.4.2.	Derin Karıştırma Kolonları Numuneleri	141
4.4.2.1.	Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi	141
4.4.2.2.	Karot Numuneler Üzerinde Permeabilite Deneyi.....	143
4.4.2.3.	Küçük Ölçekli DKK-Büyük Ölçekli DKK İlişkisi	144
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	145
5.1.	Sonuçlar.....	145
5.2.	Öneriler	148
KAYNAKLAR	149	
EKLER	155	
ÖZGEÇMİŞ	172	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

δ	: Oturma miktarı
δ	: Kolon ile zeminin sürtünme açısı
$^{\circ}$	: Derece
A	: Alan
A_0	: İlk enkesit değeri
$A_{\text{çevre}}$	: Kolon çevresinin alanı
A_f	: Uygulama sonrası enkesit değeri
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
AlO_2	: Alüminyum oksijen
$A_{uç}$	: Kolon ucunun kesit alanı
Ba	: Baryum
c	: Kohezyon
C	: Santigrat
C_3A	: Trikalsiyum alüminat
C_3S	: Trikalsiyum silikat, Alit
Ca	: Kalsiyum
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
$CaSO_4$	: Kalsiyum sülfat
C_c	: Eğrilik katsayısı
Cd	: Kadmiyum
C-H	: Kalsiyum hidroksit
Cl^-	: Klorür
cm	: Santimetre
cm^2	: Santimetrekare
cm^3	: Santimetreküp
Co	: Kobalt
CO_2	: Karbondioksit
Cs	: Sezyum
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
Cu	: Bakır
C_U	: Üniformaluluk katsayısı
D_{10}	: Efektif çap
dak	: Dakika
dev	: Devir
D_r	: Rölatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
Fe	: Demir
Fe_2O_3	: Demir (3) oksit
g	: Gram
g	: Yerçekimi ivmesi
G_s	: Güvenlik katsayısı

h	: Kolon yüksekliği
H_0	: İlk boy
H_2O	: Su (dihidrojen monoksit)
I_p	: Plastisite indisi
i	: Hidrolik eğim
K	: Potasyum
k	: Permeabilite katsayısı
K_0	: Yanal zemin basıncı katsayısı
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
kPa	: Kilopaskal
L	: Boy
L_s	: Lineer rötre
m	: Metre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
Mg	: Magnezyum
mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
n	: Porozite
N_2O	: Nitröz oksit
Na	: Sodyum
Na_2O	: Sodyum oksit
NO_2	: Azot dioksit
O	: Oksijen
P_0'	: Kolon ucundaki efektif gerilme
Pb	: Kurşun
pH	: Hidrojenin gücü
P_{max}	: Maksimum yük
PVC	: Polivinil klorür
Q	: Debi
Q	: Yük
$q_{sınır}$	: Sınır taşıma gücü
q_u	: Serbest basınç mukavemeti
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
s	: Saniye
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum dioksit
SO_2	: Kükürt dioksit
SO_3	: Kükürt trioksit
SP	: Kötü derecelenmiş kum
Sr	: Stronsiyum
$\tan$	: Tanjant
v	: Hız
w	: Doğal su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
Zn	: Çinko
α	: Adezyon katsayısı

γ'	: Efektif birim hacim ağırlık
γ_{doy}	: Doygun birim hacim ağırlık
ΔH	: Boy uzama/kısalma miktarı
Δh	: Basınç yüksekliği
ε	: Birim deformasyon
ρ_s	: Tane yoğunluğu
σ	: Gerilme
$\sigma'_{v, \text{ort}}$	: Kolon ortasında düşey efektif gerilme
ϕ	: İçsel sürtünme açısı

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	: Tek Yönlü Varyans Analizi
ark.	: arkadaşları
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BS	: İngiliz Standartları
CDM	: Çimento Derin Karıştırma
DKK	: Derin Karıştırma Kolonu
DM	: Derin Karıştırma (Deep Mixing)
DMC	: Deep Mixing Column
IR	: Kızılötesi (Infrared)
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
PHRI	: Port And Harbour Research Institute
sd	: serbestlik derecesi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TAEK	: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu
TS	: Türk Standartları
UCS	: Tek Eksenli Basınç
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
vb.	: ve benzeri
vs.	: vesaire

1. GİRİŞ

Hızla gelişen dünyada artan nüfusla beraber insanların ihtiyaçlarının karşılanması için aynı hızda teknoloji gelişmekte ve buna paralel olarak köprü, tünel, hastane, yüksek katlı binalar vb. önemli mühendislik yapılarının inşaa faaliyetleri de artmaktadır. Bu tip yapıların inşası sağlam zemin ortamlarını gerektirmektedir. Yapıların inşa edileceği alanların değerli olması veya alternatifinin olmaması, problemli zemin birimine sahip ortamlarda yapıların inşa edilmesini ve bu ortamların zeminlerinin iyileştirilmesi için farklı çözümlerin üretilmesini gerektirmektedir. Üretilen bu çözümler ise zeminlerin iyileştirilmesi olarak adlandırılmaktadır. Zeminlerin iyileştirilmesi genel anlamda yüzeysel ve derin iyileştirme yöntemleri olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Zemin iyileştirmesinin eğer sorunu çözebileceği öngörülmüş ise yüzeysel iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır. Ancak yüzeysel iyileştirmenin etkili olmayacağı öngörülmüş ise derin iyileştirme yöntemleri uygulanmaktadır.

Derin iyileştirme yöntemlerinden birisi 1960'lı yıllarda geliştirilmeye başlanan ve günümüzde kullanımı gittikçe yaygınlaşan, genellikle killi zeminlerde etkili sonuçlar veren derin karıştırma yöntemidir. Bu yöntemin çalışma prensibi; kanatlı, delici ve kanatlarında enjeksiyon karışımının basılabilmesi için delikler bulunan bir bıçağın zemini delerek ve dönerek ilerlemesi, bu esnada ise bıçak üzerindeki deliklerden uygun enjeksiyon karışımının zemine belirli bir basınçla basılması ve bıçağın tekrar geri çekilmesi sonucunda yapılacak yapının altındaki zeminde sürekli ve yeterli mukavemette bir derin karıştırma kolonu (DKK) imal edilmesi şeklindedir. Bu yöntem, fore kazık uygulamasının aksine donatı kullanılmaması ve imalatının kolay olmasından dolayı ekonomik ve hızlı bir yöntem olmaktadır.

Enjeksiyon karışımına zeminin iyileştirilmek istenen özelliklerine uygun katkı maddeleri katılabilmektedir. Bu katkı maddeleri ise fabrika, maden ocakları atıkları ve volkanik ayrışma sonucu oluşan atıklardan seçilerek hem geri dönüşüme olanak sağlanır hem de daha ekonomik bir imalat sağlanmış olunur.

Bu tez kapsamında öncelikle uygulanacak olan deney tasarım tablosunun oluşturulması için kullanılacak olan malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Daha sonrasında ise DKK imalatında uygulanan bağlayıcı dozajları, çimento ve diğer malzemelerin kullanılan değerleri araştırılarak tasarım tablosu girdilerinin alt ve üst limitleri belirlenmiştir. Design Expert 11 programı yardımıyla Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak 17 tasarımlı deney tasarım tablosu oluşturulmuştur. Bu tablo gereğince

oluşan her tasarım için enjeksiyon karışım hesabı yapılmış ve her tasarım enjeksiyonu için Marsh Hunisi deneyi yapılarak enjeksiyon karışımlarının akma kıvamları belirlenmiştir. Deney tasarım tablosundaki her tasarım için 28 ve 56 günlük kür sürelerinde hem killi hem de kumlu zemin için serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları analiz edilmiş ve bir optimum tasarım belirlenerek doğrulama deneyleri yapılmıştır. Sonrasında ise belirlenen optimum tasarım için üst tabakada kumun ve alt tabakada kilin olduğu tabakalanma durumunu temsil eden tabakalı zeminde derin karıştırma yöntemi ile DKK imal edilmiştir. DKK'nın imal edilmesinde klinoptilolit türü zeolit puzolanik katkısı kullanılmış olup, klinoptilolit DKK üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kullanılacak enjeksiyonda ise portland çimentosuyla beraber volkanik orjinli malzeme olan klinoptilolit kullanımıyla hem daha ekonomik hem de istenilen mukavemette ve geçirimsilikte bir kolon imal edilmesi amaçlanmıştır. Böylece derin karıştırma yöntemi uygulamasında portland çimentosuyla beraber klinoptilolit türü zeolit kullanılabiliirliği irdelenmiştir.

Hazırlanan numunelerden tasarımları temsil ettiği düşünölen bazı küçük ölçekli DKK numuneleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizine tabii tutulmuş ve zemin ile bağlayıcı malzemeler arasında oluşın bağ ve reaksiyonlar belirlenmeye çalışılmıştır.

Küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan optimizasyon analizi sonuçlarına göre belirlenen optimum tasarım için doğrulama deney numuneleri hazırlanarak ilgili deneylere tabii tutulmuştur. Doğrulama deney sonuçları, analiz sonuçları için elde edilen değerlerle uyumlu olmuştur.

Belirlenen optimum tasarım dikkate alınarak 3 tanesi model tank içerisinde yüklenmek üzere ve 1 tanesi de karot numunesi alınarak incelenmek üzere toplamda 4 adet büyük ölçekli DKK oluşturulmuştur. Oluşturulan DKK 28 günlük kür süresince bekletilmiş ve ardından tank içerisinde yükleme deneyleri yapılmıştır. 4. kolon ise 30 cm çapında oluşturulmuş ve kolonun farklı noktalarından karot numuneler alınmıştır. Tank içerisinde yüklemeye tabii tutulan 3 adet DKK için kıyaslama yapılarak, farklı tabakalanma yüksekliklerinin kolon dayanımına etkisi ve kolonun oturma miktarlarına etkisi incelenmiştir. 4. kolondan alınan karot numuneler üzerinde ise serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar küçük ölçekli deney numunelerinin optimum tasarımı için hazırlanan DKK için elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zemin Stabilizasyonu ve Stabilizasyon Yöntemleri

Zemin stabilizasyonu; zemin özelliklerinin üstyapı inşası için uygun olmadığı durumlarda farklı yöntemler kullanarak zeminin istenilen düzeyde iyileştirilmesi şeklinde tanımlanmaktadır (Das, 1984). Zeminin kayma mukavemetinin, temellerin taşıma gücünün ve yamaçların stabilitesinin artırılması, yine zeminin oturma miktarlarının, büzülme/kabarma ve sıvılaşma potansiyellerinin azaltılması gibi durumlarda zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır (Tuncan, 2007). İnşa edilecek her türlü yapıların yönetmelikler çerçevesinde yeterli emniyette inşa edilmesi gereklidir. Bu sebeple hem yapının kendisinin alacağı yükleri güvenle taşıması hem de yapının inşa edildiği zeminin yapıdan ve zeminden gelen yükleri güvenle taşıması gereklidir. Bu gibi durumlar düşünüldüğünde yapının inşa edileceği zeminin mühendislik özelliklerinin düşük olması durumunda zemin üzerinde farklı stabilizasyon yöntemleri uygulanarak bu özellikler iyileştirilmektedir. Bu stabilizasyon yöntemleri ise ‘Yüzeysel Stabilizasyon Yöntemleri’ ve ‘Derin Stabilizasyon Yöntemleri’ olarak Çizelge 2.1.’de verilmektedir (Uzuner, 2013).

Çizelge 2.1. Stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013)

Yüzeysel Stabilizasyon	
<i>Katkısız Stabilizasyon</i>	<i>Katkılı Stabilizasyon</i>
Kompaksiyon	Mekanik stabilizasyon
Drenaj	Çimento ile stabilizasyon
vb.	Kireç ile stabilizasyon
	Bitüm ile stabilizasyon
	vb.
Derin Stabilizasyon	
<i>Kohezyonlu Zeminler</i>	<i>Kohezyonsuz Zeminler</i>
Derin kompaksiyon (Dinamik konsolidasyon)	Ön yükleme yöntemi
Derin vibrasyon (Vibro-flotasyon)	Kum drenleri yöntemi
Kompaksiyon kazıkları	Elektro – osmoz yöntemi
Patlayıcılar	Isı ile stabilizasyon
Enjeksiyon	vb.
Geotekstilller	
vb.	

2.1.1. Derin Karıştırma Yöntemi

Derin karıştırma yöntemi; zemin taşıma gücünü artırmak, geçirimsizlik özelliği istenen yapılar oluşturmak ve zeminleri mevcut konumunda iyileştirmek amacıyla uygulanan zemin iyileştirme tekniğidir. Bu yöntem özetle; çimento, uçucu kül, kireç gibi bağlayıcı özelliği olan maddenin su ile enjeksiyon olarak hazırlanması ve zemine enjekte edilerek karıştırılması şeklindedir (Wahidy, 2019).

Bu bağlayıcı malzemeler, ortası boş olan dairesel bir şekilde zemini keserek ve delerek ilerleyen şaftlardan zemine enjekte edilir. Zemini delmeyi kolaylaştırmak için şaftın ucu iki taraftan kanat şeklinde karıştırma bıçağı ile desteklenebilir. Bu şaftlar, genel olarak karada çalışmak için paletli bir taşıta dikey bir şekilde konumlandırılarak montajlanır. Uygulanacak imalata göre her taşıta bir ile sekiz arasında değişen miktarda bağlıdır. Bu yöntemle imal edilen kolonların çapları 0.6 ile 1.5 m arasında değişebilmektedir ve yaklaşık 40 m derinliğe kadar kolon imal edilebilir (Bruce ve Bruce, 2003).

Bu yöntem ile mukavemet, geçirimsizlik, şişme potansiyeli gibi özellikleri zayıf olan zeminin yerinde iyileştirilmesi sağlanarak daha düşük maliyetli ve daha hızlı bir uygulama gerçekleştirilmektedir.

Yumuşak killer, gevşek kumlar ve turbalarda bu yöntem uygulandığında daha iyi sonuçlar elde edilmektedir (Hausmann, 1990). Ayrıca çimento, uçucu kül, kireç ve bunların farklı kombinasyonlarda karıştırılmış hali bu yöntem için en çok kullanılan bağlayıcı malzeme türleridir (Pathivada, 2005).

2.1.1.1. Derin Karıştırma Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Derin karıştırma yöntemiyle ilgili bazı önemli tarihsel gelişmeler Porbaha (1998) tarafından açıklanmıştır:

Japonya, derin karıştırma yöntemi üzerine yaptığı çalışmalar ile 1960'lerden beri bu yöntemin gelişimi için öncü ülke olarak kabul edilmektedir. Ulaştırma Bakanlığı'nın laboratuvarı olan PHRI önderliğinde araştırma ve geliştirmenin ilk aşaması derin kireç karıştırmaydı. Çalışmada farklı bölgelerden çeşitli deniz kili toplanmış ve katkı maddesi olarak hızlı kireç ile karıştırılmıştır.

İsveç ve Finlandiya ise derin karıştırma yönteminin Avrupa'daki öncü ülkeleri olarak bilinmektedir. 1967'de İsveç Geoteknik Enstitüsü, Linden-Alimak AB tarafından tasarlanan ekipmanı kullanarak Kjeld Pause girişimiyle İsveç kireç sütununu geliştirmiştir.

1974 yılında Finlandiya'da, kolon modeli ve kolon uzunluğunun taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini analiz etmek amacıyla, ilk deneme seti (6 m yüksekliğinde ve 8 m uzunluğunda) kireç sütunları inşa edilmiştir.

1974 yılında derin kireç karıştırma yöntemi Japonya ve Güneydoğu Asya'da uygulamaya konulmuştur. 1975 yılında enjeksiyon olarak çimento bulamacının kullanıldığı derin karıştırmanın 'ıslak yöntemi' geliştirilmiştir.

Çin'de, resmi araştırmalar 1970'lerin sonunda başlamıştır. İlk arazi tabanlı ekipman seti 1978'de ortaya çıkmış ve Şangay'daki bir endüstriyel tesisin temelleri için kullanılmıştır.

1980 yılında Japon İnşaat Bakanlığı kuru jet karıştırma yöntemini geliştirmiştir.

1970'ler ve 1980'ler boyunca Avrupada, stabilize edici katkıların bileşimi ve karışımların farklı zemin tipleri için optimize edilmesi üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

1980'lerde çeşitli zemin iyileştirme uygulamaları gerçekleştirilmiş, kireç sütun yöntemi ile hem Finlandiya hem de İsveç'te yıllık imal edilen kolon uzunlukları 1 milyon metreyi aşmıştır.

1980'lerin sonlarında bir ABD projesinde yeni nesil yerinde karıştırılmış sistem tanıtılmış ve bir yapının deprem sırasında zemin sıvılaşmasından korunması için kullanılmıştır. O zamandan beri ABD'li uygulayıcılar baraj stabilizasyonu için derin karıştırma yöntemini kullanmış ve aynı zamanda çevresel uygulamalarla ilgili teknolojilerin geliştirilmesinde öncü rol almıştır.

Japonya CDM Derneği tarafından yayınlanan istatistiklere göre, 1977-1993 yılları arasında Japonya'da derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen toprak hacmi, hem deniz hem de kara projeleri için yaklaşık 23.6 milyon m³ olmaktadır.

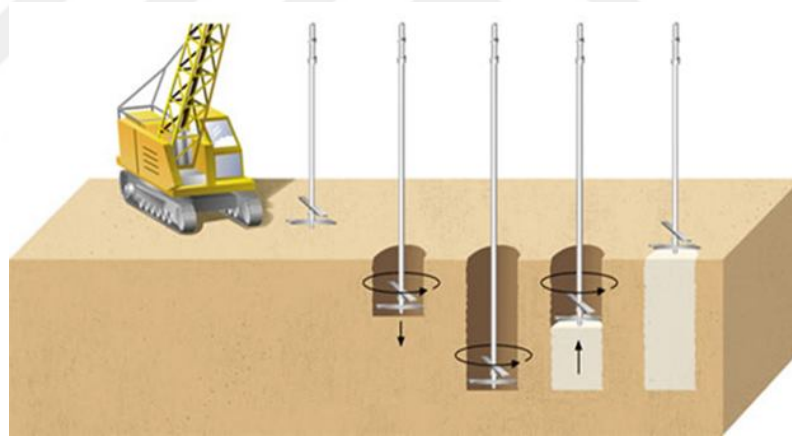
1987 ve 1990 yılları arasında, Tianjin Limanı için iki yeni rıhtım inşa edilmiş ve 60 hektarlık yeni liman arazisinin ıslahı için derin karıştırma yöntemi kullanılmıştır.

1995 yılında İsveç Geoteknik Derneği kireç ve kireç ± çimento sütunları için yeni bir tasarım kılavuzu yayınlamıştır. Bu tasarım kılavuzu proje planlama, yürütme ve denetimle ilgili mevcut bilgileri özetlemektedir.

İskandinav ülkelerinin yanı sıra, Bulgaristan Bilimler Akademisi zemin çimentosu araştırması ve demiryolu setlerinin stabilizasyonunda derin karıştırma yönteminin uygulandığını bildirmiştir.

2.1.1.2.Derin Karıştırma Yöntemi Temel Çalışma Prensibi

DKK'nın imal edileceği ekseninde delici makine konumlandırılır. Karıştırıcı şaftın zemini parçalayarak ilerlemesiyle zeminin içerisinde kolonun imal edileceği derinliğe kadar inilir. Bu derinliğe ulaşıldıktan sonra, karıştırıcı şaft zemini karıştırırken yukarıya çekilir. Bu işlemler uygulanırken aşağıya inme ve yukarıya çekme hareketlerinin birinde veya her ikisinde de çimento, kireç, diğer bağlayıcı malzeme veya bunların kombinasyonundan oluşan enjeksiyon zemine enjekte edilerek zemin ile karışması sağlanır. Bu işlemlerin sonunda karıştırıcı şaft zemin içerisinde çıkarılır ve DKK imal edilmiş olur (Şekil 2.1.).

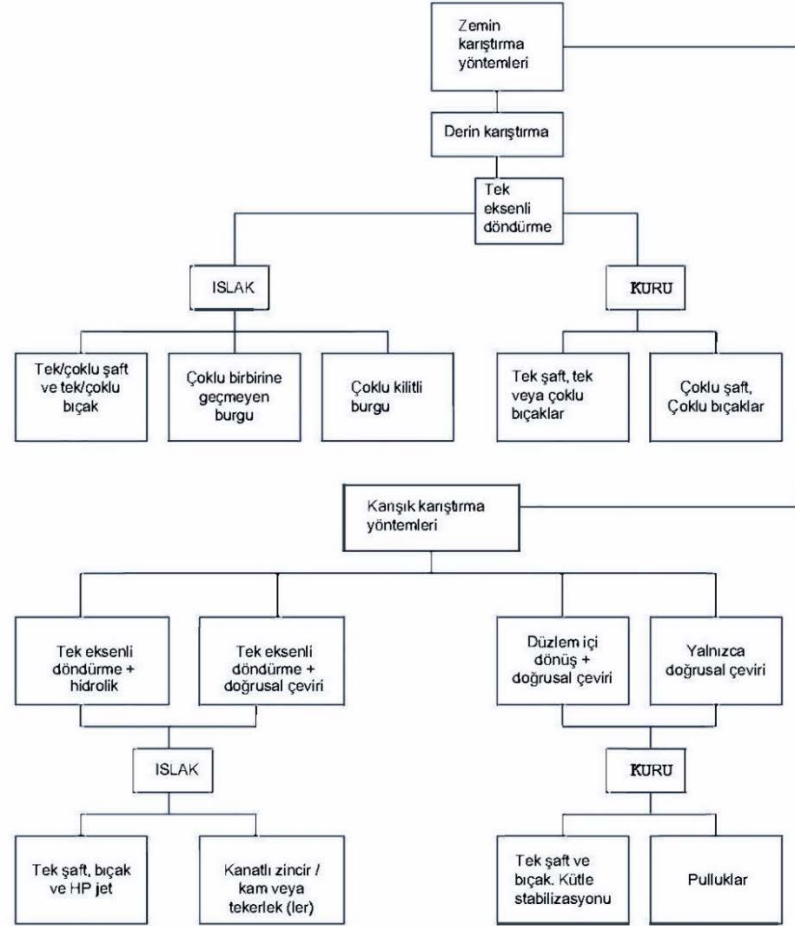


Şekil 2.1. Derin karıştırma yöntemi uygulaması (Kılıç, 2013)

2.1.1.3.Derin Karıştırma Yöntemi Çeşitleri

Zaman içerisinde yöntemin gelişmesiyle beraber çok çeşitli derin karıştırma yöntemleri ortaya çıkmıştır (Şekil 2.2.). Bu yöntemler genel olarak ıslak ve kuru karıştırma yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Islak karıştırma yönteminde bağlayıcı malzeme, su ve varsa çalışmaya özel olarak belirlenen malzemeler istenilen oranlarda karıştırılarak zemine enjekte edilir. Kuru karıştırma yöntemindeyse bağlayıcı malzeme zemine kuru olarak enjekte edilir. Yeraltı su seviyesinin düşük olduğu, kuru, kurak

ortamlarda ıslak karıştırma yöntemi, yer altı su seviyesinin yüksek olduğu ortamlarda ise kuru karıştırma yöntemi tavsiye edilmektedir (Wahidy, 2019). Ayrıca şaft sayısına göre de derin karıştırma yöntemi çeşitleri mevcuttur (Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.).



Şekil 2.2. Derin karıştırma yöntemleri ve karışık karıştırma yöntemleri ile kullanılan ekipmanın genel sınıflandırması (TS EN 14679, 2006)

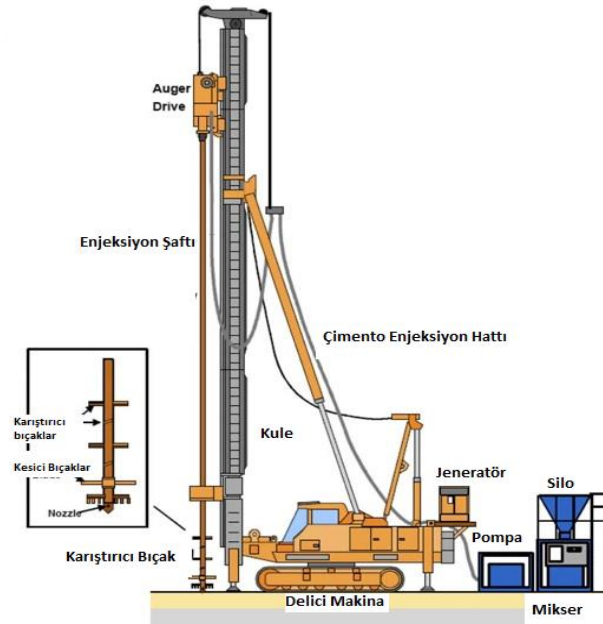


Şekil 2.3. Derin karıştırma yönteminde tek şaftlı burğu (Wahidy, 2019)



Şekil 2.4. Uygulamada kullanılan çeşitli şaftlar (Noori, 2019)

Derin karıştırma yönteminin genel sistemi Şekil 2.5.'de verilmiştir:



Şekil 2.5. Derin karıştırma yöntemi sistemi (Kılıç, 2013)

Derin karıştırma yönteminde kullanılan ekipmanların genel karakteristik özellikleri Çizelge 2.2. ve Çizelge 2.3.'te verilmiştir.

Çizelge 2.2. Islak karıştırma yöntemi için kapasite değerleri (TS EN 14679, 2006)

Ekipman	Detay	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma makinesi	Karıştırma mili sayısı	1-3	1-4	2-8
	Karıştırıcı çapı	0.4-0.9m	1.0-1.6m	1.0-1.6m
	Maksimum iyileştirme derinliği	25m	48m	70m
	Nozulun yeri	Mil üzeri	Mil ve bıçak üzeri	Mil ve bıçak üzeri
	Enjeksiyon basıncı	500-1000 kPa	300-600 kPa	500-800 kPa
Enjeksiyon tesisi	Depolanan karışım miktarı	3-6 m ³	3 m ³	3-20 m ³
	Üretim kapasitesi	0.08-0.25 m ³ /dak	0.25-1 m ³ /dak	0.5-2 m ³ /dak
Bağlayıcı depolama tankı	Maksimum kapasite	-	30 ton	50-1600 ton

Çizelge 2.3. Islak karıştırma yöntemi için uygulama değerleri (TS EN 14679, 2006)

Karıştırma makinesi	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma şaftının batma hızı	0.5-1.5 m/dak	1.0 m/dak	1.0 m/dak
Karıştırma şaftının geri çekme hızı	3.0-5.0 m/dak	0.7-1.0 m/dak	1.0 m/dak
Karıştırıcı bıçakların dönme hızı	25-50 devir/dak	20-40 devir/dak	20-60 devir/dak
Bıçak dönme sayısı	Çoğunlukla burgu ile birlikte	350 devir/m	350 devir/m
Bağlayıcı enjeksiyon miktarı	80-450 kg/m ³	70-300 kg/m ³	70-300 kg/m ³
Enjeksiyon aşaması	Batma ve/veya geri çekme sırasında	Batma ve/veya geri çekme sırasında	Batma ve/veya geri çekme sırasında

2.1.1.4. Derin Karıştırma Yöntemi Uygulama Alanları

Derin karıştırma yöntemi çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu amaçlar ise şöyle listelenebilir:

- Temel altı zeminlerin stabilizasyonunda,
- Kazı destek duvarı olarak,
- Yapılacak kazı alanı civarında bulunan mevcut yapıları korumak,
- Sıvılaşmayı engelleme,
- Geçirimsizlik perdeleri oluşturmak,
- Rıhtım yapılarında,
- Tünel zemininin desteklenmesinde (Wahidy, 2019).

2.1.1.5.Derin Karıştırma Yöntemi Uygulamasında Önemli Parametreler

DKK'nın imal edildiği zemin, enjeksiyonda çeşitli bağlayıcı malzemelerin kullanılması ve kullanılan derin karıştırma aleti düşünüldüğünde, DKK'nın performansını etkileyecek olan durumlar şöyle özetlenebilir:

İmal edildiği zemin özellikleri bakımından:

- Zeminin kohezyonu(c) ve içsel sürtünme açısı(ϕ)
- Zeminin boşluk oranı(e) ve porozitesi(n)
- Zeminin doğal su muhtevası(w)

Kullanılan bağlayıcı malzemeler bakımından:

- Uygun bağlayıcı malzeme seçimi
- Kullanılan bağlayıcı malzeme yüzdeleri
- Su/bağlayıcı oranı

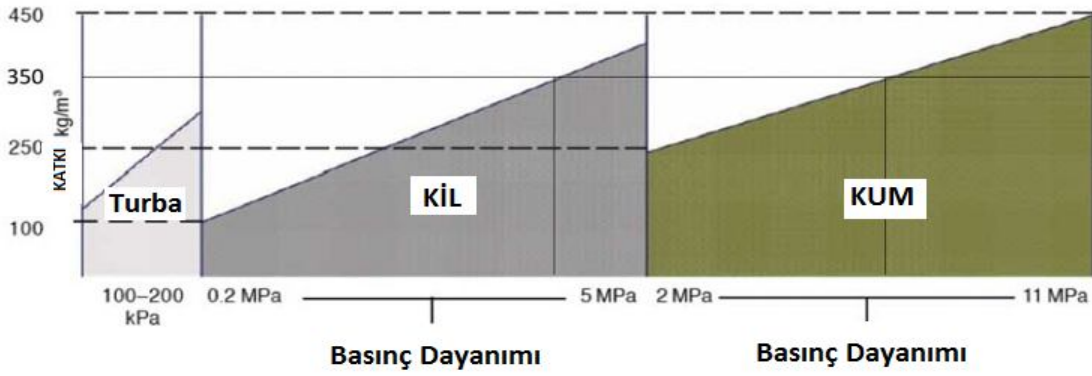
Kullanılan alet özellikleri bakımından:

- Aletin döndürme hızı
- Aletin zemine dalma ve geri çekme hızı
- Alet bıçağındaki nozul sayısı
- Alet bıçağındaki nozul çapı

Çizelge 2.4. ve Şekil 2.6.'da ise farklı zemin tiplerinde imal edilen derin karıştırma kolonlarının yaklaşık basınç dayanımları verilmiştir:

Çizelge 2.4. Farklı zeminlerde derin karıştırma kolonları yaklaşık basınç dayanımları (Onur ve ark., 2016)

Bağlayıcı miktarı (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Turba	Kil	Kum
100	0.1	0.2	-
250	0.15	1.0	2.0
350	0.2	4.0	6.0
450	-	-	11.0



Şekil 2.6. Farklı zeminlerde derin zemin karıştırma kolonları basınç dayanımları (Kılıç, 2013)

2.1.1.7. Derin Karıştırma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Derin karıştırma yönteminin aynı temel amaçlar doğrultusunda uygulanan diğer yöntemlere göre çeşitli avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Çok sıkı zeminin bulunmadığı, iyileştirilecek zemin yüksekliğinin 40 m'den daha az olduğu, iyileştirilmesi istenen zemin hacminin fazla olduğu ortamlarda ve iyileşmesi istenen zeminin mukavemetinin 0.1-5 MPa arası olduğu ve istenen performans sınırlarının belirli olduğu ortamlarda iyi sonuçlar vermektedir (Kılıç, 2013). Çizelge 2.5., Çizelge 2.6. ve Çizelge 2.7.'de derin karıştırma yönteminin diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları verilmiştir:

Çizelge 2.5. Derin karıştırma yönteminin diyafram duvarlara, palplanşlara ve kesişen kazıklara göre avantaj ve dezavantajları (Kılıç, 2013)

Hidrolik cut-off olarak kullanıldığında	
Avantajları	Dezavantajları
Atık malzeme hacmi azdır.	Derinlik sınırı vardır.
Atık malzeme kolayca katı atığa dönüştürülür.	Geniş çalışma alanı gerektirir.
Vibrasyon düşüktür, gürültü azdır.	Çok sıkı ve katı zeminlerde uygulanamaz.
Heterojen zeminlerde uniform olarak uygulanabilir.	Yalnızca düşey yönde imal edilebilir.
Düşük maliyet getirir.	Palplanşlar sıfır atık oluşturur.
Kalite kontrol testleri kolaydır.	
Kazı destek sistemi olarak kullanıldığında	
Avantajları	Dezavantajları
15 ile 40 metre derinlikler için düşük birim maliyet.	Donma, çözülme bozulması meydana gelebilir.
İlave kaplama gerektirmemesi.	Derinlik limiti vardır.
Su geçirgenliğini düşürmesi.	Geniş çalışma alanı gerektirir.
Atık malzeme kolayca katı atığa dönüştürülür.	Çok sıkı ve katı zeminlerde uygulanamaz.
Vibrasyon düşüktür, gürültü azdır.	Yalnızca düşey yönde imal edilebilir.
Heterojen zeminlerde uniform olarak uygulanabilir.	

Çizelge 2.6. Derin karıştırma yönteminin zemin iyileştirme sistemi olarak kullanıldığında Jetgrout vb. yönteme göre avantaj ve dezavantajları (Kılıç, 2013)

Avantajları	Dezavantajları
40 metreye kadar derinlikler için düşük birim maliyet.	Çok zayıf, problemli zeminlerde uygulama zorluğu.
0.5 ile 5 MPa dayanıma sahip zeminler için kolay uygulanabilirlik.	Derinlik limiti vardır.
Su geçirgenliğini düşürmesi.	Geniş çalışma alanı gerektirir.
Atık malzeme kolayca katı atığa dönüştürülür.	Çok sıkı ve katı zeminlerde uygulanamaz.
Vibrasyon düşüktür, gürültü azdır.	Yalnızca düşey yönde imal edilebilir.
Heterojen zeminlerde uniform olarak uygulanabilir.	

Çizelge 2.7. Derin karıştırma yönteminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla kullanıldığında kompaksiyon vb. yönteme göre avantaj ve dezavantajları (Kılıç, 2013)

Avantajları	Dezavantajları
Literatüre girmiş deprem sonrası performans göstergeleri.	Derinlik limiti vardır.
Büyük projelerde düşük maliyetler getirmesi.	Geniş çalışma alanı gerektirir.
Çevreye minimum zarar.	Çok sıkı ve katı zeminlerde uygulanamaz.
Kolay kalite kontrol testleri.	Yalnızca düşey yönde imal edilebilir.
Vibrasyon düşüktür, gürültü azdır.	

2.2. Zeolit

Zeolitler alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatları olarak ifade edilmektedir (Kurt ve Arık, 2015). Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de doğal zeolitler görülmektedir.

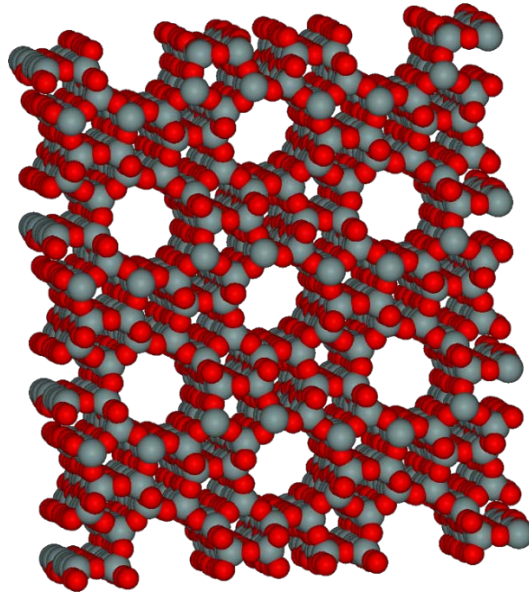
“Zeolitler kafes yapılarında alüminyum, silis ve oksijen, gözeneklerinde ise kation ve su içeren mikro gözenekli kristal katılardır. Silis ve alüminyum atomları ortak oksijen atomu sayesinde birbirlerine tetrahedral olarak bağlanmışlardır” (Gülen ve ark., 2012) (Şekil 2.9.). 1756 yılında İsveçli mineralog Fredrick Cronstedt tarafından keşfedilmiştir. Ülkemizde ise ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında zeolit oluşumları gözlemlenmiştir. Daha sonra Ankaranın batısında zeolit yatakları tespit edilmiştir (Sarıkaya, 2006). 1750’lerden beri mineral türünün biliniyor olmasına rağmen kristal yapıları, gelişen X-Rd, I.R. abrosbsiyonu, nükleer manyetik ve elektron spin rezonas gibi yöntemler sayesinde 1930’larda belirlenmeye başlamıştır (Gülen ve ark., 2012).



Şekil 2.7. Doğal zeolit (Vikipedi, 2018)



Şekil 2.8. Doğal zeolit (MTA)



Şekil 2.9. Mikro gözenekli yapıyla zeolit molekülü (Vikipedi, 2018)

2.2.1. Başlıca Zeolit Türleri

Zeolitlerin çok fazla sayıda çeşitleri olup bunlardan en fazla bilineni klinoptilolittir. Klinoptilolit, yüksek katyon değişim kapasitesi, yüksek absorpsiyon kapasitesi, kataliz ve dehidrasyon kapasitelerinden dolayı zeolit türleri arasında en çok kullanılan zeolit türüdür. Klinoptilolit ısıya dayanıklı bir zeolit türüdür ve 700°C sıcaklığa kadar kristal yapısını koruyabilmektedir. Klinoptilolit, yaklaşık %39'luk bir kristal boşluğa sahiptir. Klinoptilolit, aside karşı dayanıklı bir zeolittir (Soylu ve Gökkuş, 2017). Klinoptilolit, havadaki zararlı gazların tutularak havadaki oksijen miktarının artırılmasında, kirlilik kontrolünde, tarım ve hayvancılık uygulamalarında yem katkısı olarak, çeşitli inşaat uygulamalarında çimento üretim katkısı ve hafif agrega vb. olarak kullanılmaktadır.

Klinoptilolit'in kimyasal formülü: $(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{2.5})(\text{Ca}_{1.0}\text{Mg}_{0.5})(\text{Al}_6\text{Si}_{30})\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. Karşılaşılan diğer zeolit türleri ise şöyledir;

- Analsim
- Mordenit
- Eriyonit
- Höylandit
- Lamontit
- Şabazit
- Filipsit

Önemli bir bilgi olarak zeolitlerin ve beraberinde oluşan minerallerin toksitik olmadığı, burada asıl tehlikenin oluşan tozdan kaynaklandığı belirtilmektedir. 1970'li yıllarda Orta Anadolu'da ortaya çıkan mezotelyoma hastalığı sonucu yapılan incelemeler neticesinde iğne şekilli eriyonit kristallerinin hastalığa neden olduğu belirlenmiştir. Aynı tehlike, lifsi yapısı eriyonitten de ince olan mordenit için de geçerli olmaktadır. Doğal zeolitlerin kullanımı ve madenciliğindeki sağlık riskleri, çoğu silikat ve amonyum silikat malzemelerle aynı olmakla beraber eriyonit ve diğer lifsi yapıdaki zeolit minerallerinin kullanımında gerekli güvenlik önlemlerinin artırılması sağlık açısından hayati önem taşımaktadır (Köktürk, 1995). Ek olarak Dünya Sağlık Örgütü, eriyonitin kanser oluşumunda asbestten daha tehlikeli olarak en tehlikeli mineral olduğunu belirtmektedir.

2.2.2. Zeolitlerin Oluşumu ve Türkiye'deki Zeolit Yatakları

Doğal zeolit yataklarının oluşumu, oluşum ortamlarına göre altı grupta toplanmıştır ve şu şekildedir (Köktürk, 1995):

- Suyu tuzlu olan (kapalı) göllerde volkanik malzemenin birikip göl suyu ile reaksiyonu
- Tatlı veya tuzlu açık göllerde volkanik malzemenin birikip göl suyu ile kimyasal reaksiyona girmesi
- Derin denizel ortamda veya kıyıda volkanik malzemenin birikip deniz suyu ile reaksiyona girmesi
- Düşük ısıli gömülme metamorfizması sonucunda, Al-Si'lu sedimenter ya da volkanik malzemeler oluşması
- Hidrotermal ya da sıcak kaynak sularının Al-Si'lu malzemeye etkisiyle bu malzemenin bozulması
- Çoğunlukla ikinci zaman tortulları arasında görülen ve orijinlerinin volkanik olup olmadığının belirlenemediği, denizel veya gölsel ortamlar oluşması.

Dünyada doğal zeolit üretiminin yaklaşık %60'lık kısmı Küba tarafından yapılmaktadır. Doğal zeolit üretimi kapsamında diğer başlıca üretici ülkeler Japonya, ABD, Güney Afrika, Macaristan, Bulgaristan ve İtalya olarak ifade edilmektedir. Dünya üzerinde zeolit tüketimi 750000 ton/yıl olmakta ve bu zeolitlerin %70'i deterjan üretiminde, %10'u katalizör ve adsorban üretiminde, %8'i desikant üretiminde ve %12'si ise diğer alanlarda kullanılmaktadır (Gülen ve ark., 2012).



Şekil 2.10. Türkiye'deki zeolit yatakları haritası (MTA)

Şekil 2.10.'da Türkiye'deki zeolit yatakları haritası, Çizelge 2.8.'de ise Türkiye'deki zeolit oluşumları görülmektedir.

Çizelge 2.8. Türkiye'deki zeolit oluşumları (Bilgin ve ark., 2018)

Zeolit Yatakları	Zeolit Türleri
Edirne - Uzunköprü güney ve batısı, Keşan kuzeyi ve güneybatısı	Klinoptilolit, mordenit, analsim
Çanakkale - Gelibolu kuzeybatısı	Klinoptilolit
İstanbul - Şile-Ağva arası	Mordenit
Yalova - Karamürsel-Yalova arası, Çınarcık güneyi	Klinoptilolit, mordenit
Bursa - Mustafakemalpaşa	Klinoptilolit
Balıkesir - Sultançayırı, Bigadiç	Klinoptilolit, analsim, höylandit
Manisa - Gördes	Klinoptilolit
İzmir - Foça, Çeşme, Urla	Klinoptilolit, analsim
Afyon - Sandıklı	Şabazit, fillipsit
Kütahya - Şaphane, Gediz, Emet	Klinoptilolit, analsim
Eskişehir - Kırka	Klinoptilolit, fillipsit
Bilecik - Söğütyolu	Klinoptilolit
Kocaeli. Bilecik - Bahçecik, Gölpazarı	Analsim
Bolu - Göynük. Göynük-Mudurnu arası	Klinoptilolit, analsim, mordenit
Ankara - Polatlı, Mülk, Oğlakçı, Nallıhan, Çayırhan, Beypazarı, Kalecik, Hasayaz, Çandır- Şabanözü	Klinoptilolit, analsim, vairakit, şabazit
Çorum - Uğurludağ	Klinoptilolit
Sivas - Yıldızeli	Klinoptilolit, mordenit
Nevşehir - Ürgüp	Klinoptilolit, analsim, şabazit, eriyonit, mordenit

2.2.3. Zeolitlerin Kullanım Alanları

Zeolitler iyon değiştirme kapasitesi, adsorpsiyon yapabilmesi, moleküler boşluklu yapısı, silis içermesi, hafif olması gibi özelliklerinden dolayı çeşitli alanlarda kullanılan minerallerdir. Zeolitlerin kullanım alanları kirlilik kontrolü, enerji, tarım ve hayvancılık, maden ve metalürji ve inşaat sektörü uygulamaları olarak gruplandırılabilir.

Zeolitler daha çok iyon değiştirme ve absorpsiyon özelliklerinden dolayı kirlilik kontrolü için kullanılmaktadır. Nükleer santral atıklarından olan Sr, Cs, Co, Ca gibi çevremiz için tehlikeli olan izotoplar, zeolitler ile tutulabilmekte ve yeraltına gömülerek zararlı etkileri giderilmektedir. Bu amaç doğrultusunda asitlere karşı daha dayanıklı olan klinoptilolit ve mordenit türü zeolitler kullanılmaktadır.

Yakıt olarak petrol, kömür vb. kullanan tesislerin bacalarından zararlı CO₂ ve SO₂ gazları çıkmaktadır. Bu durumda zeolitlerin adsorpsiyon özelliğinden faydalanılarak bu gazların tutulması sağlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda klinoptilolit ve mordenit türü zeolitlerin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir.

Çöp depolama yerlerinin en problemli kısımları zeminleri ve zemin ile temas ettikleri yüzeyleridir. Bu yerlerin zemininde sağlam ve geçirimsiz bir astar olması istenmektedir. Dolayısıyla düşük geçirimsizlik özelliği olan killer, böyle yapılar için tercih edilmektedir. Ancak bu killerin zamanla şişme göstermesi ve asitlere karşı dayanıklılığının az olması yapının zemininde problem teşkil etmektedir. Bu killerin yanında klinoptilolit türü zeolit kullanımıyla bu problemlerin üstesinden gelinebildiği yapılan araştırmalar ile gösterilmiştir (MTA).

Madencilik ve metalürjik faaliyetler sonucu oluşan atık sular çeşitli ağır metal katyonlar içerebilmektedir. Doğal zeolitlerin katyon değiştirme kapasitesinden faydalanılarak bu sular temizlenebilmektedir. Ayrıca pirometalürji sanayinde yapılan Cu-Pb alaşımlarının eritilmesi işleminde açığa çıkan zararlı gazlar, doğal zeolit CaCO_3 ile beraber kullanılması sonucunda büyük oranda giderebilmektedir (MTA).

Zeolitler birçok alanda kullanılmakla birlikte inşaat sektöründe çimento katkısı, hafif agrega imalatı, şekillendirilmiş taşlar gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Zeolit özgül yüzeyinin, çimentonun özgül yüzeyinden yüksek olmasından dolayı zeolit kullanımıyla beton içerisindeki boşluklar azaltılabilmektedir (Sevim ve Okumuş, 2011). Zeolit beton içerisinde kullanıldığında beton gözenekliliğini zaman içerisinde azaltır (Gerengi ve ark., 2015). Kılınçarslan (2008) yaptığı çalışmada zeolit kullanımıyla betonların birim hacim ağırlığının azaldığı ve ısı yalıtım özelliğinin olumlu yönde arttığı gözlemlenmiştir. Sulu altyapılarda kullanılan puzolanik çimento üretiminde yüksek silis içeren doğal zeolitlerin kullanılması ile betonun sertleşmesi aşamasında ortaya çıkan kirecin nötrleşmesi sağlanır (Sarıkaya, 2006).

Perlit ve diğer volkanik camlar gibi doğal zeolitler kolay genleşebilmektedir. Aşınma, sıkışma gibi durumlara karşı genleşmiş zeolitler daha dayanıklı olmaktadır. Bundan dolayı genleştirilmiş hafif agrega imalatında bu tür doğal zeolitler kullanılmaktadır (MTA).

Zeolitik tüfler, ağırlıklarının az olması, sıkı, yüksek gözenekli ve homojen olmasından dolayı kolayca kesilip işlenebilmekte ve yapı taşı olarak kullanılabilir (MTA).

2.2. Literatür Özeti

Day ve Ryan (1995), yaptıkları çalışmada derin karıştırma yöntemini, kirliliğe maruz zeminler üzerinde uygulamışlar ve çalışmalarının sonucunda bu yöntemin daha düşük maliyetli olduğu ve daha az çevre kirliliğine sebep olma gibi avantajlar sağladığını belirlemişlerdir.

O'Rourke ve O'Donnell (1997), derin karıştırma üzerine yaptıkları çalışmada arazi ölçümlerinin sonucuna bakarak, derin karıştırma yönteminin deniz killlerinde 15.25 m derinliğindeki imalatlarda olumlu sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

Lin ve Wong (1999), çalışmaları kapsamında derin karıştırma yöntemini, köprü yaklaşımlarındaki oturmayı azaltabilmek amacıyla uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda derin karıştırma yöntemi uygulamasının yumuşak killi temellerde oluşabilecek oturmaların azaltılmasında kullanılabilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Taki (2003), yaptığı çalışmada derin karıştırma yöntemiyle üretilen zeminden alınan numunedeki çimentonun mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda aldığı numuneleri inceleyerek mukavemet değerinin, sisteminin karıştırılma şekline, çalışma koşullarına, enjeksiyona, zemin tipine vb. bağlı olduğunu belirtmiştir.

Shao ve ark. (2005), düşük maliyeti, çevreye olan zararlarının az olması ve drenaja gerek duyulmamasından dolayı derin karıştırma yönteminin sıklıkla kullanıldığını belirtmişlerdir. Buna karşılık düşük çekme dayanımlarına sahip olmasından dolayı kesit alanının kalın tutulması gerektiği ve bundan dolayı da çok derin uygulamalarda kolay uygulanabilir olmadığını ifade etmişlerdir.

Ye ve ark. (2006), yaptıkları çalışmada derin karıştırma yöntemi ve düşey kum drenleri ile ön yükleme yöntemlerini kullanarak yumuşak zeminleri iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarının sonucunda iki yönteminde kullanıldığını ancak düşük maliyet, hızlı imalat ve daha yüksek dayanım sağladığından dolayı derin karıştırma yönteminin daha iyi bir yöntem olduğunu belirlemişlerdir.

Shen ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada hassas deniz killlerinde DKK üretimini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda kolon çevresindeki kilin kayma mukavemetinin, kolon imalatı sırasında azaldığını ancak kısa bir kürlenme aşaması sonrasında tekrar arttığını belirlemişlerdir. Kesme dayanımının ise 70 günlük bir süre içinde artmaya devam ettiğini ifade etmişlerdir. Zeminin uygulama öncesindeki mukavemet değerine kolon imalatından yaklaşık 10 gün sonra tekrar ulaşabildiğini ifade etmişlerdir.

Madhyannapu ve ark. (2009), çalışmalarında derin karıştırma yöntemini kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonunu amaçlamışlardır. Kireç ve çimento içeren derin karıştırma kolonu imal etmişler ve iki yıl süreyle gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirme yönteminin şişmeye karşı olumlu sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Pye ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada derin karıştırma yöntemini kullanarak CH (yüksek plastisiteli) killi zeminleri stabilize etmişlerdir. Çalışmaları kapsamında enjeksiyon dozajını 275 kg/m^3 olarak belirlemişlerdir. Doğal halde 15 ile 50 kPa arasında olan zemin dayanımı uygulama sonrası 300 ile 500 kPa seviyelerine yükselmiştir.

Kılıç (2013), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında derin karıştırma yönteminin tasarım ve uygulamasını araştırmıştır. Çalışması sonucunda derin karıştırma yönteminin uygulanabilir yüksek alternatifli stabilizasyon yöntemi olmasının koşulunu uygun ekipman ile uygun zemin koşullarında ve standartlar içerisinde uygulanması olarak ifade etmiştir. Maliyetinin düşük olması, uygulamasının kolay olması ve çevreye karşı da düşük zararda olmasından dolayı tercih edilebilecek bir yöntem olduğunu ifade etmiştir. Bu yöntem sayesinde zeminin taşıma gücünün artırılmasının yanında sıvılaşma potansiyelinin de azaltılabileceğini ifade etmiştir.

Esmaceli ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada gevşek kumlu zeminlerin stabilizasyonunda derin karıştırma yönteminin uygulanabilirliğini laboratuvar deneyleriyle araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda kum yoğunluğunun, serbest basınç mukavemetini artırdığını ve bunun yanında kumlu çimento karışımlarının elastisite modülünü artırmada bir miktar etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir.

Madhyannapu ve Puppala (2014), yaptıkları çalışmada şişen zeminleri stabilize etmek için kullanılan derin karıştırma yönteminin tasarım ve uygulama esaslarını araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda derin karıştırma yönteminin, şişen zeminlerin büzülme ve şişme davranışlarını azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kaya (2016), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında derin karıştırma kolonlarının yük-oturma davranışını ve hesaplanan ile yorumlanan kapasiteler arasındaki benzerlikleri araştırmıştır. Bu kapsamda dört farklı sahada gerçekleştirilmiş olan toplam 42 adet tam ölçekli eksenel yükleme deney verilerini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda kolonların güvenle taşıyabileceği yük miktarı ve bunun %50 fazlasındaki yük miktarlarında yüklenmiş derin karıştırma kolonlarında oluşan maksimum oturma miktarlarının izin verilebilir oturma miktarlarının çok altında kaldığını, bunun yanında çoğu deneyde ise elastik bölgenin aşılmadığını gözlemlemiştir.

Frikha ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada yumuşak zeminlerde DKK imalatını araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda drenajsız kayma mukavemetindeki artışın en önemli nedeninin su/çimento oranı olduğunu tespit etmişlerdir. DKK imalatında, uygulanan enjeksiyon basıncının önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Kayma direncindeki artışın, DKK (7 günlük) imalatından hemen sonra başladığını belirlemişlerdir. Aletin dönme hızının 15 rpm'den 40 rpm (dakikadaki devir sayısı)'ye yükselmesiyle, drenajsız kesme kuvvetinde önemli bir düşüş (110'dan 55 kPa'a kadar) olduğunu ifade etmişlerdir.

Kocabıyık (2018), yaptığı uzmanlık tezi çalışmasında derin karıştırma yöntemi ile, taş kolon zemin iyileştirme yöntemini karşılaştırarak araştırmıştır. Araştırmalarının sonucunda derin karıştırma yönteminin taş kolon ile zemin iyileştirme yöntemine göre daha olumlu sonuçlar verebileceğini ifade etmiştir.

Noori (2019), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında katkı içerikli derin karıştırma kolonlarının performans özelliklerini yaptığı model deneylerle araştırmıştır. Çalışmasının sonucunda küçük ölçekli deney numuneleri üzerinde yaptığı ANOVA analizi sonuçlarına göre, akışkanlaştırıcı katkı maddesinin kolonun mukavemet değerleri üzerinde çok etkili olmadığını gözlemlemiştir. Su/bağlayıcı oranının artmasının dayanım üzerinde önemli olumsuz etki yaptığını tespit etmiştir. Büyük ölçekli DKK'lardan karot numuneler almış ve bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapmıştır. Bu deneylerinin sonucunda büyük ölçekli DKK dayanımlarının, küçük ölçekli DKK numunelerinin dayanımlarının %65 - %85'i arasında olduğunu belirlemiştir.

Bagherinia (2019), yaptığı doktora tez çalışmasında biyopolimer ve bazik kimyasallar kullanarak derin karıştırma yöntemi ile suya doymuş düşük plastisiteli kil (CL) zemini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmasının sonunda kullandığı katkı maddelerinin oranlarının artmasıyla numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde artışların oluştuğunu belirlemiştir.

Sarıkaya (2006), yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında zeolit katkısını kullanarak beton üretmiş ve bu betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Zeolit miktarı arttıkça betonların basınç dayanımlarının ve eğilme dayanımlarının azaldığını tespit etmiştir. Katkılı betonun basınç dayanımının, normal betona göre daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Kılınçarslan (2008), çalışması kapsamında öğütülmüş zeoliti çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda katmış ve beton üretmiştir. Ürettiği betonlarda su, ince agreaga ve iri agreaga miktarlarını değiştirmemiş, sadece çimento yerine ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranlarında zeolit eklemiştir. Çalışmasında ürettiği betonların basınç

dayanımlarını, yoğunluklarını ve termal iletkenlik katsayılarını incelemiştir. Çalışmasının sonucunda betonların 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarında önemli bir değişim gözlemlenmemiş ancak zeolitli tasarımların birim hacim ağırlıklarında azalma ve ısı yalıtım özelliklerinde olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %15'e kadar çimento yerine zeolit ikame edilmesinin beton üretiminde ekonomiklik sağlayacağını ifade etmiştir.

Sevim ve Okumuş (2011), çalışmaları kapsamında doğal zeolit ve silika dumanının betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışmalarının sonucunda mineral katkı olarak doğal zeolitin çimento yerine ağırlıkça %20 oranında kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. %10 ve %20 zeolit içeren numunelerin, kontrol numunesine göre daha düşük geçirgenliğe ve daha yüksek dayanıma sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Yalnızca zeolit içeren numunelerde ağırlıkça %20'ye kadar zeolit ikamesinin betonun basınç dayanımını artırdığını, %20'den fazlasının ise dayanımda azalmalara yol açtığını ifade etmişlerdir.

Özdamar (2012), yaptığı çalışmada doğal zeolitin geoteknik karakterizasyonunu araştırmıştır. İki farklı zeolit üzerine yaptığı çalışmada zeolitin geoteknik uygulamalarda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla zeolitin bazı mühendislik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonuçlarından zeolitin, kum ve kile göre daha düşük kuru birim hacim ağırlığına sahip olduğunu belirlemiştir. Zeolitlerin ve sıkı kumların kayma dayanımlarının da birbirlerine benzediğini ifade etmiştir. Çalışmasının sonucunda zeolitin hafif ağırlıklı zemin malzemesi ve geçirimli reaktif bariyer malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Nas (2015), yüksek lisans tez çalışmasında zeolit ve metakaolinin beton dayanımına etkisini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda beton içerisinde mineral katkı olarak zeolit ve metakaolin kullanımıyla betonun basınç ve eğilme dayanımlarında, kılcal geçirimsizliği, hızlı klor geçirimsizliği ve dona karşı dayanıklılığında olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Ancak aşınma ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığında da azalmalar gözlemlenmiştir. Zeolitin en uygun ikame oranının ise %10 olduğunu ifade etmiştir.

Gerengi ve ark. (2015) yaptıkları çalışmada zeolit katkısının beton gözenekliliğini zaman içerisinde azalttığını tespit etmişlerdir.

Yazıcıoğlu (2016), yüksek lisans tez çalışmasında çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir üretiminde doğal zeolitin puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışması sonucunda, kullandığı her iki zeolit çeşidinin

de (analsim ve klinoptilolit) katkılı çimento ve beton üretiminde %30'luk bir yer değiştirme oranında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Eren (2004), yüksek lisans tez çalışmasında patateslerin osmotik dehidrasyonunun yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonunu araştırmıştır. Çalışmasında yanıt yüzey yöntemi ve izohips eğrilerinin, parametreler arasındaki interaksyonun incelenmesinde ve optimum tasarımın belirlenmesinde büyük kolaylık sağladığını belirtmiştir.

Koç ve Kaymak-Ertekin (2009), yaptıkları çalışmada yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamalarını araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ise sistemin yanıt yüzey yöntemi sayesinde basit ampirik modeller ile modellenebildiğini, sistemdeki parametrelerin birlikte incelenebildiğini, az sayıda deney ile parametrelerin sonuca etkilerinin belirlenebildiğini belirtmişlerdir. Bu yöntemin en önemli olumsuz yönünün ise tasarım verilerinin ikinci dereceden polinomiyal bir modele uyarlanması olduğunu ifade etmişlerdir. Bu olumsuzluğun sebebinin ise eğrilik içeren tüm sistemlerin ikinci dereceden polinomiyal bir model ile uyumlu olmaması olduğunu belirtmişlerdir.

Özdikicierler ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada optimizasyon ve modelleme süreçlerinde yanıt yüzey yöntemi yaklaşımını incelemişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.Malzeme Özellikleri

3.1.1. Zeminler

Bu yüksek lisans tezi çalışması kapsamında imal edilen derin karıştırma kolonları numuneleri hem killi zemin hem de kumlu zemin kullanılarak imal edilmiştir.

3.1.1.1. Killi Zemin

Çalışma kapsamında kullanılan killi zemin Türkiye/Konya bölgesinden, Konya Teknik Üniversitesi Organize Kampüsü arazisinden temin edilmiştir (Şekil 3.1.). Çalışma kapsamında kullanılan killi zemin için su muhtevası likit limit ile plastik limit arasında bir değer (%25.0) olarak seçilmiştir.



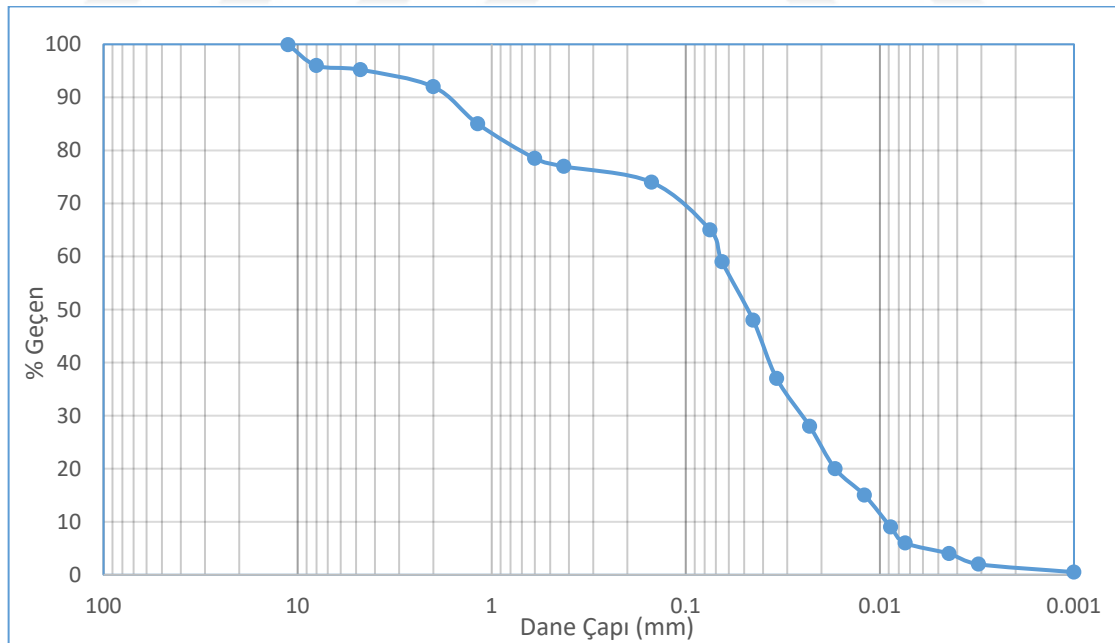
Şekil 3.1. Killi zemin

Zemin üzerinde ASTM D4318, BS 1377:2 ve TS 1900-1 standartlarına göre Atterberg Limitleri, ASTM C128 standartına göre Piknometre, ASTM C136/C136M-19 ve TS 1900-1 standartlarına göre Elek Analizi ve TS 1900-1 standartına göre Doğal su muhtevası tayini deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda zeminin plastik limiti

(w_p) %22, likit limiti (w_L) %33, lineer r tresi (L_s) ise %7 olarak belirlenmiştir. Zeminin plastisite indisi (I_p) ise %11 olarak belirlenmiştir. USCS zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Zemin üzerinde yapılan Piknometre deneyi sonucunda ise zeminin tane yoğunluğu (ρ_s) 2.64 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Yapılan elek analizi sonucunda ise zemin içerisindeki çakıl yüzdesi %10, kum yüzdesi %25 ve ince tane(kil+silt) yüzdesi ise %65 olarak belirlenmiştir. Zeminin doğal su muhtevası %5.62 olarak belirlenmiştir. Zeminin fiziksel özellikleri  izelge 3.1.'de toplu olarak verilmiştir. Zeminin dane dağılımı grafiği ise şekil 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Killi zeminin fiziksel  zellikleri

Plastik Limit (w_p) (%)	22
Likit Limit (w_L) (%)	33
Lineer R�tre (L_s) (%)	7
Plastisite İndisi (I_p) (%)	11
USCS Zemin Sınıfı	CL
Tane Yoğunluğu (ρ_s) (g/cm ³)	2.64
�akıl Yüzdesi (%)	10
Kum Yüzdesi (%)	25
İnce Tane (Kil+Silt) Yüzdesi (%)	65
Doğal Su Muhtevası (w) (%)	5.62



şekil 3.2. Killi zeminin dane dağılımı grafiği

3.1.1.2.Kumlu Zemin

Çalışma kapsamında kullanılan kumlu zemin Türkiye/Konya/Eğribayat bölgesinden temin edilmiştir (Şekil 3.3.). Çalışma kapsamında kullanılan kumlu zeminin su muhtevası suya doymun durumda olacak şekilde %10.0 olarak seçilmiştir.



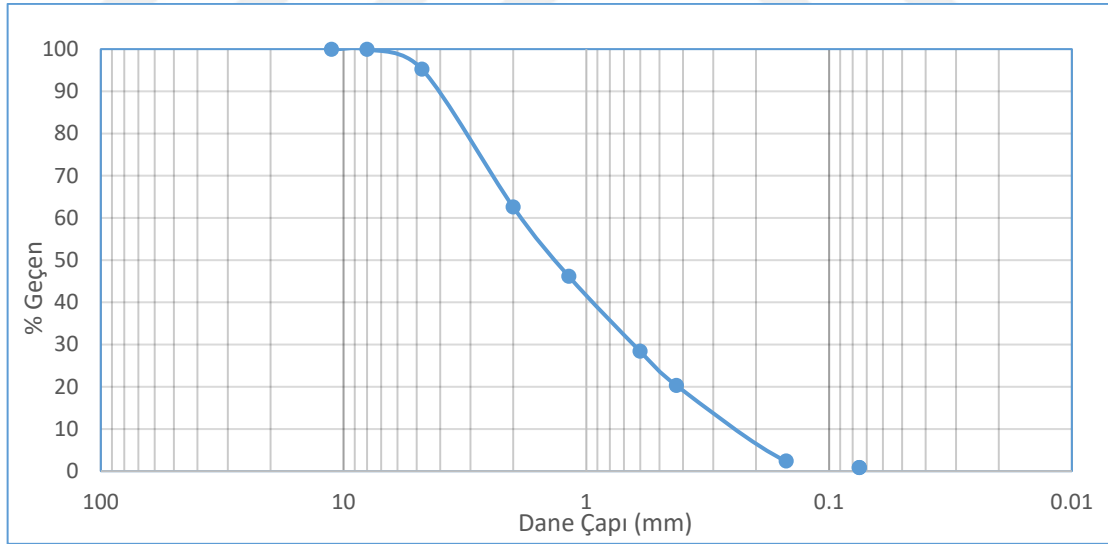
Şekil 3.3. Kumlu zemin

Zemin üzerinde ASTM C128 standartına göre Piknometre, ASTM C136/C136M-19 ve TS 1900-1 standartlarına göre Elek Analizi ve TS 1900-1 standartına göre Doğal su muhtevası tayini deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca zeminin e_{max} (maksimum boşluk oranı), e_{min} (minimum boşluk oranı) ve küçük ölçekli DKK numunelerini doldururken seçilen e (mevcut boşluk oranı) değerleri belirlenmiş ve bunun sonucunda zeminin küçük ölçekli DKK numunesi kalıbına doldurulurken oluşan D_r (rölatif sıkılık) değeri belirlenmiştir ($D_r = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})$). Piknometre deneyi sonucunda zeminin tane yoğunluğu (ρ_s) 2.69 g/cm^3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan kumlu zemin yıkanmış zemindir. Yapılan elek analizi sonucunda ise zemin içerisindeki çakıl yüzdesi %37.5, kum yüzdesi %62 ve ince tane(kil+silt) yüzdesi ise %0.5 olarak belirlenmiştir. İnce tane oranının çok az olmasından dolayı elek analizinin ıslak analiz kısmına ihtiyaç duyulmamış olup bu deney uygulanmamıştır. Zeminin efektif çapı (D_{10}) 0.25, üniformaluluk katsayısı ($C_u = D_{60}/D_{10}$ (Yüzde 60 geçen yüzdesine karşılık gelen çap/yüzde 10 geçen yüzdesine karşılık gelen çap)) 7.6 olarak ve eğrilik katsayısı ($C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$) 0.9 olarak belirlenmiştir. USCS zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı kötü

derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir. Zeminin doğal su muhtevası ise %0.14 olarak belirlenmiş ve yaklaşık kuru olarak kabul edilmiştir. Zeminin maksimum boşluk oranı 0.76, minimum boşluk oranı 0.36, küçük ölçekli DKK kalıbındaki boşluk oranı 0.62 olarak bulunmuş ve sonuç olarak zeminin rölatif sıkılığı %36 olarak belirlenmiştir. Bu rölatif sıkılık değeri için sıkılık derecesi ‘Orta Sıkı’ olarak belirlenmiştir. Zeminin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2.’de toplu olarak verilmiştir. Zeminin dane dağılımı grafiği ise Şekil 3.4.’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kumlu zeminin fiziksel özellikleri

Tane Yoğunluğu (ρ_s) (g/cm ³)	2.69
Çakıl Yüzdesi (%)	37.5
Kum Yüzdesi (%)	62
İnce Tane (Kil+Silt) Yüzdesi (%)	0.5
Efektif çap (D_{10})	0.25
Üniformluluk Katsayısı (C_u)	7.6
Eğrilik Katsayısı (C_c)	0.9
USCS Zemin Sınıfı	SP
Doğal Su Muhtevası (w) (%)	0.14 (~kuru)
Maksimum Boşluk Oranı (e_{max})	0.76
Minimum Boşluk Oranı (e_{min})	0.36
Küçük Ölçekli DKK Kalıbındaki Boşluk Oranı (e)	0.62
Küçük Ölçekli DKK Kalıbındaki Rölatif Sıkılık Değeri (D_r) (%)	36



Şekil 3.4. Kumlu zeminin dane dağılımı grafiği

3.1.2. Çimento

TS EN 197-1’de çimentolar “CEM Çimentosu” olarak adlandırılır (TS EN 197-1). CEM çimentosu, hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu

sonucu meydana gelen ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardır. Standarda göre CEM Çimentoları, 27 alt çeşidi kapsayan 5 ana tiptir. Bunlar CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V çimentosudur. Bunlar dışında, sülfatlara dayanıklı çimentolar, beyaz portland çimentosu, harç çimentosu, yüksek fırın cürufu katkılı ve çok düşük hidratasyon ısıları özel çimentolar bulunmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan portland çimentosu CEM I 42.5 R'dir. Portland Çimento klinkerinin, bir miktar alçı taşı (CaSO₄.2H₂O) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilir. İçeriği: (%95 Portland Çimento klinkeri + %5 minör bileşen) + %5 alçıtaşı olarak ifade edilebilir. Daha detaylı söylemek gerekirse CEM I 42.5 R çimentosunun içerisinde %64.37 CaO, %20.11 SiO₂, %4.9 Al₂O₃ ve %2.83 Fe₂O₃ bulunmaktadır. Bu çimento genel kullanıma uygundur. Hızlı hidrate olur ve sertleşir. İçerisinde çimentonun ana bileşenlerinden C₃S (trikalsiyum silikat, alit) bulunup, bu bileşenden dolayı kullanılan çimento, malzemenin erken dayanım kazanmasını sağlar. TS EN 197-1'e göre CEM I 42.5 R çimentosunun standart kimyasal ve fiziksel özellikleri ve yapılan çalışmalarla belirlenen değerler Çizelge 3.3.'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. CEM I 42.5 R çimentosunun standart özellikleri

Standart Kimyasal Özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Kızdırma kaybı	≤ %5.0	%1.37
Çözünmeyen kalıntı	≤ %5.0	%0.4
Kükürt trioksit (SO ₃)	≤ %4.0	%2.73
Klorür (Cl ⁻)	≤ %0.1	%0.0092
Standart Fiziksel Özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Priz başlama süresi	≥ 60 dk.	200 dk.
Hacim genleşmesi	≤ 10 mm	1.3 mm
2 günlük dayanım	≥ 20 MPa	31.7 MPa
28 günlük dayanım	42.5 MPa – 62.5 MPa	561 MPa
Diğer Özellikleri		
	TS EN 197-1	CEM I 42.5 R
Özgül yüzey (Blaine)	-	3502 cm ² /g
Yoğunluk	-	3.12 g/cm ³

3.1.3. Zeolit

Zeolitler alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatları olarak ifade edilmektedir (Kurt ve Arık, 2015). Doğada birçok doğal zeolit

bulunmakla beraber bu çalışma kapsamında bir doğal zeolit türü olan ‘klinoptilolit’ kullanılmıştır (Şekil 3.5.).

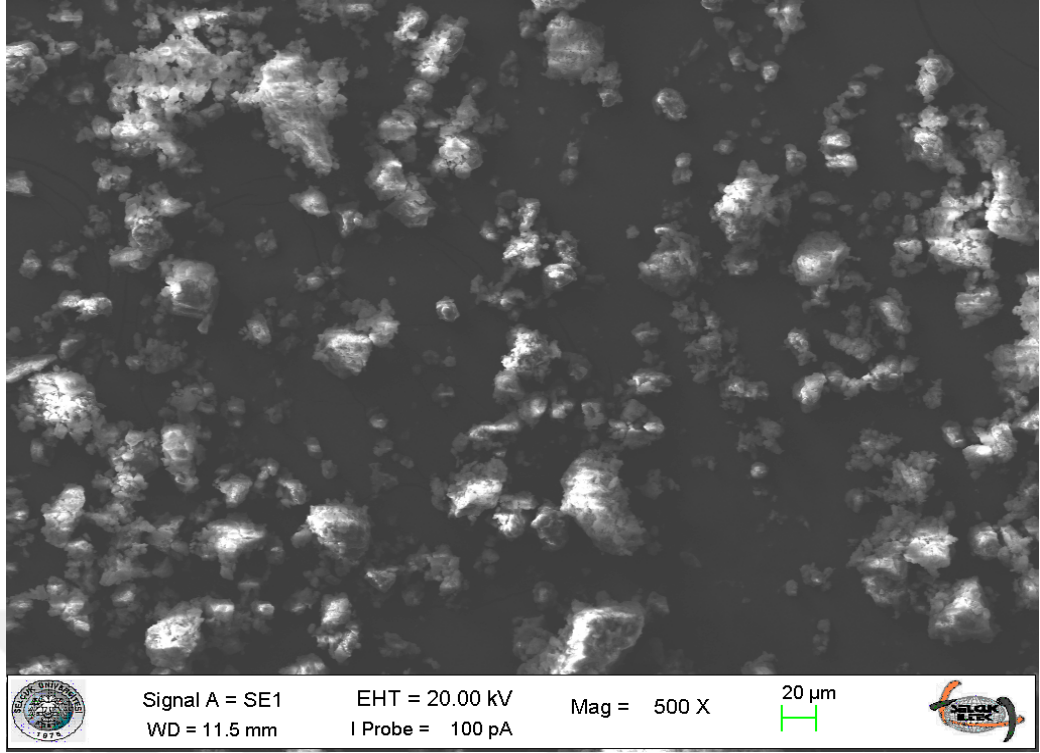
Klinoptilolit türü zeolit, volkanik kökenli mineraldir. Deniz sularının ve yer altı sularının, lavlar ile birleşmesi sonucu oluşan volkanik kayalarda oluşmaktadır. Klinoptilolit kimyasal formülü $(Na_{0.5}K_{2.5})(Ca_{1.0}Mg_{0.5})(Al_6Si_{30})O_{72} \cdot 24H_2O$ ‘dır. Bu formülün açılımı ise ‘hidrate sodyum potasyum kalsiyum alumino silikat’, kısaca ‘potasyum-kalsiyum-sodyum alumino silika’ dır.

Klinoptilolit yapısındaki K^+ , Na^+ , Mg^{+2} ve Ca^{+2} iyonları, değişebilir iyonlardır. Bu iyonlar, aluminosilika yapısını bozulmaya uğratmadan, diğer katyonlar ile yer değiştirebilmektedir.

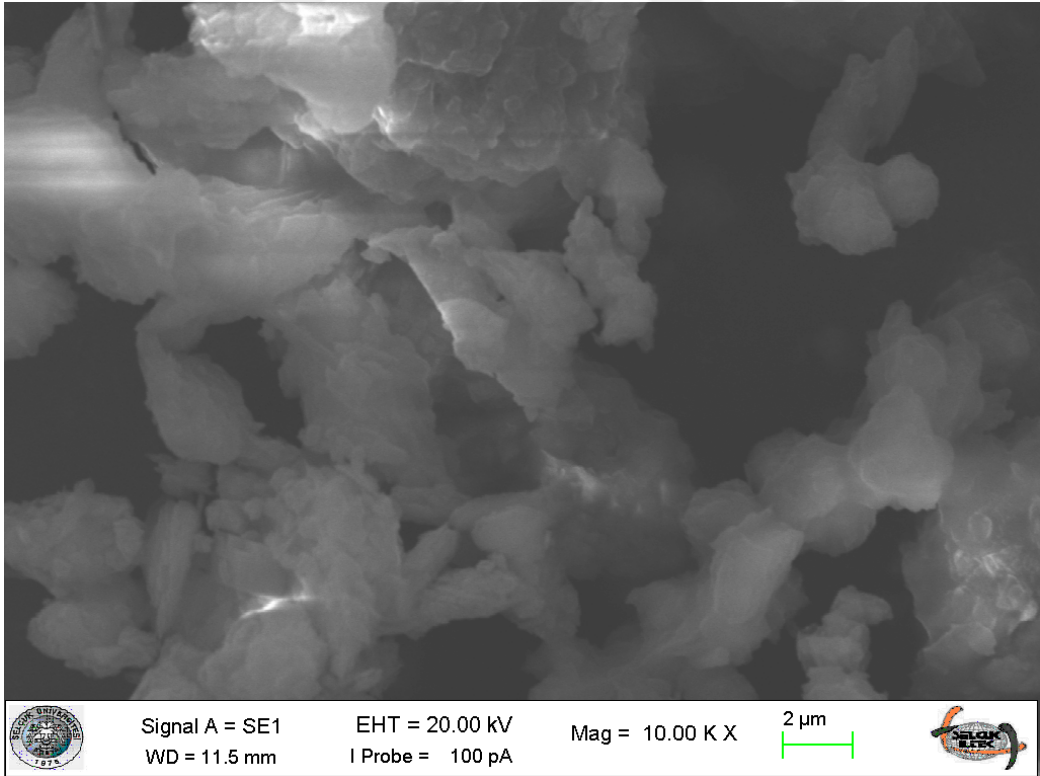
Çalışma kapsamında kullanılan klinoptilolit türü zeolit Türkiye/Balıkesir/Bigadiç maden yataklarından temin edilmiştir ve tane boyutu 40 mikrondur. Ayrıca kullanılan klinoptilolit türü zeolit SEM’deki görüntüsü 500 kat yakınlaştırma ile Şekil 3.6.’da ve 10000 kat yakınlaştırma ile Şekil 3.7.’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Toz boyutundaki klinoptilolit



Şekil 3.6. Klinoptilolit'in SEM'deki görüntüsü (500 kat yakınlaştırma)



Şekil 3.7. Klinoptilolit'in SEM'deki görüntüsü (10000 kat yakınlaştırma)

Çalışma kapsamında temin edilen klinoptilolit türü zeolitinin kimyasal analiz raporu Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Klinoptilolit türü zeolitinin kimyasal analiz raporu

Kimyasal Adı	Kalsiyum, Potasyum, Sodyum, Alüminosilikat		
Kimyasal Ailesi	Doğal Zeolit		
Kimyasal Öz Adı	Klinoptilolit		
Kimyasal Formülü	(Ca,K ₂ ,Na ₂ ,Mg) ₄ Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆ .24H ₂ O		
Mineral İçeriği	%88-97 Klinoptilolit - %0-5 Kristobalit - %0-5 Tridimit		
Kimyasal Detayları			
%62.81-70.77 SiO ₂	%10.22-13.62 Al ₂ O ₃	%2.71-5.08 CaO	%2.11-3.83 K ₂ O
%0.91-3.78 Fe ₂ O ₃	%1.43-3.12 MgO	%0.10-0.49 Na ₂ O	%0.05-0.92 TiO ₂
Asit B (ppm) %81-116		Su B (ppm) %40-55	
Fiziksel Detayları			
Görünüm	Fildişi beyazı		
Koku	Yok		
Porozite	%24-32		
Sertlik	1.5-2.5 Mohs		
Çamurlanma	Yok		
Su tutma	%34-36		
Kütle yoğunluğu	0.82-0.85 g/cm ³		
Çözünürlük	Yok		
pH	6.8-7.2		
Tane yüzey alanı	13.9 m ² /g		
Etkili gözenek çapı	0.4 nm		
Yumuşama noktası	1260 °C		
Erime noktası	1506 °C		
Kasyon Değiştirme Kapasitesi (CEC)	1.5-2.1 meq/g		
Büyük Değişim Katyonları	Rb, Li, K, Cs, NH ₄ , Na, Ca, Ag, Cd, Pb, Zn, Ba, Sr, Cu, Hg, Mg, Fe, Co, Al, Cr.		
Seçicilik	Cs ⁺ > NH ₄ ⁺ > Pb ²⁺ > K ⁺ > Na ⁺ > Ca ²⁺ > Mg ²⁺ > Ba ²⁺ > Cu ²⁺ , Zn ²⁺		
Birincil Adsorbe Edici Gazlar	O ₂ , SO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , HCHO, Ar, N ₂ , H ₂ O, He, H ₂ , Kr, Xe, CH ₂ OH		

3.1.4. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Kimyasal katkı maddeleri taze veya sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla, çimento dozajının %5'ini geçmemek şartıyla karıştırma işlemi sırasında betona eklenen kimyasal maddelerdir. TS EN 934-2'ye göre kimyasal katkı maddeleri su azaltıcı/akışkanlaştırıcı, yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, su geçirimsizleştirici, su tutucu ve sertleşme hızlandırıcı olmak üzere çok çeşitli olabilmektedir (TS EN 934-2).

Bu çalışma kapsamında ise CHRYSO Optima 100 marka süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. CHRYSO Optima 100 yeni nesil süper akışkanlaştırıcı

olarak etki eden modifiye fosfonat esaslı bir akışkanlaştırıcı/su azaltıcıdır. Özel olarak tasarlanmış moleküler yapıya sahiptir.

Bu katkı maddesinin uygulama alanları şöyle sıralanabilir:

- Her türlü çimento
- Yüksek performanslı ve çok yüksek performanslı beton
- İşlenebilirliği uzatılmış beton
- Yüksek donatılı beton
- Pompa betonu

CHRYSO Optima 100, her çeşit kıvamda standart katkılara oranla yaygın işlenebilirlik sonucu verebilmektedir. Bu açıdan CHRYSO Optima 100'ün uzun mesafelere beton pompalamasının yapılabilmesi için özel üretildiği belirtilmektedir. Ayrıca bu katkı maddesi birçok çimento türüyle beraber kullanılabilir. Bu özelliğinden dolayı çimento/katkı uyumsuzluğu olmamaktadır. Belirtilen bu özellikteki bu katkı maddesi, daha çok inşaat şantiyeleri ve hazır beton sanayisi için üretilmiş olan bir süper akışkanlaştırıcıdır (CHRYSO Optima 100 Teknik Bilgi Föyü).

3.2.İstatiksel Deney Tasarım Yöntemi

Yapılacak olan küçük ölçekli deney tasarımlarını oluşturabilmek için ‘Yanıt Yüzey Yöntemi’ kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde araştırmaya uygun sayıda deney seçilmiştir ve sonuçlarının yorumlanması için önemli tasarımların deneyleri yapılmıştır.

3.2.1. Yanıt Yüzey Yöntemi

Bu yöntem ilk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından kimyasal reaksiyonların istenilen düzeyde optimize edilebilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Özdikicierler ve Eren, 2016). Yanıt yüzey yöntemi; denemelerin tasarlanması, eldeki verilerin kullanılarak parametrelerin, istenen sonuçlar üzerindeki etkisinin matematiksel modeller kullanılarak tespit edilmesi ve parametrelerin optimizasyonu şeklinde gerçekleşmektedir (Özdikicierler ve Eren, 2016). Yanıt yüzey yöntemi, istatistiksel ve matematiksel yöntemlerin beraber kullanılarak tasarım aşamaların ilerletilmesi ve

optimize edilmesi şeklinde ifade edilmektedir (Myers ve Montgomery, 1995; Eren, 2004; Türkyılmaz, 2011).

Yanıt yüzey yöntemi eleme deneyleri, bölge araştırması ve ürünün optimizasyonu olmak üzere genel ifadeyle 3 kademedan meydana gelmektedir. Eleme deneyleri, asıl deneylerin daha az ve daha verimli yapılmasıdır. Bölge araştırması ise eleme deneyleriyle belirlenen parametrelerin tasarımın sonucunda oluşturdıkları değerlerin, optimum noktaya yakınlığını tespit etmektir. Son aşama ise optimum tasarıma yaklaşıldığında başlamaktadır. Optimuma yaklaşıldığında gerçek yanıt fonksiyonu belirli bir eğrilik göstermektedir. Bu eğriliğin belirlenmesinde ise doğrusal olmayan modeller, daha çok ikinci dereceden polinomiyal modeller, üssel modeller veya eksponensiyel modeller kullanılmaktadır. Tasarım için geçerli bir model belirlenir ve bu geçerli model kullanılarak optimum nokta belirlenmeye çalışılır (Koç ve Kaymak-Ertekin, 2009).

Yanıt yüzey yöntemi, süreci etkileyen parametreler arasında birbirleriyle olan etkileşiminin durumunu, etkileşim varsa hangi parametreler arasındaki etkileşimin daha etkili olduğu, tasarımın hangi parametreden daha çok etkilendiğini tespit edebilen ve bundan dolayı da birçok alanda tercih edilen bir yöntemdir (Türkyılmaz, 2011).

3.3.Küçük Ölçekli DKK'ların Deney Tasarım Tablosunun Oluşturulması

Küçük ölçekli deneylerin tasarımı için 'Design Expert 11' programı yardımıyla 'Yanıt Yüzey Yöntemi' kullanılmıştır. Bu yöntemle deney tasarım tablosu hazırlanırken parametrelerin sınır değerleri araştırmacı tarafından belirlenmekte ve program optimizasyon yapabilmek için uygun ara değerler belirleyerek tabloyu oluşturmaktadır. Oluşturulan deney tasarım tablosunda her tasarım için sonuç değerleri (mukavemet, geçirimsizlik vs. sonuçları) tanımlanarak parametreler ve sonuçlar arasında ilişkiler kurulmaktadır.

3.3.1. Tablo Girdilerinin Sınır Değerlerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında uygulanan bir deney tasarım tablosunda 4 farklı parametre (çimento, zeolit, akışkanlaştırıcı katkı ve su/bağlayıcı oranı) için 17 farklı tasarımı olan bir tablo oluşmuştur (Çizelge 3.5.). Islak derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilecek zeminin çimento dozajı 100-500 kg/m³ olurken kuru derin karıştırma yöntemi için bu

değer 100-300 kg/m³ olmaktadır (Kaya, 2016). Bu bağlayıcı dozajlarının sağlanabilmesi amacıyla çimento için %9-30 arasında sınır değeri seçilmiştir. Kılınçarslan (2008), çalışmasında kullandığı zeoliti öğütürerek çimento yerine ağırlıkça farklı oranlarda ikame ederek beton üretmiştir. Bu betonlarda su, ince agreg ve iri agreg miktarlarını değiştirmemiş ancak çimento yerine ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 oranlarında zeolit eklemiştir. Sevim ve Okumuş (2011), doğal zeolit ve silika dumanının betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerine etkisini araştırdığı çalışmasında doğal zeolitin, mineral katkı olarak çimentoya ağırlıkça %20 oranında ikame edilebileceğini ifade etmiştir. Yazıcıoğlu (2016), yüksek lisans tez çalışmasında çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir üretiminde doğal zeolitin puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Çalışması sonucunda, kullandığı her iki zeolit çeşidinin de (analsim ve klinoptilolit) katkılı çimento ve beton üretiminde %30'luk bir ikame oranına kadar puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir. Yapılan bu çalışmalar dikkate alındığında tez çalışması kapsamında zeolit için sınır değerler %0-40 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdeler çimento için, toplam kuru kütle (zemin+çimento+zeolit) ağırlıkça ikame yüzdesi şeklinde ve zeolit için ise çimentoya ağırlıkça ikame yüzdesi şeklinde olmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi ise genel uygulamalara uygun olması açısından bağlayıcı miktarının (çimento+zeolit) %0.5-4 oranında belirlenmiştir. Uygulamada su/bağlayıcı oranı genel olarak 0.8-1.5 aralığında seçilmektedir (Wahidy, 2019). Bu bağlamda hem akışkanlığının uygun olması hem de uygulamaya uygun değerler olması açısından su/bağlayıcı oranı 0.9-2.5 şeklinde seçilmiştir. Daha önce yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında derin karıştırma makinesinin, marsh hunisinde akma zamanı 70-100 s olan enjeksiyon karışımlarını kolay bir şekilde zemin içerisine pompalayabildiği belirlenmiştir (Noori, 2019). Bu bilgi doğrultusunda oluşan 17 tasarım için de enjeksiyon karışımları hazırlanmış olup her biri için Marsh Hunisi Deneyi yapılmıştır ve enjeksiyonların pompalanmayı olumsuz yönde etkileyecek akma sürelerinin olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5. Yanıt yüzey yöntemine göre oluşturulan deney tasarım tablosu

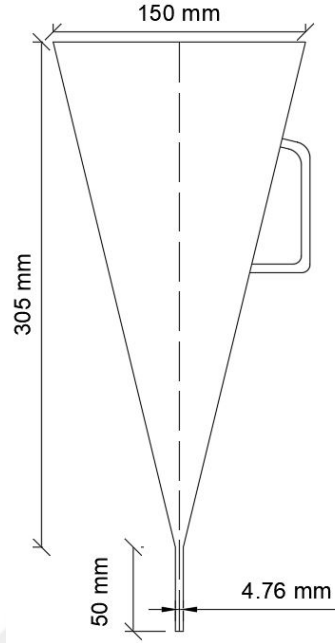
Tasarım No.	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı Katkı (%)	Su/bağlayıcı Oranı	Bağlayıcı Malzeme Dozajı (kg/m ³) (Killi Zemin)	Bağlayıcı Malzeme Dozajı (kg/m ³) (Kumlu Zemin)
1	30	15.8	2.11	1.86	273.49	293.54
2	24.33	0	0.5	1.31	279.63	308.34
3	23.81	0	3.83	2.5	207.25	223.09
4	9	29	0.5	1.31	124.86	144.37
5	30	40	0.5	0.9	367.37	404.49
6	9.42	17.34	2.30	1.83	121.88	139.36
7	16.98	40	2.15	1.88	188.49	209.12
8	9	40	4	0.9	131.36	153.13
9	9	27.8	3.91	2.5	108.70	123.19
10	30	40	4	2.5	231.37	245.56
11	9	0	3.83	1.38	124.22	143.51
12	22.62	26	4	1.47	252.55	278.29
13	17.4	16	2.18	0.9	237.28	269.81
14	22.62	26	4	1.47	252.55	278.29
15	24.33	29.46	0.5	2.5	208.36	223.89
16	30	0	4	0.9	373.18	411.54
17	9	0	1.25	2.5	109.05	123.64

3.4.Marsh Hunisi Deneyi

Marsh hunisi deneyi viskozite akış özelliklerinin göreceli olarak değişimini anlamak ve izlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu deney, çimento harçlarının özellikleri ve kalite kontrolü amacıyla uygulanan bir deneydir. Marsh Hunisi Deneyi ile 946 cm³ sıvının 4.76 mm iç çaplı 305 mm uzunluğundaki huniden akma zamanı belirlenir. Bu akış süresi, teste tabi tutulan karışımın akışkanlığı ile ters orantılıdır. Yani akış süresi ne kadar yüksek olursa, karışımın akışkanlığı da o kadar düşük olacaktır.

Huni içerisindeki nozulun üzerinde bulunan karışımın ağırlığı tarafından oluşan basınç, nozul içerisindeki akma gerilmesine karşı kesme gerilmesinin zayıf kalmasına neden olabilir. Böyle bir durumda marsh hunisi deneyi sonuçları gerçekçi olmayabilir (Roussel ve Le Roy, 2004).

Viskozite, moleküller arasında gerçekleşen sürtünmeden dolayı akışkan malzemenin akmaya karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanabilir. Karışım içerisindeki çimento miktarı, zeolit miktarı, akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve karışımın su/bağlayıcı oranı karışımın viskozite değerini etkileyebilmektedir. Marsh Hunisinin geometrik özellikleri iki boyutlu olarak Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Marsh Hunisinin iki boyutlu görünümü

Deneyin Yapılışı (ASTM D6910/D6910M-19):

- Deney için uygun olan sıcaklık 23.0 ± 2.0 °C'dir.
- Deney yapılmadan önce huni içerisi temiz olmalıdır ve deneye tabi tutulacak karışım eklenmeden önce huni su ile doldurularak suyun huniden akmasına izin verilmelidir. Su huniden 26 ± 2 saniyede akmalıdır.
- Huni alt ucu parmak ile kapatılarak dik durumda tutulur ve huni eleği üzerinden akıtılan enjeksiyon karışımı, huninin elek seviyesine kadar doldurulur (Şekil 3.9.). Huniyi dolduran bu karışımın hacmi 1725 mL olmaktadır.
- Huni alt ucundan parmak çekilir ve aynı anda kronometre çalıştırılır. Enjeksiyon karışımının, 946 mL'lik Marsh Hunisi Tasını doldurması için gereken süre ölçülür (Şekil 3.10.).
- Akış süresi, saniye cinsinden huni viskozite değeri olarak belirlenir.
- Her deney tamamlandıktan sonra Marsh Hunisi iyice temizlenmelidir. Aksi takdirde huni uç kısmında kuruyan enjeksiyon karışımından kalan malzemeler, huninin ucunu tıkayarak akış hızını değiştirebilmekte ve deney sonuçlarında hataya sebep olabilmektedir.



Şekil 3.9. Enjeksiyon karışımının Marsh Hunisinin elek üst seviyesine kadar doldurulması



Şekil 3.10. Enjeksiyon karışımının Marsh Hunisinden tasa akıtılması

Bu çalışma kapsamında oluşturulan deney tasarım tablosundaki her tasarımın enjeksiyon karışımının akışkanlığını belirlemek üzere toplam 17 adet Marsh Hunisi Deneyi yapılmıştır.

3.5.Küçük Ölçekli DKK Numunelerinin Hazırlanması ve Kürde Bekletilmesi

Çalışma kapsamında kullanılan her malzeme için malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler ve her tasarımın enjeksiyon karışımı için Marsh Hunisi deneyi yapıldıktan sonra hazırlanan deney tasarım tablosunun öngörülen şekilde olduğu tespit edilmiş ve deney tasarım tablosu kesinleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılacak olan her malzeme yeterli miktarda temin edilip $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve nem kaybını önlemek için kapalı kutuda muhafaza edilmiştir.

Kullanılan killi zeminin su muhtevası, zeminin plastik limiti (%22) ile likit limiti (%33) arasında bir değer olan %25.0 olarak belirlenmiştir. Kumlu zemin için ise su muhtevası zemin suya doymun olacak şekilde %10.0 olarak belirlenmiştir. Killi zemin 2 mm çaplı elekten, kumlu zemin ise 4.75 mm çaplı elekten elenerek kullanılmıştır.

Daha sonrasında ise zemine ilave edilecek olan çimento miktarı, zeolit miktarı, akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarı ve su/bağlayıcı oranlarına göre eklenen su miktarı, deney tasarım tablosuna göre hem killi zemine hem de kumlu zemine ilave edilerek karıştırıcı mikserde (Şekil 3.11.) 120-300 devirde ve 5-10 dakika süreyle karıştırılarak küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanmıştır. Bu devir ve süre değerlerine ise önceki çalışmalar dikkate alınarak karar verilmiştir (Bhadriraju ve ark., 2008; Japonya Geoteknik Birliği, 2000; Shen ve ark., 2003; Jacobson ve ark., 2003).

İlave edilen katkı malzemelerinin yüzdeleri çimento için, toplam kuru kütle (zemin+çimento+zeolit) ağırlıkça ikame yüzdesi şeklinde ve zeolit için ise çimentoya ağırlıkça ikame yüzdesi şeklinde olmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi ise bağlayıcı miktarının (çimento+zeolit) yüzdesi şeklinde olmaktadır.



Şekil 3.11. Karıştırıcı mikser

Karışımlar, tasarım oranlarına göre hazırlandıktan sonra serbest basınç deneyi için çapı 5 cm, boyu 10 cm olan ve permeabilite deneyi için çapı 5 cm, boyu 3 cm olan PVC kalıplara (Şekil 3.12.) doldurulmuştur. Numuneler PVC kalıplara doldurulmadan önce ise

kalıp içi yağlanarak numune çıkarılması aşamasında numunenin kalıptan kolay çıkması sağlanmıştır. Bu numunelerden toplam 17 tasarımın her biri için hem 28 günlük hem de 56 günlük olarak hem killi zemin hem de kumlu zemin için ve hem serbest basınç deneyi (1 yedekli) hem de permeabilite deneyi için olmak üzere toplamda 204 adet küçük ölçekli DKK numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 3.12. PVC kalıplar

PVC kalıp içerisindeki numuneler nem kaybını önlemek için poşetle sarılmış, ağzı kapalı bir kutu içerisinde ve $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, 28 ve 56 günlük kür süresince kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Numunelerin kürde beklemesi

Kür süresi tamamlanan serbest basınç deneyi numuneleri, numune çıkarma aleti (Şekil 3.14.) yardımı ile PVC kalıplardan çıkarılmış ve yüzeyleri düzeltilerek serbest

basınç deneyine hazır hale getirilmiştir. Permeabilite deneyi numuneleri ise kalıptan çıkarıldıktan sonra 2 gün boyunca su içerisinde bekletilerek (Şekil 3.15.) suya doymun hale gelmesi sağlanmış ve deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.14. Numune çıkarma aleti



Şekil 3.15. Permeabilite numunelerinin suya doymun hale getirilmesi

3.6.Küçük Ölçekli Deneylerin Programı

Deney tasarım tablosu hazırlandıktan sonra ve günlük yapılabilecek deney kapasitesi belirlendikten sonra deney programı oluşturulmuştur ve Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deney programı

[illegible]

3.7.Serbest Basınç Deneyi

Bu deney ASTM D2166 standartına göre yapılmıştır. Deney, zemin içerisinde oluşturulan kolonun serbest basınç mukavemetini belirlemek amacıyla yapılır. Bu deney hem küçük ölçekli numunelere hem de büyük ölçekli deney tankından alınan karot numunelere uygulanmıştır. Alınan karot numuneler boy/çap oranı 2 olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. Deney uygulanırken yükleme hızı 0.5 mm/dk olarak seçilmiştir. Deney sonucunda çizilen gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) eğrisi kullanılarak Kiriş Modülü Yöntemi ile numunelerin elastisite modülleri (E) belirlenmiştir.

Deneyin yapılışı:

- Küçük ölçekli PVC kalıplardan çıkarılan numuneler (çapı 5 cm) veya alınan karot numuneler, boyu yaklaşık 10 cm olacak şekilde alt ve üst yüzeyi kıl testereyle kesilerek düzeltilir.
- Yüzeyi düzeltilen numune serbest basınç deneyi aletine yerleştirilir ve üst başlık numune yüzeyine kadar indirilir, deformasyon saati ayarlanır ve deneye başlamadan önce sıfırlanır (Şekil 3.16.).
- Yükleme, numunede dakikada %0.5-%2 arası birim boy kısalması oluşturacak biçimde yapılır.
- Yük ve boy değişimi değerleri kaydedilir.
- Deney, numunede kesin göçme elde edilene, en büyük dayanımın belirmediği yumuşak killerde ise %20 birim boy kısalmasına kadar sürdürülür (Şekil 3.17.).
- Deney sonunda yük-boy değişimi grafiği çizilerek uygun hesaplamalardan numunenin serbest basınç mukavemeti belirlenir (ASTM D2166).

Numunenin aksenal birim boy değiştirmesi (ϵ):

$$\epsilon = \Delta H / H_0 \quad (3.1)$$

ΔH : Deney sonucu numunenin boyunda oluşan kısalma miktarı (mm)

H_0 : Numunenin ilk boyu (mm)

$$A_f = A_0 / (1 - \epsilon) \quad (3.2)$$

A_f : Kırılma esnasında numunenin en kesit alanı (m^2)

A_0 : Numunenin deney öncesi en kesit alanı (m^2)

Serbest basınç mukavemeti (q_u):

$$q_u = \sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (3.3)$$

$q_u = \sigma_1$: Serbest basınç mukavemeti (kPa)

$P_{\max}$: kırılma esnasında numuneye uygulanan maksimum yük (kN)



Şekil 3.16. Numunenin deney aletine yerleştirilmesi

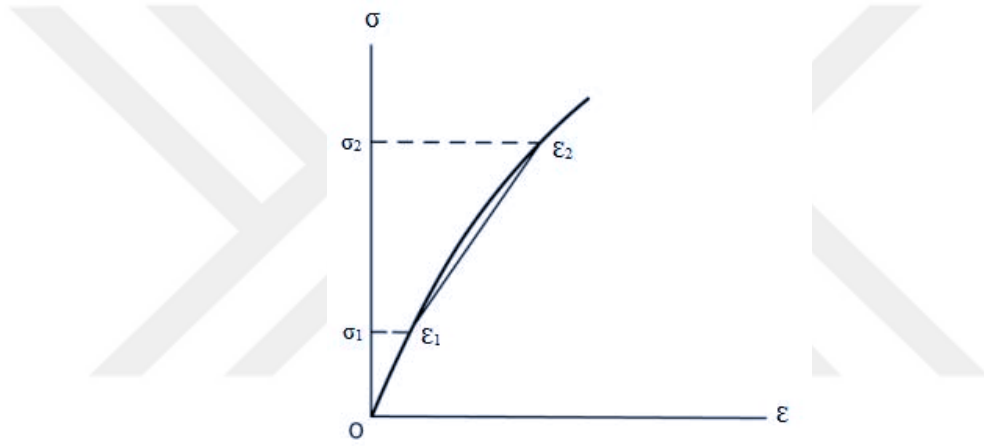


Şekil 3.17. Deney sonrası kesin göçme elde edilen numune

3.7.1. Kiriş Modülü Yöntemi

Kiriş Modülü Yöntemi ile belirlenen elastisite modülü, serbest basınç deneyi sonucu çizilen gerilme-birim deformasyon (σ - ε) eğrisi üzerinde, numunenin akma gerilmesi altındaki durumda eğri üzerinde seçilen herhangi iki nokta arasında oluşan kirişin eğimi olarak ifade edilebilir (Şekil 3.18.). Elastisite modülü, Kiriş Modülü Yöntemine Eşitlik 3.4. ile hesaplanır:

$$E = \tan \alpha = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$



Şekil 3.18. Gerilme-birim deformasyon eğrisinde Kiriş Modülü (Aydemir ve ark., 2019)

3.8. Permeabilite Deneyi

Deney, zemin içerisinde oluşturulan kolonun permeabilite (geçirimsizlik) katsayısını belirlemek amacıyla yapılır. Oluşturulan kolon numunelerinin permeabilite katsayıları çok küçük olacağı ($k < 10^{-8}$ cm/s) için sabit seviyeli ve düşen seviyeli permeabilite deneylerini yapmak yeterli olmayacaktır. Bu nedenle, permeabilite deneyleri ASTM D5084-16a standardına göre, üç eksenli basınç deneyi düzeneği kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.19.). Bu deney hem küçük ölçekli numunelere hem de alınan karot numunelere uygulanmıştır. Permeabilite deney numuneleri, suyun drenaj yolunu kısaltmak için boyu 3 cm olacak şekilde ayarlanmış ve üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilmiştir (Deng ve ark. 2015). Karot numuneler de küçük ölçekli DKK numuneleri gibi 3 cm boyunda olacak şekilde kesilerek kullanılmıştır. Daha sonra

numuneye 500 kPa hücre basıncı verilerek, zemin içerisinde 450 kPa geri basınçla birim zamanda geçirilen suyun miktarı ölçülmüştür. Bu sayede iyileştirilen zemin örneklerinin permeabilite katsayısı değerleri daha hassas belirlenmektedir.

Permeabilite deneyi de hem küçük ölçekli numunelere hem de karot numunelere uygulanmıştır.

Deneyin yapılışı:

- Numune boyu, suyun yolunu kısaltmak için 3 cm olacak şekilde ayarlanır (Deng ve ark., 2015).
- 2 gün suda bekledikten sonra suya doymuş hale gelen numune kalıptan çıkartılır ve kalınlığı 0.25 mm olan lastik kılıf içine yerleştirilir (Şekil 3.20.).
- Deney düzeneğinin içerisine numune parçacıkları kaçmaması için numunenin alt ve üst yüzeyine filtre kağıdı yerleştirilir.
- Numune deney düzeneğinde yerine konur ve yük başlığı numune üzerine yerleştirilir (Şekil 3.21.).
- Sızmayı engellemek amacıyla numunenin alt ve üst kısmı o-ring ile sıkıştırılır (Şekil 3.22.).
- Numune içerisinde suyun geçişini sağlayan boru bağlanır (Şekil 3.23.).
- Üç eksenli basınç deneyi aletinin şeffaf haznesi yerine yerleştirilir, hazne sabitlenir ve su ile doldurularak ağzı kapatılır (Şekil 3.24.).
- Hücre basıncı istenen basınçta (500 kPa) ayarlanır. Eğer numunenin serbest basınç mukavemeti 500 kPa'dan düşük ise hücre basıncı, numunenin serbest basınç mukavemetinden düşük bir değer olarak seçilir (Şekil 3.25.).
- Geri basınç istenen değerde (450 kPa) ayarlanır ve numuneden su çıkışına izin verilmeye başlanır. Eğer numunenin serbest basınç mukavemeti 500 kPa'dan düşük ise geri basınç, numunenin serbest basınç mukavemetine göre seçilen hücre basıncı değerine uygun olacak bir değer olarak seçilir (Şekil 3.26.).
- Su çıkışında sabit bir hız elde edilene kadar suyun akışına izin verilir. Bu hızın sabitlenip sabitlenmediği ara denemelerle belirlenir.
- Çıkış hızı sabitlendikten sonra belirli bir süre için numuneden geçen su miktarı belirlenir ve uygun hesaplamalar sonucunda numunenin permeabilite katsayısı belirlenir.



Şekil 3.19. Üç Eksenli Basınç Deneyi düzeneği



Şekil 3.20. Lastik kılıf içerisindeki numune



Şekil 3.21. Deney düzeneğinde yerine yerleştirilmiş numune



Şekil 3.22. Sızmanın engellenmesi için o-ring kullanılması



Şekil 3.23. Su geçişi borusunun bağlanması



Şekil 3.24. Üç eksenli basınç deneyi düzeneğinin haznesinin yerleştirilmesi



Şekil 3.25. Hücre basıncının ayarlanması



Şekil 3.26. Geri basıncın ayarlanması

Permeabilite katsayısının belirlenmesi amacıyla yapılan hesaplamalarda Darcy Yasası'ndan yararlanılmıştır:

$$v = k \times i \quad (3.5)$$

v: Debi hızı (cm/s)

k: Permeabilite katsayısı (cm/s)

i: hidrolik eğim

$$v = \frac{Q}{t \times A} \quad (3.6)$$

Q: Numune içerisinden geçen toplam su miktarı (cm³)

t: geçen süre (s)

A: numune kesit alanı (cm²)

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3.7)$$

Δh : basınç yüksekliği (cm)

L: numune boyu (cm)

Eşitlik 3.6. ve Eşitlik 3.7., Eşitlik 3.5.'te yerine yazılırsa;

$$\frac{Q}{t \times A} = k \times \frac{\Delta h}{L} \quad (3.8)$$

$$k = \frac{Q}{t} \times \frac{1}{A} \times \frac{L}{\Delta h} \text{ (cm/s)} \quad (3.9)$$

$$\Delta h(m) = \frac{\sigma \times 1000}{\rho \times g} \quad (3.10)$$

σ : Geri basınç (kPa)

ρ : Suyun yoğunluğu (kg/m³)

g: Yerçekimi ivmesi (m/s²)

3.9.Optimizasyon Çalışmaları

Çizelge 3.7. Islak ve kuru derin karıştırma yöntemleriyle iyileştirilen zeminin özellikleri (Kaya, 2016)

ISLAK YÖNTEM	
Serbest Basınç Mukavemeti (28 gün)	0,2-5,0 MPa (0,5-5 MPa granüler zeminlerde) (0,2-2 MPa kohezyonlu zeminlerde)
k (Permeabilite Katsayısı)	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-9}$ m/s (Bentonit kullanılması halinde daha düşük bir değer alır.)
E ₅₀ (Elastisite Modülü)	350-1000 x Serbest basınç mukavemeti (Laboratuvar) 150-500 x Serbest basınç mukavemeti (Arazi)
Kayma Mukavemeti	Serbest basınç mukavemeti < 1 MPa ise % 40-50 x Serbest basınç mukavemeti
Çekme Mukavemeti	% 8-14 x Serbest basınç mukavemeti
28 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti	Silt ve killeri için 7 günlük dayanımın 1,4-1,5 katı Kumlar için 7 günlük dayanımın 2 katı
60 Günlük Serbest Basınç Mukavemeti	28 günlük dayanımın 1,5 katı
KURU YÖNTEM	
Drenajsız Kayma Mukavemeti, c _u	Zeminin drenajsız kayma mukavemeti x 10-50 (150-1000 kPa)
Elastisite Modülü (E)	50 – 200 x c _u 50 – 200 x q _u (çimento) (q _u : İyileştirilmiş zeminin serbest basınç mukavemeti)
Kırılma Deformasyonu	< %2

Dünya genelinde enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ancak bu artışa karşılık enerji kaynaklarının kısıtlı ve üretim maliyetinin yüksek oluşu insanları mevcut enerjiyi en iyi şekilde kullanabilmeye itmiştir (Sarıkaya, 2006). Çimento klinkerinin imalatı ekolojik olarak zararlıdır ve yüksek enerji tüketimi gerekmektedir. Üretimi sırasında CO₂, NO₂ ve SO₃ gibi zararlı gazların fazla miktarda açığa çıkması ve hava ile karışması çevremiz için ciddi tehditler oluşturmaktadır (Yeğınobalı ve ark., 2000).

Çizelge 3.7. incelendiğinde ıslak yöntem ile uygulanan derin karıştırma kolonlarının 28 günlük serbest basınç mukavemetinin granüler zeminlerde 0.5-5 MPa, kohezyonlu zeminlerde ise 0.2-2 MPa arasında olmasının kabul görüleceği anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan zeolitin çimentoya ikame miktarının artmasıyla mukavemette azalmalar görülmesine rağmen bu mukavemet değerleri kabul edilebilir mukavemet değerleri arasında kalmıştır. Aynı çizelge incelendiğinde permeabilite katsayısının ise 1×10^{-6} - 1×10^{-9} m/s değerleri arasında olmasının kabul edileceği anlaşılmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan permeabilite deneyleri sonucu elde edilen permeabilite katsayıları kabul edilebilir değerler arasında çıkmış ve permeabilite katsayısı açısından bir problem olmadığı, serbest basınç mukavemetini azaltmadan mümkün olan en düşük permeabilite katsayısını verecek tasarımın seçilmesinin uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak dayanım ve geçirimsizlik açısından kabul görülen sınır koşullarında DKK imal edilebileceği deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Bu sayede zeolitin DKK imalatında çimentoya ikamesiyle istenilen dayanım ve geçirimsizlikte olmak koşuluyla daha düşük maliyette ve ekolojik açıdan daha olumlu malzemeler kullanılarak DKK imal edilebileceği sonucu çıkmaktadır.

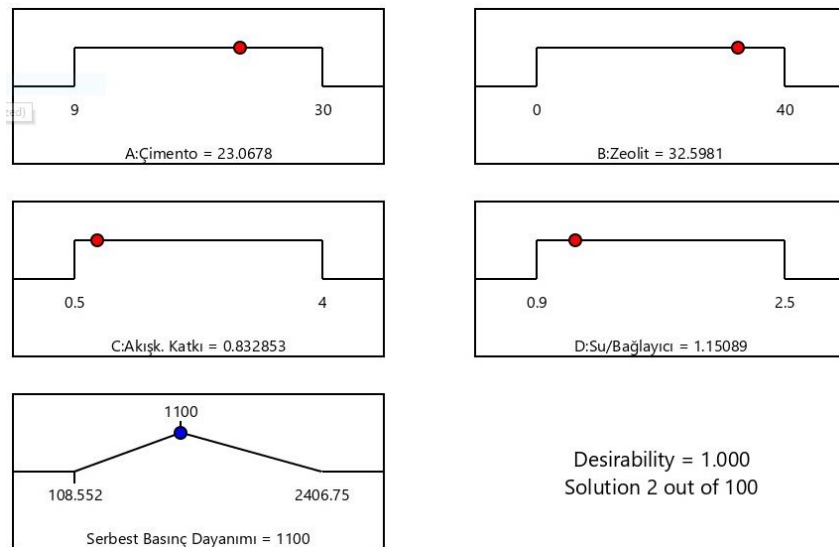
Bu tez kapsamında tabakalı zemin içerisinde derin karıştırma kolonu imal edileceği için hem granüler zemin hem de kohezyonlu zemin için sınır koşullar göz önüne alınarak iki zemin için de uygun bir değer elde edilebilmesi açısından hedef serbest basınç mukavemeti olarak granüler zeminde 1.1 MPa (1100 kPa)'lık, kohezyonlu zeminde ise 1.5 MPa (1500 kPa)'lık bir dayanım seçilmiştir. Yine aynı çizelgeden permeabilite katsayısı için sınır koşulları incelendiğinde bu tez çalışması kapsamında üretilen küçük ölçekli derin karıştırma kolonlarının istenilen sınır değerleri arasında bir permeabilite katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışmada granüler zeminde 1.1 MPa (1100 kPa)'lık, kohezyonlu zeminde ise 1.5 MPa (1500 kPa)'lık bir dayanımı elde edebilecek ve en az geçirimsizlikte olacak bir optimum tasarım belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan zeolit, çimentoya göre daha düşük maliyette bir malzemedir. Doğal bir malzeme olmasından dolayı ise çimento gibi işleme aşamalarından geçmemekte ve sonuç olarak elde edilmesi, çimentoya göre daha kolay olmaktadır. Ayrıca zeolitin elde edilmesi aşamasında, çimentonun elde edilme aşamalarında olduğu gibi zararlı gazlar oluşmamakta ve çevreye zarar gelmemektedir. Bu sebeplerden dolayı, enjeksiyon karışımının makineden pompalanmasını zorlamayacak bir kıvamda olabilmesi ve bu koşulun sağlanmasından sonra bağlayıcı olarak çimentonun yerine mümkün olduğunca zeolit ikame edilebilmesi hedeflenmiştir.

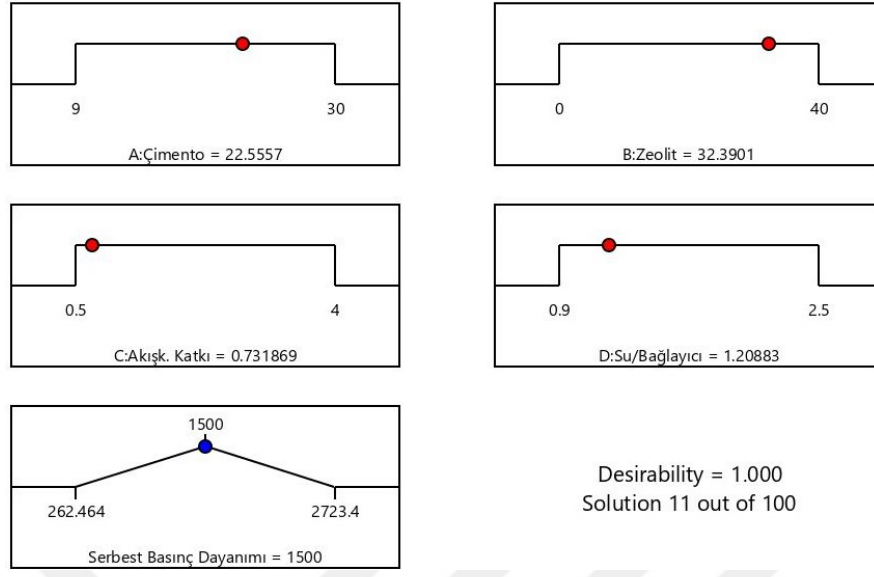
3.9.1. Optimizasyonun Yapılışı

Çalışma kapsamında önce hem killi zemin hem de kumlu zemin için yapılan serbest basınç deneyleri ve permeabilite deneylerinin 28 günlük tasarımlarının sonuçları Design Expert 11 programında Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak ayrı ayrı girilmiştir.

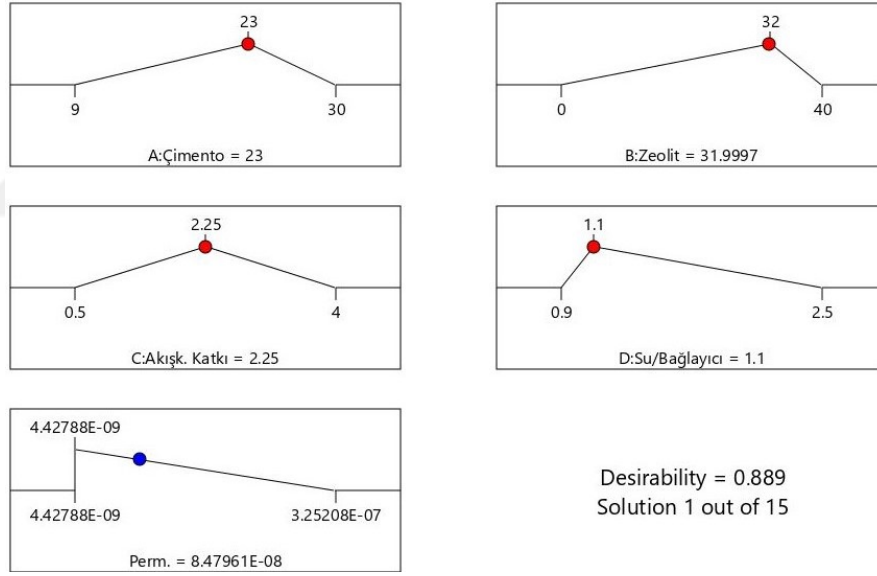
Deney sonuçları her zemin tipi ve her deney için ayrı ayrı analiz edildikten sonra program tarafından oluşturulan tasarım denklemleri Excel'e girilmiştir. Her iki zemin tipi için de serbest basınç mukavemetleri için Çizelge 3.6.'daki sınır koşullara göre belirlenen hedef değerler ve permeabilite katsayıları için Çizelge 3.6.'daki sınır koşullar dikkate alınarak ve Design Expert 11 programına göre uygulanabilirliği en yüksek olan ve parametre değerleri birbirine en yakın olan tasarımlar seçilmiştir (Şekil 3.27., Şekil 3.28., Şekil 3.29. ve Şekil 3.30.).



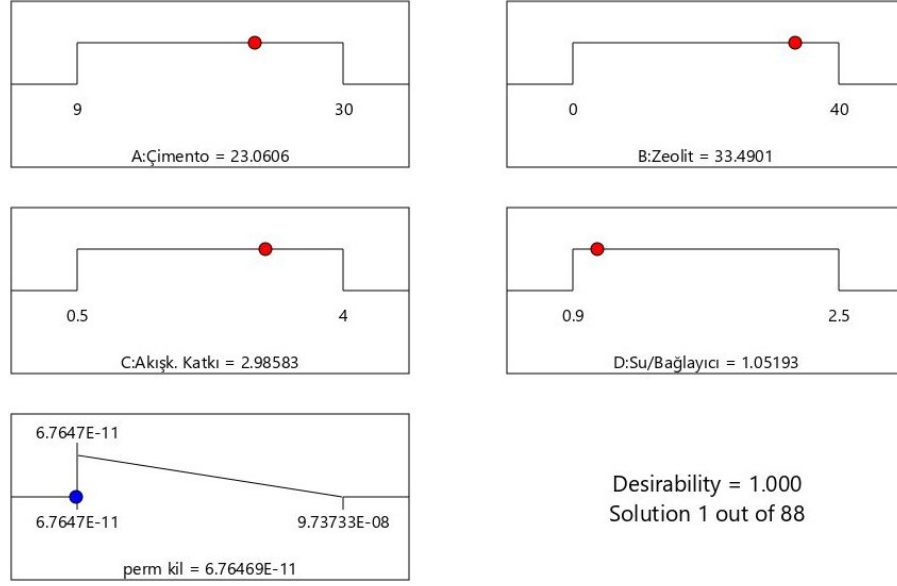
Şekil 3.27. Kumlu zeminin 28 günlük tasarımları için Serbest Basınç Deneyi optimum tasarım sınırları



Şekil 3.28. Killi zeminin 28 günlük tasarımları için Serbest Basınç Deneyi optimum tasarım sınırları



Şekil 3.29. Kumlu zeminin 28 günlük tasarımları için Permeabilite Deneyi optimum tasarım sınırları



Şekil 3.30. Killi zeminin 28 günlük tasarımları için Permeabilite Deneyi optimum tasarım sınırları

Ancak her iki zemin tipi ve her deney için oluşan toplam dört farklı optimizasyon işleminin sonucunda hepsi için tam geçerli tek bir optimum tasarım elde edilememektedir. Bu nedenle optimum tasarımın belirlenmesinde şu yöntem izlenmiştir. Deney sonuçlarına göre; permeabilite katsayıları iki zemin tipi için de tüm tasarımlarda istenen sınır değerler arasında olduğu için optimizasyon aşamasında daha kritik değerleri olan serbest basınç mukavemeti denklemleri öncelik olarak alınmıştır. Yine deney sonuçları incelenmiş ve serbest basınç mukavemetleri arasından da kumlu tasarımlarda daha düşük değerler elde edildiği belirlenmiş ve kumlu zemin için serbest basınç mukavemeti denklemi öncül parametre olarak ele alınmıştır.

Sonuç olarak parametre değerleri seçilirken ilk önce kumlu tasarımın serbest basınç mukavemetinin uygulanabilirlik değeri en yüksek olan parametre değerleri seçilmiştir. Sonrasında ise bu seçilen parametre değerleri killi tasarımın serbest basınç mukavemetindeki değeri, Excel’de tasarım denkleminde yerine koyulmuş ve killi tasarım için de istenilen değerin elde edilebileceği tespit edilmiştir. Aynı şekilde belirlenen parametre değerleri iki zemin tipi için de Excel’de permeabilite katsayısı denklemlerinde de yerine koyulmuş ve onların da istenilen değerlerinin elde edilebileceği tespit edilmiştir (Çizelge 3.8.).

Çizelge 3.8.’de görülen değerler optimizasyon sonucu tahmin edilen deney sonuçları olup, bu parametre oranlarınca küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanmış ve deney sonuçları, bu tahmin edilen deney sonuçları ile Bölüm 4.3.’te karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.8. Kumlu zeminin serbest basınç mukavemeti için seçilen parametre değerleri ve deneylerdeki tahmin edilen sonuçlar

Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı Katkı (%)	Su/bağlayıcı Oranı	Tahmin Edilen Serbest Basınç Mukavemeti (kPa) (Kumlu Zemin)
23.07	32.60	0.83	1.15	1100.00
Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı Katkı (%)	Su/bağlayıcı Oranı	Tahmin Edilen Serbest Basınç Mukavemeti (kPa) (Killi Zemin)
23.07	32.60	0.83	1.15	1553.60
Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı Katkı (%)	Su/bağlayıcı Oranı	Tahmin Edilen Permeabilite Katsayısı (m/s) (Kumlu Zemin)
23.07	32.60	0.83	1.15	8.00E-08
Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı Katkı (%)	Su/bağlayıcı Oranı	Tahmin Edilen Permeabilite Katsayısı (m/s) (Killi Zemin)
23.07	32.60	0.83	1.15	1.51E-08

Bu sayede mümkün olduğunca çimento yerine zeolit kullanılarak ekonomik açıdan ve çevre sağlığı açısından olumlu olabilecek bir tasarım değeri elde edilmiş, bu yapılırken de hem sonuçları kritik olan deneyler istenilen sınır koşullarında tutulabilmiş hem de diğer değerler de uygun sınır koşulları arasında tutularak imalata yönelik olabilecek bir tasarım elde edilmiştir.

3.10. SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) çalışma prensibi, tungsten, lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu gun'dan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerden yararlanılması şeklinde ifade edilebilir. Bu amaç doğrultusunda, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle toplanan, objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle numune yüzeyinde tarama işlemini gerçekleştirmektedir. Bir SEM'de görüntü oluşumu temel olarak şöyle ifade edilebilir: Elektron demetinin incelenen numune yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda oluşan sinyallerin toplanması ve incelenmesi şeklindedir (TAEK).

SEM ile gözle görülemeyen moleküler yapıdaki reaksiyonlar ve malzemelerin boşluk yapısı gözlemlenebilmektedir.

Bu çalışmada SEM analizi sonuçları ile laboratuvar deney sonuçları arasında ilişkiler elde edilmeye çalışılmıştır. SEM görüntüleri, deney sonuçları karakteristik özellikler gösteren numuneler için alınmış olup numunelerin mineralojik yapısı

incelenmiştir. Zemin ile karıştırılan bağlayıcı maddeler (çimento ve zeolit) arasında meydana gelen reaksiyonların ve moleküler yapıların görülebilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında bağlayıcı malzemeler ile karıştırılarak reaksiyona girmesi ve moleküler yapısında oluşan bağlar ile iyileşmesi sağlanan zemin numunelerin moleküler yapısı SEM ile incelenmiştir.

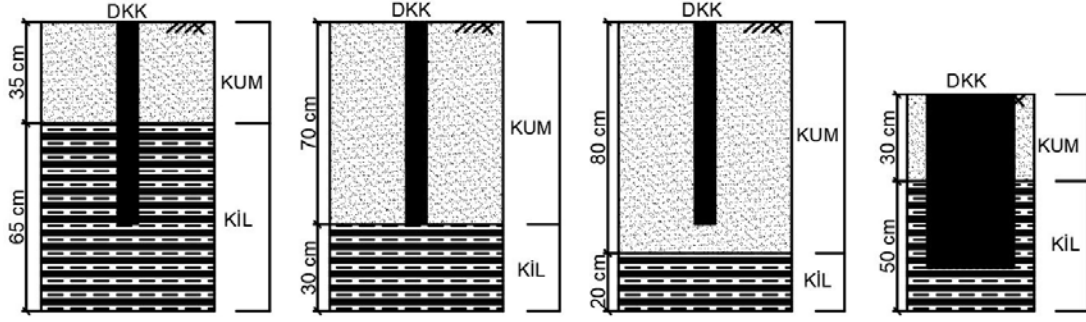
Bu amaç doğrultusunda hem killi zemin hem de kumlu zemin için serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyi sonuçları incelenen 17 tasarım içerisinde 3'er adet olmak üzere ve klinoptilolit için de 1 adet olmak üzere toplam 7 adet SEM analizi yapılmıştır. SEM analizi için seçilen kuru durumdaki numuneler, boyutları 1 cm'yi geçmeyecek şekilde küçültülerek hazırlanmış ve Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde analiz ettirilmiştir (Şekil 3.31.). Her örnek 500X, 1000X, 5000X ve 10000X büyütme oranlarıyla büyütülerek incelenmiştir.



Şekil 3.31. SEM analizi

3.11. Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları

Küçük ölçekli derin karıştırma kolonu deneyleri tamamlandıktan sonra deney sonuçları yorumlanmış ve Design Expert 11 programında analiz edilerek bu çalışma için geçerli optimum bir enjeksiyon karışımı oranı tespit edilmiştir. Bu karışım oranı kullanılarak, farklı tabakalanma yükseklikleri dikkate alınarak tank içerisinde yüklenmek üzere 7 cm çapında 3 adet DKK, karot numune almak amacıyla 30 cm çapında 1 adet olmak üzere toplamda 4 adet derin karıştırma kolonu imal edilmiştir (Şekil 3.32.).



Şekil 3.32. DKK imalatında farklı tabakalanma koşulları

3.11.1. Büyük Ölçekli DKK İmalatında Kullanılan Ekipmanlar

3.11.1.1. Derin Karıştırma Makinesi

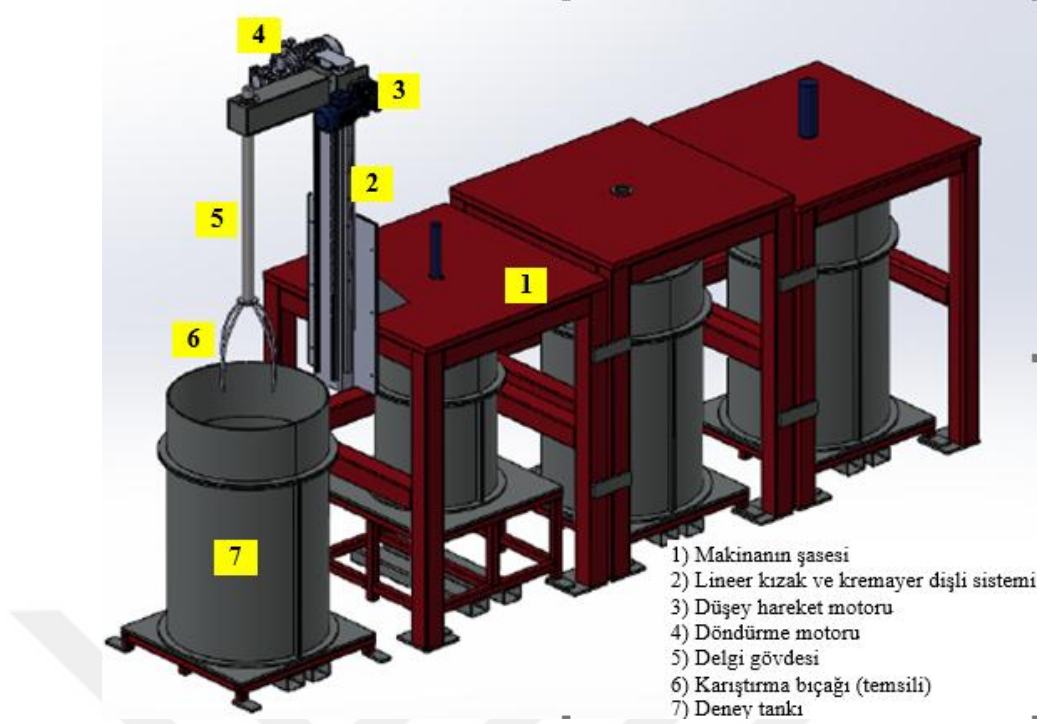
Çalışma kapsamında, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Geoteknik Laboratuvarında bulunan laboratuvar düzeyinde derin karıştırma kolonu imal edebilen derin karıştırma makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.33.). Kullanılan derin karıştırma makinesinin üç boyutlu görüntüsü Şekil 3.34.’te, makinenin teknik özellikleri ise Çizelge 3.9.’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Derin karıştırma makinesi özellikleri

Özellik	Birim
Şaft yüksekliği	95 cm
Şaft çapı	17 cm
Karıştırıcı şaftın dönme hızı	0-100 devir/dk.
Karıştırıcı şaftın batma/çekme hızı	0-100 cm/dk.
Enjeksiyon basıncı	0-60 bar



Şekil 3.33. Derin karıştırma makinesi



Şekil 3.34. Derin karıştırma makinesinin üç boyutlu görüntüsü (Yenginar, 2020)

3.11.1.2. Derin Karıştırma Makinesi Bıçakları

Karot almak amacıyla imal edilen kolon için kullanılan 30 cm çaplı derin karıştırma makinesi bıçağı Şekil 3.35.'te ve tank içerisinde yüklemek için imal edilen kolonlar için kullanılan 7 cm çaplı derin karıştırma makinesi bıçağı Şekil 3.36.'da gösterilmektedir. Bu bıçakların özellikleri ise Çizelge 3.10.'da verilmektedir.



Şekil 3.35. Derin karıştırma makinesi bıçağı (30 cm çaplı)



Şekil 3.36. Derin karıştırma makinesi bıçağı (7 cm çaplı)

Çizelge 3.10. Derin karıştırma makinesi bıçaklarının özellikleri

Özellik	30 cm çaplı bıçak	7 cm çaplı bıçak	Birim
Çapı	30	7	cm
Yüksekliği	25	37	cm
Et kalınlığı	2	1	cm
İç kanal çapı	1	1	cm
Kanat sayısı	2	2	adet
Delik sayısı	4	1	adet
Delik çapı	1	1	cm

3.11.1.3.Enjeksiyon Hazırlama Tankı ve Enjeksiyon Pompası

Çalışma kapsamında, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Geoteknik Laboratuvarında bulunan enjeksiyon tankı ve enjeksiyon pompası kullanılmıştır (Şekil 3.37.). Tankın özellikleri Çizelge 3.11.'de, pompanın özellikleri ise Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Enjeksiyon tankının özellikleri

Özellik	Birim
Bıçak sayısı	3 adet
Dönme hızı	60 devir/dk.
Çap	65 cm
Yükseklik	42 cm
Tank hacmi	140 litre



Şekil 3.37. Enjeksiyon karıştırma tankı ve pompası (Noori, 2019)

Çizelge 3.12. Enjeksiyon pompasının özellikleri (Noori, 2019)

AC güç	380 V, 50 Hz
Pompa motoru	5.5 kW
Enjeksiyon miktarı	35 lt./dk.
İletim mesafesi	50 m
En yüksek çalışma basıncı	40 bar

3.11.1.4. Karot Alma Makinesi

Çalışma kapsamında, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Geoteknik Laboratuvarında bulunan elmas uçlu karotiyer kullanılmıştır (Şekil 3.38.). Karot alma esnasında oluşacak sürtünme kuvvetinden doğacak olan yüksek sıcaklığı engelleyebilmek amacıyla basınçlı su sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.38. Karot alma makinesi

3.11.2. Tankların Zemin ile Doldurulması

Çalışma kapsamında kullanılan killi zemin ve kumlu zemin Şekil 3.32.'de gösterilen tabakalanma yüksekliklerinde 3 adet tank içinde (tank çapı 60 cm, boyu 100 cm) ve çapı 44 cm, boyu 80 cm olacak şekilde 1 adet tank içinde üst tabaka kumlu zemin, alt tabaka ise killi zemin olacak şekilde doldurulmuştur.

Yapılan laboratuvar çalışmasında, arazideki imalatlara mümkün olduğunca yakın olabilmek için üzerine yükleme yapılacak DKK'ların kolon boyu/kolon çapı (L/d) oranının mümkün olduğunca yüksek olmasının sağlanması gerekmektedir. Aynı zamanda zemin tabakalanma yükseklikleri sonucu kolonun yapacağı oturma miktarlarını karşılaştırabilmek adına DKK'nın da tank içerisinde belirli bir sınır boyda olması gerekmektedir. Bu kapsamda L/d oranı 10 olarak seçilmiştir. Sonuç olarak 100 cm uzunluktaki tankların içerisinde 7 cm çapında olan kolonların 70 cm uzunlukta imal edilmesine karar verilmiştir. 80 cm uzunluğunda olan tank için ise kolon üzerinde yükleme yapılmayacağından dolayı L/d oranını gözetmeksizin, 50cm uzunluğundaki karotiyerin alabileceği maksimum uzunlukta karot numuneyi alabilmesi açısından imal edilecek kolonun 60 cm uzunlukta olmasına karar verilmiştir.

Üzerinde yükleme yapılacak olan DKK'da; bir adet kazık ucu killi zemine oturmuş ve çevre sürtünmelerinin yarısını kumlu yarısını ise killi zeminden alan, bir adet kazık ucu killi zemine oturmuş ve çevre sürtünmelerinin tamamını kumlu zeminden alan ve bir adet ise kazık ucu kumlu zemine oturmuş ve çevre sürtünmelerinin kumlu zeminden alan olmak üzere üç farklı tabakalanma yüksekliklerinde olan tank doldurulmuştur. Karot numune alınacak olan kolon için ise iki zemin için de numune alabilmek açısından tank içerisinde kolon oluşacak yüksekliğin yarısı kumlu zemin ile doldurulmuş tankın kalan kısmı ise killi zeminle doldurulmuştur.

Tanklar doldurulurken ise küçük ölçekli DKK numuneleri ile büyük ölçekli DKK'nın arasında bağlantı kurulabilmesi açısından zeminlerin tankta sıkıştırılması için şöyle bir yol izlenmiştir: Killi zemin için seçilen su muhtevasında (%25) zemin su ile karıştırılmış ve küçük ölçekli numuneler hazırlanırken yapılan kalıp doldurma şekli ile zemin kalıba doldurulmuştur. Doldurulan zeminin ağırlığı ve kalıbın hacmi belirlenmiş ve bilinen formüller kullanılarak zeminin kuru yoğunluğu belirlenmiştir. Çapı belli olan tank içerisinde doldurulması istenen zemin yüksekliğine göre zeminin tank içerisinde kaplayacağı hacim hesaplanmış, aynı kuru yoğunluk değerine göre kullanılması gereken zeminin ağırlığı hesaplanmış ve seçilen su muhtevasında (%25) olacak şekilde su ile

karıştırılarak homojen bir şekilde ve istenilen yükseklikte tankın içerisinde yerleştirilmiştir. Kumlu zeminin çalışma başlangıcında kalıpta doldurulan boşluk oranına göre rölatif sıkılık değeri %36 (orta sıkı) olarak belirlenmiştir. Tank içerisinde doldurulması istenen kumlu zeminin yüksekliği ve bunun sonucunda kumlu zeminin tank içerisinde kaplayacağı hacim hesaplanmıştır. Kumlu zemin de seçilen su muhtevasında (%10.0) olacak şekilde su ile karıştırılmış ve küçük ölçekli numuneler ile aynı olabilmesi açısından aynı rölatif sıkılık değeri (%36) elde edilecek şekilde kullanılacak zemin miktarı hesaplanarak tank içerisine doldurulmuştur. Burada yapılan hesaplar kontrol edildiğinde kumlu zeminin de killi zemin ile aynı mantıkta tanklara doldurulduğu ve küçük ölçek ile büyük ölçek arasında bir bağlantı kurulabildiği sonucu çıkmaktadır.

Doldurulan tankların iki boyutlu görüntüsü Şekil 3.32.'de görülmektedir. Şekil 3.39. ve Şekil 3.40.'ta tankların doldurulma aşaması görülmektedir. Şekil 3.41.'de ise zemin ile doldurulmuş, kolon imalatına hazır tank görülmektedir.



Şekil 3.39. Zeminlerin istenilen su muhtevasında karıştırılması



Şekil 3.40. Zeminlerin istenilen yüksekliklerde sıkıştırılma aşaması



Şekil 3.41. Kolon imalatına hazır zemin

3.11.3. Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonu İmalatı

3.11.3.1. Tank İçerisinde Yüklenecek Farklı Tabakalanmalı DKK'nın İmalatı

Çalışma kapsamında tank içerisinde yüklenmek üzere üç adet derin karıştırma kolonu imal edilmiştir. Bu kolonların imalatının iki boyutlu şeması Şekil 3.32.'deki 1 m yükseklikteki ilk üç tank olarak görülmektedir.

Tankın yatayda merkez noktası belirlenmiş ve derin karıştırma bıçağının ucu tam tank merkezine gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Deneyler esnasında bıçak dönme hızı 80 devir/dk. ve bıçak batma hızı 50 cm/dk. olarak ayarlanmıştır. Düzenek hazırlandıktan sonra makine çalıştırılmış ve bıçağın belirlenen hızlarda zemine girmesi ve dönmesi sağlanmıştır (Şekil 3.42.). Bıçak hareket halindeyken enjeksiyon karışımı eşit parçalara bölünerek tüm kolon boyunca eşit miktarda bıçak içerisine eklenmiş ve zeminle enjeksiyonun homojen olarak karışması sağlanmıştır (Şekil 3.43.). Enjeksiyon basma işi bittikten sonra iki zeminin birbiriyle fazla karışmasını engelleyebilmek için her zemin kendi içerisinde 10 kere taranarak enjeksiyon ve zeminin iyice karışması sağlanmıştır. Kolon imalat işi bittikten sonra kolon üst ucu yüklemeye uygun olabilmesi açısından düzeltilmiş ve tankın üzeri poşet ile kapatılarak 28 gün boyunca kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.44.).

Enjeksiyon dozajı, killi zeminin optimum dozajı (278.17 kg/m^3) ile kumlu zeminin optimum dozajı (344.30 kg/m^3) arasında bir değer olan 300 kg/m^3 olarak seçilmiştir.



Şekil 3.42. Derin karıştırma makinesinin çalışması



Şekil 3.43. Derin karıştırma kolonu imalatı (7 cm'lik kolonlar)



Şekil 3.44. Tank içerisinde kürlenmeye bırakılmış DKK'lar (7 cm'lik kolonlar)

3.11.3.2.Karot Alınacak DKK'nın İmalatı

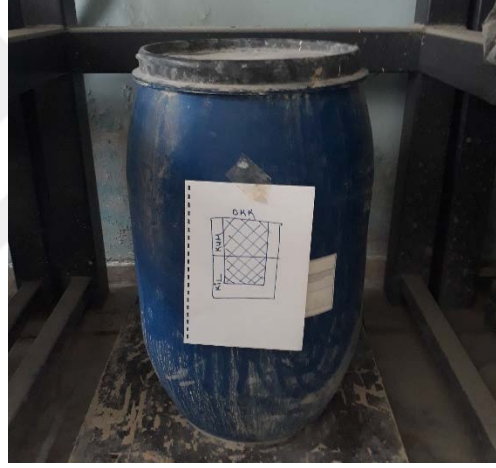
Çalışma kapsamında karot numune alınmak üzere optimum tasarım oranları ile bir adet 30 cm çapında DKK imal edilmiştir. Diğer imal edilen kolonların enjeksiyon dozajı hesabında olduğu gibi bu kolon için gerekli enjeksiyon dozajı da, killi zeminin optimum dozajı (278.17 kg/m^3) ile kumlu zeminin optimum dozajı (344.30 kg/m^3) arasında bir değer olan 300 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Ayrıca enjeksiyon karışımının bir miktarı pompa borusunda kalacağı için bu kalan miktar da hesaplanmış ve gerekli enjeksiyon miktarına eklenmiştir. Bıçak ucunda ise 3 mm çaplı nozul kullanılmıştır.

Derin karıştırma bıçağı dönme hızı 80 devir/dk. olarak seçilmiştir. Bıçağın batma hızı şöyle belirlenmiştir: Enjeksiyon karışımının tamamı bıçağın zemine ilk girişinde basılacaktır. Kullanılacak toplam enjeksiyon hacmi hesaplanmıştır. Aynı hacimde su, enjeksiyon pompası tankına doldurulmuş ve makine içerisinden suyun basılması sağlanmıştır. Tüm su makineden basılırken geçen süre dakika olarak tutulmuş ve kaydedilmiştir. İmal edilecek kolon yüksekliği/geçen süre ($60 \text{ cm}/1.45 \text{ dk.}$) ile derin karıştırma bıçağı batma hızı 41 cm/dk. olarak belirlenmiştir.

Toplam enjeksiyon miktarına göre her parametre için gerekli miktarlar hesaplanmıştır ve enjeksiyon karıştırma tankına eklenerek 15 dakika boyunca karıştırılarak enjeksiyonun homojen bir şekilde karışması sağlanmıştır. Daha sonra tankın yatayda merkez noktası tespit edilmiş ve derin karıştırma bıçağının ucu tespit edilen nokta üzerinde konumlandırılmıştır. Enjeksiyon tankında karışarak homojen hale gelen enjeksiyon, enjeksiyon pompası tankına aktarılmaya başlanmış ve aynı zamanda pompa da çalıştırılarak enjeksiyonun bıçak ucundan basılması başlatılmıştır. Bıçak ucundan enjeksiyon karışımı çıkmaya başladığı an bıçakta zemine dönerek girmeye başlamış ve tüm enjeksiyonun, bıçağın zemine ilk girişi esnasında kolon boyunca zeminle karışması sağlanmıştır (Şekil 3.45.). Daha sonra diğer kolonlarda yapıldığı gibi her zemin kendi içerisinde 5-10 kere taranarak enjeksiyon ve zeminin iyi bir şekilde karışması sağlanmıştır. Kolon imalatı tamamlandıktan sonra tankın kapağı kapatılmış ve kolon 28 gün boyunca kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 3.46.).



Şekil 3.45. Derin karıştırma kolonu imalatı (30 cm'lik kolon)



Şekil 3.46. Tank içerisinde kürlenmeye bırakılmış DKK (30 cm'lik kolon)

3.11.4. Tank İçerisinde DKK'ların Yüklenmesi

Çalışma kapsamında imal edilen 7 cm çaplı 3 adet derin karıştırma kolonu, kür süresi tamamlandıktan sonra tank içerisinde düşey olarak yüklenmiştir. Yükleme yapılırken aynı zamanda bir deformasyon saati ile kolonun zemin içerisinde ne kadar oturma yaptığı ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu sayede kolonun taşıyabildiği maksimum yük ve bu yüke karşılık zemin içerisinde ne kadar oturma yaptığı belirlenmiştir.

DKK'nın yüklenebilmesi için; kolonun üst kısmının etrafındaki zemin, oturmaya izin verilebilecek yükseklik oluşuncaya kadar kaldırılmıştır. Ağırlıkların koyulacağı plakanın tam yatay ekseninde durabilmesi ve kolonun eksantrik olarak yüklenmemesi için

kolonun üst kısmı temizlenmiş ve eğrilikleri giderilerek düzeltilmiştir (Şekil 3.47.). Daha sonra plaka, kolonun ve plakanın merkezleri tam kesişecek şekilde kolonun üstüne yerleştirilmiştir. Deformasyon saati de plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Sonrasında ise belirli aralıklarla plaka üzerine ağırlıklar koyulmuş ve bu ağırlıklara karşılık gelen oturmalar kaydedilmiştir (Şekil 3.48.).

DKK'ların göçme yükü (taşıma kapasitesi), Teğet Yöntemi ile belirlenmiştir. Kolonların beklenen taşıma kapasitesi değerleri de hesaplanmış ve göçme yükü değerleri ile beraber yorumlanmıştır.

Kolon üzerinde yükleme işlemi bittikten sonra tanktan çıkarılmış, kolonun boyu ve çapı ölçülmüştür (Şekil 3.49.).



Şekil 3.47. Tank içerisindeki kolonun yüklenmeye hazırlanması



Şekil 3.48. Tank içerisindeki kolonun yüklenmesi

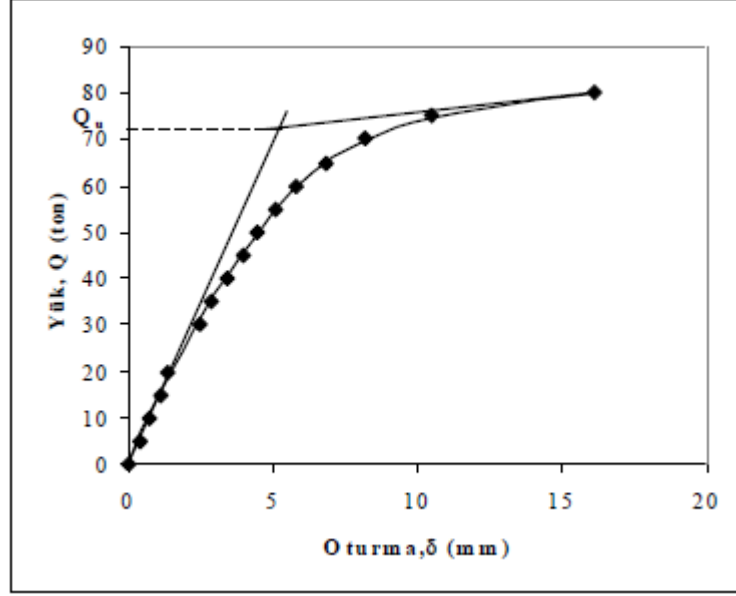


Şekil 3.49. 7 cm çapta imal edilen kolonun boy ve çapının ölçülmesi

3.11.4.1. Teğet Yöntemi

Kolon yüklemesi sonucu oluşan yük-oturma miktarı ($Q-\delta$) grafiği eğrisinin elastik deformasyon durumunu ifade eden başlangıç bölümünden ve plastik deformasyon

durumunu belirten bitiş bölümünden eğriye teğet doğrular çizilir. Bu iki teğet doğrusunun kesiştiği noktadan yük (Q) eksenine dik indirilir ve okunan değer kolonun göçme yükü (Q_u) (taşıma kapasitesi) olarak kabul edilir (Şekil 3.50.).



Şekil 3.50. Teğet yöntemi (Alku, 2006)

3.11.5. DKK'dan Karot Alınması

Karot almak amacıyla imal edilen kolonun kür süresi bittikten sonra imal edilen kolondan, kolonun serbest basınç mukavemetini ve permeabilite katsayısını belirleyebilmek amacıyla karot numuneler alınmıştır. Karot numuneler, kolonun hem alt hem de üst kısmı ve çeşitli bölgelerinden olmak üzere alınmış ve istenilen uzunlukta boyları ayarlanarak ilgili deneylere tabii tutulmuştur.

Karot alma işlemi şöyle gerçekleşmiştir: Karot alma makinesi, karot alma işlemi esnasında kolonu fazla sarsmaması için düz bir zemine konumlandırılmış ve makinenin parçaları sabitlenerek çalışmaya hazır hale getirilmiştir. Daha sonra hem sorunsuz karot numune alabilmek hem de makinenin ısınmasını engellemek için makinede bulunan parçadan su geçişine izin verilmiş ve karotiyerin içinden su geçişi sağlanmıştır. Aynı anda makine de kolonun içerisine yavaş ve düzgünce indirilerek kolon delinerek, karot numuneler alınmıştır (Şekil 3.51. ve Şekil 3.52.).



Şekil 3.51. DKK'dan karot alınması



Şekil 3.52. Karot numuneler

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Mars Hunisi Deneyi

Çalışma kapsamında hazırlanan enjeksiyon karışımının kıvamının, DKK imalatı sırasında makineyi zorlamamasını sağlamak amacıyla 17 adet küçük ölçekli DKK numunelerinin her birinin enjeksiyonları hazırlanmış ve Marsh hunisi deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerin sonucunda enjeksiyonların akma süreleri Çizelge 4.1.'de toplu bir şekilde görülmektedir. Noori (2019), derin karıştırma makinesinin, marsh hunisinde akma süresinin 70-100 saniye arasında olan enjeksiyon karışımlarını zemin içerisine rahatlıkla pompalayabildiğini ifade etmiştir. Çizelge 4.1. incelendiğinde akma sürelerinin Noori (2019) tarafından belirtilen bu sınır değerler içerisinde olduğu görülmektedir.

Marsh hunisi deneyi sonuçları Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir ve ANOVA tablosu ve R^2 , Düzeltilmiş R^2 , Tahmin Edilen R^2 ve Hassasiyet değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Analiz sonucu akma süresini veren denklem Eşitlik 4.1. ile ifade edilmiştir.

$$\text{Akma Süresi} = +35.87 + 0.17 \cdot \text{Çimento} + 0.03 \cdot \text{Zeolit} - 0.10 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 3.23 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.1)$$

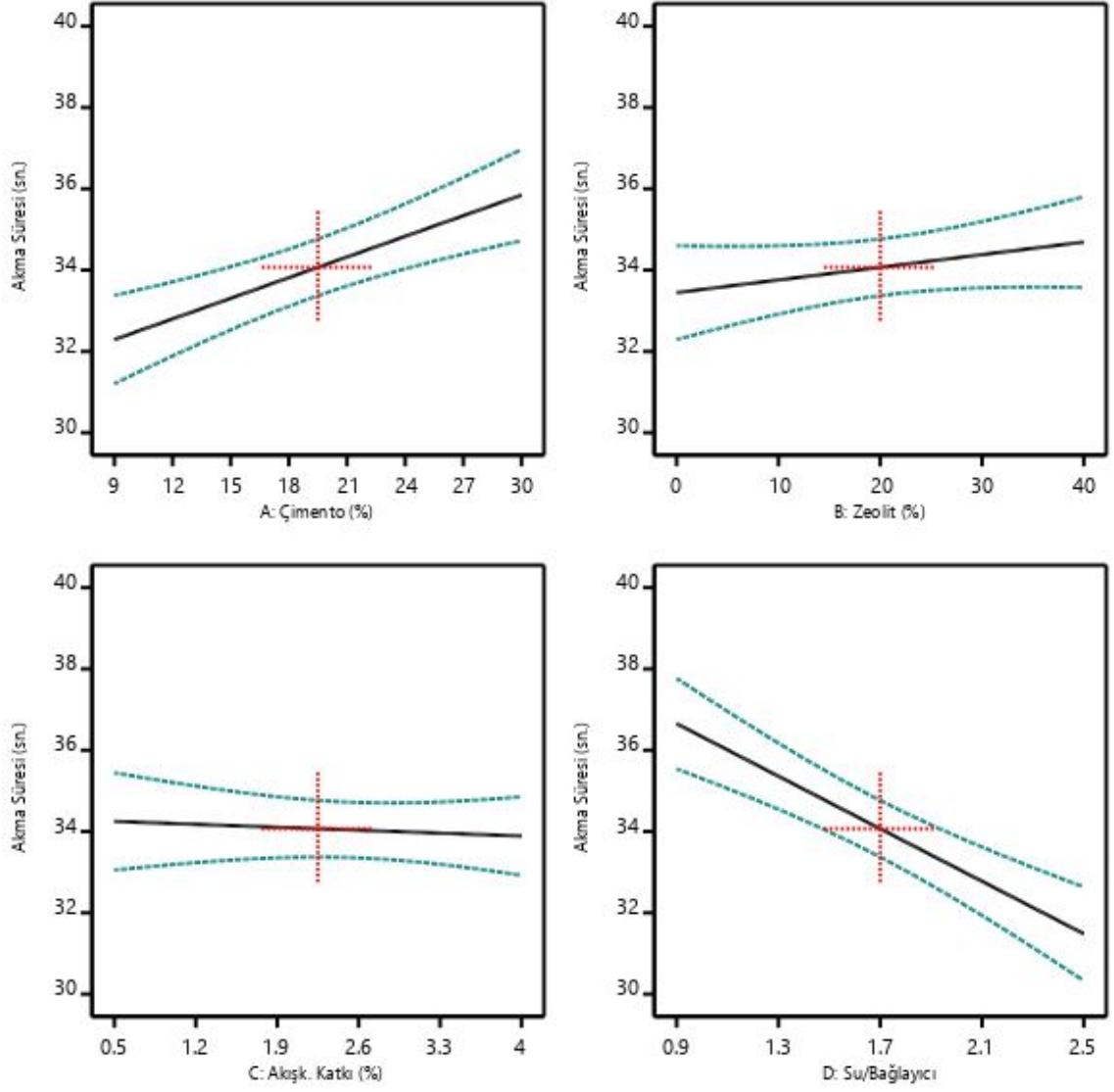
Çizelge 4.1. Marsh Hunisi Deneyi sonuçları

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				Akma süresi (s)
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı	
1	30	15.8	2.11	1.86	34
2	24.33	0	0.5	1.31	35
3	23.81	0	3.83	2.5	30
4	9	29	0.5	1.31	33
5	30	40	0.5	0.9	40
6	9.42	17.34	2.30	1.83	32
7	16.98	40	2.15	1.88	32
8	9	40	4	0.9	35
9	9	27.8	3.91	2.5	30
10	30	40	4	2.5	33
11	9	0	3.83	1.38	32
12	22.62	26	4	1.47	37
13	17.4	16	2.18	0.9	36
14	22.62	26	4	1.47	37
15	24.33	29.46	0.5	2.5	34
16	30	0	4	0.9	38
17	9	0	1.25	2.5	31

Çizelge 4.2. ANOVA Tablosu (Marsh Hunisi Deneyi)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	111.04	4	27.76	16.74	< 0.0001 önemli
A-Çimento	33.92	1	33.92	20.46	0.0007
B-Zeolit	3.81	1	3.81	2.30	0.1557
C-Akışk. Katkı	0.3674	1	0.3674	0.2216	0.6463
D-Su/Bağlayıcı	65.97	1	65.97	39.79	< 0.0001
R²	0.8480				
Düzeltilmiş R²	0.7974				
Tahmin Edilen R²	0.7010				
Hassasiyet	14.3879				

Çizelge 4.2. incelendiğinde, F değerinin 16.74 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerinin (yüzdelik değerler) 0.05'ten küçük olması istenmektedir. Bu değer 0.05'ten küçük olması, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda A ve D terimleri önemli terimlerdir. p değerinin 0.10'dan büyük olması ise model terimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Çizelge 4.1.'e bakıldığında zaman akma süreleri arasındaki saniye farklarının çok az olduğu hatta bazı deneylerin sonuçlarında eşit değerler olduğu için B ve C terimleri anlamlı çıkmamıştır ancak yapılan deneylerde istenilen sınır akma değerlerinin daha altında bir akma değerleri elde edildiği için karışımların kıvamlarının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.2.'deki son dört satırda R², Düzeltilmiş R², Tahmin Edilen R² ve Hassasiyet değerleri görülmektedir. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki farkın 0.2'den küçük olması istenmektedir ve burada bu koşulun sağlandığı görülmekte ve tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Hassasiyet değerinin ise 4'ten büyük olması beklenmektedir. Çizelge 4.2.'ye bakıldığında bu değer de sağlandığı ve tasarımın uyumlu olduğu görülmektedir.

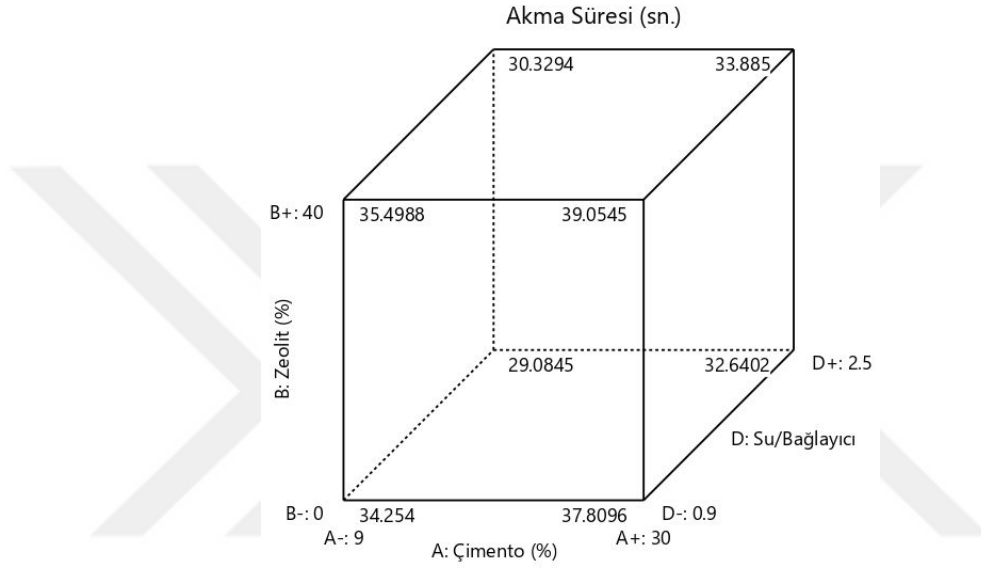


Şekil 4.1. Parametrelerin akma sürelerine etkisi

Analiz sonuçlarına göre parametrelerin akma sürelerine olan etkileri Design Expert 11 programından alınan Şekil 4.1.'de görülmektedir. Bir akışkana katı bir madde eklendiğinde, tahmin edildiği üzere daha koyu bir kıvam alması yani akma süresinin uzaması beklenmektedir. Şekil 4.1.'de de görüldüğü üzere çimento ve zeolit miktarının artması ile enjeksiyon karışımlarının akma süreleri artmakta yani enjeksiyon daha koyu bir kıvam almaktadır. Bu sebepten dolayı çimento ve zeolit miktarının belirli bir üst sınırı geçmemesi gerekmektedir. Ancak tekrar belirtmek gerekirse bu çalışmada maksimum akma süresi 40 s olduğu için çimento ve zeolit miktarları çalışma sınırları içerisinde herhangi bir sorun oluşturmamaktadır. Akışkanlaştırıcı katkı miktarı ise hem oranının düşük seviyede olması hem de Marsh Hunisinin küçük bir hacimde olmasından dolayı sonuçlarda çok etkili olmamıştır ancak akma süresi için küçük bir miktarda azalmaya

katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Su/bağlayıcı oranının artması, karışımda bağlayıcı miktarı sabitken su miktarının artması anlamına gelmektedir. Şekil 4.1.'de su/ bağlayıcı oranının grafiği incelendiğinde ise beklenildiği üzere su/bağlayıcı oranının artmasıyla karışımın akma süresi azalmakta ve karışım daha akışkan bir kıvama gelmektedir.

Şekil 4.2.'de ise çimento miktarı, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının birbirleri ile olan üçlü etkileşimi görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkisi az olduğu için bu etkileşimde gösterilmemiştir.



Şekil 4.2. Çimento miktarı, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının birbirleri ile olan üçlü etkileşimleri

4.2.Küçük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları

4.2.1. Serbest Basınç Deneyi

Çalışma kapsamında hem killi zemin için hem de kumlu zemin için 28 ve 56 günlük kür sürelerinde hazırlanan 17'şer adet küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış olup deneylerin sonucunda elde edilen veriler aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde beklenildiği üzere 56 günlük kür sürelerinde elde edilen serbest basınç mukavemetleri daha yüksek olmuştur. Ayrıca killi zeminlerde, kumlu zeminlere göre daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Kumlu zemin suya doymun durumda olduğu için kolon numunelerinin

kürlenme aşamasında zemin içerisindeki su kaybolarak DKK'nın yapısında boşluklar oluşturmuş ve dayanımda azalmaya sebep olmuştur.

4.2.1.1. Killi Zemin

Killi zeminler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları hem 28 hem de 56 günlük tasarım için toplu bir şekilde Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucu oluşan gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) grafikleri Şekil Ek.1.1. - Şekil Ek.1.17. arasında verilmiştir.

Çizelge 4.3. Serbest Basınç Deneyi toplu sonuçları (Killi zemin – 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	30	15.8	2.11	1.86	1352.30	2316.55
2	24.33	0	0.5	1.31	2420.23	3351.26
3	23.81	0	3.83	2.5	1443.94	1580.20
4	9	29	0.5	1.31	897.97	1471.83
5	30	40	0.5	0.9	2154.09	2396.92
6	9.42	17.34	2.30	1.83	977.19	1379.81
7	16.98	40	2.15	1.88	518.50	815.40
8	9	40	4	0.9	1063.05	1409.32
9	9	27.8	3.91	2.5	453.11	717.78
10	30	40	4	2.5	584.06	765.15
11	9	0	3.83	1.38	620.51	1378.71
12	22.62	26	4	1.47	1014.70	1722.48
13	17.4	16	2.18	0.9	1733.82	2532.96
14	22.62	26	4	1.47	1120.88	1329.31
15	24.33	29.46	0.5	2.5	262.46	440.57
16	30	0	4	0.9	2723.40	5335.50
17	9	0	1.25	2.5	682.42	1205.99

EK-1'deki Şekil Ek.1.1. ile Şekil Ek.1.17. arasındaki şekillerde bulunan σ - ϵ grafikleri incelendiğinde, kür süresinin artmasıyla numunenin basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Çimento miktarının daha fazla olduğu ve bunun yanında zeolit miktarının az olduğu tasarımların ise kür süresinin artmasıyla daha gevrek bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir.

4.2.1.1.1. Serbest Basınç Mukavemeti (q_u)

Yapılan deneylerin sonuçları Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. 28 günlük ve 56 günlük deneylerin ANOVA tabloları ve R^2 , Düzeltilmiş R^2 , Tahmin Edilen R^2 ve Hassasiyet değerleri Çizelge 4.4.'te ve Çizelge 4.5.'te verilmiştir. 28 günlük deney sonuçlarının analizi ile oluşan tasarım denklemi Eşitlik 4.2., 56 günlük deney sonuçlarının analizi ile oluşan tasarım denklemi ise Eşitlik 4.3. ile verilmektedir.

$$q_u = +2096.02 + 40.58 \cdot \text{Çimento} - 19.17 \cdot \text{Zeolit} - 43.23 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 710.52 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.2)$$

$$q_u = +3367.16 + 58.83 \cdot \text{Çimento} - 39.27 \cdot \text{Zeolit} + 9.37 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 1156.27 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.4. ANOVA Tablosu (Serbest Basınç Deneyi-Killi zemin, 28 günlük kür)

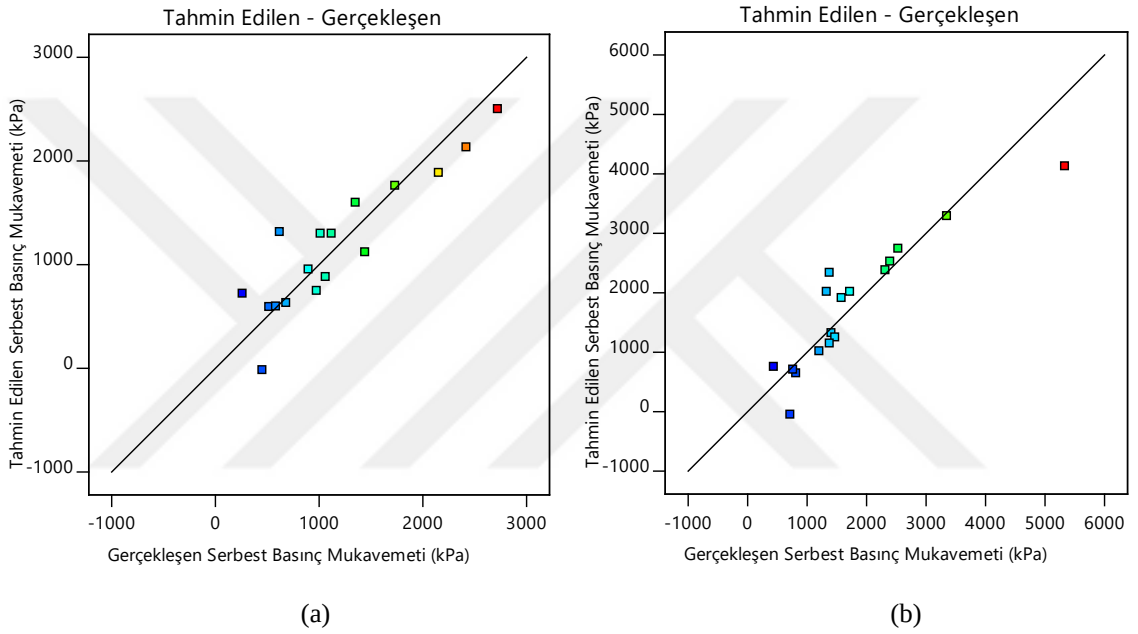
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	6.670E+06	4	1.667E+06	13.39	0.0002 önemli
A-Çimento	1.949E+06	1	1.949E+06	15.65	0.0019
B-Zeolit	1.444E+06	1	1.444E+06	11.59	0.0052
C-Akışk. Katkı	64620.05	1	64620.05	0.5190	0.4851
D-Su/Bağlayıcı	3.190E+06	1	3.190E+06	25.63	0.0003
R²	0.8170				
Düzeltilmiş R²	0.7560				
Tahmin Edilen R²	0.6098				
Hassasiyet	13.1590				

Çizelge 4.4. incelendiğinde, F değerinin 13.39 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerine göre A, B ve D terimleri anlamlı terimlerdir, C terimi anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Bu durum tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Hassasiyet değeri 4'ten büyüktür ki bu da tasarımın uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5.'e göre; F değerinin 13.87 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerine göre; A, B ve D terimleri anlamlı terimler iken, C terimi anlamlı çıkmamıştır. Çizelge 4.5.'e göre Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür ve tasarımın uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Hassasiyet değeri de yine 4'ten büyük çıkmıştır.

Çizelge 4.5. ANOVA Tablosu (Serbest Basınç Deneyi-Killi zemin, 56 günlük kür)

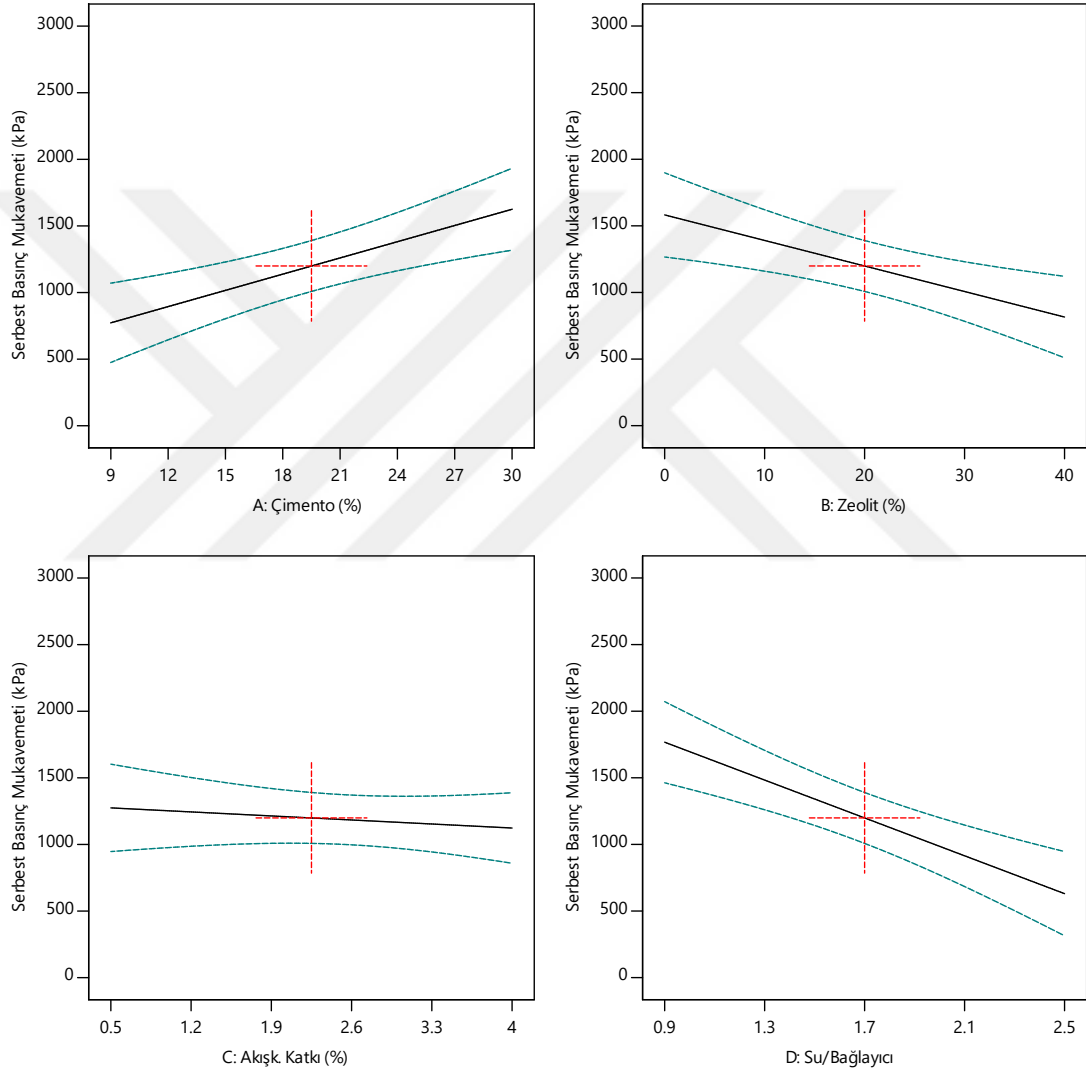
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	1.838E+07	4	4.595E+06	13.87	0.0002 önemli
A-Çimento	4.095E+06	1	4.095E+06	12.36	0.0043
B-Zeolit	6.060E+06	1	6.060E+06	18.29	0.0011
C-Akışk. Katkı	3038.22	1	3038.22	0.0092	0.9253
D-Su/Bağlayıcı	8.449E+06	1	8.449E+06	25.50	0.0003
R²	0.8221				
Düzeltilmiş R²	0.7628				
Tahmin Edilen R²	0.5825				
Hassasiyet	13.3826				

**Şekil 4.3.** Tahmin edilen – gerçekleşen deney sonuçları eğrisi (Killi zemin); (a) 28 günlük kür, (b) 56 günlük kür

Şekil 4.3.'te killi zeminin 28 günlük ve 56 günlük DKK numuneleri üzerinde uygulanan serbest basınç deneyi sonuçları ile yapılan analiz sonucu tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu gösterilmiştir. Doğru etrafında bulunan noktalar doğruya ne kadar yakın olursa analiz o kadar sağlıklı olmaktadır ve program sonucu tahmin edilecek olan deney sonuçları o derece doğru olmaktadır. Şekil incelendiğinde noktaların eğriye yeterli derecede yakın olduğu ve iki kür süresi için de program ile gerçekleştirilen analizin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre parametrelerin serbest basınç mukavemetlerine olan etkileri 28 günlük kür süresi için Şekil 4.4.'te ve 56 günlük kür süresi için Şekil 4.5.'te gösterilmiştir.

Çimento inşaat çalışmalarında kullanılan bağlayıcılar arasında en sık kullanılan ve iyi sonuç alınan bağlayıcılardan bir tanesidir. Bu çalışmada da Şekil 4.4. ve Şekil 4.5. incelendiğinde beklenildiği üzere çimento miktarının artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir. Beton dayanımının büyük bir kısmını ilk 28 günde kazanmaktadır. Bundan sonraki dayanım artışları ilk 28 güne göre çok daha az olmaktadır. Bu sebeple 56 günlük kür süresi sonucu çimento miktarının artmasının etkisi, 28 günlük kür süresine göre daha az olmaktadır.



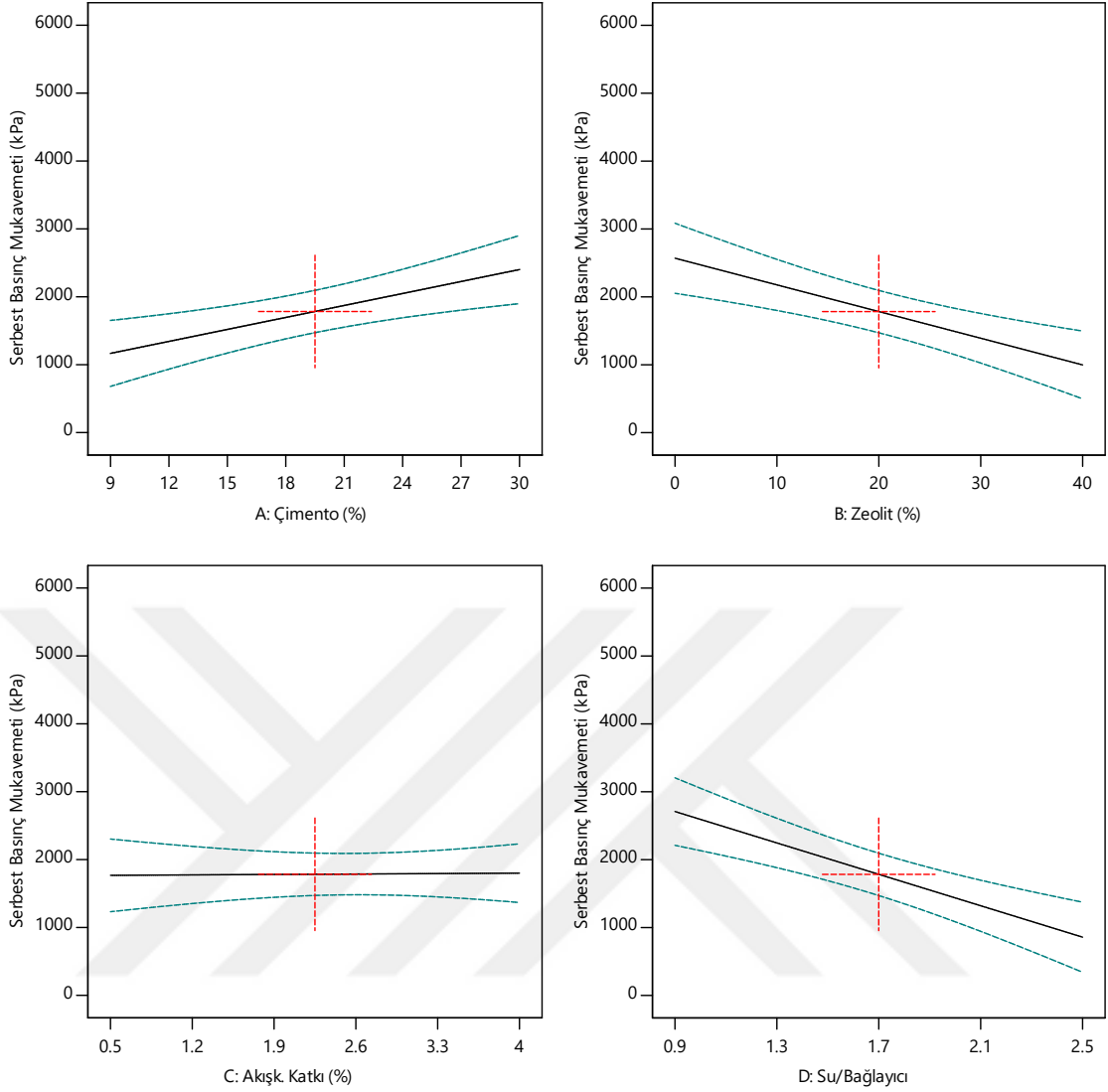
Şekil 4.4. Parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkisi (Killi zemin, 28 günlük kür)

Sarıkaya (2006) tarafından yapılan çalışmada, beton içerisine katkı olarak zeolit katılmış ve betonların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Zeolit miktarının artmasıyla betonların basınç ve eğilme dayanımlarının azaldığı ancak katkılı betonun basınç dayanımının normal betona göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nas (2015) tarafından yapılan çalışmada ise; beton içerisine zeolit ve metakaolin katılmış, bu

malzemelerin betonun dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda zeolitin beton içerisinde kullanılmasıyla betonun basınç ve eğilme dayanımlarında olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise (Yazıcıoğlu, 2016) doğal zeolitin puzolanik katkı maddesi olarak çimento ve beton üretiminde kullanılabilirliği incelenmiş ve çalışmada kullanılan iki zeolit türünün de (analsim ve klinoptilolit) katkılı çimento ve beton üretiminde %30'luk bir ikame oranında kullanılabileceği belirtilmiştir.

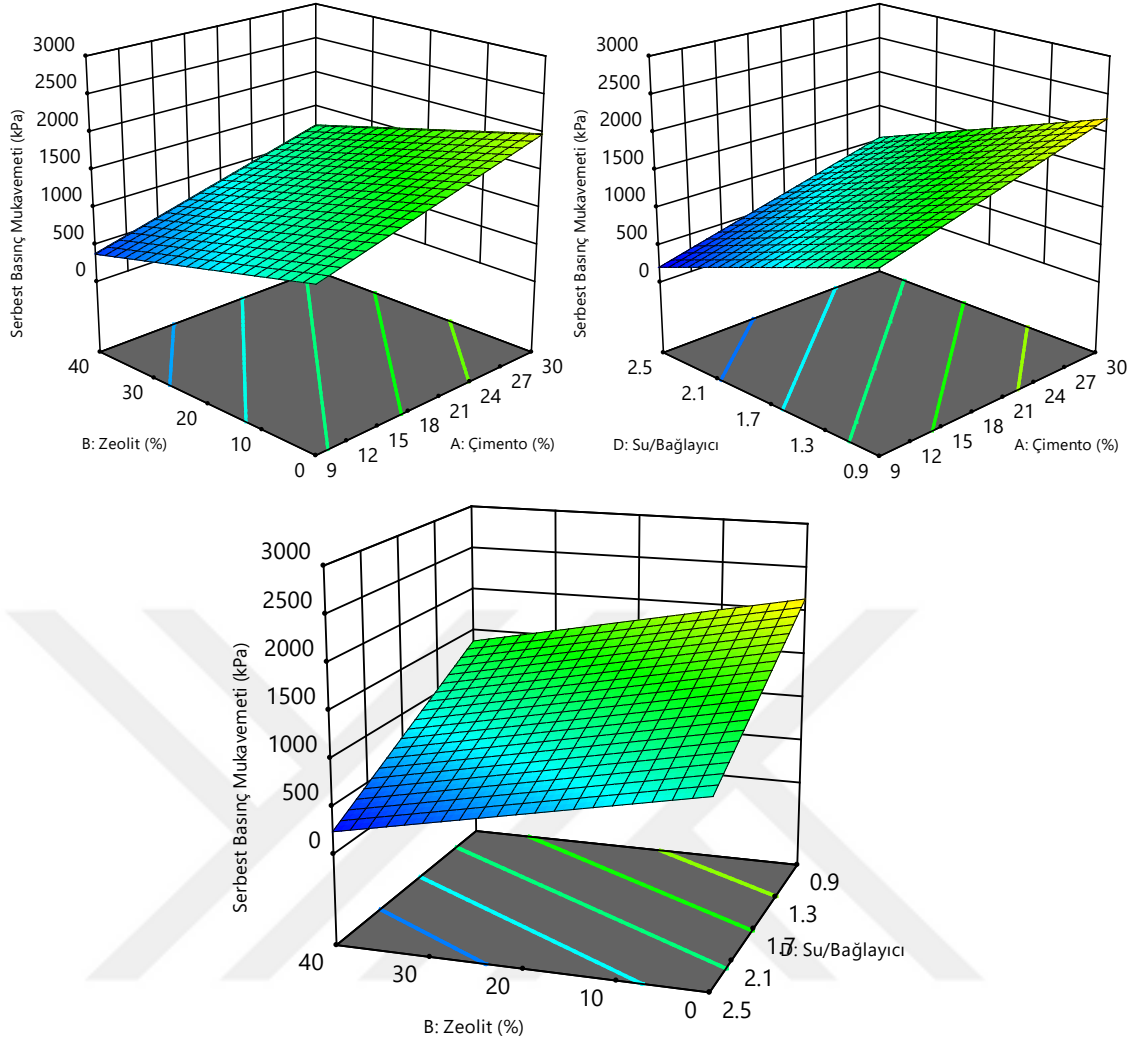
Yapılan bu tez çalışmasında ise, kullanılan zeolit miktarının artması ile iki kür süresi için de aynı oranda ve az bir miktarda serbest basınç mukavemetinde azalma görülmektedir. Zeolitin serbest basınç mukavemeti üzerinde az bir miktar olumsuz etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır ancak bu azalma sonucunda oluşan mukavemet değerleri yine kabul edilebilir sınır değerler içerisinde kalmaktadır. Bunun yanında zeolitin çimentoya göre daha düşük maliyetli ve sağlıklı bir malzeme olması ve dayanımdaki azalma miktarının az olması, zeolitin belirli sınırlar içerisinde kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır.

Akışkanlaştırıcı katkı miktarının artması ile 28 günlük kür için serbest basınç mukavemetlerinde azalma çok az olurken, 56 günlük kür süresi için ise neredeyse katkı miktarının hiç etkisi olmamıştır. Ancak, akışkanlaştırıcı katkının kullanılma amacı mukavemette artış sağlamak değil, enjeksiyonun akışkanlığını artırmaktır ve enjeksiyonun makineden daha kolay pompalanmasını sağlamaktır. Su/bağlayıcı oranının artmasıyla beklenildiği gibi serbest basınç mukavemetinde önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Su/bağlayıcı oranının, enjeksiyonun pompalanmasını engellemeyecek kıvamda olması ve kolonun istenen hedef bir dayanımda elde edilebilmesi kriterleri göz önünde tutularak, belirli bir sınır değerde tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

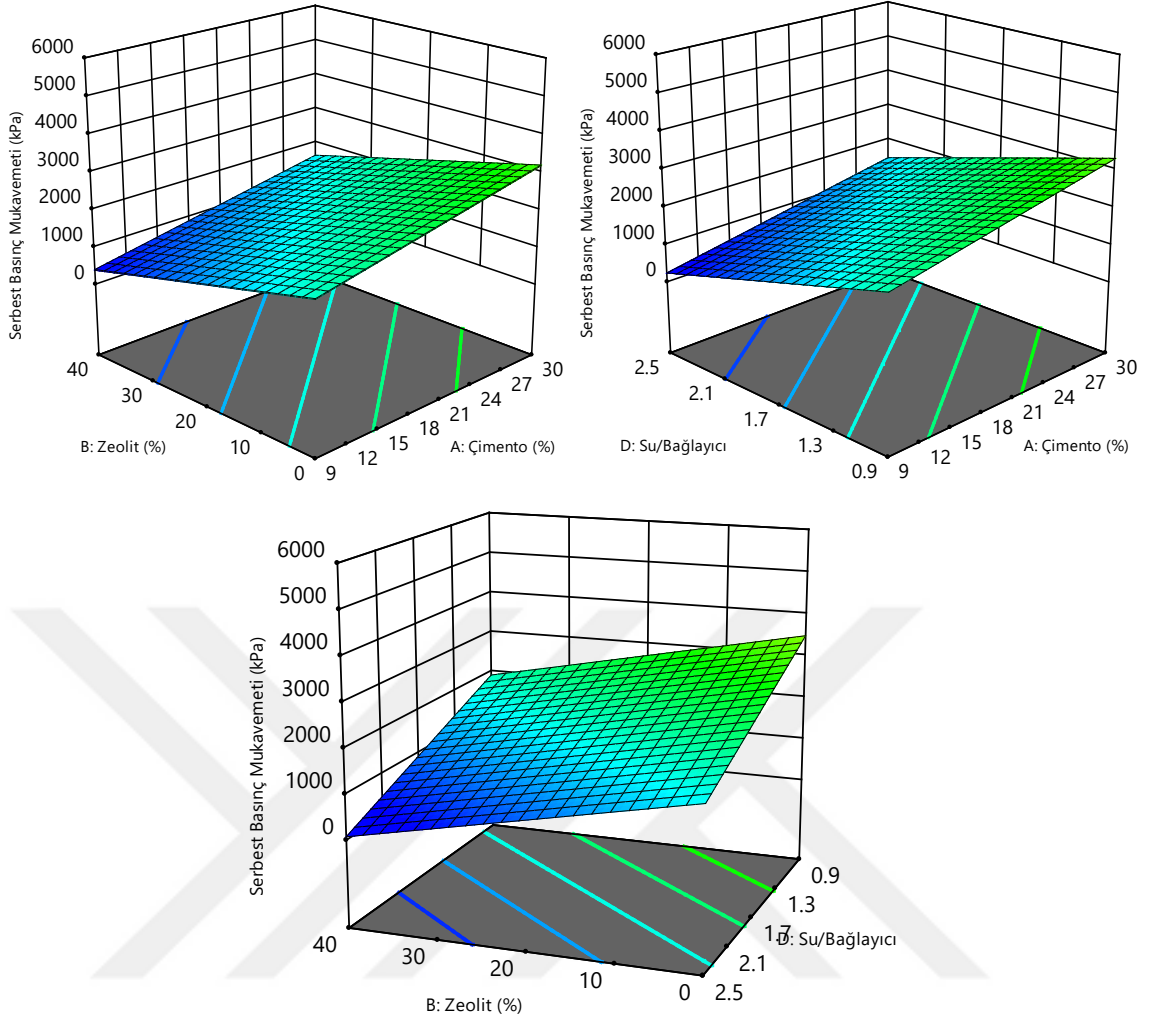


Şekil 4.5. Parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkisi (Killi zemin, 56 günlük kür)

Akışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkisinin diğer parametrelere oranla çok daha az olduğu Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.’den anlaşılmaktadır. O yüzden ikili etkileşimlerde akışkanlaştırıcı katkı maddesi tekrar eklenmemiş, kalan üç parametrenin birbirleriyle olan ikili etkileşimleri dikkate alınmıştır. Bu şekiller incelendiğinde çimento ve zeolit miktarının artışının serbest basınç mukavemeti değerlerine aynı derecede etki ettiği, ancak su/bağlayıcı oranının etkisinin diğer iki etkiye göre çok daha baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Burada su/bağlayıcı oranının artmasının dayanıma büyük bir oranda olumsuz etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Enjeksiyonun pompalanabilmesini sağlayabilecek bir oran olması şartı ile su/bağlayıcı oranının olabildiğince düşük tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



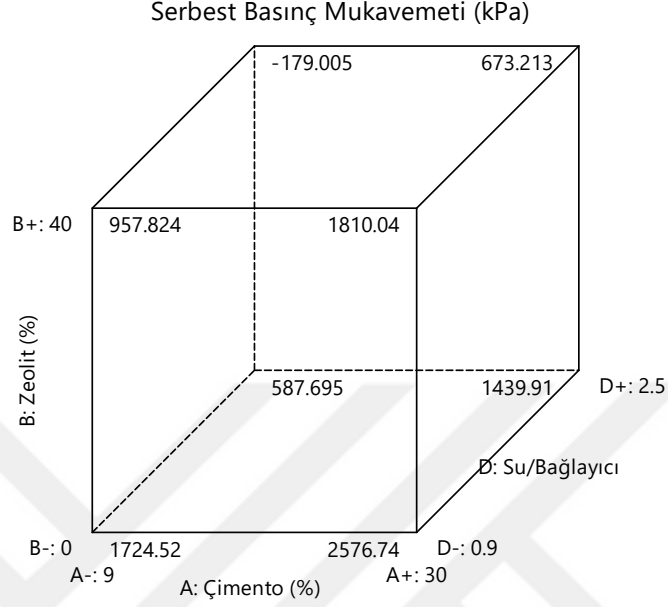
Şekil 4.6. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Killi zemin, 28 günlük kür)



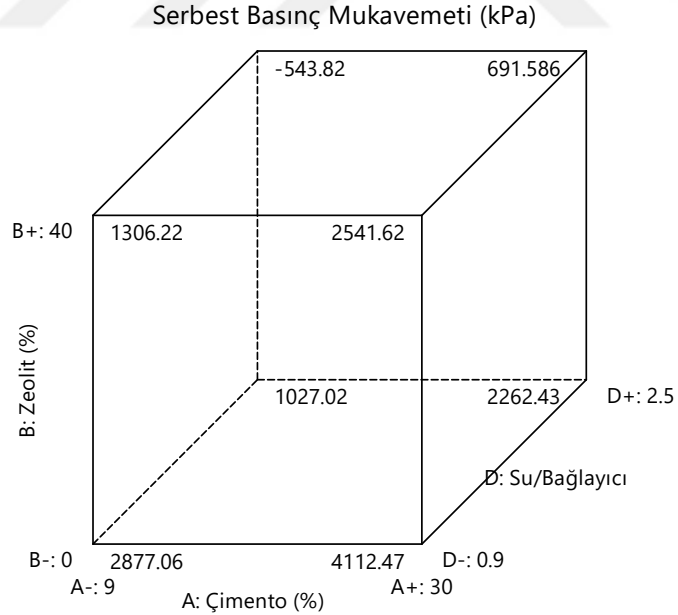
Şekil 4.7. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Killi zemin, 56 günlük kür)

Şekil 4.8.'de 28 günlük kür için, Şekil 4.9.'da ise 56 günlük kür süresi için çimento miktarı, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimi görülmektedir. Şekiller detaylı incelendiğinde zeolit miktarı %0 olarak sabitken su/bağlayıcı oranı minimum değer seçildiğinde çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük kür için %49, 56 günlük kür için %43 olmuştur. Yine zeolit miktarı %0 olarak sabitken su/bağlayıcı oranının maksimum değer seçilmesiyle çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük için %145, 56 günlük için ise %120 olmuştur. Bu sonuçlara göre su/bağlayıcı oranındaki artışın serbest basınç mukavemetinde çok etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak burada su/bağlayıcı oranının artmasıyla serbest basınç mukavemetinde artış olduğu sonucu çıkmamaktadır. Çünkü aynı şekiller incelendiğinde su/bağlayıcı oranının az olduğu durumda daha yüksek mukavemet değerleri elde edildiği görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının artması mukavemeti

azaltırken, su/bağlayıcı oranının ayrı ayrı minimum ve maksimum seviyelerde sabit tutulup çimento miktarlarının artmasıyla su/bağlayıcı oranının mukavemete etkisi oransal olarak fazla olmaktadır.



Şekil 4.8. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimleri (Killi zemin, 28 günlük kür)



Şekil 4.9. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimleri (Killi zemin, 56 günlük kür)

Zeolit miktarı %0 olarak sabitken çimento miktarı minimum değer seçildiğinde su/bağlayıcı oranının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet azalışı 28 günlük kür için %66, 56 günlük kür için %64 olmuştur. Yine zeolit

miktarı %0 olarak sabitken çimento miktarının maksimum değer seçilmesiyle su/bağlayıcı oranının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet azalışı 28 günlük için %44, 56 günlük için ise %45 olmuştur. Bu sonuçlara göre ise çimento miktarındaki artışın serbest basınç mukavemetine etkisinin su/bağlayıcı oranına göre daha az etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yine burada çimento miktarının artmasıyla serbest basınç mukavemetinin azaldığı sonucu çıkarılmamalıdır. Çünkü aynı şekiller incelendiğinde çimento miktarının fazla olduğu durumda daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranı 0.9 olarak sabitken, zeolit miktarı minimum değer seçildiğinde çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye yükselmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük kür için %49, 56 günlük kür için %43 olmuştur. Yine su/bağlayıcı oranı 0.9 olarak sabitken zeolit miktarının maksimum değer seçilmesiyle çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye yükselmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük için %89, 56 günlük için %95 olmuştur. Zeolit miktarının artışının serbest basınç mukavemetine etkisi çimento miktarına göre daha fazla, su/bağlayıcı oranına göre ise daha az olmaktadır. Ancak şekiller incelendiğinde zeolitin olmadığı durumda biraz daha yüksek serbest basınç mukavemeti değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumda zeolitin çimento yerine ikame edilmesi mukavemeti azaltırken, ikame oranı sabit tutulup çimento miktarı artırıldığında zeolitin mukavemet üzerindeki etkisi oransal olarak daha fazla olmaktadır.

4.2.1.1.2. Eksenel Birim Boy Değiştirmesi (ϵ)

Çalışma kapsamında 28 ve 56 günlük kür sürelerindeki DKK numunelerine uygulanan serbest basınç deneyi sonucu elde edilen ϵ değerleri Çizelge 4.6.'da toplu olarak verilmiştir. İki kür süresindeki numuneler için yapılan analiz sonuçları benzer çıktığı için sadece 56 günlük kür süresindeki numunelerin analiz sonuçları gösterilmiştir.

ϵ değerleri için yapılan ANOVA analizler sonucu Çizelge 4.7.'de verilmiştir. ϵ için elde edilen denklem, Eşitlik 4.4.'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \epsilon = & +0.00153 + 0.00067 * \text{Çimento} - 0.00018 * \text{Zeolit} - 0.00425 * \text{Akışk. Katkı} \\ & + 0.01265 * \text{Su/Bağlayıcı} + 0.00021 * \text{Çimento} * \text{Akışk. Katkı} \\ & - 0.00062 * \text{Çimento} * \text{Su/Bağlayıcı} + 0.00011 * \text{Zeolit} * \text{Akışk. Katkı} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.6. Eksenel birim boy değıştirme değeri (ε) (Killi zemin, 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				ε (%) (28 Gün)	ε (%) (56 Gün)
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı		
1	30	15.8	2.11	1.86	2.44	0.95
2	24.33	0	0.5	1.31	3.00	1.74
3	23.81	0	3.83	2.5	1.92	1.68
4	9	29	0.5	1.31	1.14	1.14
5	30	40	0.5	0.9	1.83	1.47
6	9.42	17.34	2.30	1.83	2.15	1.82
7	16.98	40	2.15	1.88	2.68	1.66
8	9	40	4	0.9	1.83	1.69
9	9	27.8	3.91	2.5	2.17	2.23
10	30	40	4	2.5	2.6	2.86
11	9	0	3.83	1.38	1.64	0.84
12	22.62	26	4	1.47	1.58	1.71
13	17.4	16	2.18	0.9	1.35	1.31
14	22.62	26	4	1.47	1.72	2.86
15	24.33	29.46	0.5	2.5	1.48	1.03
16	30	0	4	0.9	2.09	2.64
17	9	0	1.25	2.5	2.35	2.27

Çizelge 4.7. ANOVA Tablosu (Eksenel birim boy değıştirme değeri (ε)–Killi zemin, 56 günlük kür)

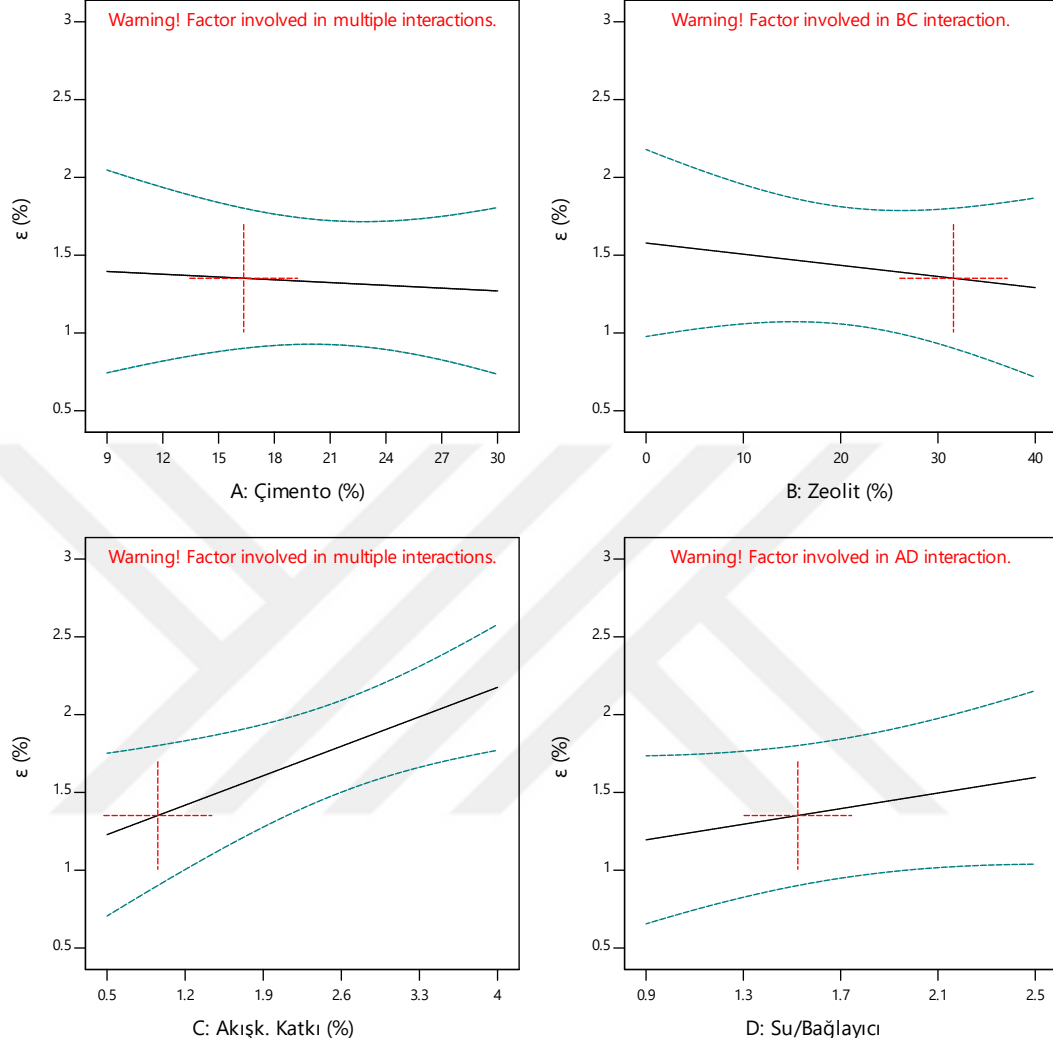
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	0.0005	7	0.0001	4.41	0.0216 önemli
A-Çimento	0.0000	1	0.0000	0.6868	0.4287
B-Zeolit	0.0000	1	0.0000	1.09	0.3236
C-Akışk. Katkı	0.0001	1	0.0001	8.75	0.0160
D-Su/Bağlayıcı	1.814E-06	1	1.814E-06	0.1126	0.7449
AC	0.0001	1	0.0001	6.16	0.0349
AD	0.0002	1	0.0002	10.05	0.0114
BC	0.0001	1	0.0001	6.27	0.0336
R²	0.7741				
Düzeltilmiş R²	0.5983				
Tahmin Edilen R²	0.3899				
Hassasiyet	6.4091				

Çizelge 4.7. incelendiğinde, F değeri 4.41 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Hassasiyet değeri ise 4'ten büyük olması beklenmektedir. Çizelge 4.7.'ye bakıldığında bu değeri de sağlandığı ve tasarımın uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10. incelendiğinde çimento ve zeolit miktarının artmasıyla ε değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni özellikle çimento miktarının artmasıyla numunenin betonlaşarak daha fazla mukavemet kazanması ve daha gevrek bir yapıya dönüşmesidir.

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarının ve su/bağlayıcı oranının artmasıyla numune daha elastik bir yapıya geçiş göstermekte ve bunun sonucunda eksenel birim boy

değiştirme kapasitesi artmaktadır. Yani akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranı arttıkça ϵ değeri artmaktadır.



Şekil 4.10. Parametrelerin eksenel birim boy değiştirme değerine (ϵ) etkisi (Killi zemin, 56 günlük kür)

Ayrıca Şekil Ek.1.1. - Şekil Ek.1.17. arasındaki σ - ϵ grafikleri incelendiğinde çimento miktarının daha fazla olduğu ve bunun yanında zeolit miktarının az olduğu tasarımların ise kür süresinin artmasıyla daha gevrek bir yapıya geçtiği yani birim boy uzaması değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çimento ile birlikte zeolitin kullanımı ile DKK'nın elastiklik özelliğinin arttığını göstermektedir.

4.2.1.1.3. Elastisite Modülü (E)

Çalışma kapsamında 28 ve 56 günlük kür sürelerindeki DKK numuneleri için elde edilen σ - ϵ grafikleri üzerinde Kiriş Modülü Yöntemi uygulanarak numunelerin elastisite modülleri (E) belirlenmiştir (Çizelge 4.8.). Burada iki kür süresindeki numuneler için yapılan analiz sonuçları benzer çıktığı için sadece 28 günlük kür süresindeki numunelerin analiz sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Elastisite modülleri (Killi zemin, 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				E (kPa) (28 Gün)	E (kPa) (56 Gün)
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı		
1	30	15.8	2.11	1.86	22046.45	328926.82
2	24.33	0	0.5	1.31	74049.52	13039.09
3	23.81	0	3.83	2.5	52262.97	128426.35
4	9	29	0.5	1.31	177236.1	273019.40
5	30	40	0.5	0.9	206601.4	231855.74
6	9.42	17.34	2.30	1.83	62827.82	127218.40
7	16.98	40	2.15	1.88	28685.71	65905.71
8	9	40	4	0.9	119389.8	42071.80
9	9	27.8	3.91	2.5	27641.4	22350.21
10	30	40	4	2.5	11383.84	27401.41
11	9	0	3.83	1.38	78133.42	217190.78
12	22.62	26	4	1.47	32420.64	46774.55
13	17.4	16	2.18	0.9	162298.9	232685.77
14	22.62	26	4	1.47	60511.53	45259.27
15	24.33	29.46	0.5	2.5	19935.06	34511.61
16	30	0	4	0.9	132181	56857.46
17	9	0	1.25	2.5	29702.55	50681.49

Elastisite modülleri için Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucu elde edilen ANOVA tablosu Çizelge 4.9.'da verilmiştir. E için elde edilen denklem, Eşitlik 4.5.'te verilmiştir.

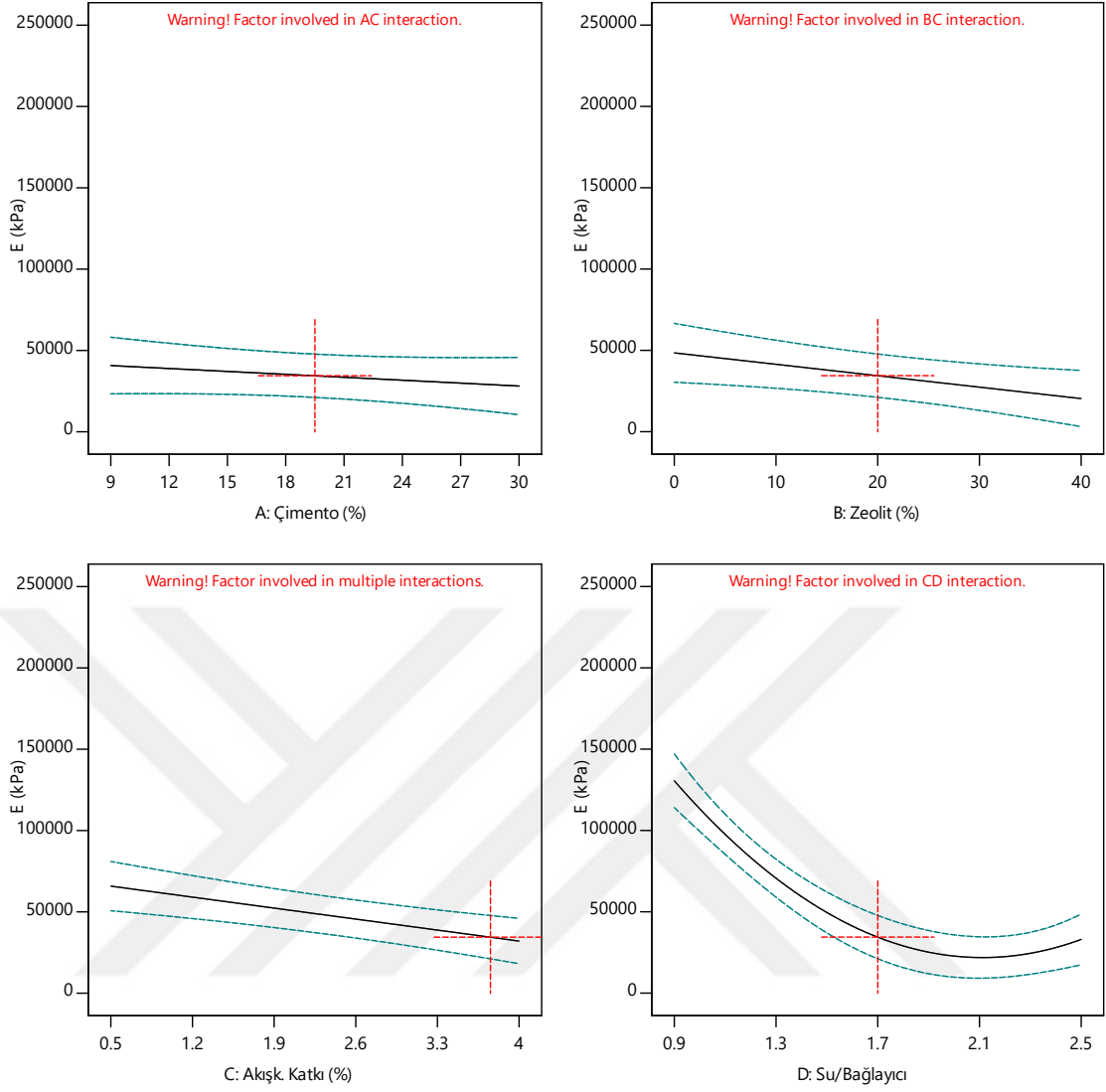
$$\begin{aligned}
 E = & +532829.66 - 3622.67 \cdot \text{Çimento} + 1835.24 \cdot \text{Zeolit} - 41304.52 \cdot \text{Akışk. Katkı} \\
 & - 377730.48 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} + 804.89 \cdot \text{Çimento} \cdot \text{Akışk. Katkı} \\
 & - 676.05 \cdot \text{Zeolit} \cdot \text{Akışk. Katkı} + 17338.96 \cdot \text{Akışk. Katkı} \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \\
 & + 74018.21 \cdot \text{Su/Bağlayıcı}^2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Çizelge 4.9. ANOVA Tablosu (Elastisite modülü–Killi zemin, 28 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	5.840E+10	8	7.300E+09	47.62	< 0.0001 önemli
A-Çimento	3.355E+09	1	3.355E+09	21.89	0.0016
B-Zeolit	3.389E+08	1	3.389E+08	2.21	0.1754
C-Akışk. Katkı	3.120E+09	1	3.120E+09	20.36	0.0020
D-Su/Bağlayıcı	4.065E+10	1	4.065E+10	265.18	< 0.0001
AC	1.471E+09	1	1.471E+09	9.60	0.0147
BC	3.734E+09	1	3.734E+09	24.36	0.0011
CD	4.032E+09	1	4.032E+09	26.30	0.0009
D ²	7.103E+09	1	7.103E+09	46.34	0.0001
R²	0.9794				
Düzeltilmiş R²	0.9589				
Tahmin Edilen R²	0.9252				
Hassasiyet	21.1828				

Çizelge 4.9. incelendiğinde, F değerinin 47.62 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür ve hassasiyet değeri ise 4'ten büyüktür. Bu durum tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

Analiz sonuçlarına göre parametrelerin elastisite modüllerine olan etkileri Şekil 4.11.'de gösterilmiştir. Burada çimento ve zeolitin E üzerindeki etkisi net olarak görülememektedir. Ancak daha sonraki kısımlarda bahsedileceği gibi kum zemin için yapılan analizlerde daha detaylı bir grafik elde edilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranının artmasıyla ise elastisite modülünde azalmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Parametrelerin elastisite modüllerine etkisi (Killi zemin, 28 günlük kür)

4.2.1.2. Kumlu Zemin

Kumlu zeminler kullanılarak hazırlanan küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan Serbest basınç deney sonuçları hem 28 hem de 56 günlük tasarım için toplu bir şekilde Çizelge 4.10.'da verilmiştir. Yapılan serbest basınç deneyleri sonucu oluşan gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) grafikleri Şekil Ek.1.18. - Şekil Ek.1.34. arasında gösterilmiştir. Bu şekillerdeki σ - ϵ grafikleri incelendiğinde killi zeminde olduğu gibi kumlu zeminde de kür süresinin artmasıyla numunenin basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. Serbest Basınç Deneyi toplu sonuçları (Kumlu zemin – 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	30	15.8	2.11	1.86	764.73	1280.74
2	24.33	0	0.5	1.31	1290.70	1816.63
3	23.81	0	3.83	2.5	519.09	2053.10
4	9	29	0.5	1.31	266.98	326.09
5	30	40	0.5	0.9	1922.91	1967.76
6	9.42	17.34	2.30	1.83	323.11	469.64
7	16.98	40	2.15	1.88	228.17	237.47
8	9	40	4	0.9	330.17	408.79
9	9	27.8	3.91	2.5	108.55	175.96
10	30	40	4	2.5	163.29	295.54
11	9	0	3.83	1.38	731.90	1002.58
12	22.62	26	4	1.47	552.92	758.01
13	17.4	16	2.18	0.9	1427.24	1520.16
14	22.62	26	4	1.47	753.38	799.21
15	24.33	29.46	0.5	2.5	163.76	455.34
16	30	0	4	0.9	2406.75	4087.94
17	9	0	1.25	2.5	148.31	269.21

4.2.1.2.1. Serbest Basınç Mukavemeti (q_u)

Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucu elde edilen ANOVA tabloları 28 ve 56 günlük kürlü numuneler için sırasıyla Çizelge 4.11. ve Çizelge 4.12.'de verilmiştir. 28 ve 56 günlük tasarımlara göre q_u için elde edilen denklemler Eşitlik 4.6. ve Eşitlik 4.7.'de verilmiştir.

$$q_u = +1519.94 + 39.61 \cdot \text{Çimento} - 14.79 \cdot \text{Zeolit} - 16.32 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 728.12 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.6)$$

$$q_u = +1531.22 + 66.67 \cdot \text{Çimento} - 34.83 \cdot \text{Zeolit} + 70.24 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 728.52 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.7)$$

Çizelge 4.11. ANOVA Tablosu (Serbest Basınç Deneyi-Kumlu zemin, 28 günlük kür)

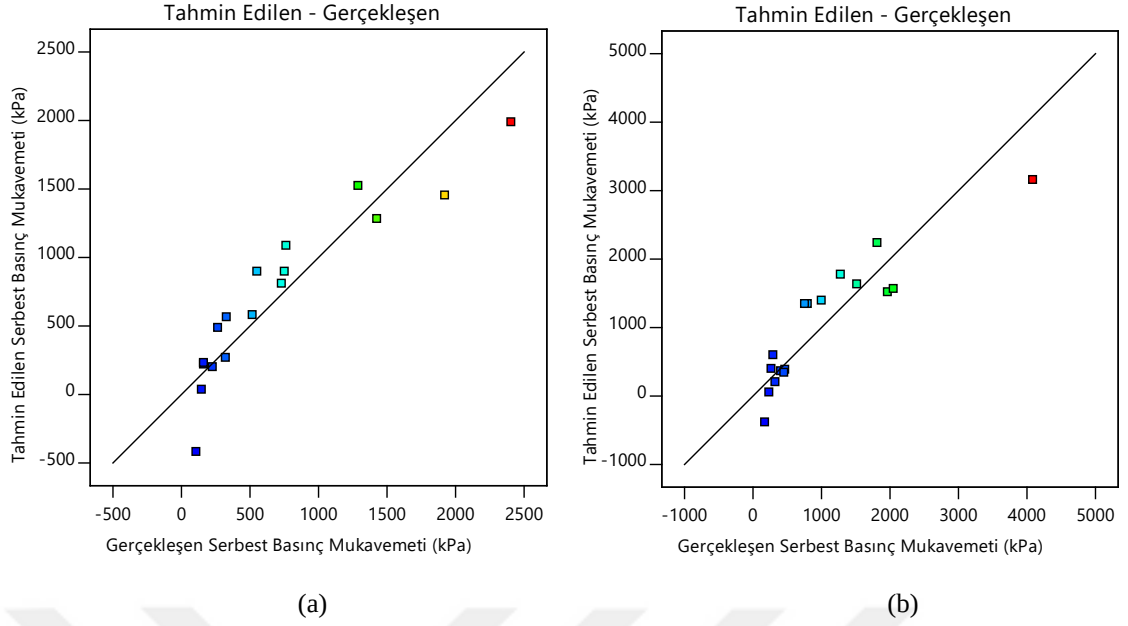
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	6.136E+06	4	1.534E+06	16.31	< 0.0001 önemli
A-Çimento	1.857E+06	1	1.857E+06	19.73	0.0008
B-Zeolit	8.594E+05	1	8.594E+05	9.14	0.0106
C-Akışk. Katkı	9209.96	1	9209.96	0.0979	0.7597
D-Su/Bağlayıcı	3.351E+06	1	3.351E+06	35.61	< 0.0001
R²	0.8446				
Düzeltilmiş R²	0.7928				
Tahmin Edilen R²	0.6341				
Hassasiyet	14.4673				

Çizelge 4.11.'e göre F değerinin 16.31 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerine göre; A, B ve D terimleri etkili parametreler olarak belirlenmişlerdir. Bu bağlamda C terimi ise anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür ve tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Hassasiyet değerinin de 4'ten büyük olması bu durumu desteklemektedir.

Çizelge 4.12. ANOVA Tablosu (Serbest Basınç Deneyi-Kumlu zemin, 56 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	1.329E+07	4	3.323E+06	13.17	0.0002 önemli
A-Çimento	5.259E+06	1	5.259E+06	20.85	0.0006
B-Zeolit	4.767E+06	1	4.767E+06	18.90	0.0009
C-Akışk. Katkı	1.706E+05	1	1.706E+05	0.6765	0.4269
D-Su/Bağlayıcı	3.354E+06	1	3.354E+06	13.30	0.0033
R²	0.8145				
Düzeltilmiş R²	0.7527				
Tahmin Edilen R²	0.5765				
Hassasiyet	12.9975				

Çizelge 4.12.'ye göre, F değerinin 13.17 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. A, B ve D parametreleri için p değerlerinin 0.05'ten küçük olması bu parametrelerin önemli olduğunu göstermektedir. Bu durumda C terimi anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki farkın 0.20'den küçük olduğu ve Hassasiyet değerinin ise 4'ten büyük olduğu görülmekte olup tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

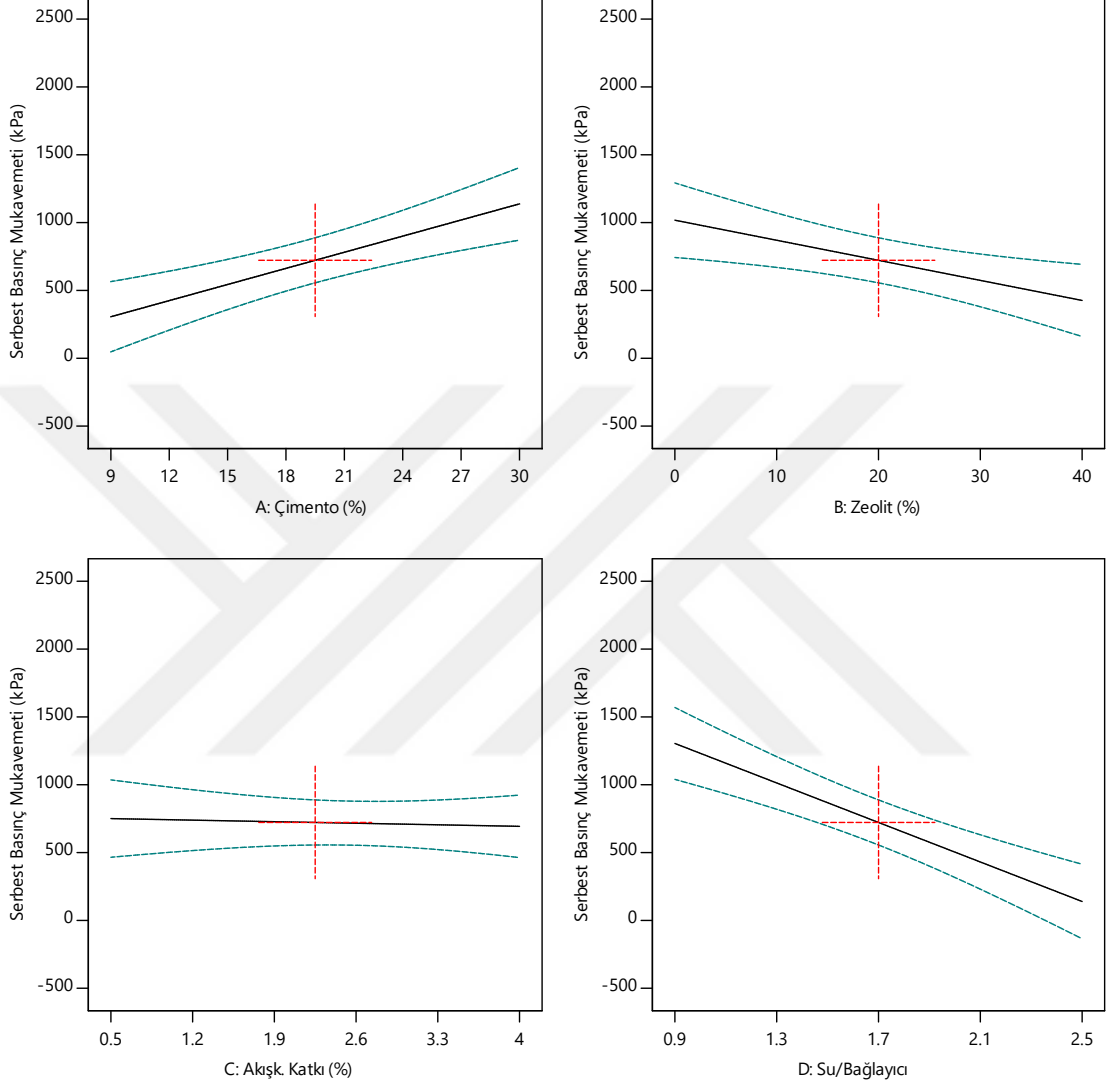


Şekil 4.12. Tahmin edilen - gerçekleşen deney sonuçları eğrisi (Kumlu zemin); (a) 28 günlük kür, (b) 56 günlük kür

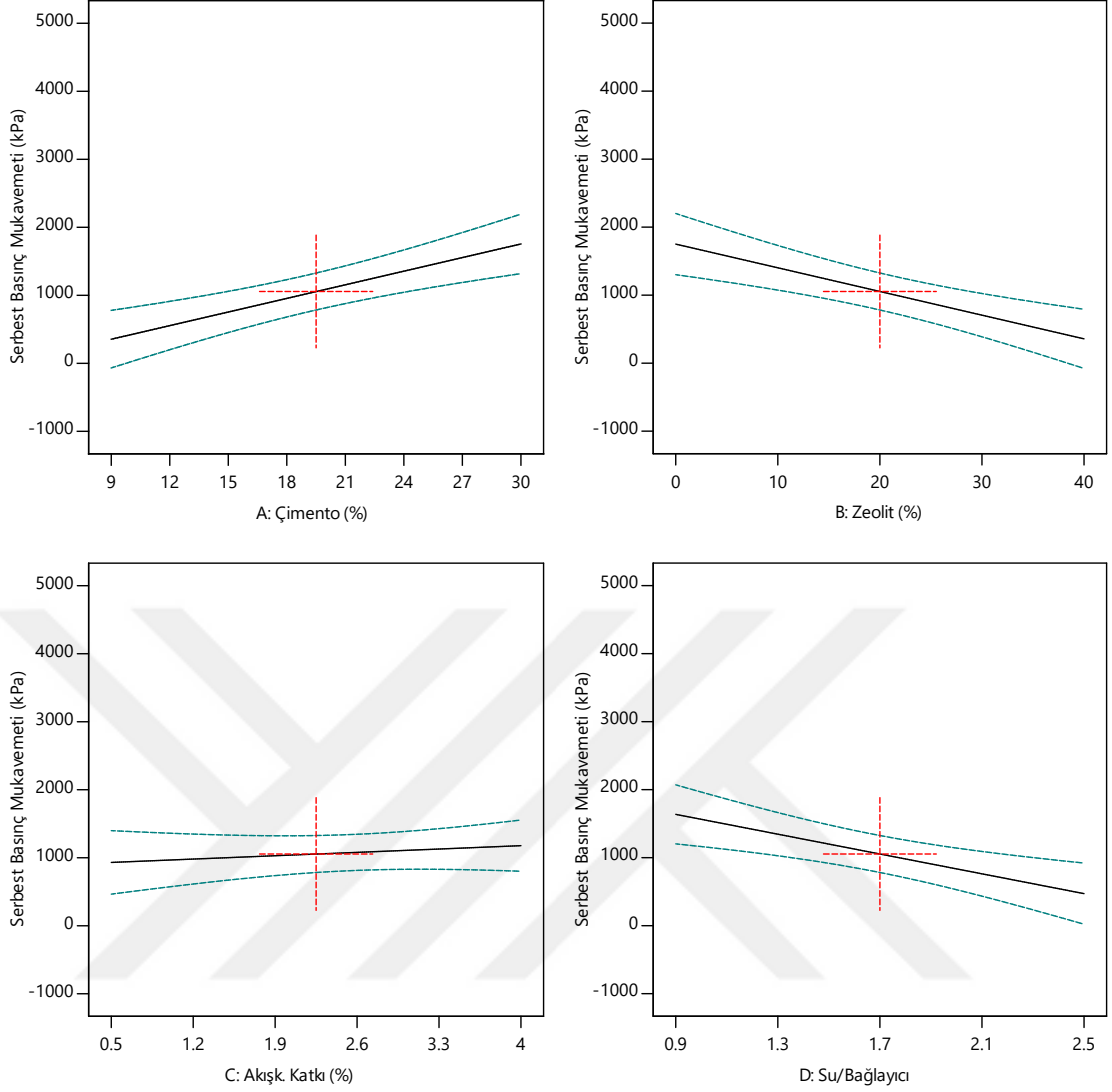
Şekil 4.12’de kumlu zemin ile hazırlanmış DKK’nın 28 ve 56 günlük serbest basınç deneyi sonuçları ve tahmin edilen deney sonuçları için elde edilen doğrular gösterilmiştir. Deney sonuçları için elde edilen noktaların eğriye yeterli derecede yakın olduğu ve iki kür süresi için de deney sonuçları ile tahmin edilen değerlerin uyumlu olduğu görülmektedir.

Parametrelerin serbest basınç mukavemetlerine olan etkileri 28 ve 56 günlük kür süreleri için Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.’te gösterilmiştir. Killi zeminde olduğu gibi çimento miktarının artmasıyla serbest basınç mukavemeti önemli derecede artmaktadır. Zeolit puzolanik katkısı kullanılarak yapılan benzer çalışmalardan bir tanesinde; zeolit ve silika dumanının betonun geçirimsizlik ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiştir. %10 ve %20 zeolit içeren betonların, şahit numuneye göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir (Sevim ve Okumuş, 2011). Yapılan başka bir çalışmada öğütülmüş zeolit, çimentoya ağırlıkça ikame şeklinde %0, %5, %10 ve %15 oranlarında katılmış ve sonuçta betonların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir ancak ağırlıkça %15’e kadar zeolit ikamesinin beton üretiminde ekonomiklik sağlayacağı belirtilmiştir (Kılınçarslan, 2008). Bu çalışma kapsamında kullanılan zeolit miktarının artması ile ise iki kür süresi için de aynı oranda serbest basınç mukavemetinde azalmalar görülmektedir. Zeolit in killi zeminde olduğu gibi serbest basınç mukavemetini bir miktar azalttığı ancak bu azalma sonucunda mukavemet değerlerinin killi zeminde olduğu gibi kabul edilebilir sınırlar arasında kaldığı

belirlenmiştir. Yine zeolitin düşük maliyeti ve çevre kirliliğine karşı olumlu etkileri göz önüne alındığında killi zeminlerde olduğu gibi belirli sınırlar içerisinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.



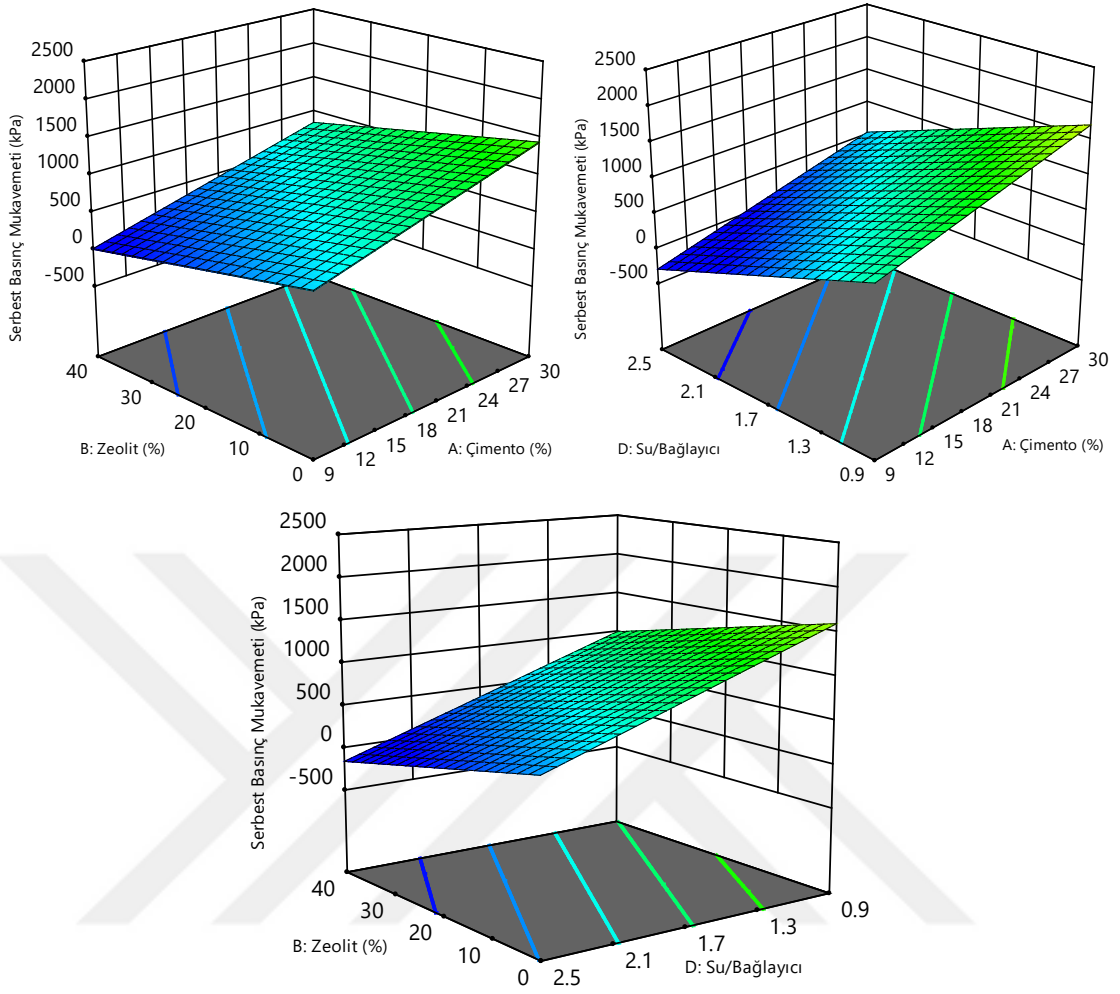
Şekil 4.13. Parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkisi (Kumlu zemin, 28 günlük kür)



Şekil 4.14. Parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkisi (Kumlu zemin, 56 günlük kür)

Analizler sonucunda C parametresinin anlamsız çıktığı belirlenmiştir. Ancak deney sonuçları analizler dikkate alınmaksızın incelendiğinde akışkanlaştırıcı katkı maddesinin dayanımda çok az bir azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Burada da akışkanlaştırıcı katkı maddesinin kullanılma amacı mukavemette artış sağlamak değil, enjeksiyonun akışkanlığını artırmaktır ve enjeksiyonun makineden daha kolay pompalanmasını sağlamaktır.

Su/bağlayıcı oranının artmasıyla killi zeminde olduğu gibi serbest basınç mukavemetinde önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Yine burada da killi zeminlerde yapılan deney sonuçlarını destekler nitelikte olarak su/bağlayıcı oranının, enjeksiyonun pompalanmasını engellemeyecek kıvamda olması ve kolonun istenen hedef bir dayanımda elde edilebilmesi kriterleri göz önünde tutularak, belirli bir sınır değerde tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

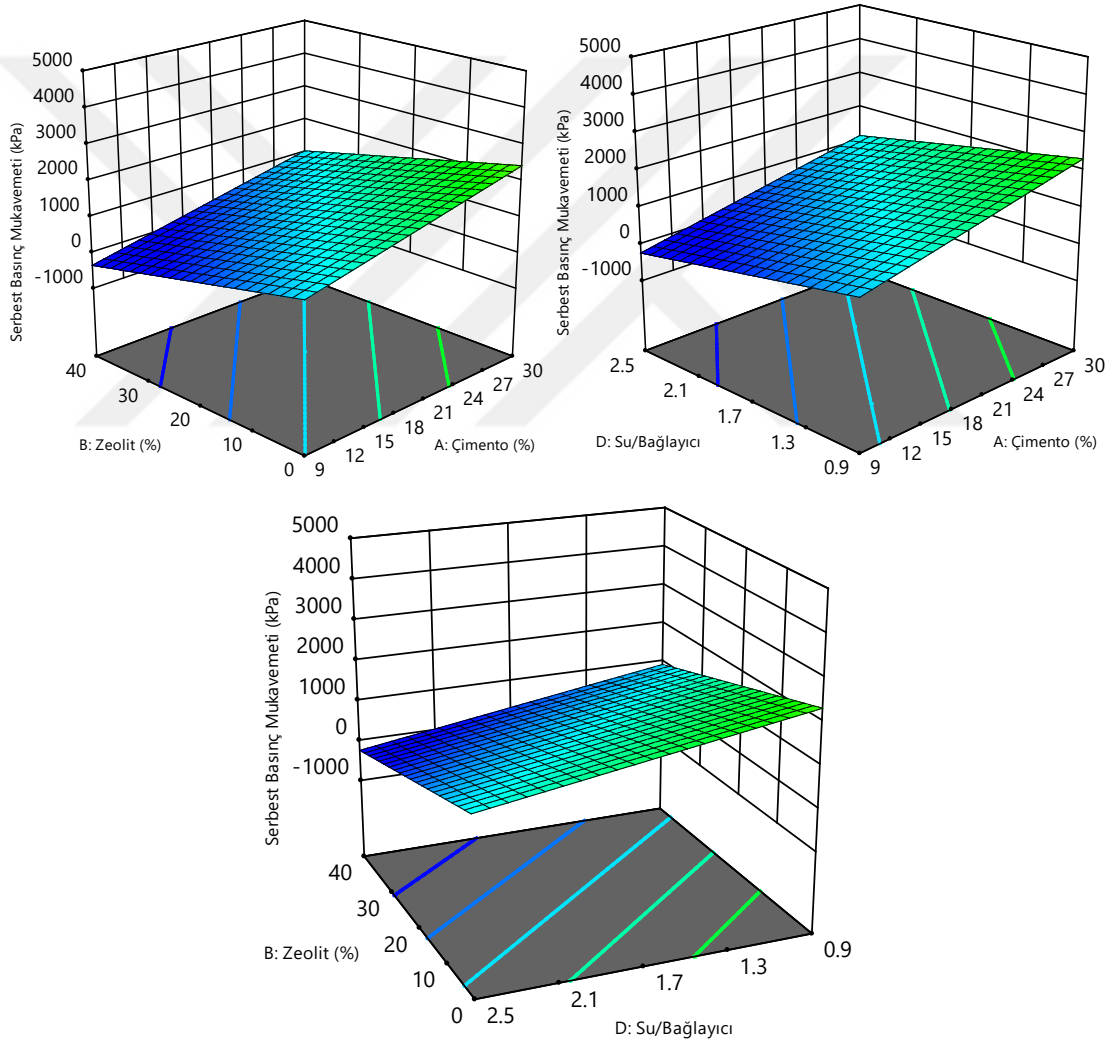


Şekil 4.15. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Kumlu zemin, 28 gün kür)

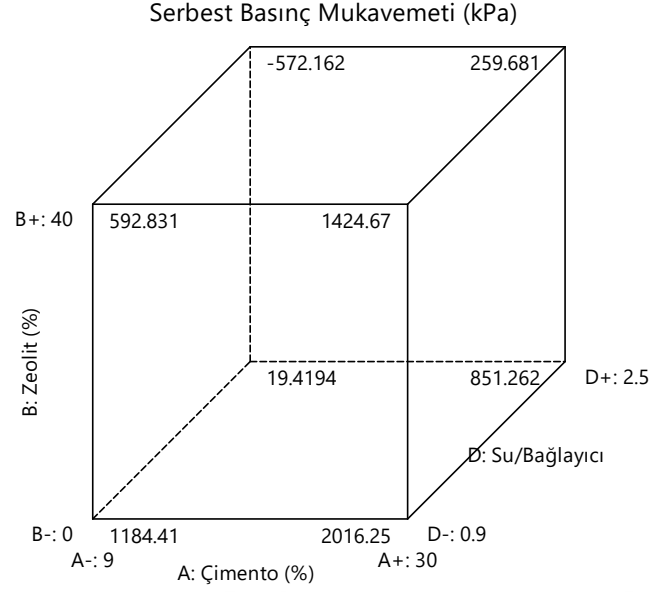
Şekil 4.15. ve Şekil 4.16. incelendiğinde; çimento miktarının artması ile mukavemette artış sağlandığı, zeolit ikame oranının artışı ile mukavemette azalma meydana geldiği ve su/bağlayıcı oranının artması ile mukavemette önemli miktarda azalma olduğu görülmektedir.

Şekil 4.17.'de 28 günlük kür süresi için, Şekil 4.18.'de ise 56 günlük kür süresi için çimento miktarı, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimi görülmektedir. Zeolit miktarı %0 olarak sabitken su/bağlayıcı oranı minimum değer seçildiğinde çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük kür için %70, 56 günlük kür için %86 olmuştur. Yine zeolit miktarı %0 olarak sabitken su/bağlayıcı oranının maksimum değer seçilmesiyle çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye çıkmasıyla gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük için %4284, 56 günlük için ise %299 olmuştur.

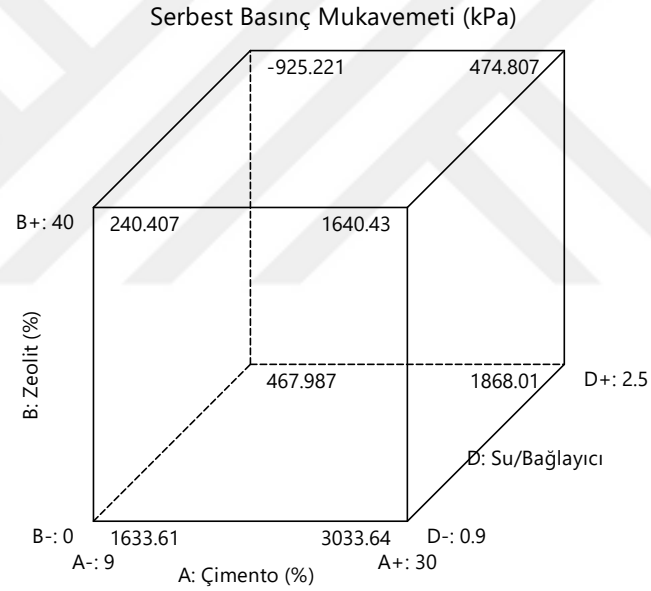
Burada çimento miktarının 28 günlük dayanımlarda, 56 günlük dayanımlara göre çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre killi zeminde olduğu gibi kumlu zeminde de su/bağlayıcı oranındaki artışın serbest basınç mukavemetinde çok etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak burada su/bağlayıcı oranının artışının mukavemeti artırdığı sonucu çıkarılmamalıdır. Çünkü şekiller incelendiğinde su/bağlayıcı oranının az olduğu durumda daha yüksek mukavemet değerleri elde edildiği görülmektedir. Su/bağlayıcı oranının artması mukavemeti azaltırken, su/bağlayıcı oranının ayrı ayrı minimum ve maksimum seviyelerde sabit tutulup çimento miktarlarının artmasıyla su/bağlayıcı oranının mukavemete etkisi oransal olarak fazla olmaktadır.



Şekil 4.16. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Kumlu zemin, 56 gün kür)



Şekil 4.17. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimleri (Kumlu zemin, 28 gün kür)



Şekil 4.18. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimleri (Kumlu zemin, 56 gün kür)

Zeolit miktarı %0 olarak sabitken çimento miktarı minimum değer seçildiğinde su/bağlayıcı oranının maksimum seviyeden minimum seviyeye inmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük kür için %5999, 56 günlük kür için %249 olmuştur. Burada su/bağlayıcı oranının 28 günlük dayanımlarda, 56 günlük dayanımlara göre çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. Yine zeolit miktarı %0 olarak sabitken çimento miktarının maksimum değer seçilmesiyle su/bağlayıcı oranının maksimum seviyeden minimum seviyeye inmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük için %137, 56 günlük için ise %62 olmuştur. Bu sonuçlara göre çimento miktarındaki artış ile su/bağlayıcı

oranındaki azalışın serbest basınç mukavemetine etkisi birbirleriyle benzer oranda olmuştur. Yine burada çimento miktarının artmasıyla serbest basınç mukavemetinin azaldığı sonucu çıkarılmamalıdır. Çünkü aynı şekiller incelendiğinde (Şekil 4.17. ve Şekil 4.18) çimento miktarının fazla olduğu durumda daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranı 0.9 olarak sabitken, zeolit miktarı minimum değer seçildiğinde çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye yükselmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük kür için %70, 56 günlük kür için %86 olmuştur. Yine su/bağlayıcı oranı 0.9 olarak sabitken zeolit miktarının maksimum değer seçilmesiyle çimento miktarının minimum seviyeden maksimum seviyeye yükselmesiyle gerçekleşen mukavemet artışı 28 günlük için %140, 56 günlük için %582 olmuştur. Zeolit miktarının artışının serbest basınç mukavemetine etkisi hem çimento miktarının artışına göre hem de su/bağlayıcı oranının azalışına göre daha az etkili olmaktadır. Şekiller incelendiğinde zeolitin olmadığı durumda biraz daha yüksek mukavemet değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumda zeolitin çimentoya ikame edilmesi kabul edilebilir mukavemet değerleri arasında kalarak mukavemeti bir miktar azaltırken, ikame oranı sabit tutulup çimento miktarı artırıldığında zeolitin mukavemet üzerindeki etkisi oransal olarak daha fazla olmaktadır.

4.2.1.2.2. Eksenel Birim Boy Değiştirme (ϵ)

Çalışma kapsamında 28 ve 56 günlük kürlü DKK numunelerine uygulanan serbest basınç deneyi sonucu elde edilen ϵ değerleri Çizelge 4.13.'te verilmiştir. İki kür süresindeki numuneler için yapılan analiz sonuçları benzer çıktığı için sadece 28 günlük kür süresindeki numunelerin analiz sonuçları gösterilmiştir.

ϵ değerleri Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir ve ANOVA tablosu Çizelge 4.14.'te verilmiştir. ϵ için elde edilen denklem, Eşitlik 4.8.'de verilmiştir.

$$\ln(\epsilon) = -6.18 + 0.072 \cdot \text{Çimento} + 0.01 \cdot \text{Zeolit} + 0.592 \cdot \text{Akışk.Katkı} - 0.324 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} - 0.022 \cdot \text{Çimento} \cdot \text{Akışk.Katkı} \quad (4.8)$$

Çizelge 4.13. Eksenel birim boy değiştirme değerleri (ϵ) (Kumlu zemin, 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				ϵ (%) (28 Gün)	ϵ (%) (56 Gün)
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı		
1	30	15.8	2.11	1.86	1.85	1.2
2	24.33	0	0.5	1.31	0.78	1.93
3	23.81	0	3.83	2.5	0.77	0.74
4	9	29	0.5	1.31	0.47	1
5	30	40	0.5	0.9	1.26	1.7
6	9.42	17.34	2.30	1.83	0.29	0.82
7	16.98	40	2.15	1.88	1.37	1.48
8	9	40	4	0.9	2.49	0.71
9	9	27.8	3.91	2.5	0.92	1.56
10	30	40	4	2.5	0.71	0.9
11	9	0	3.83	1.38	1.24	1.83
12	22.62	26	4	1.47	1.87	2.71
13	17.4	16	2.18	0.9	1.39	1.92
14	22.62	26	4	1.47	1.11	3.08
15	24.33	29.46	0.5	2.5	0.7	0.79
16	30	0	4	0.9	0.69	1.26
17	9	0	1.25	2.5	0.31	0.5

Çizelge 4.14. incelendiğinde, F değerinin 4.25 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması da tasarımın uyumlu olduğunu göstermektedir.

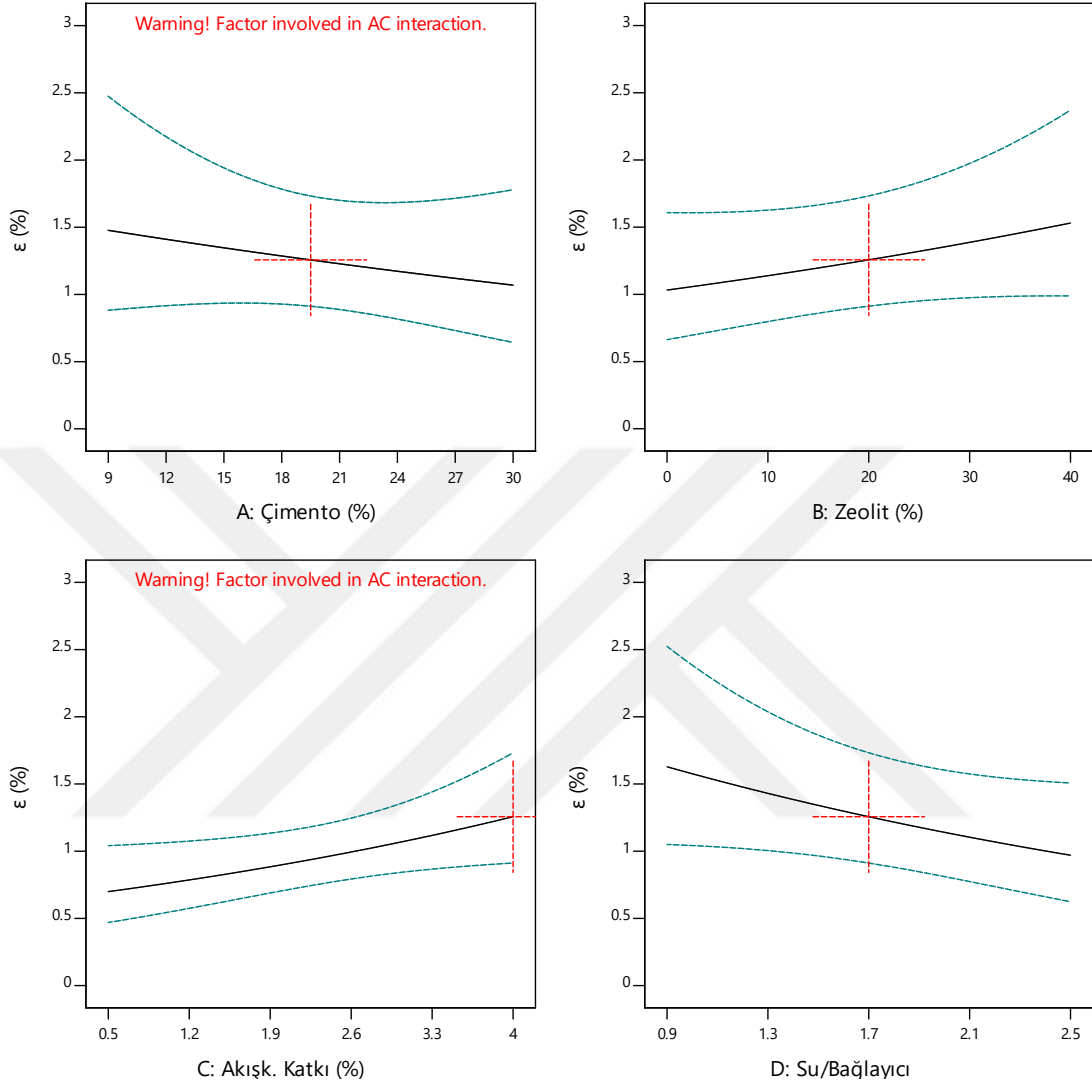
Şekil 4.19. incelendiğinde çimento miktarının artmasıyla eksenel birim boy değiştirme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni çimento miktarının artmasıyla DKK numunelerinin rijitliğinin artarak daha fazla mukavemet kazanmaları ve daha gevrek bir yapıya dönüşmeleridir.

Çizelge 4.14. ANOVA Tablosu (Eksenel birim boy değiştirme değeri (ϵ)-Kumlu zemin, 28 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	3.80	5	0.7595	4.25	0.0213 önemli
A-Çimento	0.5718	1	0.5718	3.20	0.1011
B-Zeolit	0.3687	1	0.3687	2.06	0.1786
C-Akışk. Katkı	0.9624	1	0.9624	5.39	0.0405
D-Su/Bağlayıcı	0.6423	1	0.6423	3.60	0.0844
AC	1.09	1	1.09	6.13	0.0308
R²	0.6591				
Düzeltilmiş R²	0.5041				
Tahmin Edilen R²	0.2672				
Hassasiyet	7.9702				

Zeolit ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarlarının artmasıyla numuneler daha fazla elastik bir yapıya geçiş göstermekte ve bunun sonucunda eksenel birim boy

değiştirme kapasiteleri artmaktadır. Bunun nedeni, zeolitin kumlu zemin içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak zemini daha homojen bir yapı haline getirmesidir.



Şekil 4.19. Parametrelerin eksenel birim boy değiştirme değerine (ϵ) etkisi (Kumlu zemin, 28 günlük kür)

4.2.1.2.3. Elastisite Modülü (E)

Çalışma kapsamında 28 ve 56 günlük kür sürelerindeki kum zeminle hazırlanan DKK numuneleri için elde edilen elastisite modülleri (E) belirlenmiştir (Çizelge 4.15.). İki kür süresindeki numuneler için yapılan analiz sonuçlarının benzer çıkmasından dolayı sadece 28 günlük kür süresindeki numunelerin analiz sonuçları gösterilmiştir.

Elastisite modülleri için Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ANOVA tablosu Çizelge 4.16.'da verilmiştir. E için elde edilen denklem Eşitlik 4.9. ile verilmiştir.

$$(E)^{1/2} = +560.19 + 6.75 \cdot \text{Çimento} - 3.84 \cdot \text{Zeolit} - 28.05 \cdot \text{Akışk. Katkı} - 151.16 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \quad (4.9)$$

Çizelge 4.15. Elastisite modülleri (Kumlu zemin, 28 ve 56 günlük kür)

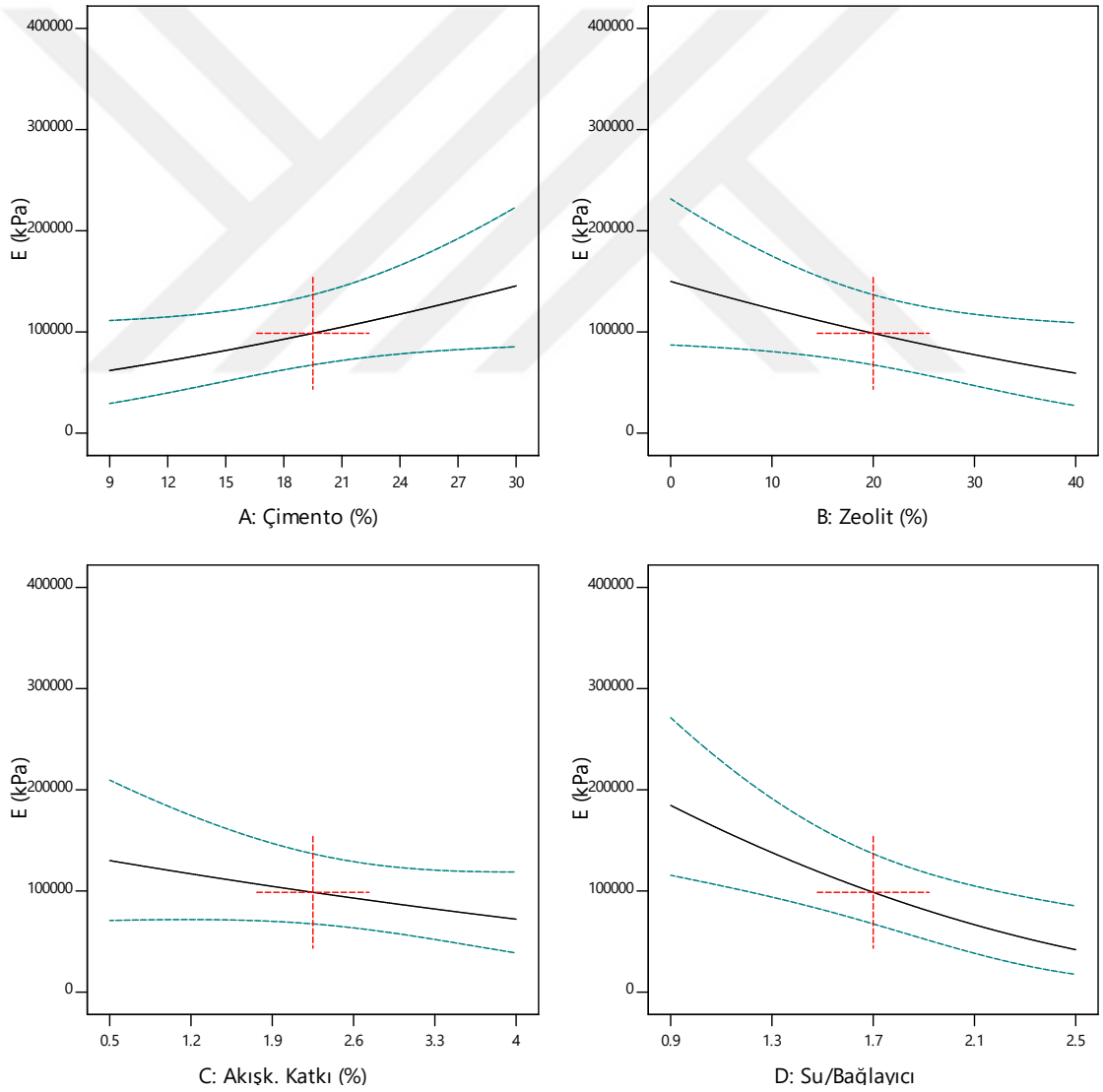
Tasarım no.	Tasarım parametreleri				E (kPa) (28 Gün)	E (kPa) (56 Gün)
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı		
1	30	15.8	2.11	1.86	96437.26	113950.60
2	24.33	0	0.5	1.31	325741.80	68216.46
3	23.81	0	3.83	2.5	95791.69	95327.93
4	9	29	0.5	1.31	77000.66	10406.02
5	30	40	0.5	0.9	342092.10	312542.03
6	9.42	17.34	2.30	1.83	113650.80	69226.63
7	16.98	40	2.15	1.88	26301.25	14075.14
8	9	40	4	0.9	87893.58	55013.62
9	9	27.8	3.91	2.5	14337.37	25016.12
10	30	40	4	2.5	14979.28	11304.69
11	9	0	3.83	1.38	64260.16	67039.73
12	22.62	26	4	1.47	46954.87	40286.61
13	17.4	16	2.18	0.9	61828.06	206776.06
14	22.62	26	4	1.47	10555.35	19218.59
15	24.33	29.46	0.5	2.5	22371.61	29310.57
16	30	0	4	0.9	382408.10	143022.03
17	9	0	1.25	2.5	27929.58	98216.26

Çizelge 4.16. incelendiğinde, F değerinin 6.10 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Hassasiyet değeri de 4'ten büyüktür ve tasarım uyumludur.

Çizelge 4.16. ANOVA Tablosu (Elastisite modülü–Kumlu zemin, 28 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	2.870E+05	4	71756.00	6.10	0.0064 önemli
A-Çimento	53918.55	1	53918.55	4.58	0.0535
B-Zeolit	58043.90	1	58043.90	4.94	0.0463
C-Akışk. Katkı	27205.43	1	27205.43	2.31	0.1542
D-Su/Bağlayıcı	1.444E+05	1	1.444E+05	12.28	0.0043
R²	0.6704				
Düzeltilmiş R²	0.5605				
Tahmin Edilen R²	0.3580				
Hassasiyet	8.2975				

Elastisite modülü, elastik sınırlar içerisinde malzemeye uygulanan gerilmenin, gerilme sonucu oluşan aksenal birim boy değişimine oranı olarak ifade edilebilir. Buradan numunenin mukavemeti ne kadar yüksek olursa elastisite modülünün de o kadar yüksek olacağı sonucu çıkarılmaktadır. Analiz sonuçlarına göre parametrelerin elastisite modüllerine olan etkileri Şekil 4.20.'de görülmektedir. Çimento miktarının artmasıyla numunenin mukavemetinde artış olmaktadır. Dolayısıyla numunenin elastisite modülünün de artması beklenmektedir. Şekil 4.20. incelendiğinde çimento miktarının artmasıyla elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Zeolit, akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranının artmasıyla ise elastisite modülünde azalmaların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.20. Parametrelerin elastisite modüllerine etkisi (Kumlu zemin, 28 günlük kür)

4.2.2. Permeabilite Deneyi

Çalışma kapsamında hem killi zemin hem de kumlu zemin kullanılarak hazırlanan 17 adet küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda permeabilite deneyleri yapılmış olup, deneylerin sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda detaylı olarak verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin permeabilite katsayısı (k) değerleri daha düşük olmuştur. Yani 56 günlük kür sürelerindeki numuneler daha geçirimsiz olmuştur. Ayrıca killi zeminler, kumlu zeminlere göre daha düşük permeabilite katsayısı değerine sahip olmuş ve daha geçirimsiz yapıda olmuşlardır.

4.2.2.1. Killi Zemin

Killi zeminler üzerinde yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları hem 28 hem de 56 günlük tasarım için toplu bir şekilde Çizelge 4.17.'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Permeabilite Deneyi sonuçları (Killi zemin – 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				Permeabilite katsayısı (k) (m/s)	
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	30	15.8	2.11	1.86	5.28E-09	1.31E-09
2	24.33	0	0.5	1.31	9.57E-10	4.03E-10
3	23.81	0	3.83	2.5	1.56E-08	2.82E-09
4	9	29	0.5	1.31	1.59E-08	2.91E-09
5	30	40	0.5	0.9	2.68E-08	5.59E-09
6	9.42	17.34	2.30	1.83	2.41E-10	4.35E-11
7	16.98	40	2.15	1.88	8.89E-10	2.21E-10
8	9	40	4	0.9	1.32E-08	2.39E-09
9	9	27.8	3.91	2.5	7.21E-09	1.66E-09
10	30	40	4	2.5	9.74E-08	2.42E-08
11	9	0	3.83	1.38	6.76E-11	1.43E-11
12	22.62	26	4	1.47	2.82E-09	1.22E-09
13	17.4	16	2.18	0.9	1.55E-09	7.31E-10
14	22.62	26	4	1.47	2.86E-09	8.22E-10
15	24.33	29.46	0.5	2.5	7.98E-08	2.68E-08
16	30	0	4	0.9	2.12E-10	5.77E-11
17	9	0	1.25	2.5	6.18E-10	1.10E-09

Permeabilite deneylerinin sonuçları Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve ANOVA tabloları Çizelge 4.18. ve Çizelge 4.19.'da farklı kür süreleri için

verilmiştir. 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda yapılan analiz sonuçlarına göre k değerleri için elde edilen denklemler Eşitlik 4.10. ve Eşitlik 4.11.'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 k = & +1.97E-07 - 3.95E-09 \cdot \text{Çimento} - 1.73E-09 \cdot \text{Zeolit} - 2.55E-08 \cdot \text{Akışk. Katkı} \\
 & - 1.62E-07 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} + 5.02E-11 \cdot \text{Çimento} \cdot \text{Zeolit} \\
 & + 2.19E-09 \cdot \text{Çimento} \cdot \text{Su/Bağlayıcı} + 7.50E-10 \cdot \text{Zeolit} \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \\
 & + 4.71E-09 \cdot \text{Akışk. Katkı}^2 + 3.50E-08 \cdot \text{Su/Bağlayıcı}^2
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}
 (k)^{1/2} = & +0.00024 - 3.73E-06 \cdot \text{Çimento} + 1.03E-06 \cdot \text{Zeolit} - 8.42E-06 \cdot \text{Akışk. Katkı} \\
 & - 0.00026 \cdot \text{Su/Bağlayıcı} + 3.26E-06 \cdot \text{Çimento} \cdot \text{Su/Bağlayıcı} \\
 & + 6.58E-05 \cdot \text{Su/Bağlayıcı}^2
 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Çizelge 4.18. ANOVA Tablosu (Permeabilite Deneyi-Killi zemin, 28 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	1.256E-14	9	1.396E-15	22.20	0.0002 önemli
A-Çimento	6.066E-16	1	6.066E-16	9.65	0.0172
B-Zeolit	9.752E-16	1	9.752E-16	15.51	0.0056
C-Akışk. Katkı	5.692E-16	1	5.692E-16	9.05	0.0197
D-Su/Bağlayıcı	1.167E-15	1	1.167E-15	18.56	0.0035
AB	6.695E-16	1	6.695E-16	10.65	0.0138
AD	2.008E-15	1	2.008E-15	31.94	0.0008
BD	8.475E-16	1	8.475E-16	13.48	0.0079
C ²	5.075E-16	1	5.075E-16	8.07	0.0250
D ²	1.396E-15	1	1.396E-15	22.20	0.0022
R²	0.9662				
Düzeltilmiş R²	0.9226				
Tahmin Edilen R²	0.7933				
Hassasiyet	17.9605				

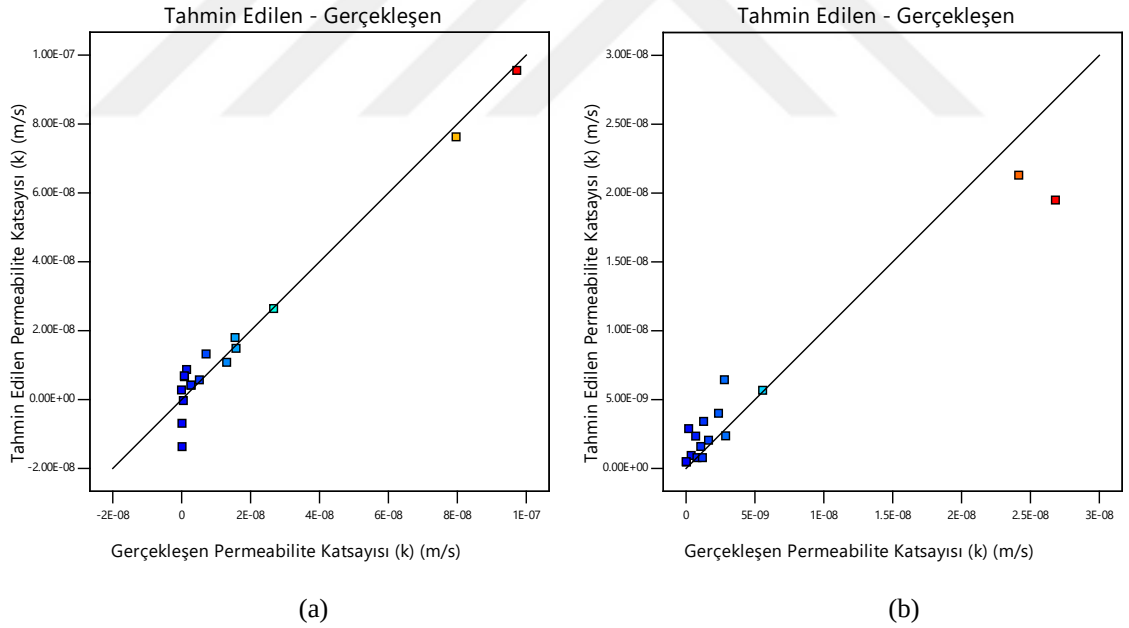
Çizelge 4.18. incelendiğinde, F değerinin 22.20 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerinin 0.05'ten küçük olması istenmektedir. Bu değer 0.05'ten küçük olması, model terimlerinin anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda A, B, C, D, AB, AD, BD, C² ve D² terimleri önemli terimlerdir. Düzeltilmiş R² değeri ile tahmin edilen R² değeri arasındaki farkın 0.20'den küçük olması istenmektedir ve burada bu koşulun sağlandığı görülmekte ve tasarımın makul bir uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Hassasiyet değerinin ise 4'ten büyük olması beklenmektedir. Çizelge 4.18.'e bakıldığında bu değer de sağlandığı ve tasarımın uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.19. incelendiğinde, F değerinin 11.64 olması, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerlerinin 0.05'ten küçük olması, model terimlerinin anlamlı

olduğunu göstermektedir. Bu durumda A, B, C, D, AD ve D² terimleri önemli terimlerdir. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür ve tasarım makul bir uyum içerisindedir. Hassasiyet değeri ise 4'ten büyüktür ve tasarımın uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.19. ANOVA Tablosu (Permeabilite Deneyi-Killi zemin, 56 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri
Model	3.002E-08	6	5.004E-09	11.64	0.0005 önemli
A-Çimento	3.798E-09	1	3.798E-09	8.84	0.0140
B-Zeolit	3.778E-09	1	3.778E-09	8.79	0.0142
C-Akışk. Katkı	2.355E-09	1	2.355E-09	5.48	0.0413
D-Su/Bağlayıcı	5.252E-09	1	5.252E-09	12.22	0.0058
AD	4.498E-09	1	4.498E-09	10.47	0.0089
D ²	5.577E-09	1	5.577E-09	12.98	0.0048
R²	0.8748				
Düzeltilmiş R²	0.7996				
Tahmin Edilen R²	0.6771				
Hassasiyet	12.1930				



Şekil 4.21. Tahmin edilen - gerçekleşen deney sonuçları eğrisi (Killi zemin); (a) 28 günlük kür (k), (b) 56 günlük kür ($k^{1/2}$)

Şekil 4.21.'de killi zemin kullanılarak hazırlanan DKK numuneleri için 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda yapılan permeabilite deneyi sonuçları ve bu sonuçlar kullanılarak yapılan analizlerin sonucu tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu

görülmektedir. Deney sonuçları için elde edilen noktaların eğriye yeterli derecede yakın olduğu görülmektedir.

Analiz sonuçlarına göre parametrelerin permeabilite katsayılarına (k) olan etkileri 28 günlük kür için Şekil 4.22.'de ve 56 günlük kür için Şekil 4.23.'te görülmektedir.

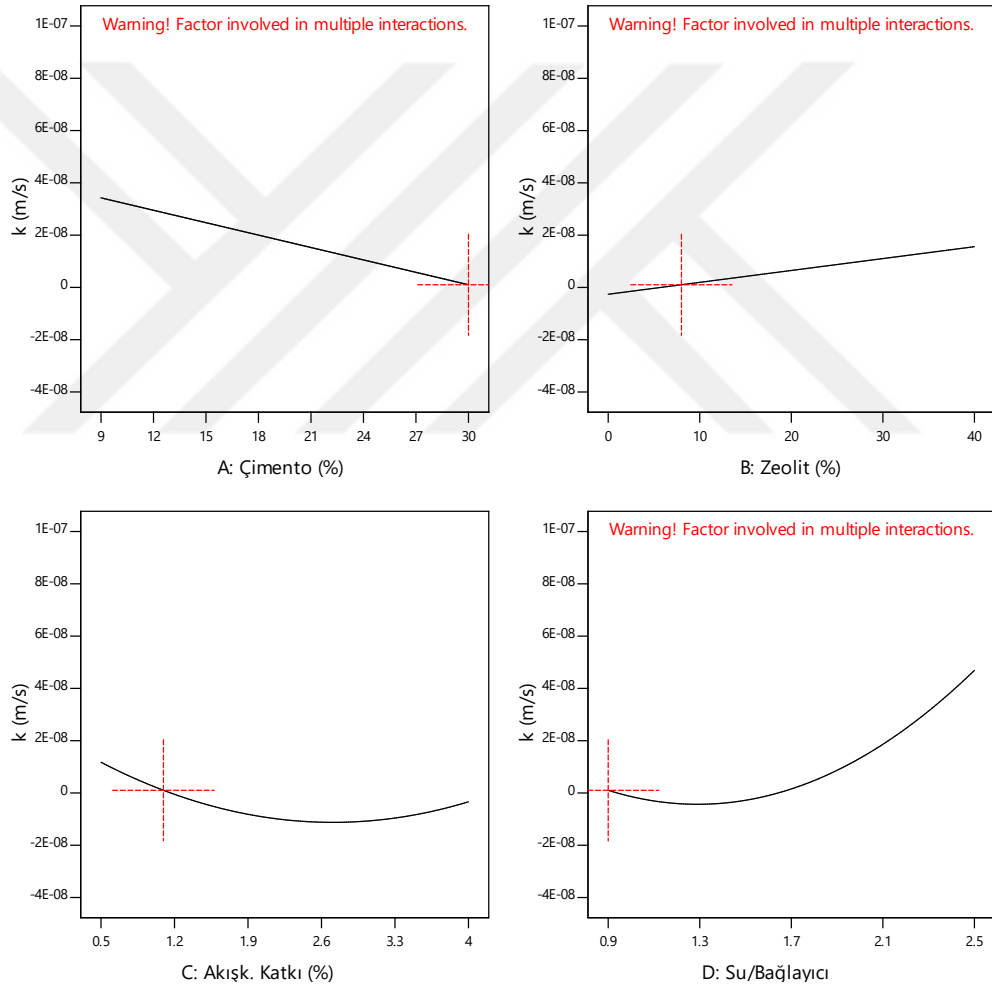
Zemin içerisinde su ve çimentonun karıştırılması sonucu çimentonun priz almaya başlamasıyla beraber C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ve C-H (kalsiyum hidroksit) ürünleri oluşmakta ve çimento sertleşmeye başlamaktadır. Bu ürünlerin zeminin etrafını sarmasıyla beraber zeminde dayanım artarken boşluklar azalmakta ve zemin numunesi daha sıkı bir yapıya geçmektedir. Daha sıkı yapıya geçmesinin sonucu olarak ise zeminin permeabilite katsayısında azalma olmaktadır. Çimento miktarının artmasıyla bu etki daha fazla olacağından çimento miktarının artmasıyla permeabilite katsayısının azalacağı sonucu çıkmaktadır. Şekil 4.24. ve Şekil 4.25. incelendiğinde bu sonucu destekler nitelikte grafikler oluşmuştur.

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarının artması ile hem 28 günlük hem de 56 günlük kür süresi için permeabilite katsayıları azalmıştır. Yani akışkanlaştırıcı katkı maddesi, permeabilite katsayısı için olumlu etki göstermiştir ancak bu etki diğer parametrelere göre çok az oranda olmuştur. Zemine eklenen akışkanlaştırıcı katkı maddesinin miktarının artmasıyla zemin tanelerinin dizilimi bir miktar iyileşmekte ve zemin daha iyi sıkışarak geçirimsizliği azalmaktadır.

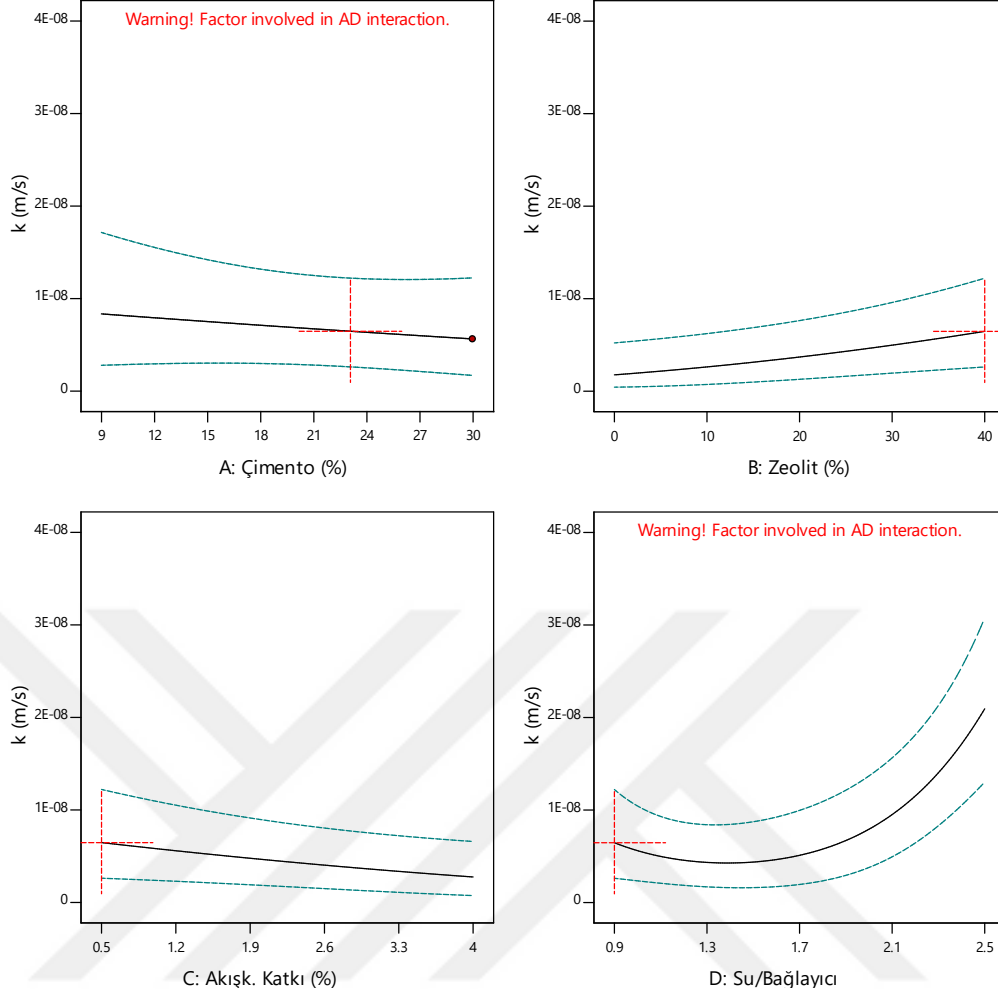
Su/bağlayıcı oranının artmasıyla zeminin su muhtevası artmakta ve zemin taneleri daha iyi konumlanarak daha iyi sıkışma sağlanmakta bunun sonucu olarak zeminin permeabilite katsayısında azalma olmaktadır. Ancak belirli bir su muhtevasından sonra zemin tanelerinin yerini su almakta ve zemin taneleri artık daha kötü konumlanmaya başlamaktadır. Kürlenme aşamasında zemin içerisindeki bu suların kaybolmasıyla zemin içerisinde boşluklar oluşmakta ve bunun sonucu olarak zeminin permeabilite katsayısı artmaktadır. Su/bağlayıcı oranının, enjeksiyonun pompalanmasını engellemeyecek kıvamda olması, kolonun istenen hedef bir dayanımda elde edilebilmesi ve yeterli permeabilite katsayısı değerinin elde edilebilmesi kriterleri göz önünde tutularak, belirli bir sınır değerinde tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan benzer bir çalışmada beton içerisine zeolit katılmasının, zaman içerisinde betonun gözenekliliğini azalttığı belirtilmiştir (Gerengi ve ark., 2015). Bu çalışmada kullanılan zeolit miktarının artması ile 28 ve 56 günlük kür süreleri için permeabilite katsayısında artışlar görülmekte ancak bu artış sonucunda oluşan permeabilite katsayısı değerlerinin kabul edilebilir sınırları geçmediği hatta çok altında kaldığı görülmektedir.

Bu artışın sebebi, çalışma kapsamında kullanılan zeolitin boşluklu yapıda olmasıdır. Çalışmamızda kullanılan zeolitin kimyasal analizi sonucu porozitesinin %24-32 arasında olduğu belirlenmiştir. Zeolitin çimentoya göre daha düşük maliyetli ve çimento gibi üretiminde zararlı gazlar oluşmayıp doğa dostu bir malzeme olması ve zeolitli numunelerden elde edilen permeabilite katsayısı değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması, zeolit kullanılarak oluşturulan DKK numunelerinin serbest basınç mukavemetleri de göz önüne alınarak, zeolitin puzolanik malzeme olarak çimento ile birlikte DKK imalatında belirli sınırlar içerisinde kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır.

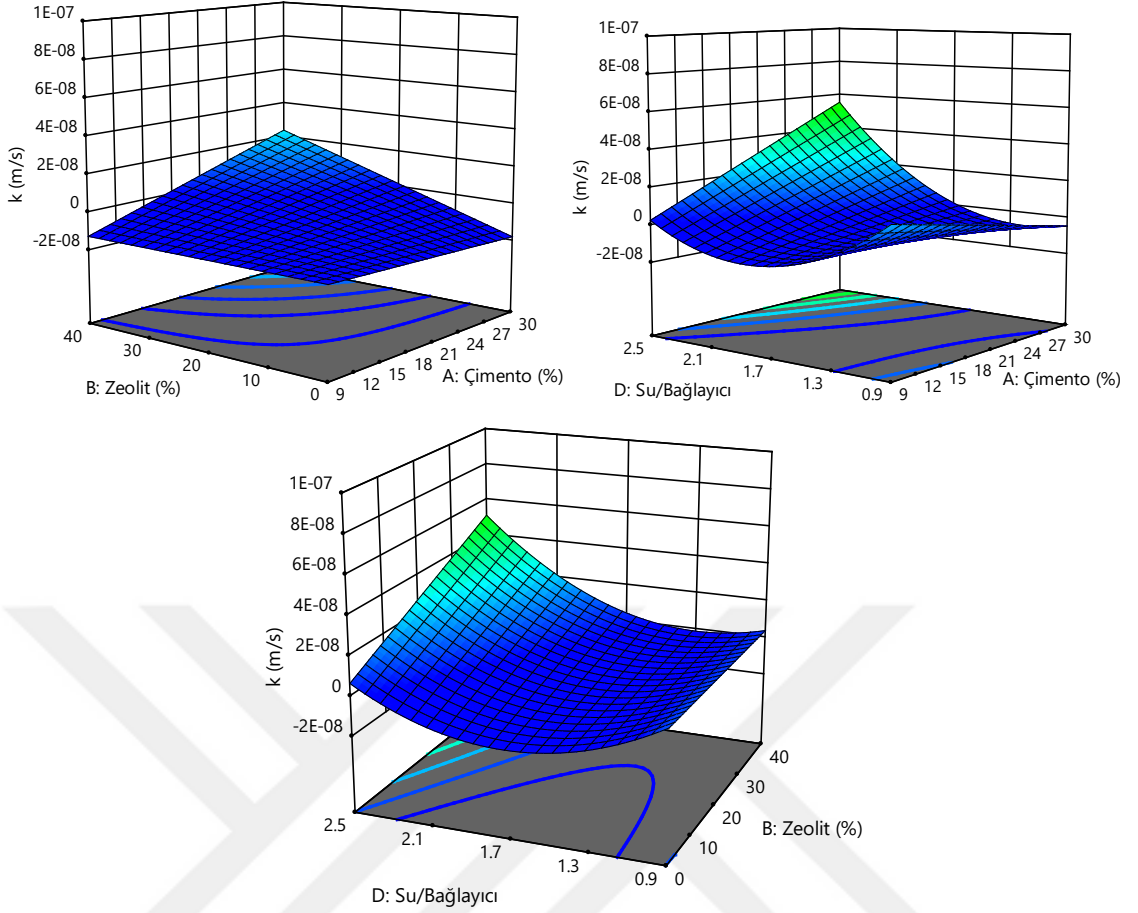


Şekil 4.22. Parametrelerin permeabilite katsayısına etkisi (Killi zemin, 28 günlük kür)



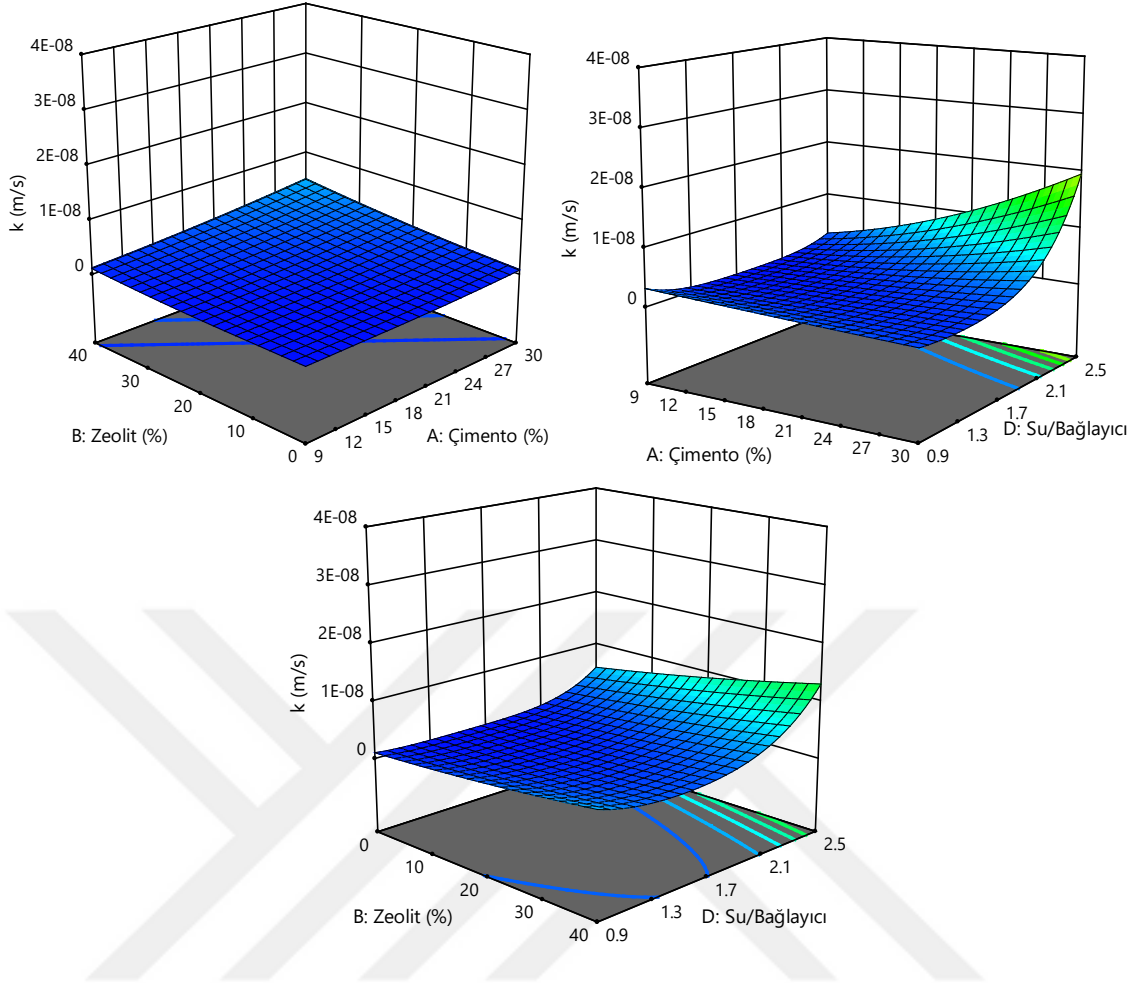
Şekil 4.23. Parametrelerin permeabilite katsayısına etkisi (Killi zemin, 56 günlük kür)

Akışkanlaştırıcı katkı maddesinin etkisinin diğer parametrelere oranla çok daha az olduğu daha önce ifade edilmişti. O yüzden ikili etkileşimlerde akışkanlaştırıcı katkı maddesi tekrar eklenmemiş, kalan üç parametrenin birbirleriyle olan ikili etkileşimleri Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde çimento ve zeolit miktarının artışının birbirleriyle aynı derecede ve doğrusal olarak etki ettiği ancak su/bağlayıcı oranının etkisinin diğer ikisine göre çok daha baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.24. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Killi zemin, 28 günlük kür)

Şekil 4.24. ve Şekil 4.25. incelendiğinde zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının minimum değerlerindeyken çimento miktarının artmasıyla permeabilite katsayısının azaldığı görülmektedir. Ancak bu durumda enjeksiyon çok koyu kıvamda olmaktadır. Zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranı maksimum seviyedeysen çimento miktarının artmasıyla permeabilite katsayısı artmaktadır. Bu durumda ise DKK'nın serbest basınç mukavemetinde istenilen değer elde edilememektedir. En düşük permeabilite katsayısı (k) ise su/bağlayıcı oranının orta seviyelerde olduğu durumlarda oluşmaktadır. Enjeksiyonun uygun kıvamda olabilmesi, DKK'nın istenilen serbest basınç mukavemetinde imal edilebilmesi ve en düşük permeabilite katsayısına sahip DKK elde edilebilmesi açısından hem zeolit miktarının hem de su/bağlayıcı oranının, kendi parametre sınırları arasında ve ortalama bir seviyede seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.25. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Killi zemin, 56 günlük kür)

4.2.2.2. Kumlu Zemin

Kumlu zeminle hazırlanmış DKK numuneleri üzerinde yapılan permeabilite deneylerinin sonuçları tüm tasarımlar için toplu bir şekilde Çizelge 4.20.'de verilmiştir.

Yapılan analizler sonucu oluşan ANOVA tabloları 28 günlük tasarımlar için Çizelge 4.21.'de, 56 günlük tasarımlar için Çizelge 4.22.'de verilmiştir. Analizler sonucu 28 günlük kürlenmiş numuneler için elde edilen tasarım denklemi Eşitlik 4.12., 56 günlükler için tasarım denklemi ise Eşitlik 4.13. ile verilmiştir.

Çizelge 4.20. Permeabilite Deneyi sonuçları (Kumlu zemin – 28 ve 56 günlük kür)

Tasarım no.	Tasarım parametreleri				Permeabilite katsayısı (k) (m/s)	
	Çimento (%)	Zeolit (%)	Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	30	15.8	2.11	1.86	6.01E-08	1.46E-08
2	24.33	0	0.5	1.31	5.93E-08	2.44E-08
3	23.81	0	3.83	2.5	3.02E-07	5.38E-08
4	9	29	0.5	1.31	9.86E-08	1.77E-08
5	30	40	0.5	0.9	5.98E-08	1.22E-08
6	9.42	17.34	2.30	1.83	8.94E-08	1.60E-08
7	16.98	40	2.15	1.88	2.07E-07	5.06E-08
8	9	40	4	0.9	2.98E-07	5.29E-08
9	9	27.8	3.91	2.5	2.58E-07	5.85E-08
10	30	40	4	2.5	2.19E-07	5.30E-08
11	9	0	3.83	1.38	7.68E-08	1.59E-08
12	22.62	26	4	1.47	8.89E-08	3.76E-08
13	17.4	16	2.18	0.9	5.12E-08	2.36E-08
14	22.62	26	4	1.47	8.78E-08	2.47E-08
15	24.33	29.46	0.5	2.5	3.25E-07	1.07E-07
16	30	0	4	0.9	4.43E-09	1.18E-09
17	9	0	1.25	2.5	2.28E-07	3.97E-08

$$\begin{aligned}
(k)^{1/2} = & +0.00058 - 1.67E-05 * \text{Çimento} + 8.31E-06 * \text{Zeolit} + 2.36E-06 * \text{Akışk. Katkı} \\
& - 0.00037 * \text{Su/Bağlayıcı} + 7.39E-06 * \text{Çimento} * \text{Su/Bağlayıcı} \\
& - 3.45E-06 * \text{Zeolit} * \text{Su/Bağlayıcı} + 0.00013 * \text{Su/Bağlayıcı}^2
\end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}
(k)^{1/2} = & +0.00012 + 1.88E-05 * \text{Çimento} + 1.24E-06 * \text{Zeolit} + 2.21E-05 * \text{Akışk. Katkı} \\
& - 0.00024 * \text{Su/Bağlayıcı} - 1.24E-06 * \text{Çimento} * \text{Akışk. Katkı} \\
& + 3.18E-06 * \text{Çimento} * \text{Su/Bağlayıcı} - 5.90E-07 * \text{Çimento}^2 \\
& + 7.29E-05 * \text{Su/Bağlayıcı}^2
\end{aligned} \quad (4.13)$$

Çizelge 4.21.'e göre, yapılan analiz sonucu F değeri 10.45 olarak çıkmış ve buradan modelin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. p değerlerine göre B, D, AD ve D² terimleri önemli terimlerdir. Hassasiyet değeri 4'ten büyüktür ve tasarımın uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.21. ANOVA Tablosu (Permeabilite Deneyi-Kumlu zemin, 28 günlük kür)

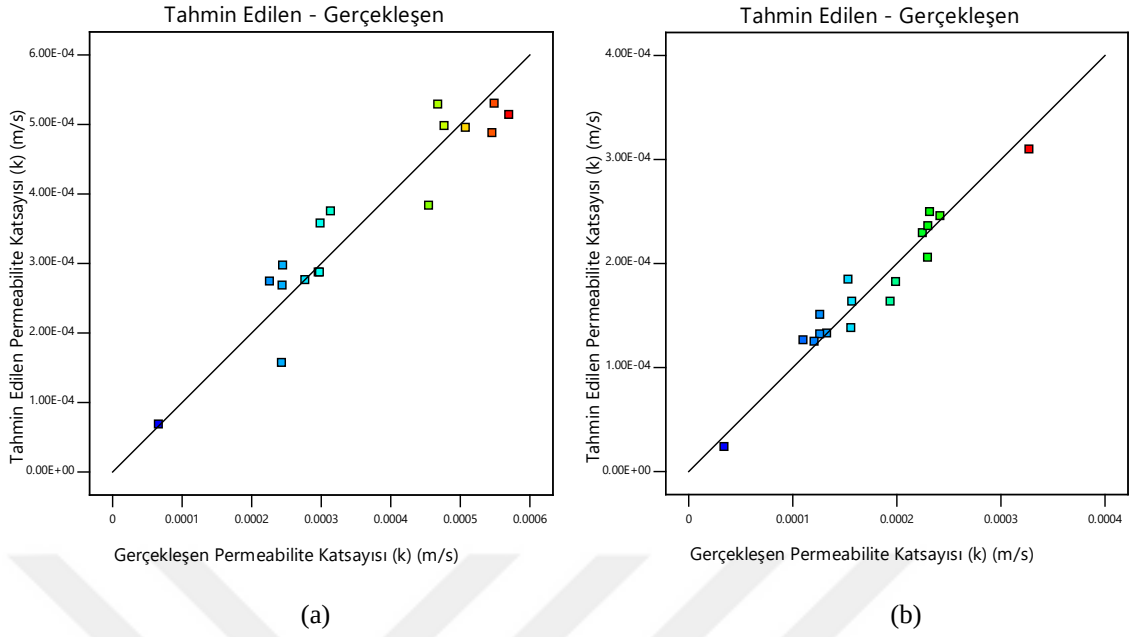
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	2.989E-07	7	4.270E-08	10.45	0.0011	önemli
A-Çimento	1.816E-08	1	1.816E-08	4.44	0.0643	
B-Zeolit	2.122E-08	1	2.122E-08	5.19	0.0487	
C-Akışk. Katkı	1.788E-10	1	1.788E-10	0.0437	0.8390	
D-Su/Bağlayıcı	1.348E-07	1	1.348E-07	32.96	0.0003	
AD	2.311E-08	1	2.311E-08	5.65	0.0414	
BD	1.805E-08	1	1.805E-08	4.42	0.0650	
D ²	2.132E-08	1	2.132E-08	5.22	0.0483	
R²	0.8904					
Düzeltilmiş R²	0.8052					
Tahmin Edilen R²	0.5722					
Hassasiyet	10.5232					

Çizelge 4.22. ANOVA Tablosu (Permeabilite Deneyi-Kumlu zemin, 56 günlük kür)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	7.005E-08	8	8.756E-09	14.44	0.0005	önemli
A-Çimento	2.544E-09	1	2.544E-09	4.20	0.0747	
B-Zeolit	5.202E-09	1	5.202E-09	8.58	0.0190	
C-Akışk. Katkı	1.536E-10	1	1.536E-10	0.2532	0.6284	
D-Su/Bağlayıcı	2.757E-08	1	2.757E-08	45.45	0.0001	
AC	3.470E-09	1	3.470E-09	5.72	0.0437	
AD	4.158E-09	1	4.158E-09	6.85	0.0307	
A ²	1.158E-08	1	1.158E-08	19.09	0.0024	
D ²	6.459E-09	1	6.459E-09	10.65	0.0115	
R²	0.9352					
Düzeltilmiş R²	0.8704					
Tahmin Edilen R²	0.6968					
Hassasiyet	15.9614					

Çizelge 4.22.'ye göre, F değeri 14.44'tür ve model anlamlıdır. p değerlerine göre B, D, AC, AD, A² ve D² terimleri önemli terimlerdir. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür, Hassasiyet değeri ise 4'ten büyüktür. Böylelikle tasarımın uygunluğu ortaya çıkmaktadır.

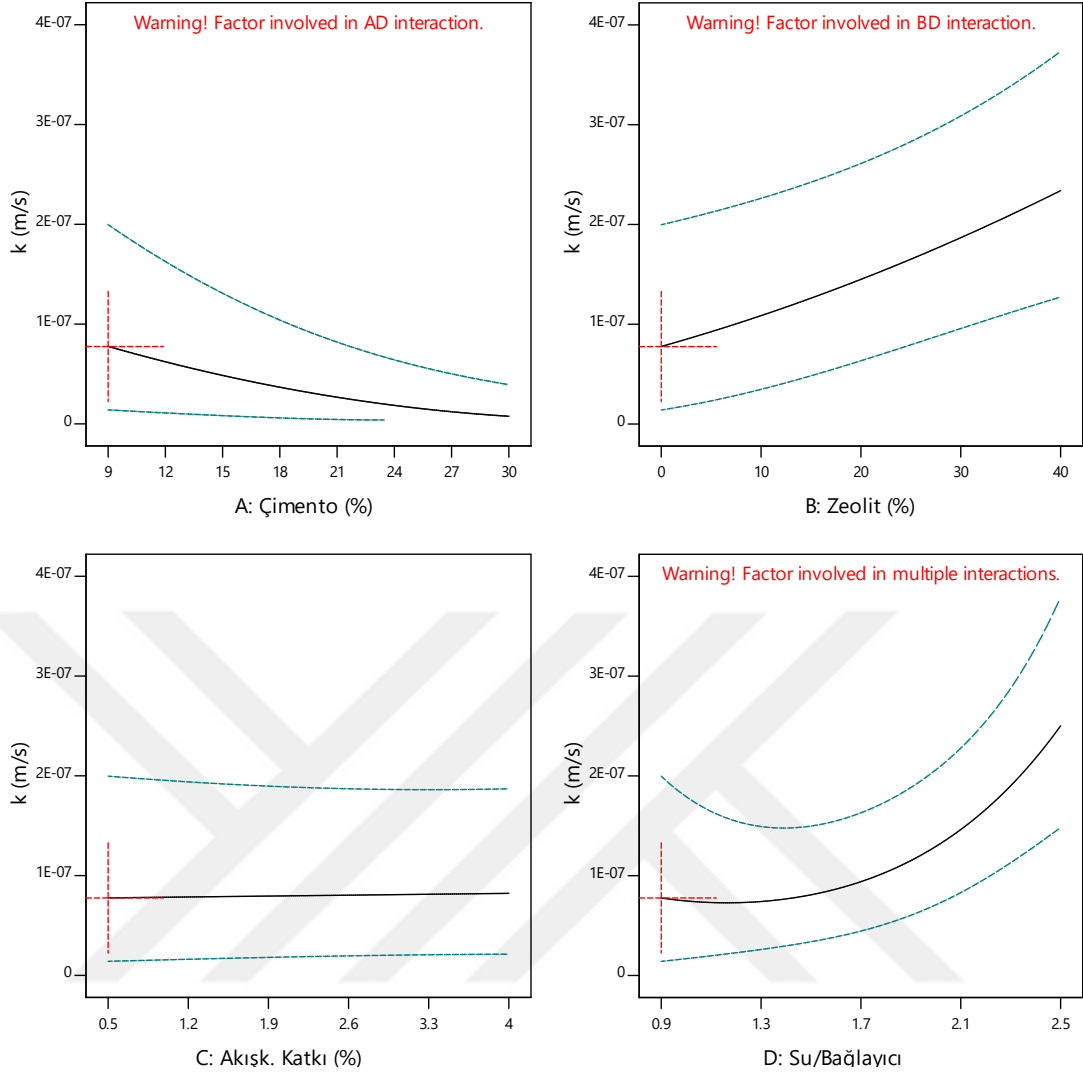
Permeabilite deneyleri sonucu tahmin edilen ve gerçekleşen deney sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.26.'da 28 günlük ve 56 günlük kür için görülmektedir. Deney sonuçlarının değerleri çok küçük olduğu için grafikler normal değerlerle iyi bir şekilde elde edilememiştir. Ancak deney sonuçları, $k^{1/2}$ için düzenlendiğinde grafikler anlamlı bir şekilde oluşmuştur. Şekil incelendiğinde noktaların eğriye yeterli derecede yakın olduğu ve iki kür süresi için de anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.26. Tahmin edilen - gerçekleşen deney sonuçları eğrisi (Kumlu zemin); (a) 28 günlük kür ($k^{1/2}$), (b) 56 günlük kür ($k^{1/2}$)

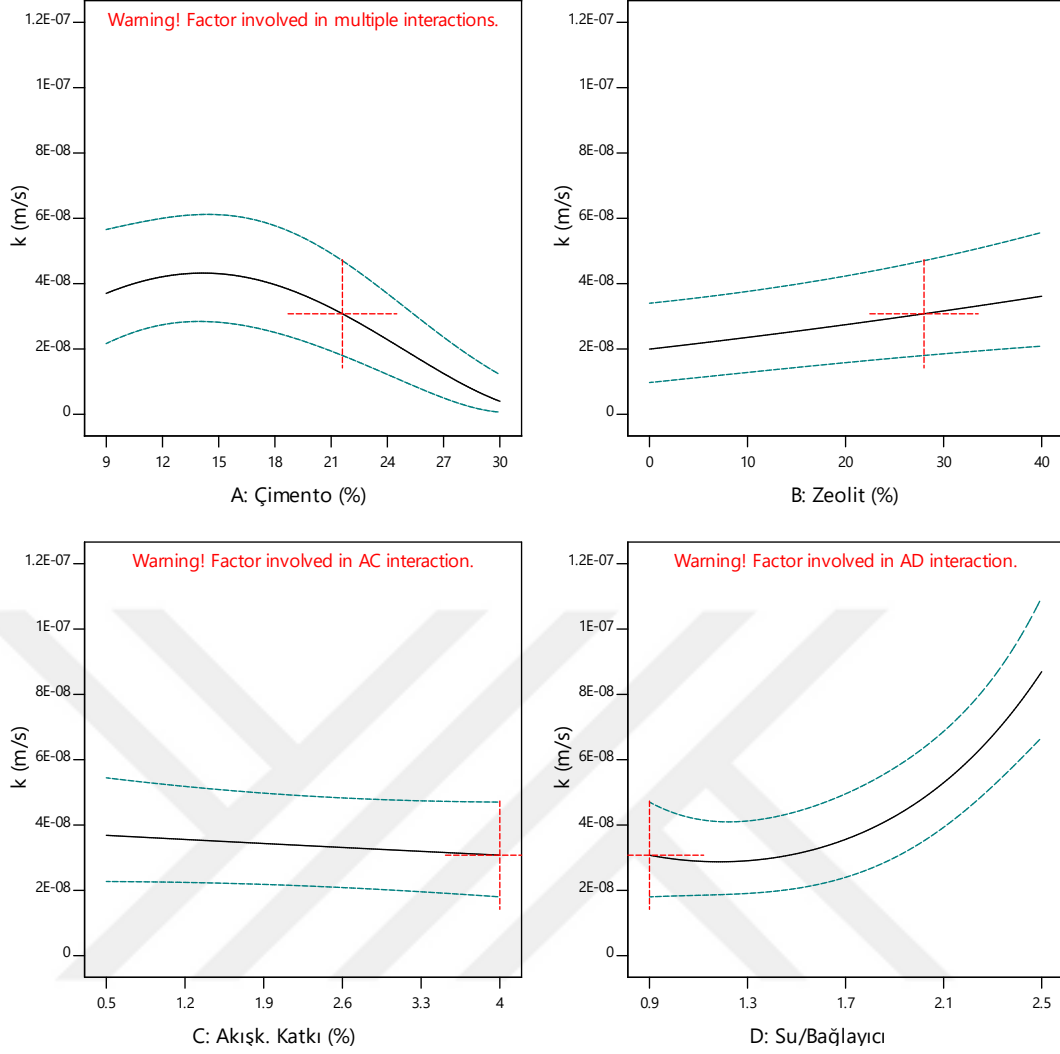
Parametrelerin permeabilite katsayılarına olan etkileri 28 günlük kür için Şekil 4.27.'de ve 56 günlük kür için Şekil 4.28.'de görülmektedir.

Killi zeminle oluşturulmuş DKK'da, zemin içerisinde su ve çimentonun karıştırılması sonucu çimentonun priz almaya başlamasıyla beraber C-S-H ve C-H ürünleri oluşmakta ve çimento sertleşmeye başlamaktadır. Bu ürünlerin zeminin etrafını sarmasıyla beraber zeminde dayanım artarken boşluklar azalmakta ve zemin numunesi daha sıkı bir yapıya geçmektedir. Daha sıkı yapıya geçmesinin sonucu olarak ise zeminin permeabilite katsayısında azalma olmaktadır. Kumlu zeminle oluşturulmuş DKK'da ise yine killi zeminde olduğu gibi çimento miktarının artmasıyla bu etkinin daha fazla olması nedeniyle permeabilite katsayısı azalmaktadır.



Şekil 4.27. Parametrelerin permeabilite katsayısına etkisi (Kumlu zemin, 28 günlük kür)

Doğal zeolit ve silika dumanının betonun geçirimsizlik ve dayanımına olan etkilerinin incelendiği bir başka çalışmada beton içerisinde %10 ve %20 oranlarında zeolit kullanımıyla betonun geçirimsizliğinin azaldığı tespit edilmiştir (Sevim ve Okumuş, 2011). Bu çalışmada ise yukarıda ki çalışmanın tersine killi zeminde olduğu gibi zeolit miktarının artması ile iki kür süresi için de permeabilite katsayısı artmaktadır. Bunun sebebi, zeolitin boşluklu yapısı olarak ifade edilmektedir. Ancak, burada gözlemlenen artış sonucu oluşan permeabilite katsayıları yine kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmıştır. Zeolitin çimentoya göre daha düşük maliyette olması ve çevre için zararının olmaması, zeolitli numunelerden elde edilen permeabilite katsayısı değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması, zeolitin killi zeminlerde olduğu gibi kumlu zeminlerde de belirli sınırlar içerisinde kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır.



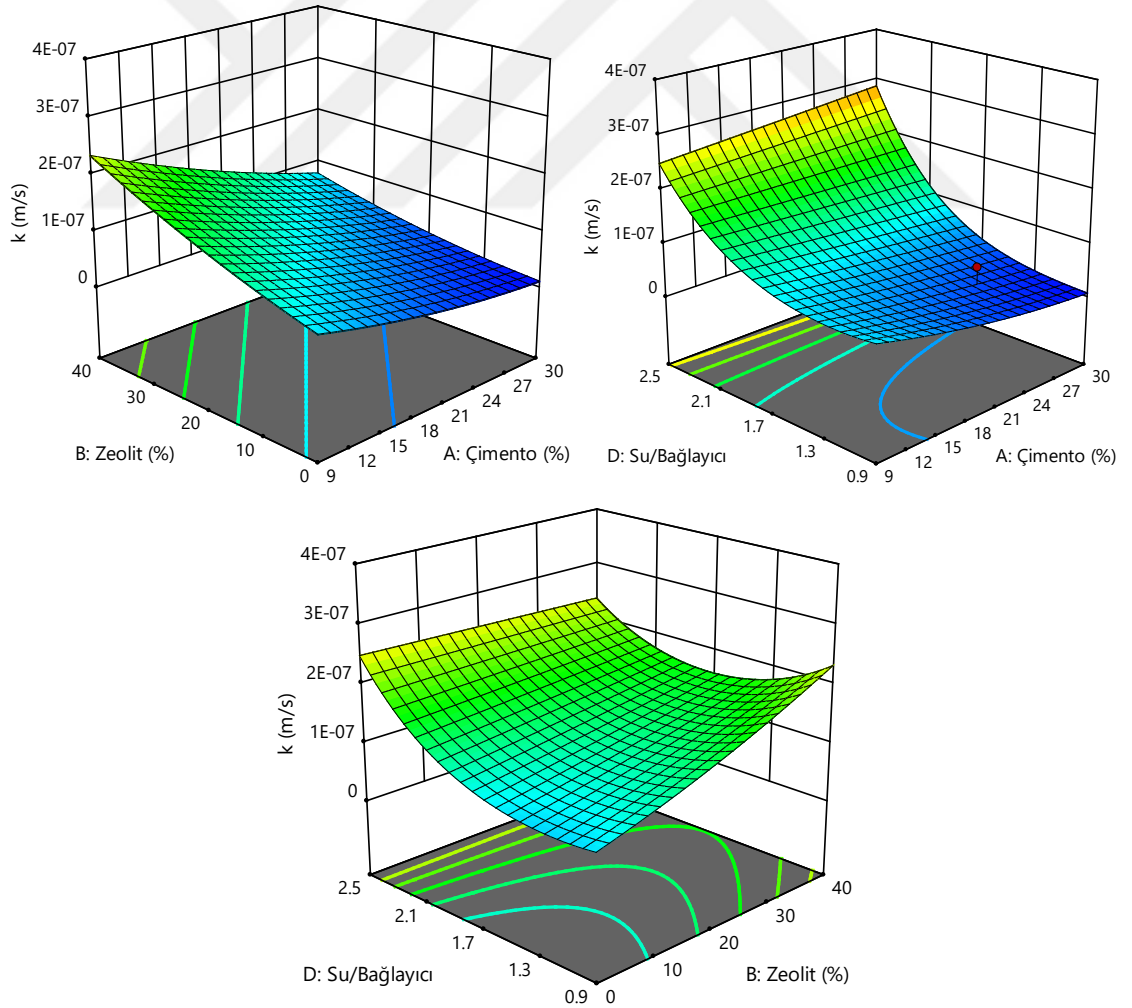
Şekil 4.28. Parametrelerin permeabilite katsayısına etkisi (Kumlu zemin, 56 günlük kür)

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarının artması ile iki kür süresi için de permeabilite katsayıları azalmıştır. Yani akışkanlaştırıcı katkı maddesi, permeabilite katsayısı için olumlu etki göstermiştir ancak bu etki diğer parametrelere göre çok az oranda olmuştur. Bunun sebebi zemin tanecikleri arasındaki boşluklara sıvı girişinin sağlanması ile tane diziliminin iyileşmesi ve daha iyi sıkışma sağlanmasıdır.

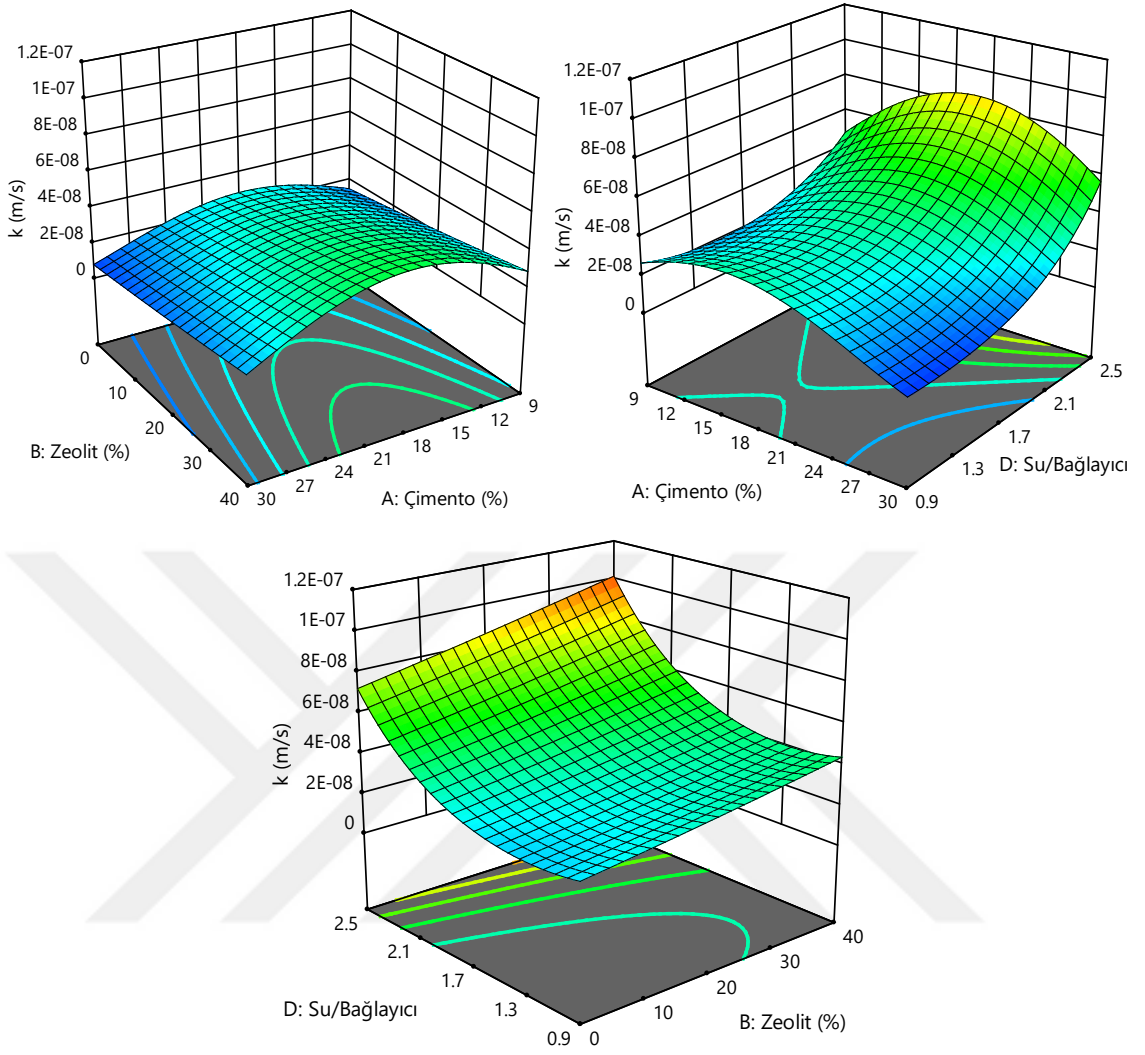
Killi zeminlerde olduğu gibi kumlu zeminlerde de su/bağlayıcı oranının, enjeksiyonun pompalanmasını engellemeyecek kıvamda olması, kolonun istenen hedef bir dayanımda elde edilebilmesi ve yeterli permeabilite katsayısı değerinin elde edilebilmesi kriterleri göz önünde tutularak, belirli bir sınır değerde tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

İkili etkileşimlerde akışkanlaştırıcı katkı maddesi, deney sonuçlarına etkisinin çok az olmasından dolayı incelenmemiş, kalan üç parametrenin birbirleriyle olan ikili etkileşimleri Şekil 4.29. ve Şekil 4.30.'da verilmiştir.

Şekil 4.29. ve Şekil 4.30. incelendiğinde su/bağlayıcı oranının minimum değerindeyken çimento miktarının artmasıyla permeabilite katsayısı azalmakta, zeolit miktarının artmasıyla permeabilite katsayısı artmaktadır. Bu durumda enjeksiyon kıvamı çok koyu olmaktadır. Su/bağlayıcı oranı maksimum seviyedeysen çimento miktarının artmasıyla permeabilite katsayısı artmakta, zeolit miktarının artması ile permeabilite katsayısı azalmaktadır. Bu durumda çimento miktarının artması serbest basınç mukavemetini artırmakta ancak su/bağlayıcı oranının artması serbest basınç mukavemetini azaltmaktadır. En düşük permeabilite katsayısı (k) ise su/bağlayıcı oranının orta seviyelerinde oluşmaktadır. Bu durumda killi zemindeki sonuçlara paralel olarak enjeksiyonun pompalanmaya uygun kıvamda olabilmesi, DKK'nın hedeflenen serbest basınç mukavemetinde imal edilebilmesi ve en düşük permeabiliteye sahip DKK elde edilebilmesi açısından su/bağlayıcı oranının kendi parametre sınırı arasında ve orta seviyede tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.29. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Kumlu zemin, 28 gün kür)



Şekil 4.30. Çimento, zeolit miktarı ve su/bağlayıcı oranının ikili etkileşimleri (Kumlu zemin, 56 gün kür)

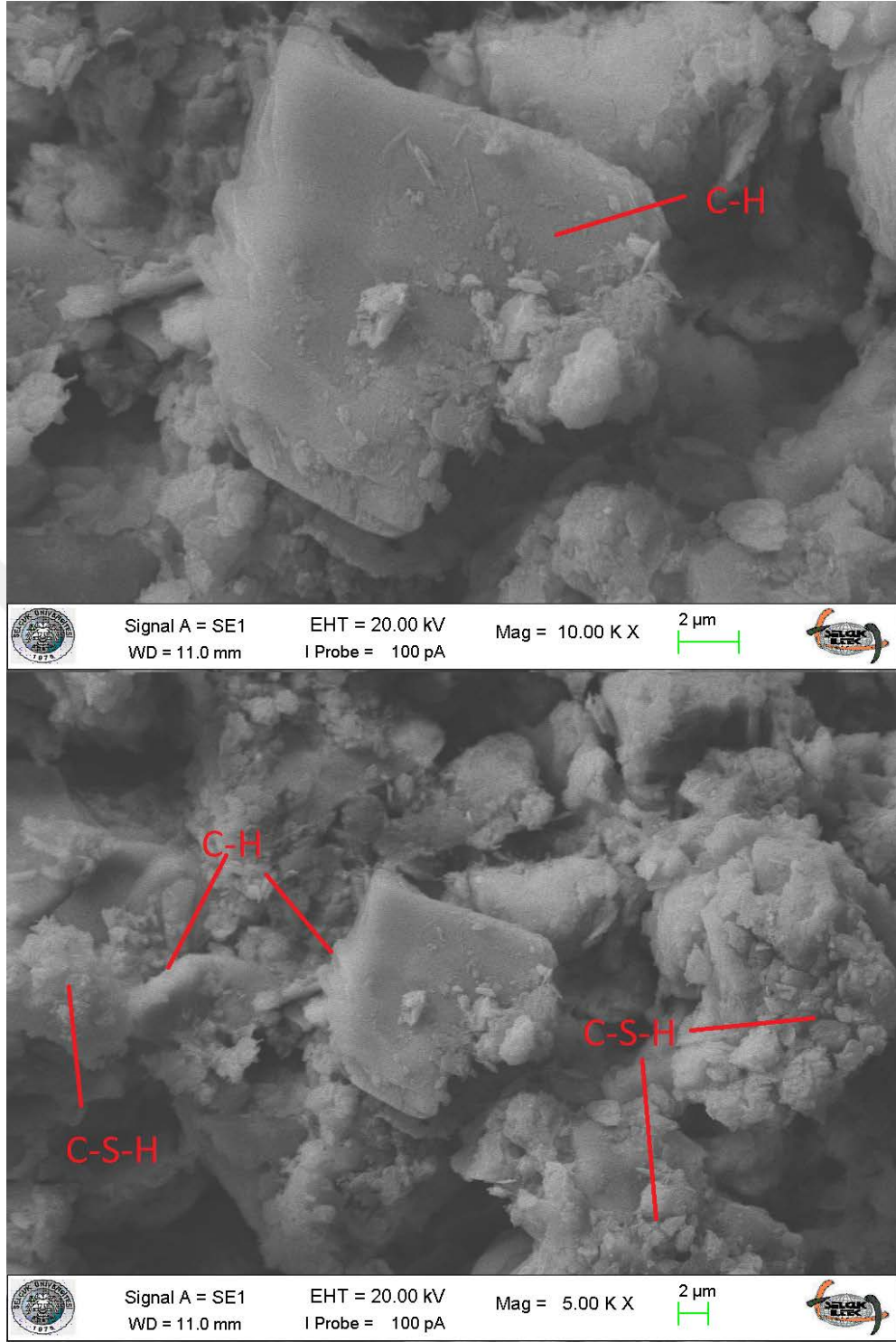
4.2.3. SEM Analizleri

Tez çalışması kapsamında numunelerin SEM analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yapılmıştır. SEM görüntüsü incelenecek DKK numunelerinin seçilmesinde numunelere uygulanan serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyi sonuçları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda yüksek dayanım vermesi ve içerisinde her parametrenin bulunmasından dolayı 5. tasarım (%30 çimento, %40 zeolit, %0.5 akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranı 0.9) seçilmiştir. Zeolit ve çimentonun etkisini görebilmek ve 5. tasarımla kıyaslayabilmek amacıyla 8. tasarım (%9 çimento, %40 zeolit, %4 akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranı 0.9) seçilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması sonucu belirlenen optimum tasarıma yakın

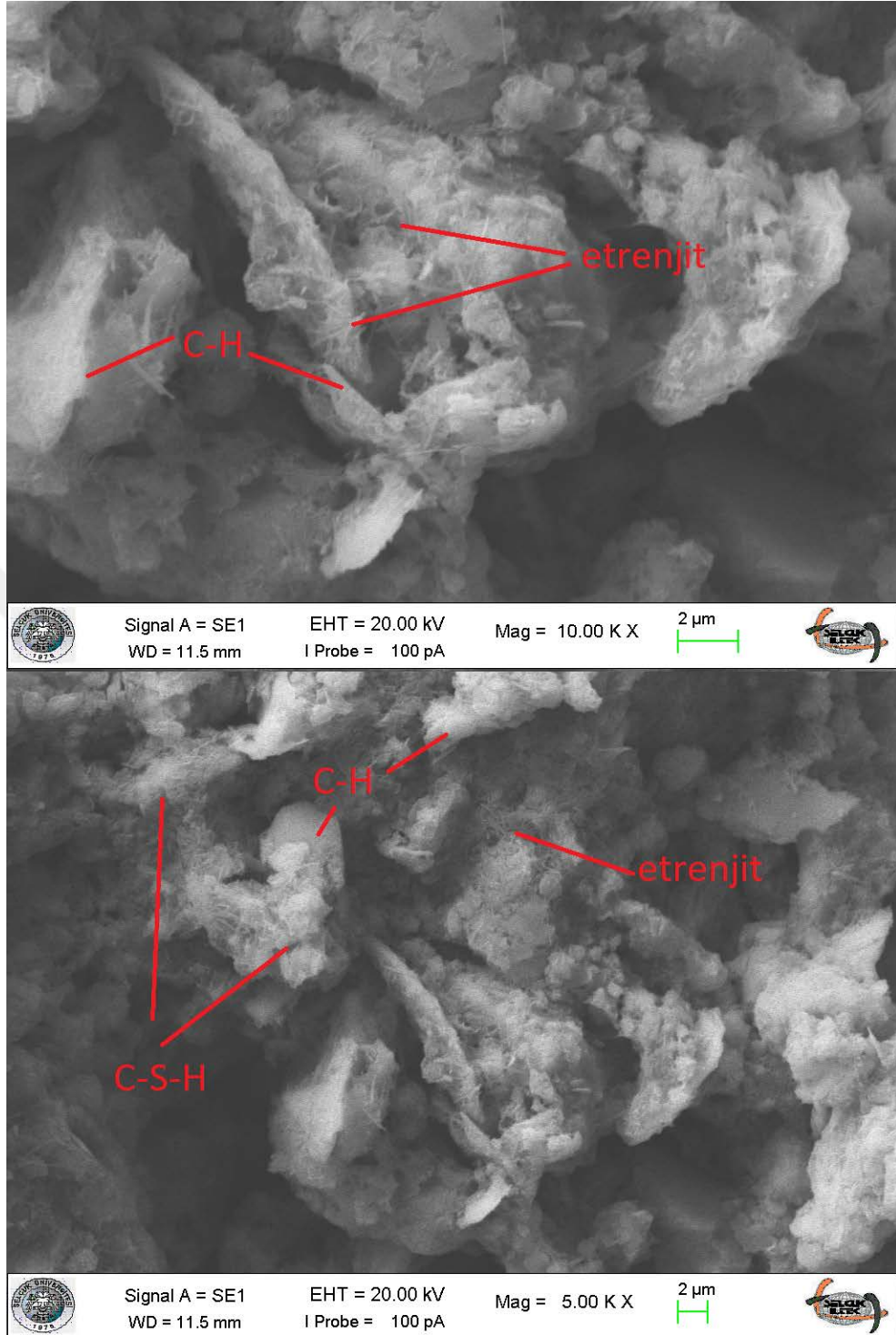
olmasından dolayı 14. tasarım (%22.62 çimento, %26 zeolit, %4 akışkanlaştırıcı katkı maddesi ve su/bağlayıcı oranı 1.47) seçilmiştir. Sonuç olarak hem killi numuneler için hem de kumlu numuneler için 3'er adet tasarım seçilmiş ve toplamda 6 adet numunenin SEM görüntüsü incelenmiştir.

Şekil 4.31. ve Şekil 4.42. arasındaki şekillerdeki SEM görüntüleri incelendiğinde çimentonun hidratasyon olayının başlamasından kısa süre sonra oluşan C-H jelleri, çimentonun içerisindeki C_3A bileşeninin hidratasyonu sonucu oluşan etrenjit jelleri ve hidratasyonun başlamasından birkaç saat sonra C-H jelleriyle karışım içerisindeki puzolanik malzemelerin reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H jelleri görülmektedir. C-H jelleri büyük boyutlardadır ve mukavemete etkisi, boyutu çok küçük olan C-S-H jellerine göre çok azdır. C-S-H jellerinin ise mukavemete etkisi çok fazladır.

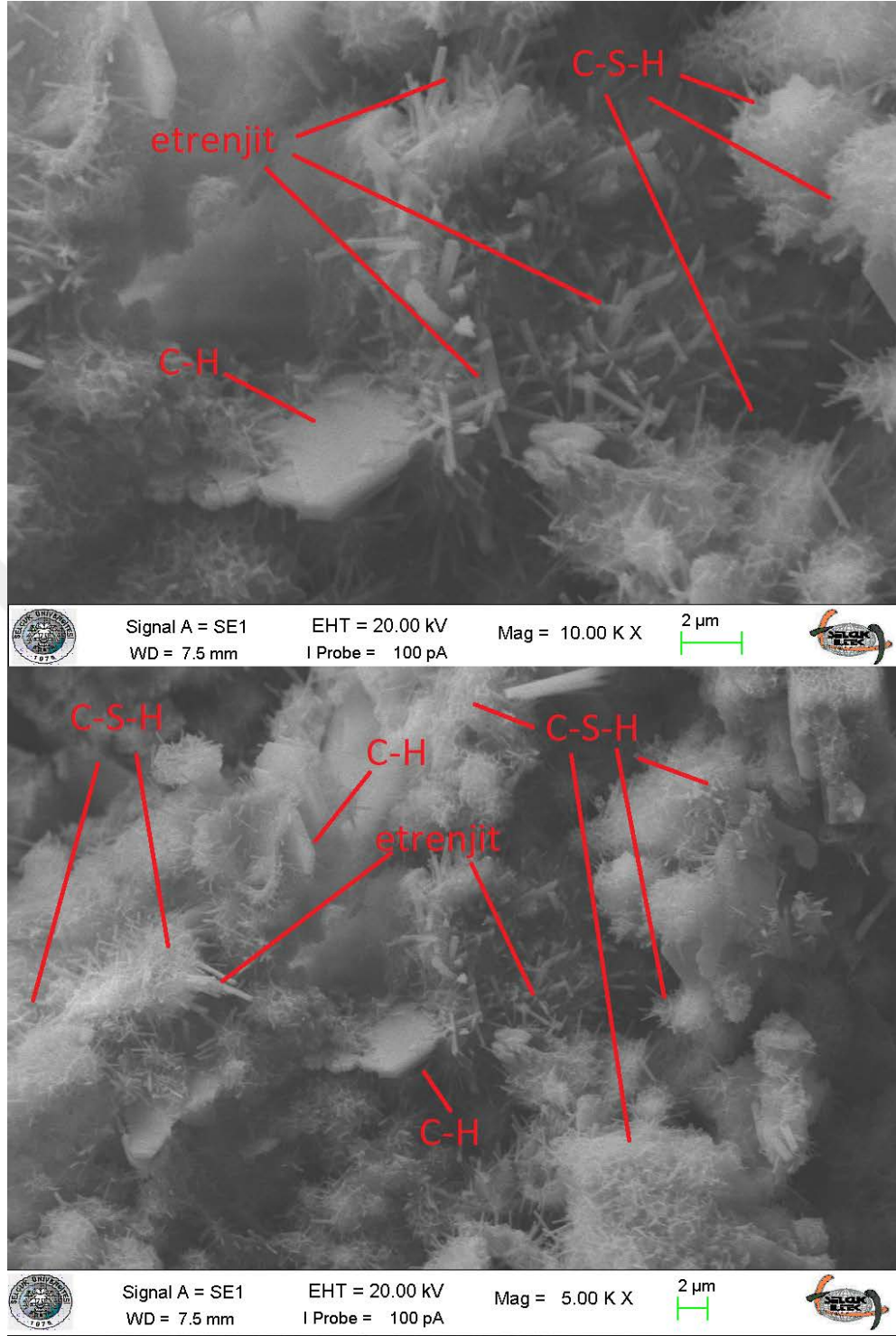
Şekil 4.31. ve Şekil 4.32.'de killi zemin, Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'te ise kumlu zemin ile hazırlanmış küçük ölçekli DKK'dan alınan 5. tasarıma ait SEM görüntüleri görülmektedir. Bu tasarım için 28 günlük kürde killi zeminin serbest basınç mukavemeti 2154 kPa, permeabilite katsayısı $2.68E-08$ m/s bulunmuştur. Yine 28 günlük kür için kumlu zeminin serbest basınç mukavemeti 1923 kPa, permeabilite katsayısı $5.98E-08$ m/s olarak bulunmuştur. Şekiller incelendiğinde çimento oranının yüksek olması sonucu fazla miktarda oluşan C-H ve etrenjit jelleri ile mukavemetin yüksek olmasını sağlayan C-S-H jelleri görülmektedir.



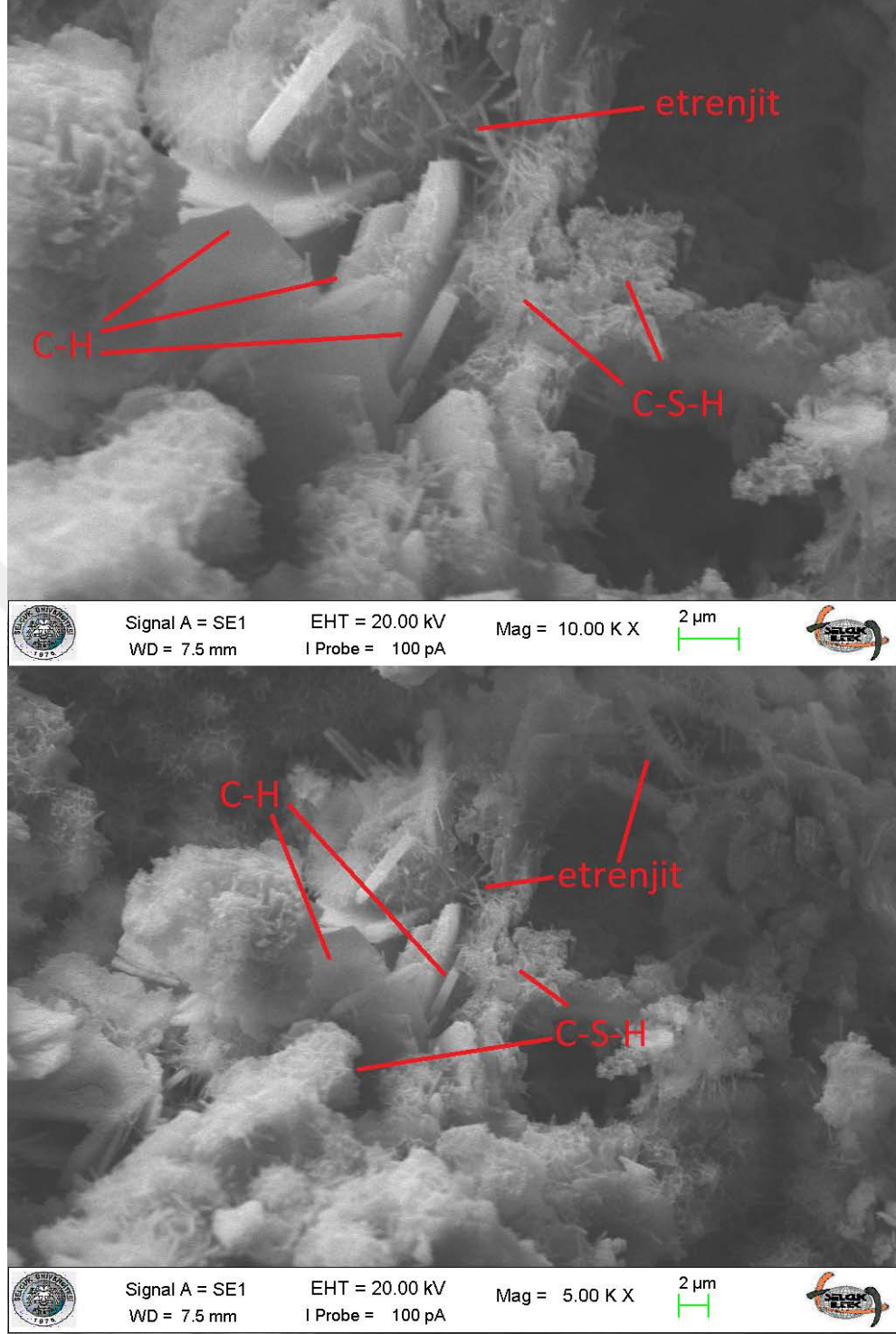
Şekil 4.31. Killi zemin 5. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



Şekil 4.32. Killi zemin 5. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



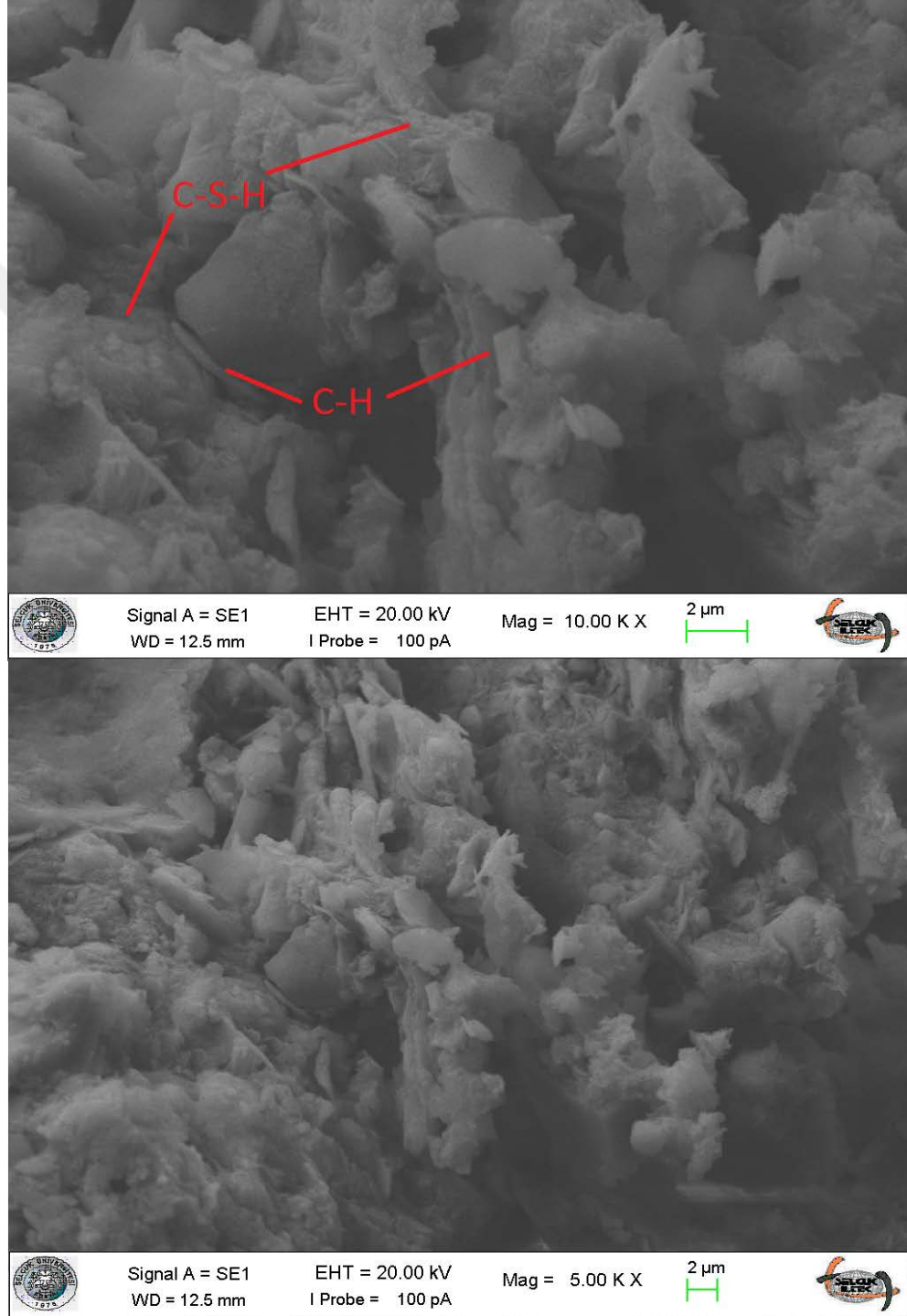
Şekil 4.33. Kumlu zemin 5. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



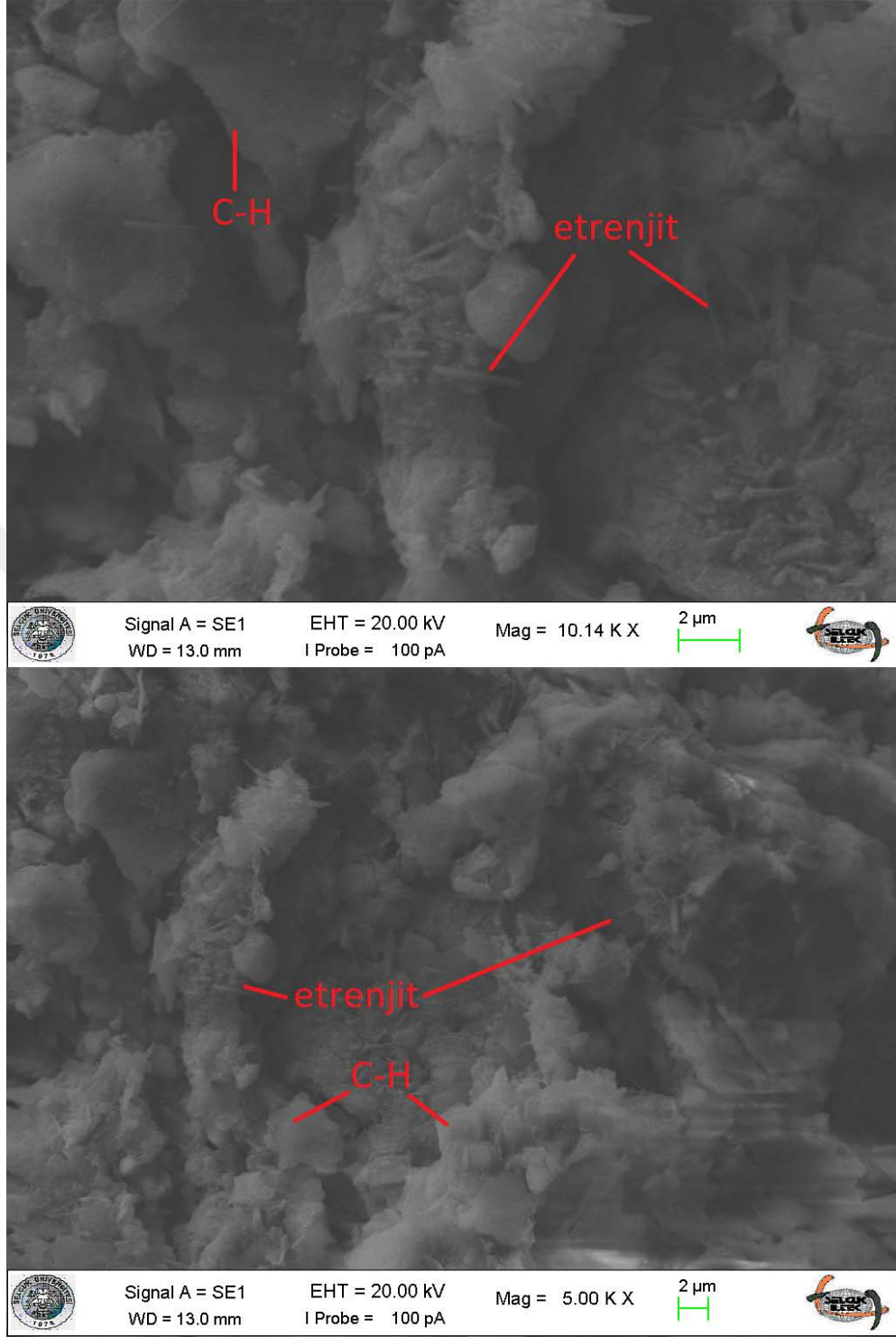
Şekil 4.34. Kumlu zemin 5. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)

Şekil 4.35. ve Şekil 4.36.'da killi zemin, Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'de ise kumlu zemin ile hazırlanmış olan küçük ölçekli DKK'nın 8. tasarımına ait SEM görüntüleri görülmektedir. Bu tasarım için 28 günlük kürde killi zeminin serbest basınç mukavemeti 1063 kPa, permeabilite katsayısı $1.32E-08$ m/s bulunmuştur. Yine 28 günlük kür için kumlu zeminin serbest basınç mukavemeti 330 kPa, permeabilite katsayısı $2.98E-07$ m/s

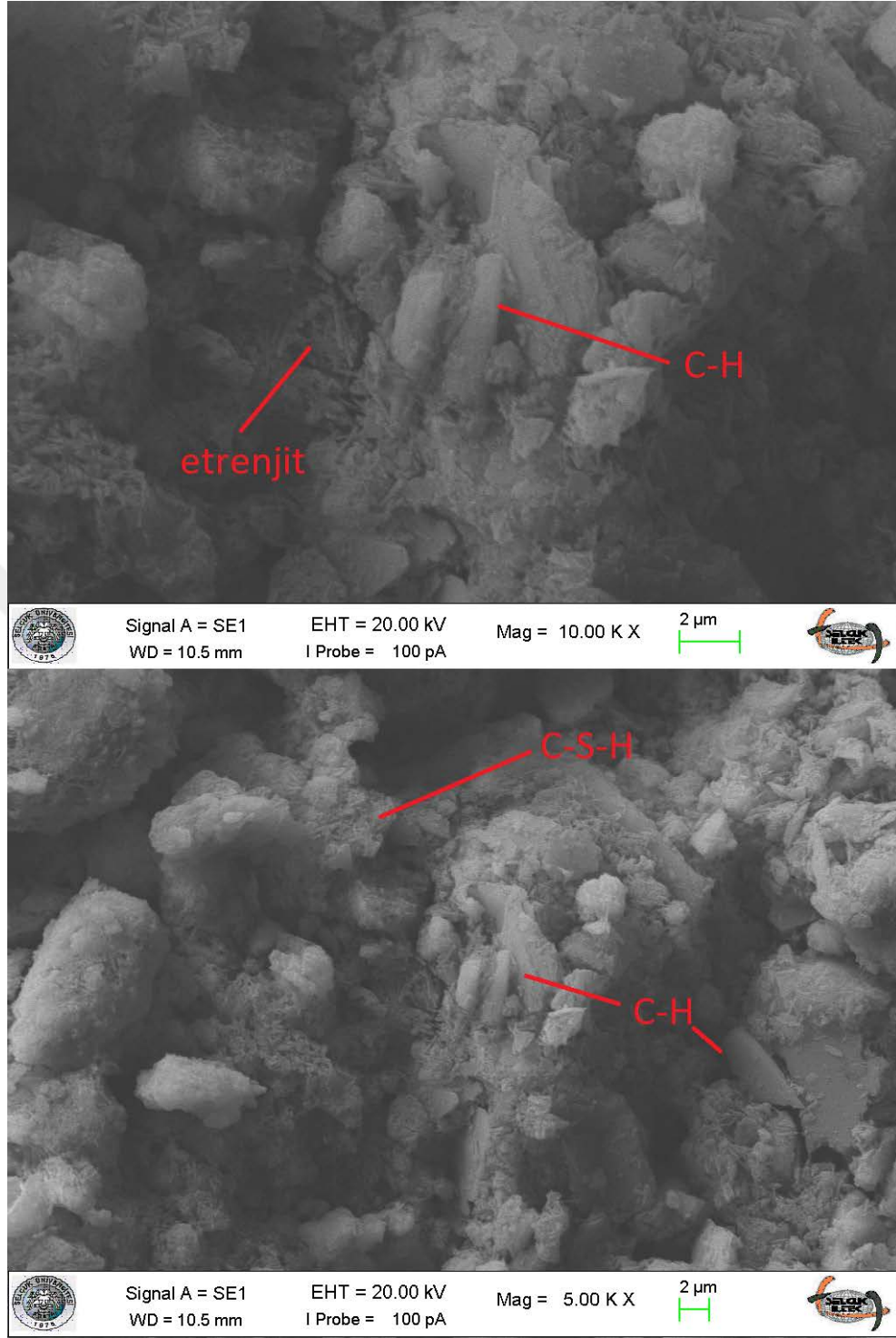
olarak bulunmuştur. Şekiller incelendiğinde çimento oranının düşük ve buna karşılık zeolit oranının yüksek olması sonucu zeolitin çimentoya ikame edilerek katılmasından dolayı karışımdaki çimento miktarı azalmıştır. Bunun sonucunda ise C-H ve etrenjit jelleri ile mukavemetin artmasını sağlayan C-S-H jelleri de fazla miktarda oluşamamıştır. Bu nedenle de dayanımda önemli bir düşüş olmuştur.



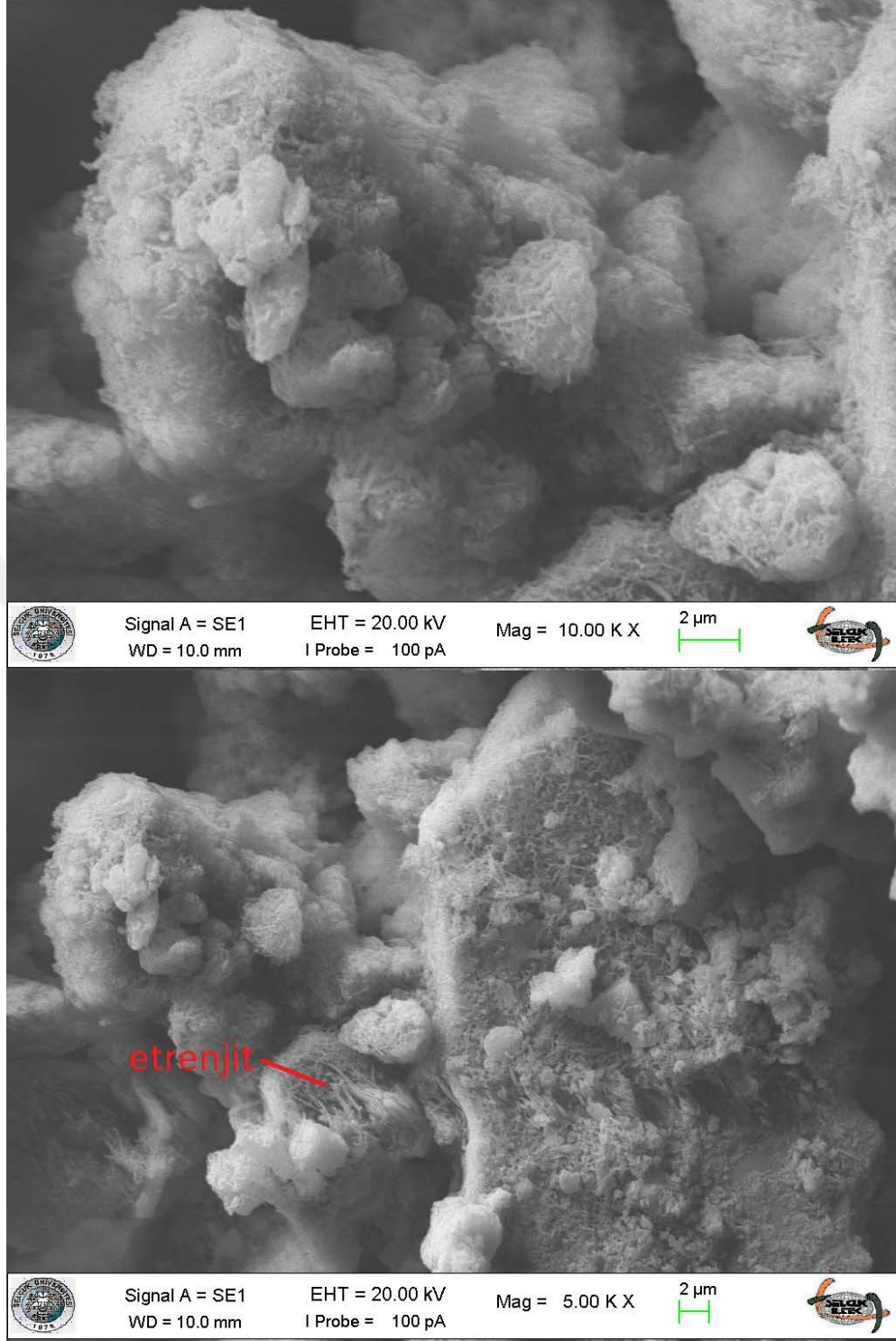
Şekil 4.35. Killi zemin 8. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



Şekil 4.36. Killi zemin 8. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



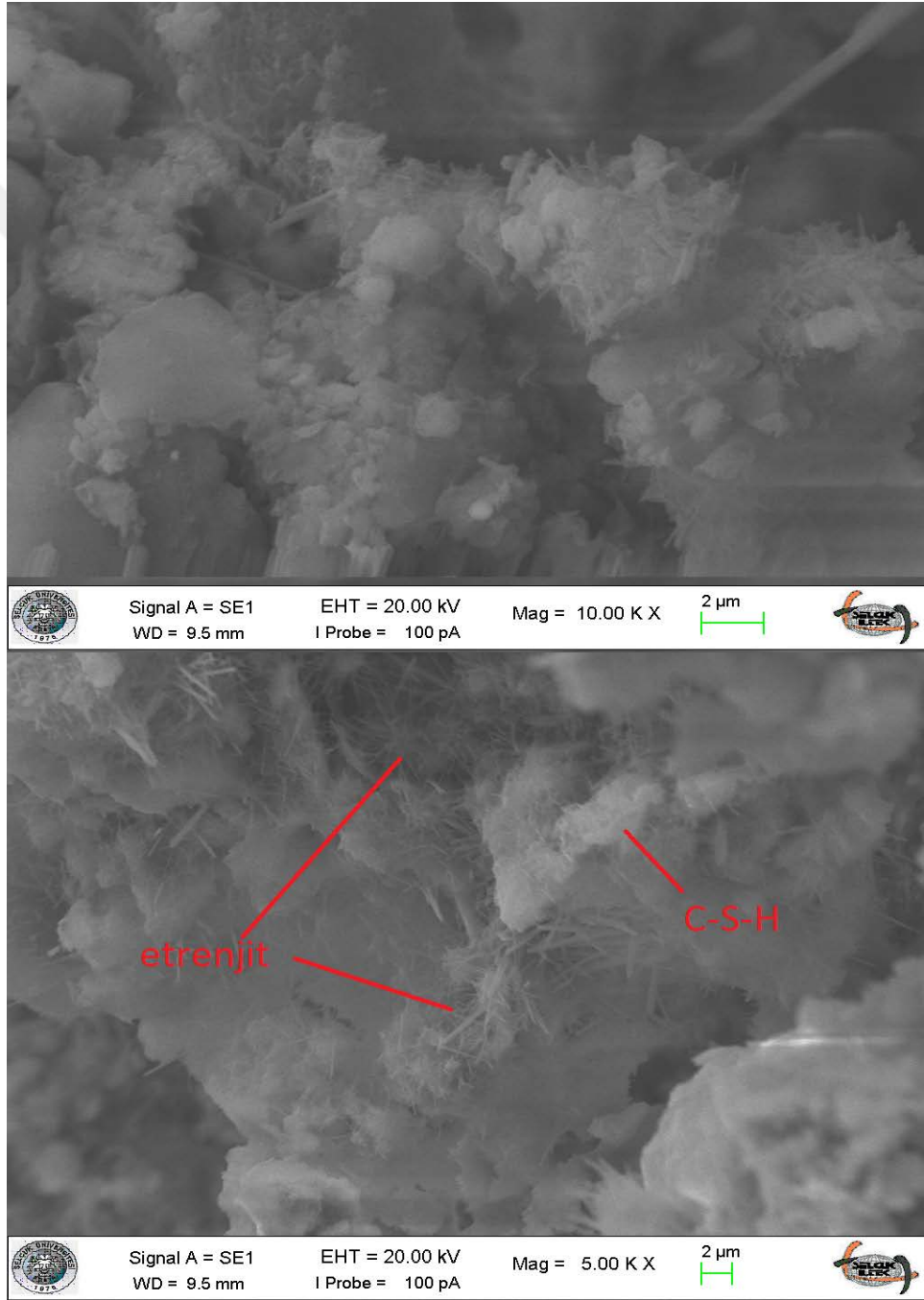
Şekil 4.37. Kumlu zemin 8. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



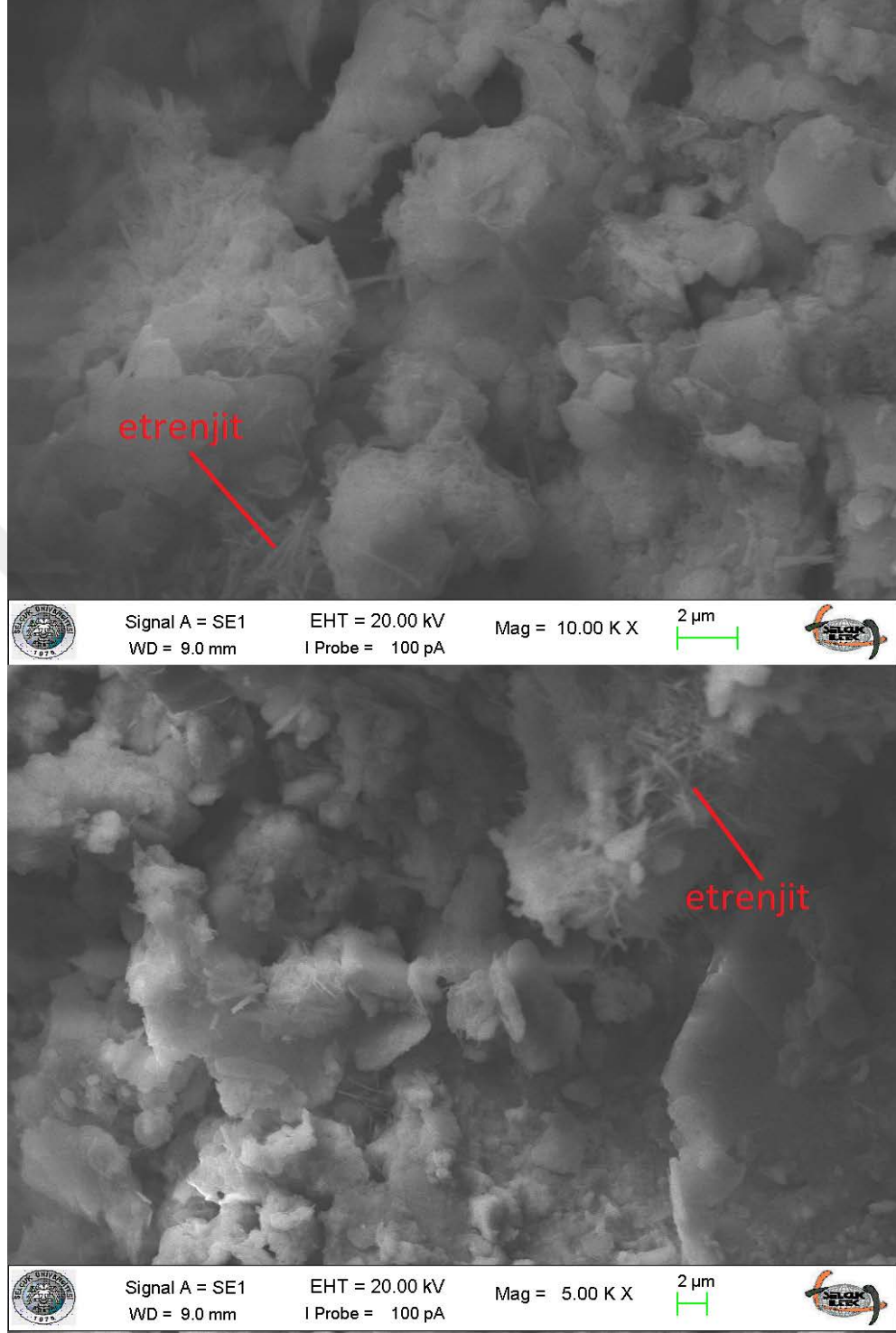
Şekil 4.38. Kumlu zemin 8. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)

Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'ta killi zemin, Şekil 4.41. ve Şekil 4.42.'de ise kumlu zemin kullanılarak hazırlanmış olan küçük ölçekli DKK'nın 14. tasarımına ait SEM görüntüleri verilmiştir. 14 no'lu tasarım için 28 günlük kürde killi zeminin serbest basınç mukavemeti 1121 kPa, permeabilite katsayısı $2.86E-09$ m/s bulunmuştur. Yine 28 günlük kür için kumlu zeminin serbest basınç mukavemeti 753 kPa, permeabilite katsayısı $8.78E-$

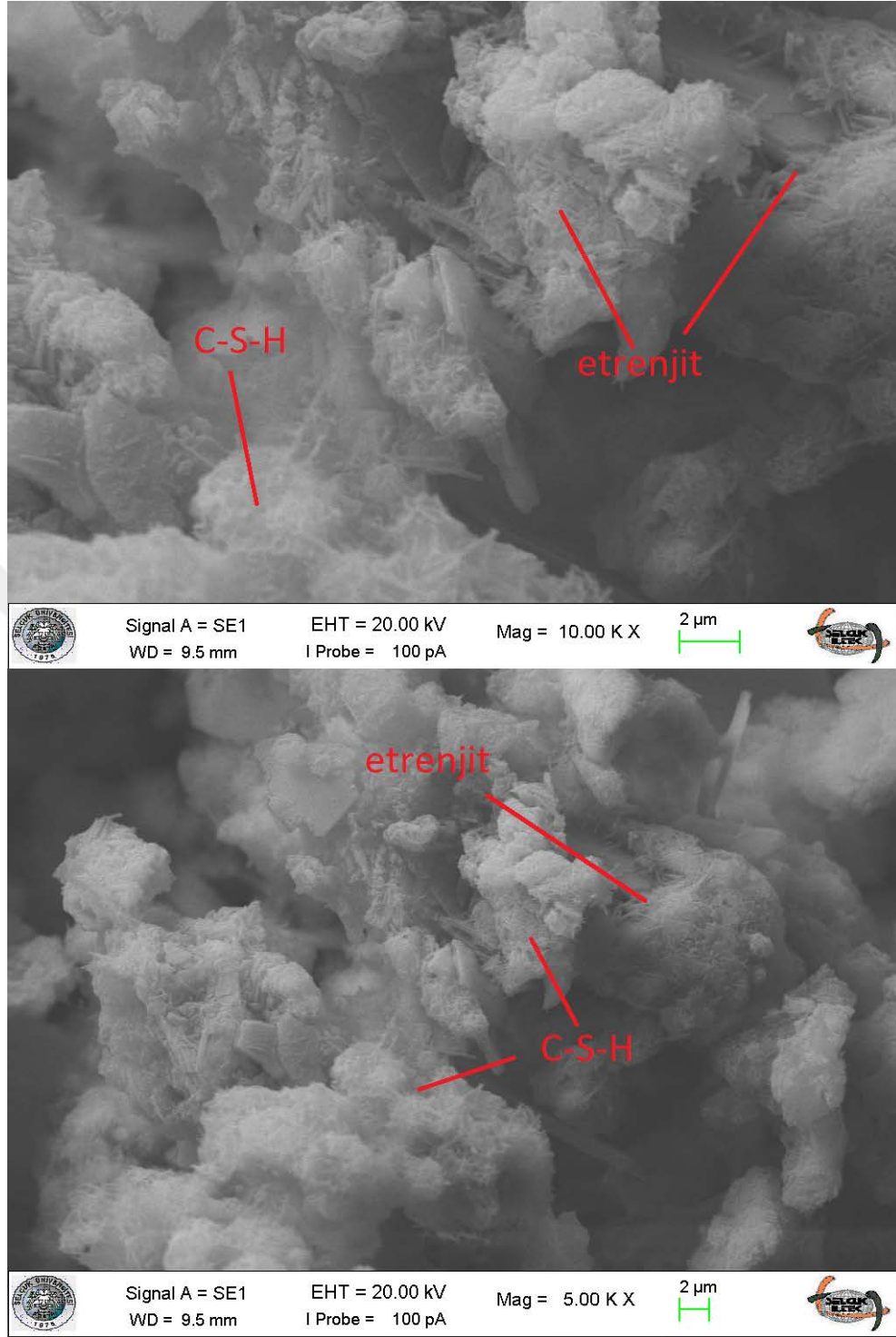
08 m/s olarak bulunmuştur. Şekiller incelendiğinde 14. tasarımda çimento ve zeolit oranının ortalama bir değerde olması sonucu; C-H, etrenjit ve C-S-H jellerinin oluşumunun 8. tasarıma göre daha belirgin hale geldiği ancak 5. tasarıma göre ise daha az olduğu görülmektedir. Bunun doğal sonucu olarak ise bu tasarım için hazırlanan DKK numunesinin q_u değeri, 8 ve 5. tasarımlar için hazırlanan numunelerin q_u değerlerinin arasında bir değer olmuştur. Böylelikle, 14. tasarımın belirlenen optimum tasarıma yakın bir tasarım olduğu tespit edilmiştir.



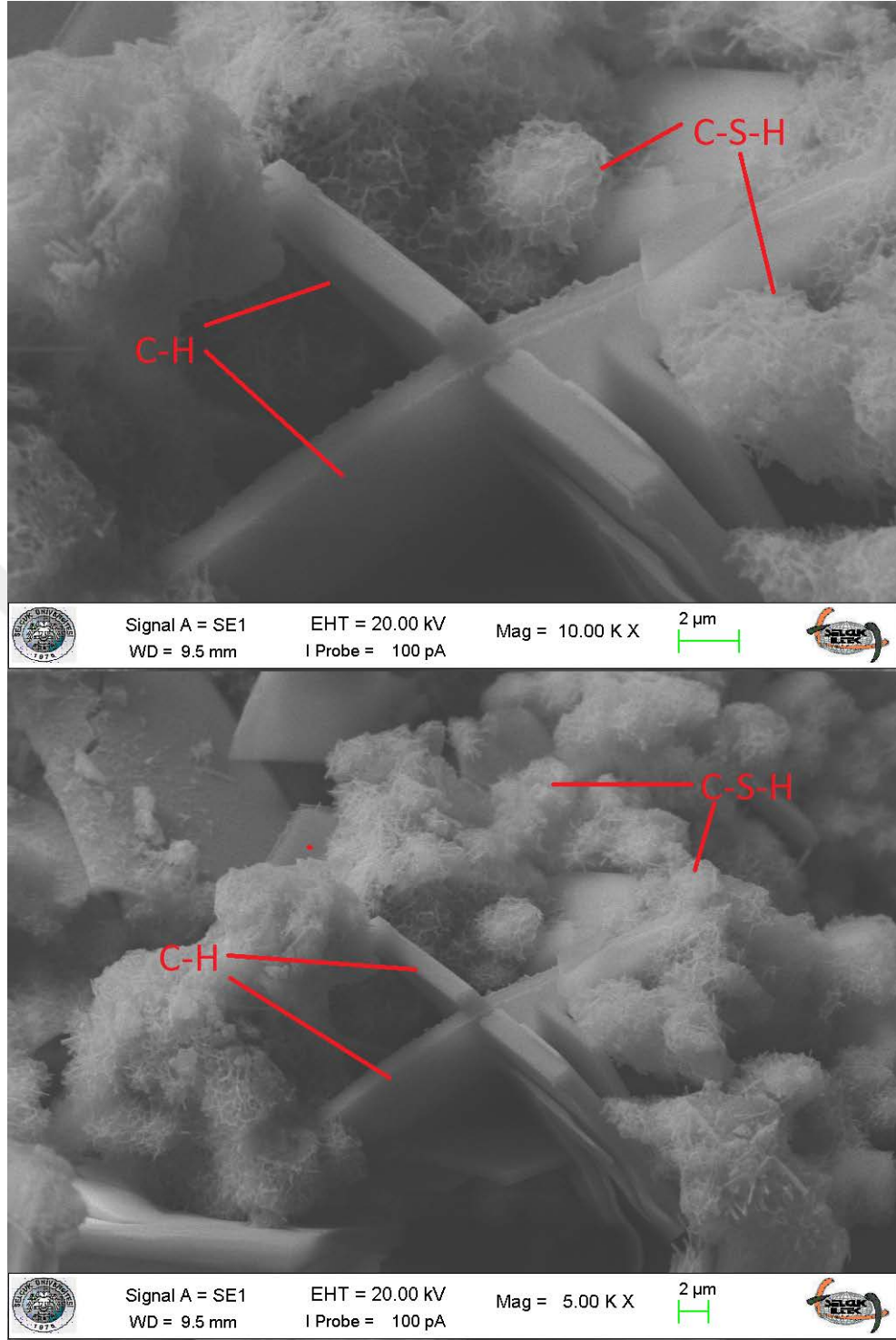
Şekil 4.39. Killi zemin 14. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



Şekil 4.40. Killi zemin 14. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



Şekil 4.41. Kumlu zemin 14. tasarım 1. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)



Şekil 4.42. Kumlu zemin 14. tasarım 2. SEM görüntüsü (10000X ve 5000X yakınlaştırma)

4.3. Optimum Tasarım Deneyleri

Tez çalışması kapsamında hazırlanan deney tasarım tablosuna göre oluşturulan küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç ve permeabilite deney sonuçları Design Expert 11 programı kullanılarak Yanıt Yüzey Yöntemi ile analiz edilmiş ve çalışma koşulları için geçerli bir optimum tasarım bulunmuştur (Çizelge 4.23.).

Çizelge 4.23. Optimizasyon işlemi sonrası belirlenen optimum tasarım oranları

Parametre	Oran
Bağlayıcı miktarı (%)	23.07
Bağlayıcı içerisindeki zeolit miktarı (%)	32.60
Akışkanlaştırıcı katkı miktarı (%)	0.83
Su/bağlayıcı oranı	1.15
Killi zeminde bağlayıcı dozajı (kg/m ³)	278.17
Kumlu zeminde bağlayıcı dozajı (kg/m ³)	344.30

Optimum tasarım deneyleri aşamasında hem killi zemin hem de kumlu zemin kullanılarak hazırlanmış olan DKK için küçük ölçekli serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyi numuneleri hazırlanmış ve 28 gün kürde bekletildikten sonra numuneler üzerinde ilgili deneyler uygulanmıştır. Optimum tasarımlar için hazırlanmış numunelerin deney sonuçları ve optimum tasarımın doğruluk yüzdeleri Çizelge 4.24.'te verilmiştir.

Çizelge 4.24. DKK için optimum tasarım sonuçları ve doğruluk yüzdeleri

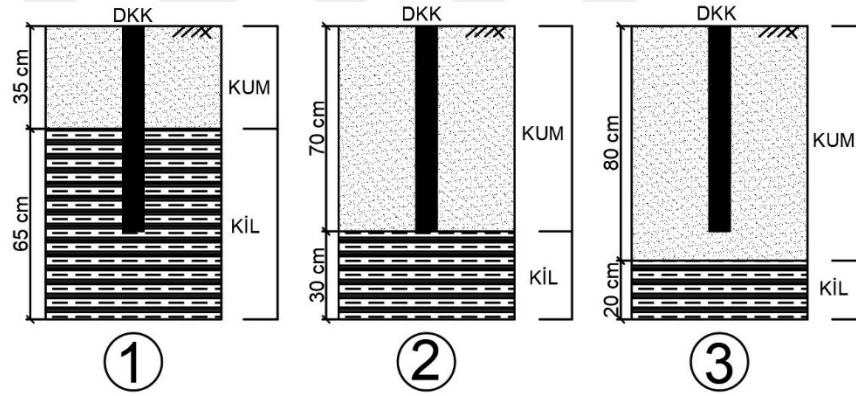
Serbest Basınç Mukavemeti			
Zemin Türü	Analiz Sonucu (kPa)	Deney Sonucu (kPa)	Doğruluk Yüzdesi (%)
Killi Zemin	1553.60	1435.43	92.39
Kumlu Zemin	1100.00	1323.72	83.10
Permeabilite Katsayısı			
Zemin Türü	Analiz Sonucu (m/s)	Deney Sonucu (m/s)	Doğruluk Yüzdesi (%)
Killi Zemin	1.51E-08	1.08E-08	71.49
Kumlu Zemin	8.00E-08	4.53E-08	56.66

Çizelge 4.24. incelendiğinde serbest basınç mukavemeti için killi zeminde %92.39, kumlu zeminde %83.10 doğruluk yüzdesine ulaşılmıştır. Permeabilite katsayısı için ise killi zeminde %71.49, kumlu zeminde %56.66 doğruluk yüzdesine ulaşılmıştır. Permeabilite deneyinin hassas bir deney olması ve permeabilite deneylerinde çok küçük bir gözeneğin bile sonuçlar üzerinde çok önemli miktarda değişikliğe neden olabilmesinden dolayı doğruluk yüzdesi değerleri serbest basınç mukavemeti için elde edilen değerlerden düşük çıkmıştır.

4.4.Büyük Ölçekli Derin Karıştırma Kolonları

4.4.1. Tank İçerisinde Yüklenen Derin Karıştırma Kolonları

Çalışma kapsamında farklı iki zemin tabakası içerisinde imal edilen çapı 7 cm boyu 70 cm olan toplam 3 adet DKK, tank içerisinde yüklemeye tabii tutulmuş ve kolonların taşıma kapasitesi ve oturma miktarları belirlenmiştir. Tank içerisinde kolonları yükleme işlemi bittikten sonra kolonlar tanktan çıkarılarak boy ve çapları ölçülmüştür (Çizelge 4.25.). Ölçümler sonucunda kolonların, planlanan boy ve çaplarda imal edildiği belirlenmiştir. Deney sonuçlarının daha kolay değerlendirilebilmesi için DKK'lar Şekil 4.43.'te gösterildiği gibi numaralandırılmıştır.



Şekil 4.43. DKK'nın imal edildiği tabakalı zeminlerin tank içerisindeki yerleşimi ve yükseklikleri

Çizelge 4.25. İmal edilen DKK'ların uzunlukları ve çapları

Kolon Numarası	1	2	3
Kolonun Toplam Uzunluğu (cm)	70	70	70
Kum Zemin İçerisindeki Kolon Uzunluğu (cm)	36	70	70
Kum Zemin İçerisindeki Kolon Çapı (cm)	8	8	8
Kil Zemin İçerisindeki Kolon Uzunluğu (cm)	34	-	-
Kil Zemin İçerisindeki Kolon Çapı (cm)	7	-	-

Kolon yükleme deneyleri sonucu elde edilen; kolonun taşıma kapasitesi, aynı yük altında yaptığı oturma miktarı, göçme anında yaptığı oturma miktarı, aynı yük altında oluşan aksel birim deformasyon değeri (ϵ), göçme anında aksel birim deformasyon değeri (ϵ) ve elastisite modülü (E) ile kazıkların yük taşıma kapasitesi hesapları sonucu

belirlenen; kolonun sınır taşıma kapasitesi ve taşıyabileceği güvenli yük değerleri Çizelge 4.26.'da toplu bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.26. Kolon yükleme deneyleri toplu sonuçları

Kolon Numarası	1	2	3
<i>Gerçekleşen Taşıma Kapasitesi (N)</i>	1100	2400	2700
<i>Hesaplanan Sınır Taşıma Kapasitesi (N)</i>	1146	473	1278
<i>Hesaplanan Güvenli Yük (N)</i>	459	190	511
<i>Aynı Yük Altında Yaptığı Oturma Miktarı (mm)</i>	2.93	0.97	0.69
<i>Aynı Yük Altında Oluşan Birim Deformasyon (ϵ) (%)</i>	0.42	0.14	0.10
<i>Göçme Anında Oturma Miktarı (mm)</i>	2.93	3.39	3.84
<i>Göçme Anında Birim Deformasyon (ϵ) (%)</i>	0.42	0.48	0.55
<i>Elastisite Modülü (E) (kPa)</i>	79341.82	182488.88	189269.24

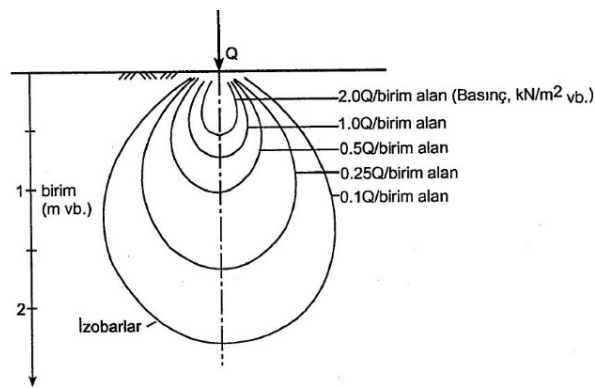
Çizelge 4.26. incelendiğinde, kolonların gerçekleşen taşıma kapasitesi değeri 3 numaralı kolonda en yüksek, 2 numaralı kolonda orta ve 1 numaralı kolonda en düşük olmuştur. DKK için bu şekilde bir taşıma kapasitesi değerlerinin elde edilmesi; 3 numaralı kolonunun uç direncini kumlu zeminden almış olması olarak ifade edilebilir. Yapılan taşıma kapasitesi hesapları sonucunda 3 numaralı kolonun en yüksek taşıma kapasitesine sahip olmasının doğru olacağı sonucuna ulaşılmıştır. 1 numaralı kolonun çevre direncinin yarısını killi zeminden almasından dolayı 2 numaralı kolondan daha yüksek bir taşıma kapasitesine sahip olması beklenmektedir ancak yapılan kolon yükleme deneyleri sonucu 1 numaralı kolon, 2 numaralı kolondan daha düşük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Bu durum; 1 numaralı DKK'nın kum ve kil zemin içerisinde imal edilmiş olması ve zeminlerin birleşim bölgesinden DKK'nın kırılmış olmasından kaynaklanmıştır. Zeminlerin birleşim bölgesi DKK için zayıf bölge olmaktadır. Elastisite modülleri için de DKK için elde edilen taşıma kapasitesi değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

En düşük yük altında göçen 1 numaralı kolonun taşıma kapasitesi değeri (1100N) baz alınarak kolonların aynı yük altında yaptıkları oturma miktarları kıyaslandığında, 1 numaralı kolonda en fazla, 2 numaralı kolonda orta seviye, 3 numaralı kolonda ise en az seviyede oturma oluşmuştur. Bu durumun tank içerisindeki killi zemin yüksekliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Tabakalı zemin yerleşim yüksekliklerine bakıldığında; 1 numaralı tankta 65 cm, 2 numaralı tankta 30 cm ve 3 numaralı tankta ise 20 cm yüksekliğinde killi zemin bulunmaktadır. Kolonun imal edildiği seviyede veya yükleme sonucu oluşan basınç soğanları sınırları içerisinde bulunan killi zemin yüklemeden etkilenecek oturma yapmaktadır. Bu basınç soğanları ise Şekil 4.44.'te görülmektedir.

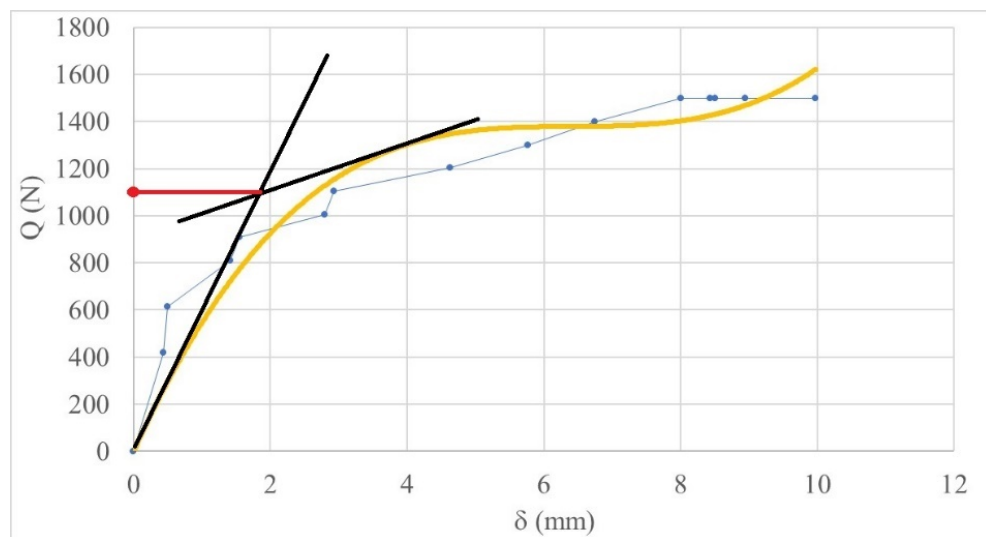
Burada laboratuvar düzeyinde imal edilen tanklar içerisindeki killi zeminlerin bu basınç soğanları içerisinde kalacağı Şekil 4.44.'ten anlaşılmaktadır.

DKK'ların aynı yük altında oluşan birim deformasyon değerleri de yine aynı yük altında yaptığı oturma miktarlarında olduğu gibi killi zemin miktarı ile doğru orantılı olmuştur.

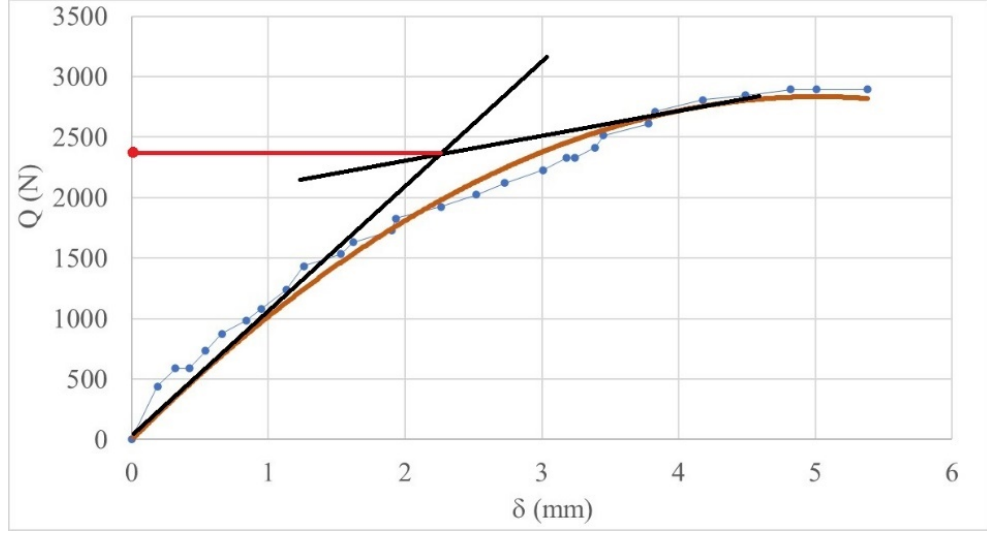
DKK için kolon yükleme deneyleri sonucu elde edilen yük-oturma miktarı (Q- δ) grafikleri Şekil 4.45., Şekil 4.46. ve Şekil 4.47.'de gösterilmiştir. Grafikler üzerinde Teğet Yöntemi ile belirlenen göçme yükü (taşıma kapasitesi) değerleri de işaretlenmiştir.



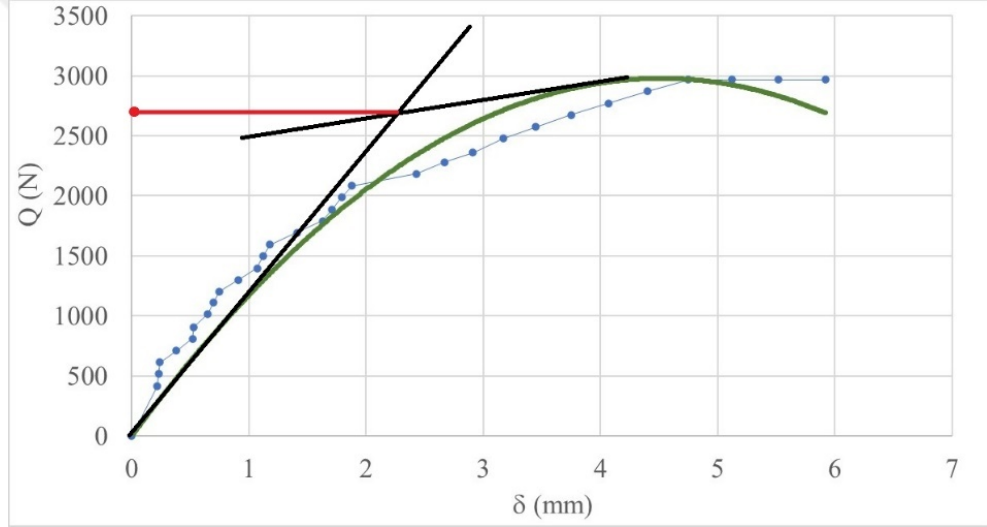
Şekil 4.44. Nokta yük için basınç halkası (Uzuner, 2007)



Şekil 4.45. 1 numaralı kolonun yük-oturma miktarı (Q- δ) grafiği



Şekil 4.46. 2 numaralı kolonun yük-oturma miktarı (Q-δ) grafiği

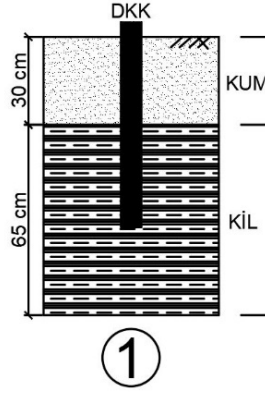


Şekil 4.47. 3 numaralı kolonun yük-oturma miktarı (Q-δ) grafiği

4.4.1.1.DKK'ların Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı

4.4.1.1.1. 1 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı

Çalışma kapsamında imal edilen 1 numaralı kolonun üstten ilk 35 cm'lik kısmı kum zemin içerisinde kalan 35 cm'lik kısmı ise kil zemin içerisinde olmakta ve kolon kil zemin üzerine oturmaktadır. Kolon üzerine yükleme yapabilmek için etrafındaki zemin 5 cm derinliğinde kazılmıştır. Sonuç olarak kolonun üstten 30 cm'lik kısmı kum zemin içerisinde, kalan 35 cm'lik kısmı ise kil zemin içerisinde bulunmaktadır (Şekil 4.48.).



Şekil 4.48. 1 numaralı DKK

1 numaralı kolonun uç direnci; Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi'nden elde edilen kohezyonlu zeminlerde kazık ucu taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılan Eşitlik 4.14. yardımıyla hesaplanmıştır. Sınır yük Eşitlik 4.15. ile ve güvenli yük ise Eşitlik 4.16. ile hesaplanmıştır.

$$q_{\text{sınır}} = 6 \times c \quad (4.14)$$

$$Q_{\text{uç,sınır}} = q_{\text{sınır}} \times A_{\text{uç}} \quad (4.15)$$

$$Q_{\text{uç,güv}} = Q_{\text{uç,sınır}} / G_s \quad (4.16)$$

$q_{\text{sınır}}$: Kolon ucundaki sınır taşıma gücü (kN/m^2)

c : Zeminin kohezyonu (kN/m^2), yumuşak killerde 12-25 kN/m^2 arasında olup bu çalışma kapsamında kullanılan kil için 13 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

N_c, N_q, N_γ : Kazıkların taşıma gücü hesaplarında kullanılan taşıma gücü katsayıları (boyutsuz) olup Çizelge 4.27.'de verilmiştir.

$Q_{\text{uç,sınır}}$: Kolon ucunun taşıyabileceği sınır yük (kN)

$A_{\text{uç}}$: Kolon ucunun kesit alanı (m^2)

$Q_{\text{uç,güv}}$: Kolon ucunun güvenli taşıyabileceği yük (kN)

G_s : Güvenlik katsayısı (2.5)

Çizelge 4.27. Taşıma gücü katsayıları (Das ve Sivakugan, 2014)

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1	0	23	18.05	8.66	8.2
1	5.38	1.09	0.07	24	19.32	9.6	9.44
2	5.63	1.2	0.15	25	20.72	10.66	10.88
3	5.9	1.31	0.24	26	22.25	11.85	12.54
4	6.19	1.43	0.34	27	23.94	13.2	14.47
5	6.49	1.57	0.45	28	25.8	14.72	16.72
6	6.81	1.72	0.57	29	27.86	16.44	19.34
7	7.16	1.88	0.71	30	30.14	18.4	22.4
8	7.53	2.06	0.86	31	32.67	20.63	25.99
9	7.92	2.25	1.03	32	35.49	23.18	30.22
10	8.35	2.47	1.22	33	38.64	26.09	35.19
11	8.8	2.71	1.44	34	42.16	29.44	41.06
12	9.28	2.97	1.69	35	46.12	33.3	48.03
13	9.81	3.26	1.97	36	50.59	37.75	56.31
14	10.37	3.59	2.29	37	55.63	42.92	66.19
15	10.98	3.94	2.65	38	61.35	48.93	78.03
16	11.63	4.34	3.06	39	67.87	55.96	92.25
17	12.34	4.77	3.53	40	75.31	64.2	109.41
18	13.1	5.26	4.07	41	83.86	73.9	130.22
19	13.93	5.8	4.68	42	93.71	85.38	155.55
20	14.83	6.4	5.39	43	105.11	99.02	186.54
21	15.82	7.07	6.2	44	118.37	115.31	224.64
22	16.88	7.82	7.13	45	133.88	134.88	271.76

Uygun değerler Eşitlik 4.14., Eşitlik 4.15. ve Eşitlik 4.16.'da yerine koyularak 1 numaralı kolonun ucunun sınır taşıma gücü, kolon ucunun taşıyabileceği sınır yük ve güvenli yük bulunmuştur.

$$q_{uç,sınır} = 6 \times 13 = 78 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{uç,sınır} = 78 \times 0.004 = 0.31 \text{ kN} = 310 \text{ N}$$

$$Q_{uç,güv} = 0.31/2.5 = 0.125 \text{ kN} = 125 \text{ N}$$

1 numaralı kolonun kum zeminden gelen çevre direnci Eşitlik 4.17. kullanılarak bulunmuştur. Bu çevre direncine karşılık oluşan sınır yük Eşitlik 4.18. kullanılarak ve güvenli yük ise Eşitlik 4.19. kullanılarak bulunmuştur.

$$q_{çevre,sınır} = K_0 \times \sigma'_{v,ort} \times \tan \delta \quad (4.17)$$

$$Q_{çevre,sınır} = q_{çevre,sınır} \times A_{çevre} \quad (4.18)$$

$$Q_{çevre,güv} = Q_{çevre,sınır}/G_s \quad (4.19)$$

$q_{çevre,sınır}$: Kolon çevresinin sınır taşıma gücü (kN/m^2)

K_0 : Yanal zemin basıncı katsayısı ($K_0 = 1 - \sin \phi$)

ϕ : Zeminin içsel sürtünme açısı ($^{\circ}$), orta sıkı kumlarda $\phi = 23-40^{\circ}$ arasında olmaktadır ve bu çalışma kapsamında 35° olarak alınmıştır (Günaydın ve ark., 2014; Karakan ve Ebre, 2020).

$\sigma'_{v,ort}$: Kolon ortasında düşey efektif gerilme (kN/m^2), zemin doygun durumda olup doygun birim hacim ağırlığı (γ_{doy}) 20.11 kN/m^3 ve efektif birim hacim ağırlığı (γ') 10.3 kN/m^3 'tür. Bu durumda kum zemin içerisinde kolon ortasındaki düşey efektif gerilme 1.55 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

δ : Kolon ile zeminin sürtünme açısı ($^{\circ}$), Çizelge 4.28. yardımı ile 35° olarak belirlenmiştir.

$Q_{\text{çevre,sınır}}$: Kolon çevresinin taşıyabileceği sınır yük (kN)

$A_{\text{çevre}}$: Kolon çevresinin alanı (m^2)

$Q_{\text{çevre,güv}}$: Kolon çevresinin güvenli taşıyabileceği yük (kN)

Çizelge 4.28. Kolon-zemin sürtünmesi değerleri (Birand, 2001)

Kazık/Zemin Temas Durumu	Kazık/Zemin Sürtünme Açısı (δ)
Pürüzsüz veya Kaplanmış Çelik/Kum	$0.5\phi' - 0.7\phi'$
Kaba (ondüleli) Çelik/Kum	$0.7\phi' - 0.9\phi'$
Önceden Dökülmüş Beton/Kum	$0.8\phi' - 1.0\phi'$
Yerinde Dökülmüş Beton/Kum	$1.0\phi'$
Ahşap/Kum	$0.8\phi' - 0.9\phi'$
Zemin İçinde Boru Bırakılan Kazıklar	$0.1\phi' - 0.85\phi'$

Uygun değerler Eşitlik 4.17. Eşitlik 4.18. ve Eşitlik 4.19.'da yerine koyulmuş ve 1 numaralı kolonun kum zeminden gelen çevre direnci, bu dirence karşılık oluşan sınır yük ve güvenli yük bulunmuştur.

$$q_{\text{çevre,sınır}} = (1 - \sin(35)) \times 1.55 \times \tan(35) = 0.463 \text{ kN/m}^2$$

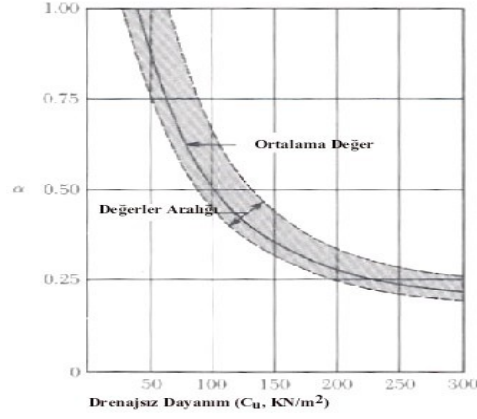
$$Q_{\text{çevre,sınır}} = 0.463 \times 0.075 = 0.035 \text{ kN} = 35 \text{ N}$$

$$Q_{\text{çevre,güv}} = 0.035/2.5 = 0.014 \text{ kN} = 14 \text{ N}$$

1 numaralı kolonun kil zeminden gelen çevre direnci Eşitlik 4.20. kullanılarak bulunmuştur. Bu çevre direncine karşılık oluşan sınır yük Eşitlik 4.18. kullanılarak, güvenli yük ise Eşitlik 4.19. kullanılarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{çevre,sınır}} = \alpha \times c \quad (4.20)$$

α : Adezyon katsayısı olup Şekil 4.49. yardımı ile 0.80 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.49. Adezyon Katsayısı (Birand, 2001)

Uygun değerler Eşitlik 4.20.'de yerine koyulmuş ve 1 numaralı kolonun kil zeminden gelen çevre direnci bulunmuştur. Eşitlik 4.18. ve Eşitlik 4.19. kullanılarak ise sınır yük ve güvenli yük belirlenmiştir.

$$q_{\text{çevre,sınır}} = 0.80 \times 13 = 10.4 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{\text{çevre,sınır}} = 10.4 \times 0.077 = 0.801 \text{ kN} = 801 \text{ N}$$

$$Q_{\text{çevre,güv}} = 0.801/2.5 = 0.32 \text{ kN} = 320 \text{ N}$$

Sonuç olarak 1 numaralı kolonun taşıyabileceği toplam sınır yük Eşitlik 4.21.'de ve güvenli yük Eşitlik 4.22.'de bulunmuştur.

$$Q_{\text{sınır,toplam}} = Q_{\text{uç,sınır}} + Q_{\text{çevre,sınır}} \quad (4.21)$$

$$Q_{\text{güv,toplam}} = Q_{\text{uç,güv}} + Q_{\text{çevre,güv}} \quad (4.22)$$

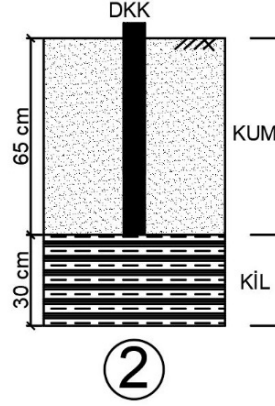
$$Q_{\text{sınır,toplam}} = 0.31 + 0.035 + 0.801 = 1.146 \text{ kN} = 1146 \text{ N}$$

$$Q_{\text{güv,toplam}} = 0.125 + 0.014 + 0.32 = 0.459 \text{ kN} = 459 \text{ N}$$

4.4.1.1.2. 2 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı

2 numaralı DKK, kolon boyunca kum zemin içerisinde bulunmakta ve kolon kil zemin üzerine oturmaktadır. Kolon etrafındaki zemin 5 cm derinliğinde kazılmıştır.

Sonuç olarak kolon 65 cm uzunluğu boyunca kum zemin içerisinde bulunmaktadır (Şekil 4.50.).



Şekil 4.50. 2 numaralı DKK

Kil zemin üzerine oturan 2 numaralı kolonun uç direnci; Eşitlik 4.14. yardımıyla hesaplanmıştır. Sınır yük Eşitlik 4.15. ve güvenli yük ise Eşitlik 4.16. ile hesaplanmıştır.

$$q_{uç,sınır} = 6 \times 13 = 78 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{uç,sınır} = 78 \times 0.004 = 0.31 \text{ kN} = 310 \text{ N}$$

$$Q_{uç,güv} = 0.31/2.5 = 0.125 \text{ kN} = 125 \text{ N}$$

2 numaralı kolonun kum zeminden gelen çevre direnci Eşitlik 4.17. kullanılarak bulunmuştur. Oluşan sınır yük Eşitlik 4.18. ve güvenli yük ise Eşitlik 4.19. kullanılarak bulunmuştur. Burada kum zemin yüksekliği 65 cm olduğu için kolon ortasındaki düşey efektif gerilme 3.35 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

$$q_{çevre,sınır} = (1 - \sin(35)) \times 3.35 \times \tan(35) = 1.00 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{çevre,sınır} = 1.00 \times 0.163 = 0.163 \text{ kN} = 163 \text{ N}$$

$$Q_{çevre,güv} = 0.163/2.5 = 0.065 \text{ kN} = 65 \text{ N}$$

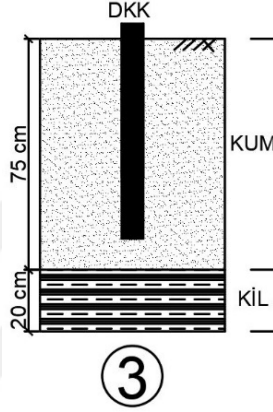
Sonuç olarak 2 numaralı kolonun taşıyabileceği toplam sınır yük Eşitlik 4.21. ile ve güvenli yük Eşitlik 4.22. ile bulunmuştur.

$$Q_{sınır,toplam} = 0.31 + 0.163 = 0.473 \text{ kN} = 473 \text{ N}$$

$$Q_{güv,toplam} = 0.125 + 0.065 = 0.19 \text{ kN} = 190 \text{ N}$$

4.4.1.1.3. 3 numaralı DKK'nın Yük Taşıma Kapasitesi Hesabı

3 numaralı DKK 70 cm uzunluğunda tüm kolon boyunca kum zemin içerisinde imal edilmiştir ve kolonun ucu kum zemine oturmaktadır. Yükleme için kolon etrafı 5 cm kazıldıktan sonra zemin içerisinde 65 cm uzunluğunda kolon bulunmaktadır (Şekil 4.51.).



Şekil 4.51. 3 numaralı DKK

Kum zemine oturan 3 numaralı kolonun uç direnci; Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi'nden elde edilen kohezyonsuz zeminlerde kazık ucu taşıma gücünün belirlenmesinde kullanılan Eşitlik 4.23. yardımıyla hesaplanmıştır. Sınır yükün bulunması için Eşitlik 4.15. ve güvenli yükün bulunması için ise Eşitlik 4.16. kullanılmıştır.

$$q_{\text{sınır}} = P_0' N_q \quad (4.23)$$

$$P_0' = h \times \gamma' \quad (4.24)$$

P_0' : Kolon ucundaki efektif gerilme (kN/m^2)

h : Kolon yüksekliği (m)

γ' : Efektif birim hacim ağırlık (kN/m^3)

$$P_0' = 0.65 \times (20.11 - 9.81) = 6.70 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\text{uç,sınır}} = 6.70 \times 33.3 = 222.94 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{\text{uç,sınır}} = 222.94 \times 0.005 = 1.115 \text{ kN} = 1115 \text{ N}$$

$$Q_{uç,güv} = 1.115/2.5 = 0.446 \text{ kN} = 446 \text{ N}$$

3 numaralı kolonun çevre direnci Eşitlik 4.17. kullanılarak bulunmuştur. Oluşan sınır yük Eşitlik 4.18. ile ve güvenli yük ise Eşitlik 4.19. ile bulunmuştur. Burada 2 numaralı kolonda olduğu gibi kum zemin yüksekliği 65 cm olduğu için kolon ortasındaki düşey efektif gerilme 3.35 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

$$q_{çevre,sınır} = (1 - \sin(35)) \times 3.35 \times \tan(35) = 1.00 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{çevre,sınır} = 1.00 \times 0.163 = 0.163 \text{ kN} = 163 \text{ N}$$

$$Q_{çevre,güv} = 0.163/2.5 = 0.065 \text{ kN} = 65 \text{ N}$$

3 numaralı kolonun taşıyabileceği toplam sınır yük Eşitlik 4.21. ile ve güvenli yük Eşitlik 4.22. ile bulunmuştur.

$$Q_{sınır,toplam} = 1.115 + 0.163 = 1.278 \text{ kN} = 1278 \text{ N}$$

$$Q_{güv,toplam} = 0.446 + 0.065 = 0.511 \text{ kN} = 511 \text{ N}$$

4.4.2. Derin Karıştırma Kolonları Numuneleri

Çalışma kapsamında yarısı kumlu yarısı killi zemin içerisinde imal edilen 30 cm çaplı DKK'dan kür süresi sonunda karot numuneler alınmış ve Serbest basınç deneyleri için boy/çap oranı 2 olacak şekilde, Permeabilite deneyleri için ise 3 cm yüksekliğinde kesilerek gerekli deneyler yapılmıştır.

4.4.2.1. Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi

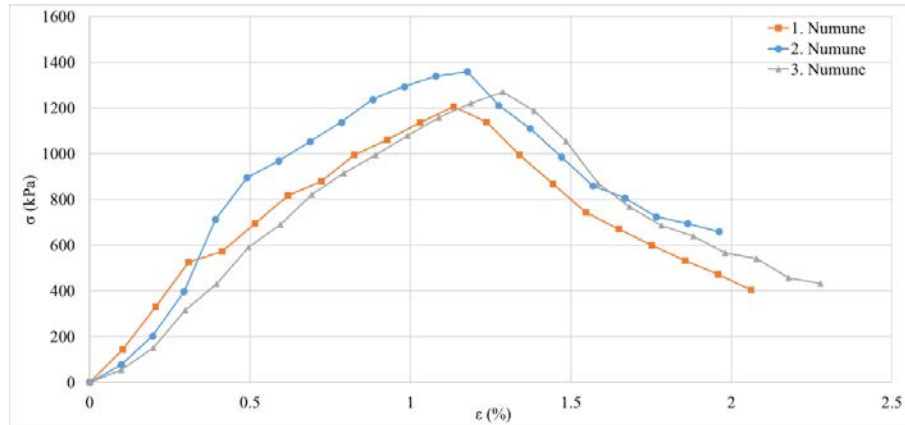
Çalışma kapsamında DKK'dan alınan karot numuneler üzerinde yapılan Serbest Basınç Deneyleri sonucu elde edilen q_u , ε ve E değerleri toplu bir şekilde Çizelge 4.29.'da görülmektedir.

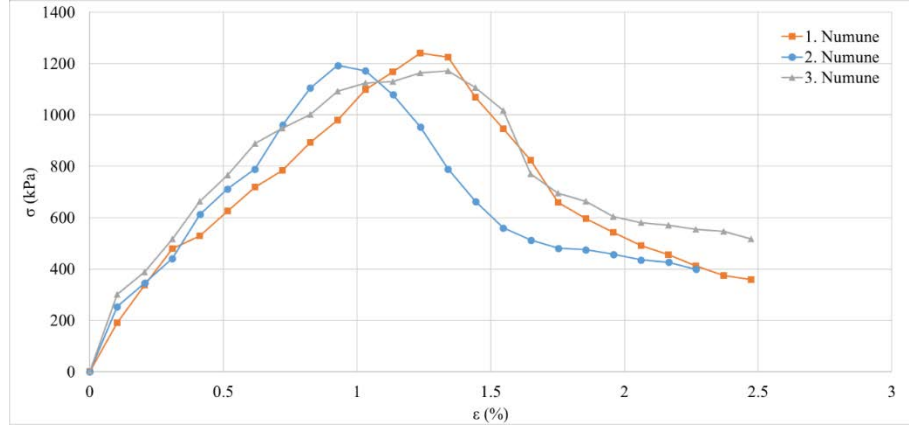
Çizelge 4.29. Karot Numuneler Üzerinde Yapılan Serbest Basınç Deney Sonuçları

Numune Adı	Serbest Basınç Mukavemeti (q_u) (kPa)	Birim Deformasyon (ϵ) (%)	Elastisite Modülü (E) (kPa)
Killi Zemin 1	1204.75	1.13	185384.91
Killi Zemin 2	1359.98	1.18	235204.29
Killi Zemin 3	1270.45	1.29	135554.40
Kumlu Zemin 1	1241.72	1.24	139259.23
Kumlu Zemin 2	1193.13	0.93	116119.70
Kumlu Zemin 2	1171.32	1.34	114090.40
Killi Zemin Ortalama	1278.39	1.20	185381.20
Kumlu Zemin Ortalama	1202.06	1.17	123156.44

Islak derin karıştırma kolonlarının 28 günlük serbest basınç mukavemetinin granüler zeminlerde 0.5 ile 5 MPa, kohezyonlu zeminlerde ise 0.2 ile 2 MPa arasında olmasının kabul edilebileceği ifade edilmiştir (Kaya, 2016). CH killi zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle stabilize edildiği bir çalışmada enjeksiyon dozajı 275 kg/m^3 olarak seçilmiş ve zemin dayanımı 300-500 kPa seviyelerine yükseltilmiştir (Pye ve ark., 2012). Çizelge 4.29.'daki ortalama değer sonuçları incelediğinde laboratuvar düzeyinde granüler zeminde (kumlu zemin) imal edilen DKK'dan alınan karot numunenin serbest basınç mukavemeti 1202 kPa (1.20 MPa), kohezyonlu zeminde imal edilen DKK'dan alınan karot numunenin serbest basınç mukavemeti ise 1278 kPa (1.28 MPa) olarak belirlenmiştir. Bu durumda yapılan imalatın serbest basınç mukavemeti açısından kabul edilebilir sınırlar arasında kaldığı belirlenmiştir.

Deneyler sonucu oluşan gerilme-birim deformasyon grafikleri ise kil zemin kullanılarak hazırlanan DKK için Şekil 4.52.'de, kum zemin kullanılarak hazırlanan DKK için ise Şekil 4.53.'te görülmektedir.

**Şekil 4.52.** DKK numunesi σ - ϵ grafiği (Killi zemin)



Şekil 4.53. DKK numunesi σ - ϵ grafiği (Kumlu zemin)

4.4.2.2. Karot Numuneler Üzerinde Permeabilite Deneyi

Çalışma kapsamında 3 cm yüksekliğinde kesilen karot numuneler üzerinde Permeabilite Deneyleri yapılmış ve bu deneylerin sonuçları toplu bir şekilde Çizelge 4.30.'da verilmiştir.

Çizelge 4.30. Karot numuneler üzerinde Permeabilite Deneyi sonuçları

Numune Adı	Permeabilite Katsayısı (m/s)
Killi Zemin 1	1.80E-08
Killi Zemin 2	9.81E-09
Killi Zemin 3	1.83E-08
Kumlu Zemin 1	5.03E-08
Kumlu Zemin 2	8.69E-08
Kumlu Zemin 2	6.68E-08
Killi Zemin Ortalama	1.54E-08
Kumlu Zemin Ortalama	6.80E-08

Islak yöntemle hazırlanan DKK numuneleri için permeabilite katsayısı 1×10^{-6} ile 1×10^{-9} m/s arasında kabul edilebilmektedir (Kaya, 2016). Çizelge 4.30. incelendiğinde çalışma kapsamında laboratuvar düzeyinde imal edilen DKK'nın permeabilite katsayılarının kabul edilebilir sınırlar arasında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.4.2.3. Küçük Ölçekli DKK-Büyük Ölçekli DKK İlişkisi

Optimum tasarımlı küçük ölçekli DKK numuneleri için elde edilen deney sonuçları, optimum tasarımlı büyük ölçekli DKK karot numuneleri için elde edilen deney sonuçları ve bu sonuçların birbirleri ile uyumluluğu Çizelge 4.31.'de verilmiştir. Çizelge 4.31. incelendiğinde serbest basınç mukavemeti için killi zeminde %89.06, kumlu zeminde %90.81 ve permeabilite katsayısı için killi zeminde %70.23, kumlu zeminde ise %66.69 oranında uyumluluk sağlanmıştır.

Çizelge 4.31. Küçük ölçekli DKK - büyük ölçekli DKK arası ilişki

Serbest Basınç Mukavemeti			
<i>Zemin Türü</i>	<i>Küçük Ölçekli DKK (kPa)</i>	<i>Büyük Ölçekli DKK (kPa)</i>	<i>Doğruluk Yüzdesi (%)</i>
Killi Zemin	1435.43	1278.39	89.06
Kumlu Zemin	1323.72	1202.06	90.81
Permeabilite Katsayısı			
<i>Zemin Türü</i>	<i>Küçük Ölçekli DKK (m/s)</i>	<i>Büyük Ölçekli DKK (m/s)</i>	<i>Doğruluk Yüzdesi (%)</i>
Killi Zemin	1.08E-08	1.54E-08	70.23
Kumlu Zemin	4.53E-08	6.80E-08	66.69

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında tabakalı zemin ortamında klinoptilolit türü zeolit puzolanik katkısı kullanılarak oluşturulan DKK'nın mukavemet ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında killi ve kumlu olmak üzere iki farklı zemin türü, zeolit puzolanik katkısı ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. DKK'nın imal edilmesinde 4 farklı parametrenin (çimento miktarı, zeolit miktarı, akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarı ve su/bağlayıcı oranı) optimizasyonunu yapabilmek için 17 tasarımdan oluşan bir deney tasarım tablosu kullanılmıştır.

Belirlenen tasarım tablosunda her deney tasarımı için Marsh Hunisi deneyleri yapılarak bütün tasarımlar için enjeksiyonların akma sürelerinin kabul edilebilir sınırlar arasında olduğu doğrulanmış ve parametre sınır değerlerinde değişim yapılmaya gerek kalmadan deney tasarım tablosuna kesin olarak karar verilmiştir. Bu aşamadan sonra deney tasarım tablosuna göre; hem kil hem de kum zemin kullanılarak hazırlanan küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda Serbest Basınç deneyleri ve Permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının farklılığını ortaya koyabilecek olan numunelerden 6 tanesi üzerinde SEM analizleri yapılmıştır.

Serbest Basınç Deneyi ve Permeabilite Deneyi sonuçları Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak analiz edilmiş, arazi uygulamalarında belirlenen sınır koşulları arasında kalmak koşulu ile bir optimum tasarım belirlenmiştir. Optimum tasarım parametreleri kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları analizle tahmin edilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Optimum tasarım parametreleri kullanılarak üst tabakada kumlu zemin, alt tabakada killi zemin olacak şekilde, farklı tabakalanma yüksekliklerinde model tanklar içerisinde 3 adet 7 cm çaplı DKK, 1 adet ise yine üst tabakada kumlu zemin ve alt tabakada killi zemin olacak şekilde ve karot numune alınmak üzere 1 adet 30 cm çaplı DKK imal edilmiştir. Tank içerisinde yüklenmek üzere imal edilen DKK'lar kür süresi sonunda düşey olarak yüklenmiş ve DKK'ların taşıyabildiği düşey yük ve bu yüke karşılık gösterdikleri oturma miktarları belirlenmiştir. Yükleme tamamlandıktan sonra kolonlar tank içerisinden çıkarılmış ve boy ve çap uzunlukları ölçülmüştür. Ölçümlerin sonucunda hedeflenen boy ve çapta DKK'ların imal edilebildiği belirlenmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında yapılan Marsh Hunisi Deneyi sonuçlarına göre; çimento ve zeolit artmasının enjeksiyon karışımının akma süresini artırdığı, çimento ve zeolit miktarının maksimum ve su/bağlayıcı oranı ile akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarının minimum olduğu durumda bile 40 s akma süresi elde edildiği (kabul edilebilir akma süresi 70-100 s) ve tasarımlarının kıvamı açısından bir sorun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan mukavemet deney sonuçlarına göre; çimento miktarının artması beklenildiği gibi serbest basınç mukavemetini artırmakta, su/bağlayıcı oranının artması mukavemet değerini azaltmaktadır. Çalışmada kullanılan klinoptilolit türü zeolit ikame şeklinde kullanılmasıyla serbest basınç mukavemetinde bir miktar azalma olmasına rağmen, mukavemet için kabul edilebilir sınır değerlerin içerisinde mukavemet elde edilebileceği belirlenmiştir.

Serbest Basınç Deneyleri sonucu elde edilen elastisite modülü değerleri (E) çimento miktarının artmasıyla artmış, ancak zeolit miktarı, akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve su/bağlayıcı oranının artması ile azalmıştır.

Permeabilite Deney sonuçlarına göre; çimento miktarının artmasıyla numune içerisinde tanecikler arasında oluşan bağlar artmakta, zeminin daha sert ve sıkı bir yapı kazanmasıyla permeabilite katsayısında azalmalar oluşmaktadır. Zeolit miktarının artması, permeabilite katsayısında bir miktar bir artışa neden olmuş ancak maksimum zeolit içerikli durumda da geçirimsizlik katsayısı istenilen sınır değerleri arasında kalmıştır. Zeolit boşluklu yapısının bu artışın nedeni olduğu düşünülmektedir, ancak zeolit geçirimsizlik açısından bir sorun oluşturmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Killi zeminlerle hazırlanan küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan Permeabilite deney sonuçlarının analizi sonucu oluşan grafikler incelendiğinde su/bağlayıcı oranının 1.3 seviyelerinde olduğu durumda en düşük permeabilite katsayısı değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir. Bu su/bağlayıcı değerinden uzaklaştıkça ise zeminin boşluk oranında artış meydana geleceğinden permeabilite katsayısında artış olmaktadır.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların Yanıt Yüzey Yöntemi ile analiz edilmesi sonucu elde edilen optimum tasarım numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar analiz sonuçlarıyla uyumlu olmuştur. Serbest Basınç Deneyi için killi zeminle oluşturulmuş DKK'da %92, kumlu zeminle oluşturulmuş DKK'da %83 ve Permeabilite Deneyi için ise sırasıyla %71 ve %57 doğruluk yüzdesine ulaşılmıştır.

Çalışma kapsamında elde edilen SEM görüntüleri, optimum miktarda zeolitin çimento yerine ikame edilmesiyle mukavemet ve permeabilite özellikleri açısından yeterli olabilecek C-H, C-S-H ve etrenjit jellerinin oluşabileceğini göstermiştir. SEM analizi görüntüleri, DKK numuneleri için elde edilen mukavemet ve geçirimsizlik deney sonuçlarıyla uyum göstermiştir.

Optimum tasarım parametreleri kullanılarak tabakalı zemin ortamında oluşturulan DKK'nın yüklenmesi sonucu kolonların taşıyabildiği maksimum yükler kıyaslandığında kumlu zemin içerisinde imal edilmiş ve ucu kuma oturan kolonun en fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Yine kumlu zemin içerisinde imal edilmiş ancak ucu kile oturan kolonun ise orta seviyede yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Yarısı kumlu zemin yarısı killi zemin içerisinde imal edilmiş ve ucu kile oturan kolonun ise orta seviyede yük taşıma kapasitesine sahip olması beklenirken bu kolon en az yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Bu durumun nedeninin ise kumlu ve killi zeminin birleşim bölgesinin DKK için zayıf bölge olması ve kolonun bu bölgeden kırılması olduğu belirlenmiştir. DKK'ların yüklenmesi sonucunda tank içerisindeki killi zeminin yüksekliğinin artmasıyla DKK'nın daha fazla oturma yaptığı belirlenmiştir.

Büyük ölçekli DKK'dan alınan karot numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda belirlenen serbest basınç mukavemeti ve permeabilite katsayısı değerlerinin kabul edilebilir sınırlar arasında olduğu tespit edilmiştir.

Küçük ölçekli DKK numuneleri ile büyük ölçekli DKK'dan alınan karot numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları incelendiğinde serbest basınç mukavemeti için kil zeminde %89, kum zeminde %91 ve permeabilite katsayısı için kil zeminde %70, kum zeminde ise %67 oranında uyumluluk sağlandığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak klinoptilolit türü zeolitin mukavemeti bir miktar azalttığı ve permeabiliteyi ise bir miktar artırdığı ancak bu azalış ve artış sonucunda hem mukavemette hem de permeabilitede istenilen ve kabul edilebilir değerler arasında kaldığı tespit edilmiştir. Klinoptilolit türü zeolitin permeabilite açısından bir sorun oluşturmadığı ancak yüksek mukavemet istenilen yerlerde kullanımında dikkatli olunması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

5.2.Öneriler

Çalışma kapsamında kullanılan klinoptilolit türü zeolitin çimentoya ikame miktarının artması zeminin mukavemetinde azalmalara sebep olmuş ve zeminin geçirimsizliğini bir miktar artırmıştır. Ancak bu etkiler sonucu serbest basınç mukavemeti ve permeabilite katsayısı açısından kabul edilebilir sınırlar arasında kalmıştır. Yapılacak imalata göre bu tür zeolitin, proje için hedeflenen serbest basınç mukavemeti ve permeabilite katsayısı değerlerine ulaşmak koşulu ile filtrasyon gibi farklı özelliklerinin de önemli olabileceği uygulamalarda kullanılabileceği ve bu doğrultuda çalışmaların yapılıp uygulanabilirliğinin araştırılması önerilmektedir.

Çimentonun imalatı ekolojik olarak zararlı olmakla beraber yüksek maliyetlidir. Üretimi sırasında CO₂, NO₂ ve SO₃ gibi zararlı gazların açığa çıkması ise doğayı ciddi oranda tahrip etmektedir. Bu sebepten dolayı çimentonun kullanımının mümkün olduğunca azaltılması, doğa ve ekonomi için çok daha faydalı olmaktadır. Bu kapsamda yüksek mukavemet beklenmeyen imalatlarda çimentonun yerine yaklaşık %30'luk ikame oranıyla doğal ve doğaya zararı olmayan klinoptilolit türü zeolitin kullanılabileceği belirlenmiştir.

Doğal bir zeolit olan klinoptilolit zeminine ilave edilerek oturma, sıvılaşma gibi diğer zayıf zemin problemlerinin çözülmesinde kullanılabirliğinin yeni çalışmalar ile araştırılması önerilmektedir. Bu gibi amaçlarla kullanılabirir olması durumunda hem ekonomik hem de ekolojik açıdan daha olumlu imalatların gerçekleşmesi, ülke ekonomisine ve doğamıza katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Alku, Y., 2006, Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi İle İlgili Bir İnceleme'', Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Andromalos, K. B. ve Bahner, E. W., 2003, The application of various deep mixing methods for excavation support systems, *In: Grouting and Ground Treatment*, Eds, 515-526.
- ASTM C128, 2015, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *ASTM*, USA.
- ASTM C136/C136M-19, 2019, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *ASTM*, USA.
- ASTM D2166, 2016, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, 3-4, *ASTM*, USA.
- ASTM D4318, 2017, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, *ASTM*, USA.
- ASTM D5084 – 16a, 2016, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, 9-11, 2016, *ASTM*, USA.
- ASTM D6910/D6910M-19, 2019, Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Construction Slurries, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Aydemir, B., Elmas, B. S. ve Ayan, E., 2019, Çekme Deneyinde Elastisite Modülü Hesap Yöntemleri ve Hata Kaynakları, *4th International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019)*, 597-603, Antalya, Türkiye.
- Bagherinia, M., 2019, Derin Karıştırma Yöntemi ile Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Biyopolimer ve Bazik Kimyasallar Kullanılarak İyileştirilmesi'', Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Bhadriraju, V. ve Puppala, A., 2008, Laboratory Procedure to Obtain Well-Mixed Soil Binder Samples of Medium Stiff to Stiff Expansive Clayey Soil for Deep Soil Mixing Simulation, *Geotechnical Testing Journal*, 31(3).
- Bilgin, Ö. ve Kantarcı, S., 2018, Bigadiç (Balıkesir, Türkiye) civarında gözlenen höylandit/klinoptilolit zeolit oluşumlarının teknolojik özelliklerinin incelenmesi *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, Şırnak, Türkiye, 20(1), 589-601.
- Birand, A., 2001, Kazıklı Temeller, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Bruce, D. A. ve Bruce, M. E. C., 2003, The practitioner's guide to deep mixing, *In: Grouting and Ground Treatment*, Eds, 474-488.

- BS 1377:2, 1990, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests, *British Standards Institution*, UK.
- CHRYSO Optima 100, Uzun Süre Kıvam Koruyan / Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı Teknik Bilgi Föyü, *CHRYSO-KAT KATKI MALZEMELERİ SAN. VE TİC. A.Ş.*, Kocaeli.
- Das, B., 1984, Principles of foundation engineering, Brooks/Cole Engineering division, Monterey, California.
- Das, B. ve Sivakugan, N., 2014, Introduction to Geotechnical Engineering, 263, USA.
- Day, S. R. ve Ryan, C.R., 1995, Containment, Stabilization and Treatment of Contaminated Soils Using In-Situ Soil Mixing. *Geo Environment 2000 Conference*, 1-15, Los Angeles.
- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y. ve Zhang, D., 2015, Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution, *Engineering Geology*, 193, 146–152.
- Eren, İ., 2004, Patateslerin Osmotik Dehidrasyonunun ‘‘Response Surface’’ Metodu Kullanılarak Optimizasyonu’, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Esmaili, M., Gharouni-Nik, M. ve Khajehei, H., 2014, Evaluation of Deep Soil Mixing Efficiency in Stabilizing Loose Sandy Soils Using Laboratory Tests, *Geotechnical Testing Journal*, 37(5), 817-827.
- Frikha, W., Zargayouna, H., Boussetta, S. ve Bouassida, M., 2017, Experimental Study of Tunis Soft Soil Improved by Deep Mixing Column, *Geotech Geol Eng*, 35:931–947.
- Gerengi, H., Kurtay, M. ve Durgun, H., 2015, Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 1 m HCl Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu, *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara, 221-225.
- Gülen, J., Zorbay, F. ve Arslan, S., 2012, Zeolitler ve Kullanım Alanları, *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 2(1), 63-68.
- Günaydın, O., Alpyıldız, S. ve Akkuş, Ç., 2014, SP (Kötü Derecelenmiş Orta-İnce Kum) Zeminlerde Kesme Hızının Kesme Direnci Parametreleri Üzerine Etkisi, *Selçuk Üniversitesi, Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, Konya.
- Hausmann, M. R., 1990, Engineering principles of ground modification, *McGraw-Hill*, New York.
- Jacobson, J. R., Filz, G. M. ve Mitchell, J. K., 2003, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *Virginia Center for Transportation Innovation and Research*.

- Japonya Geoteknik Birliği (Japanese Geotechnical Society), 2000, "Practice for making and curing stabilized soil specimens without compaction", Vol. 5, Chapter 7 (JGS 0821-2000).
- Karakan, E. ve Ebren, Z., 2020, Kuru Kumlarda Dane Çapı Dağılımının İçsel Sürtünme Açısına Etkisinin Kesme Kutusu Deneyleri ile Belirlenmesi, *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), İğdır.
- Kaya, Z., 2016, Derin Karıştırma Kolonlarının Ölçülen ve Hesaplanan Kapasitelerinin Tam Ölçekli Yükleme Deneyleri ile İncelenmesi'', Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Kılıç, H. O., 2013, Derin Karıştırma Yöntemi Tasarım ve Uygulaması'', Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Kılınçarslan, Ş., 2008, Zeolit İçeren Betonların Termomekanik Özellikleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 262-267.
- Kocabıyık, A., 2018, Derin Karıştırma (Deep Mixing) ile Taş Kolon Zemin İyileştirme Metotlarının Karşılaştırılması'', Uzmanlık Tezi, *İller Bankası Anonim Şirketi*, Ankara.
- Koç, B. ve Kaymak-Ertekin, F., 2009, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları, *Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü*, İzmir, 2.
- Köktürk, U., 1995, Zeolit Madenciliği ve Çevre Sağlığına Etkileri, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kurt, H. ve Arık, F., 2015, Mineraloji, *Nobel Akademik Yayıncılık*.
- Madhyannapu, R. S. ve Puppala, A. J., 2014, Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(9).
- Madhyannapu, R.S, Puppala, A.J, Bhadriraju, V. ve Nazarian, S., 2009, Deep soil mixing (DSM) treatment of expansive soils, *Us-China Work Shop on Ground Improvement Technologies, Asce*, 130-139.
- Maghsoudloo, A. ve Can, A., 2014, Derin Karıştırma Yöntemi ile Taşıma Kapasitesi Güçlendirmesine Bir Örnek: (Van, Türkiye). *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On beşinci Ulusal Kongresi Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, 689-698.
- MTA, Türkiye'deki Zeolit Yatakları Haritası, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, URL: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/zeolit.jpg
- MTA, Zeolit, Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü, URL: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/zeolit>

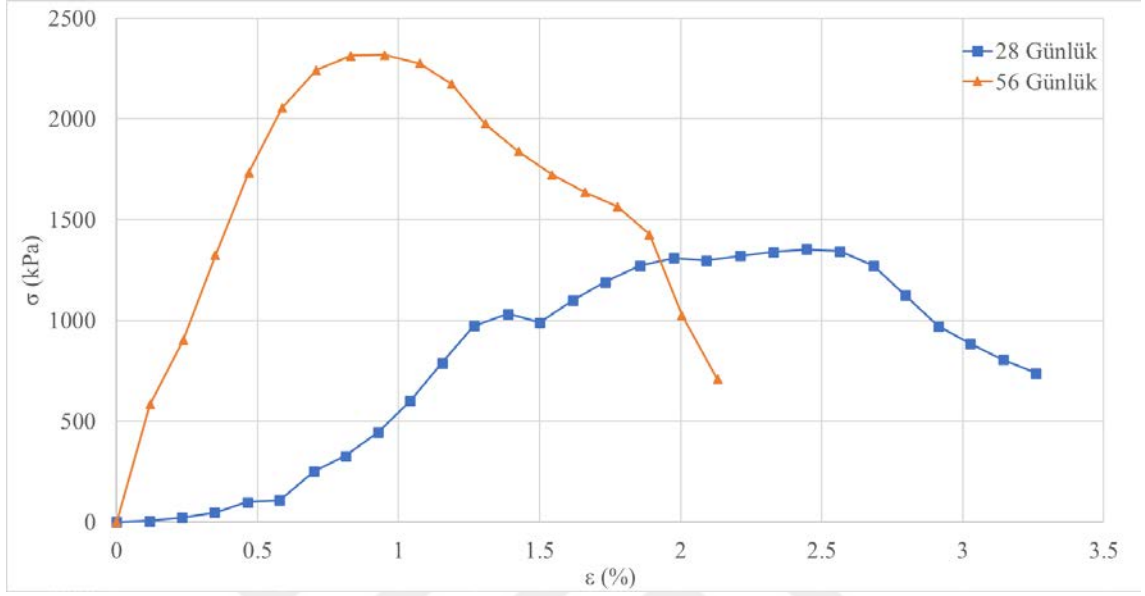
- Myers, R. H. ve Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, NY.
- Nas, M., 2015, Zeolit ve Metakaolin İçeren Betonların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması'', Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Noori, M. A., 2019, Katkı İçerikli Derin Karıştırma Kolonları Performans, Özelliklerinin Model Deneylerle Araştırılması'', Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- O'Rourke, T. D. ve O'Donnell, C. J., 1997, Field Behavior of Excavation Stabilized by Deep Soil Mixing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(6), 516-524.
- Onur, M. İ., Tuncan, M., Kılıç, H. O. ve Tuncan, A., 2016, Yeni Bir Derin Zemin Karıştırma Sistemi Tasarımı ve Arazi Uygulamaları, *Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Erzincan, Türkiye, 9(3), 194-205.
- Özdamar, T., 2012, Geotechnical Characterization of Natural Zeolite'', Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Özdikicierler, E. ve Eren, İ., 2016, Optimizasyon ve Modelleme Süreçlerinde Cevap Yüzey Metodu Yaklaşımı, *Türkiye 12. Gıda Kongresi*, Edirne.
- Pathivada, S. P., 2005, Effects of water-cement ratio on deep mixing treated, *The University Of Texas*, Arlington, ABD.
- Porbaha, A., 1998, State of the art in deep mixing technology: part I. Basic concepts and overview, *Technical Research Institute, TOA Corporation*, 81-92, Tsurumiku, Yokohama 239, Japan.
- Pye, K. ve Blott, S. J., 2013, The Coast and Estuaries of Northwest England, *Internal Research Report 1247, Kenneth Pye Associates Ltd.*, Solihull.
- Roussel, N. ve Le Roy, R., 2004, The Marsh cone: a test or a rheological apparatus, *Science Direct*, 1-2.
- Sarıkaya, H., 2006, Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması'', Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Saride, S., Archeewa, E., Puppala, A. J., Nazarian, S. ve Williammee, R., 2010, Deep soil mixing (DSM) columns to improve foundation support for bridge approach embankments, *Geo Florida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, Asce, 199, 1866-1875.

- Sevim, U. K. ve Okumuş, N., 2011, Zeolit ve Silika Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimsilik Özellikleri, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 57-63.
- Shao, Y., Macari, E.J. ve Cai, W., 2005, Compound deep soil mixing columns for retaining structures in excavations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Asce*, 11, 1370-1377.
- Shen, S., Han, J. ve Du, Y., 2008, Deep Mixing Induced Property Changes in Surrounding Sensitive Marine Clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 845-854.
- Shen, S. L., Huang, X. C., Du, S. J. ve Han, J., 2003, Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns, *Marine Georesources and Geotechnology*, 21 (1), 15-35.
- Siva, P. P., 2005, Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive clay characteristics, *Master of science in civil engineering, The university of Texas at arlington, Texas*.
- Soylu, M. ve Gökkuş, Ö., 2017, TÜRKİYE'DEKİ DOĞAL ZEOLİTLER VE İYON DEĞİŞİMİ UYGULAMALARI, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Niğde, Türkiye, 6(1), 11-20.
- TAEK, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, URL: <https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/148-malzeme-teknolojisi-sss/948-taramali-elektron-mikroskobu-son-nasil-calisir.html>
- Taki, O., 2003, Strength Properties of Soil Cement Produced by Deep Mixing, *Grouting and Ground Treatment*, 646-657.
- TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, *TSE*, Ankara.
- TS EN 14679, 2006, Özel jeoteknik uygulamalar-derin karıştırma, *TSE*, Ankara, Türkiye.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *TSE*, Ankara.
- TS EN 934-2, 2011, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, *TSE*, Ankara.
- Tuncan, A., 2007, Yapı Denetimi Alanında Hizmet Veren Yapı Denetçileri Ve Yardımcı Kontrol Mühendisleri İçin Hazırlanan Meslek İçi Eğitim Programı Kurs Notları. *İnşaat Mühendisleri Odası*, Eskişehir.

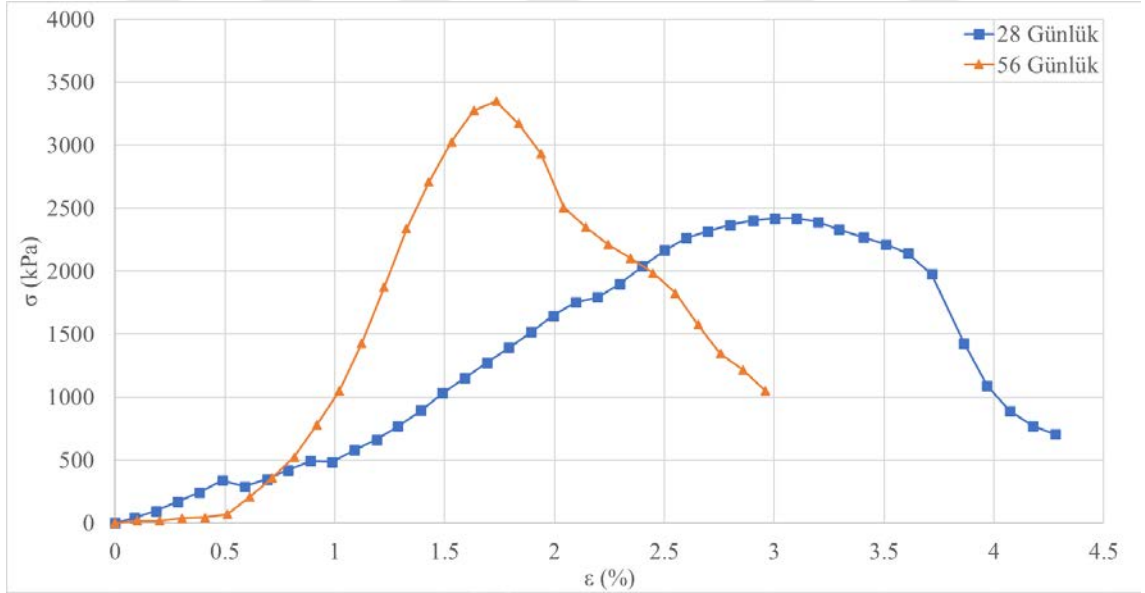
- Türkyılmaz, H., 2011, Kurşun iyonlarının kesikli adsorpsiyon prosesi ile gideriminin cevap yüzey yöntemiyle optimizasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Uzuner, B. A., 2007, Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Uzuner, B. A., 2013, Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 343.
- Wahidy, M., 2019, Derin Karıştırma Kolonlarının Performansı Üzerinde Farklı Özellikteki Çimentoların Etkilerinin Araştırılması'', Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Yazıcıoğlu, Ö. F., 2016, Çimento ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit (Analsim)'in Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi'', Yüksek Lisans Tezi, *Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ordu.
- Ye, G., Xu, C. A. ve Gao, Y., 2006, Improving soft soil using combined cement deep mixing column and preloading with prefabricated vertical drains, *Ground Modification and seismic Mitigation*, Asce, 152, 23-28.
- Yeğınobalı, A., Sobolev, K. G., Soboleva, S. V. ve Kıyıcı, B., 2000, Yüksek Fırın Cürufu Yüksek Dayanımlı Çimentonun Isıl Direnci. *TÇMB Çimento ve Beton Dünyası*, 5, 31-47.
- Yenginar, Y., 2020, Derin Karıştırma Kolonlarının Performansını Etkileyen Faktörlerin Model Deneylerle Araştırılması'', Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.

EKLER

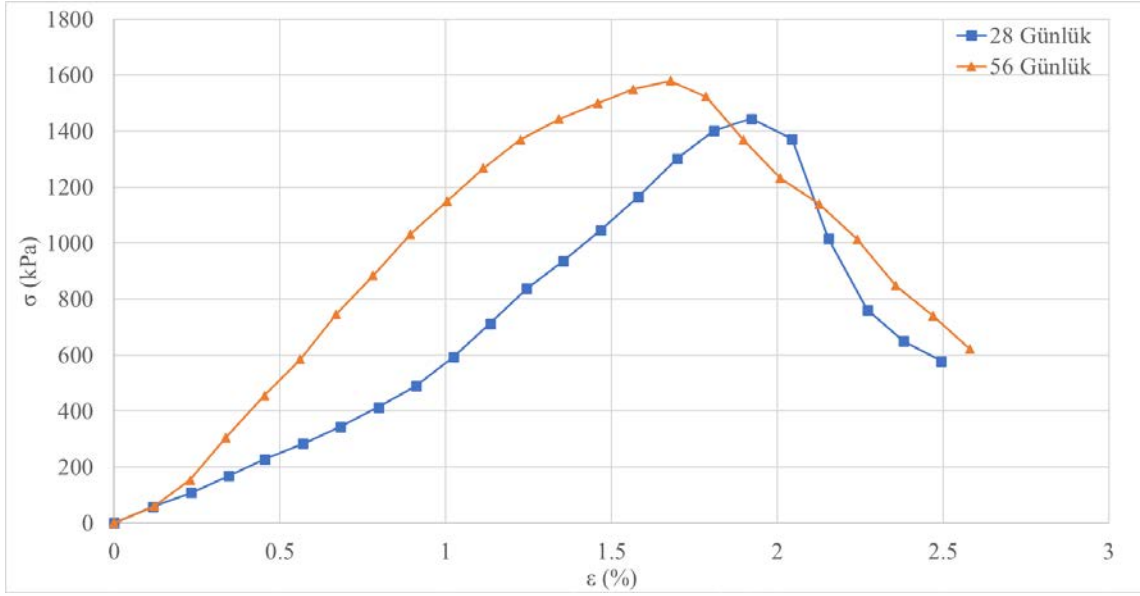
EK-1 Küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim deformasyon (σ - ϵ) grafikleri



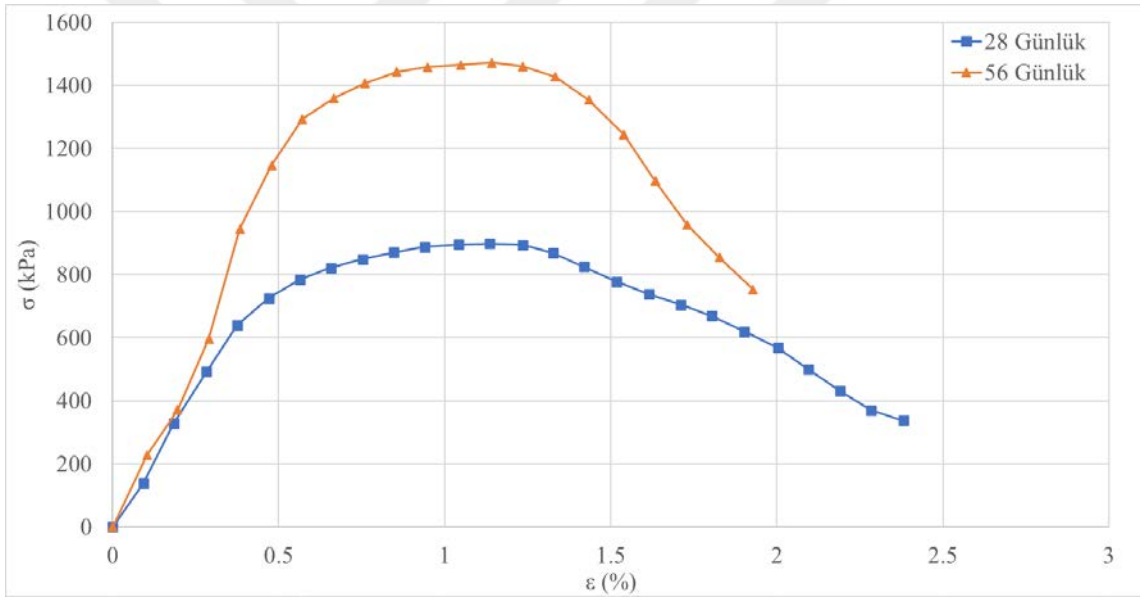
Şekil Ek.1.1. Killi zemin 1. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



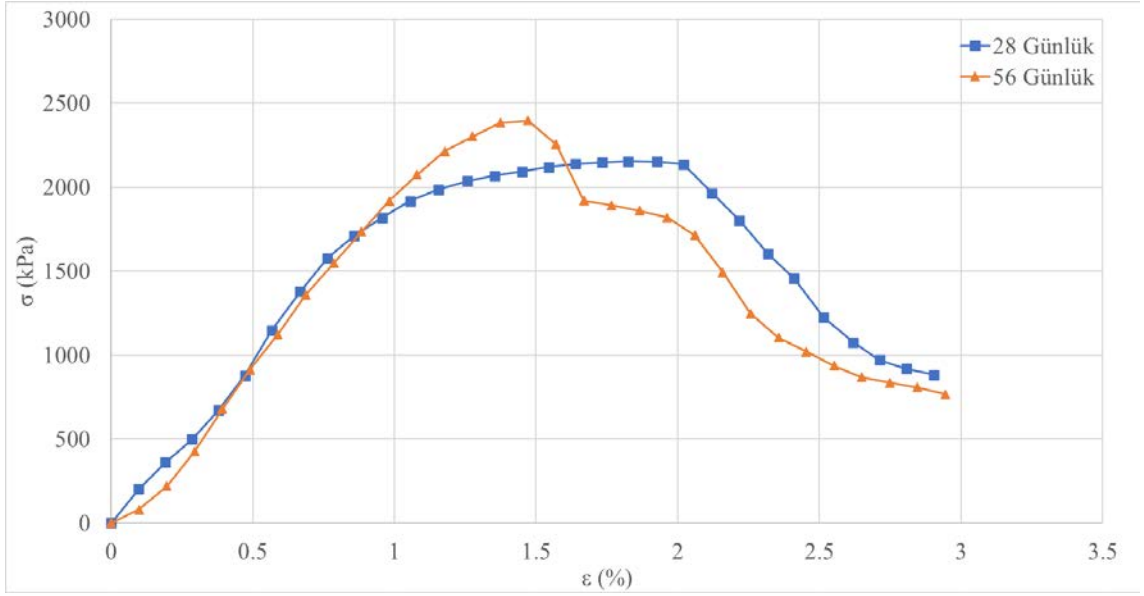
Şekil Ek.1.2. Killi zemin 2. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



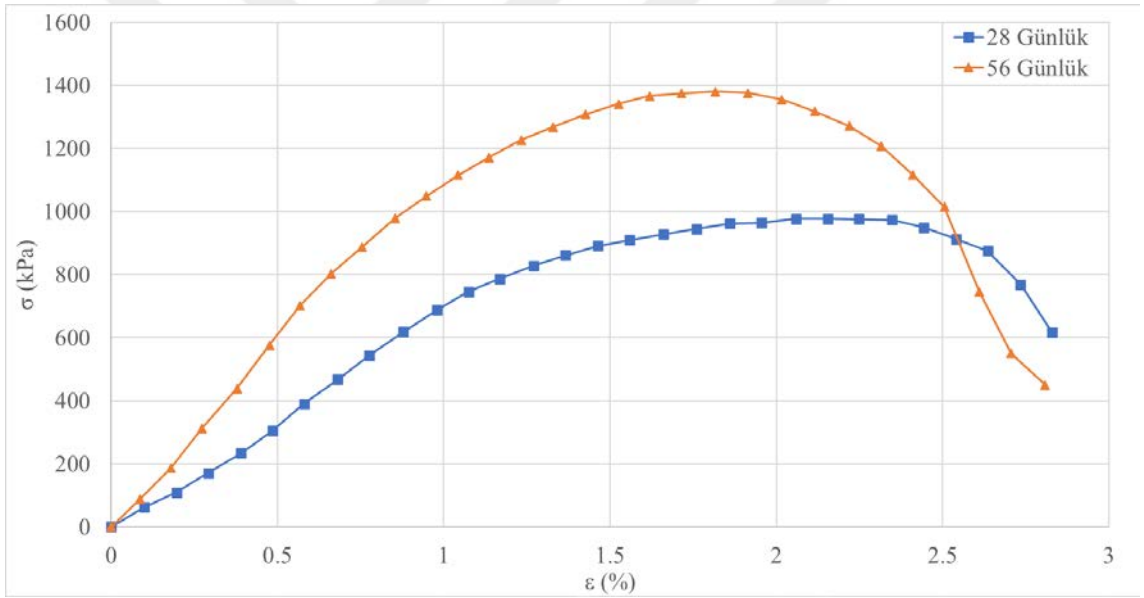
Şekil Ek.1.3. Killi zemin 3. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



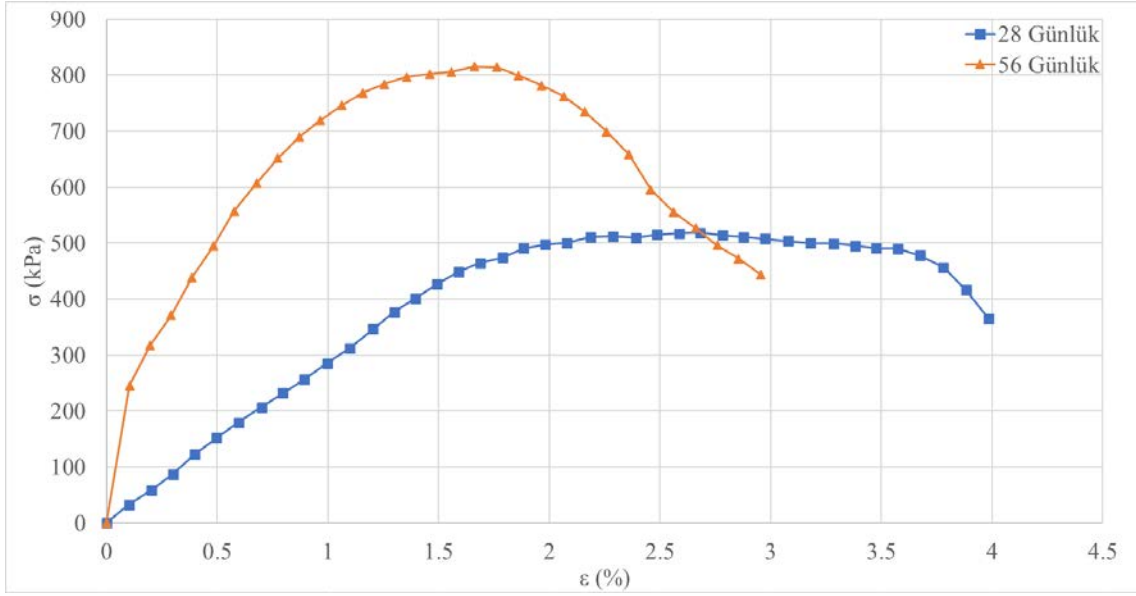
Şekil Ek.1.4. Killi zemin 4. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



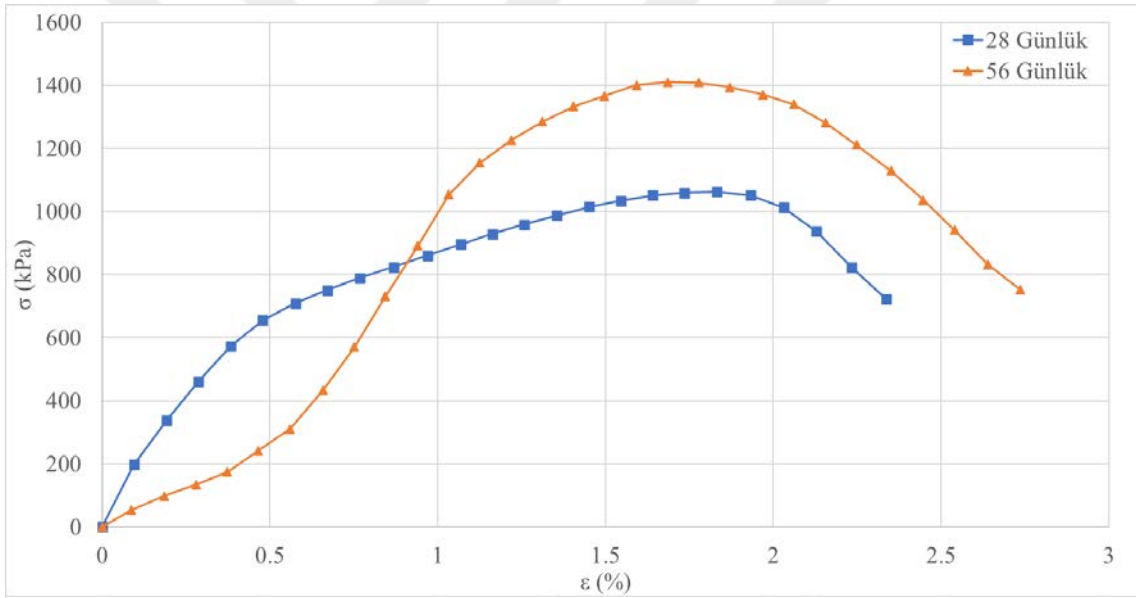
Şekil Ek.1.5. Killi zemin 5. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



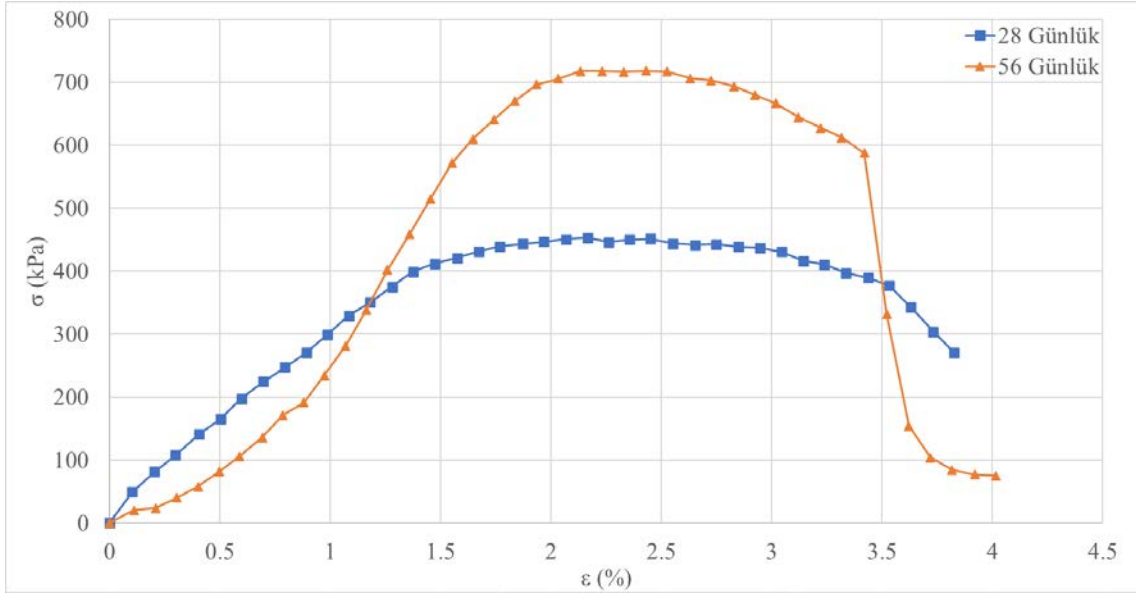
Şekil Ek.1.6. Killi zemin 6. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



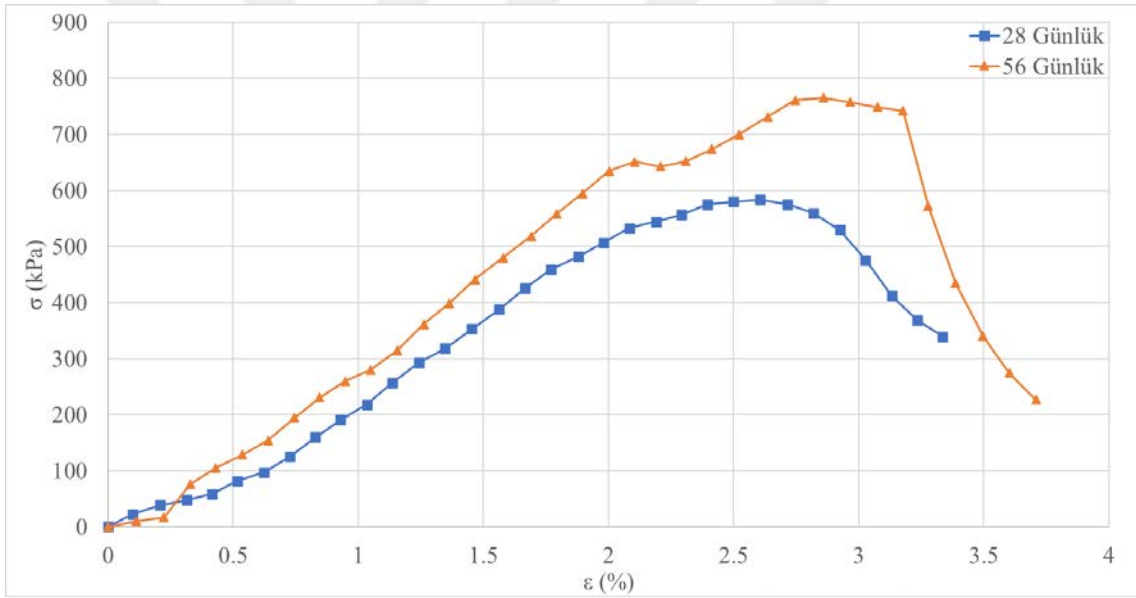
Şekil Ek.1.7. Killi zemin 7. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



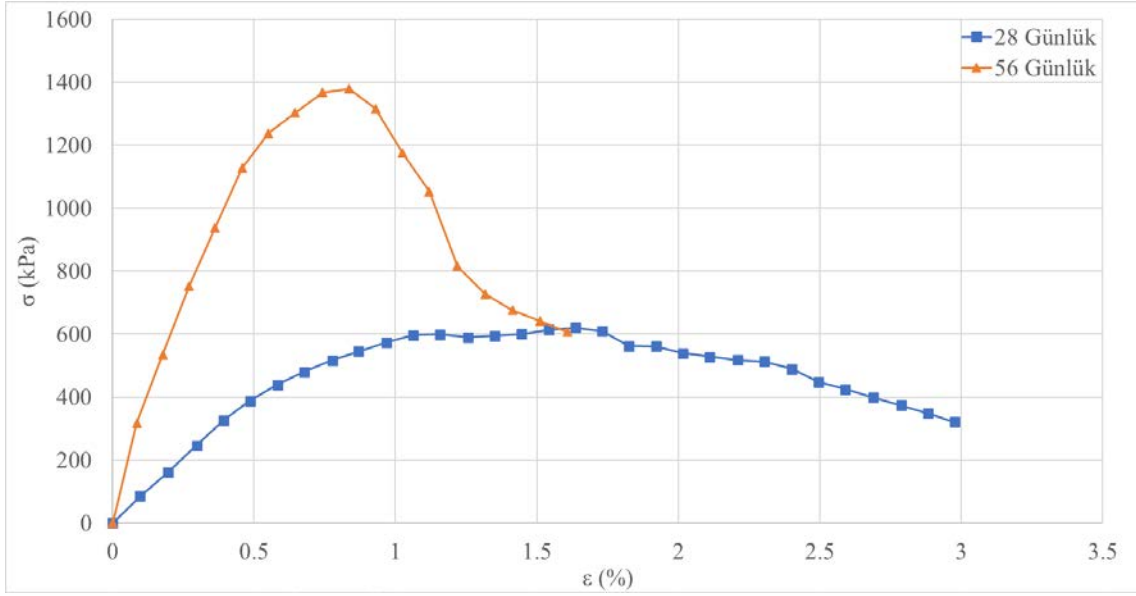
Şekil Ek.1.8. Killi zemin 8. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



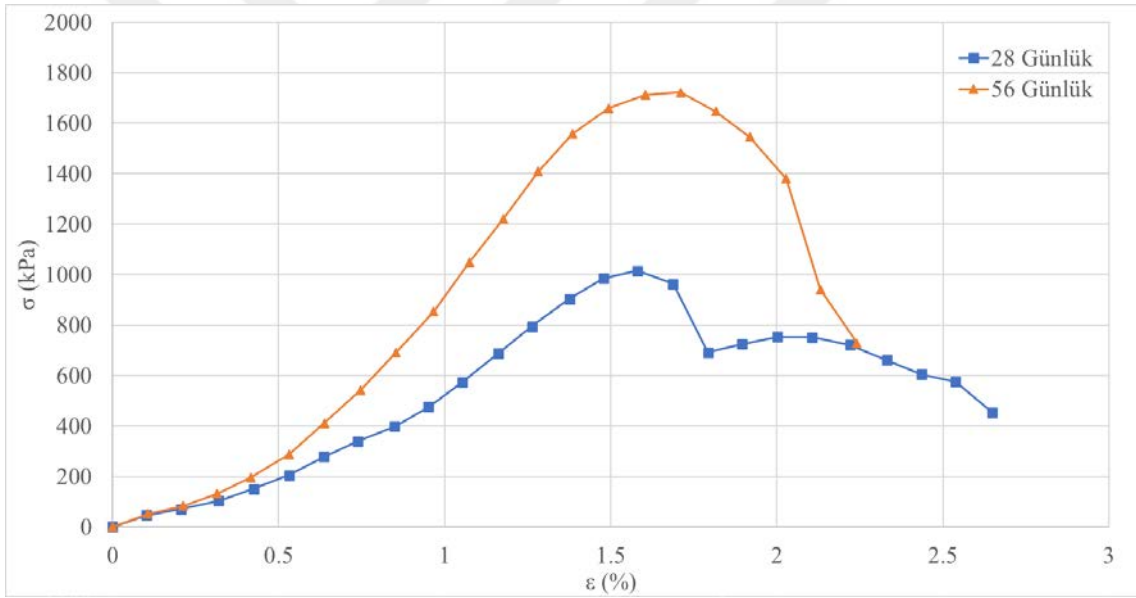
Şekil Ek.1.9. Killi zemin 9. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



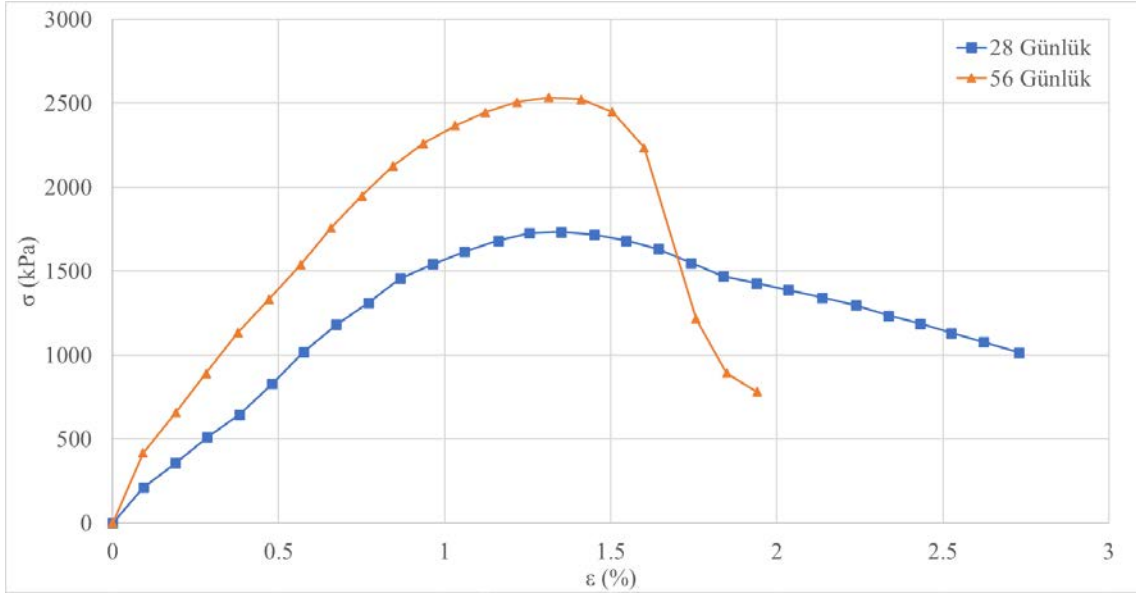
Şekil Ek.1.10. Killi zemin 10. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



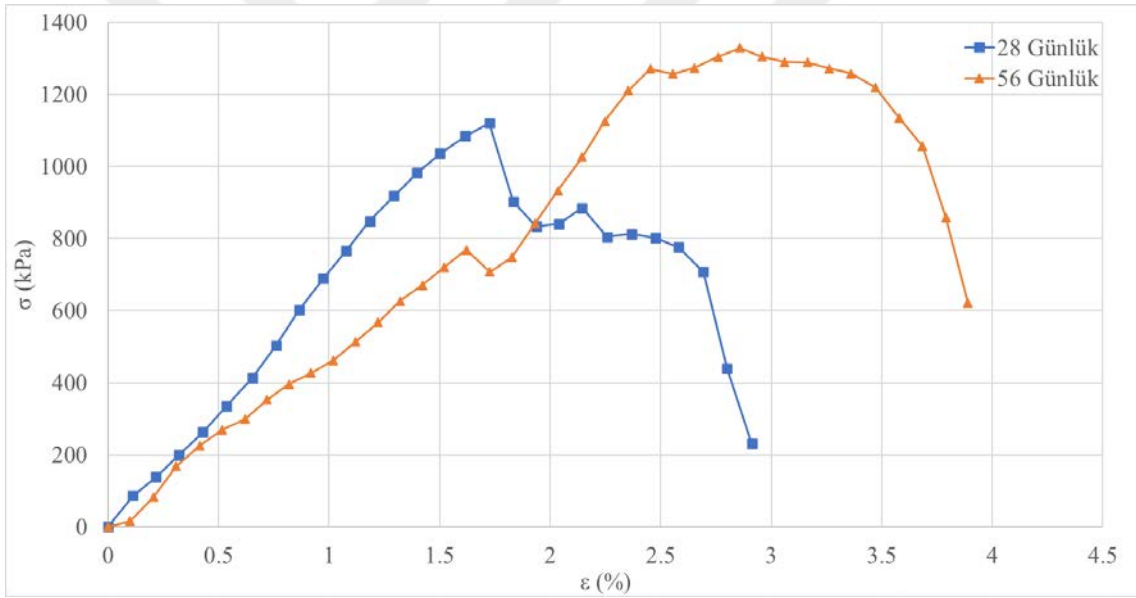
Şekil Ek.1.11. Killi zemin 11. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



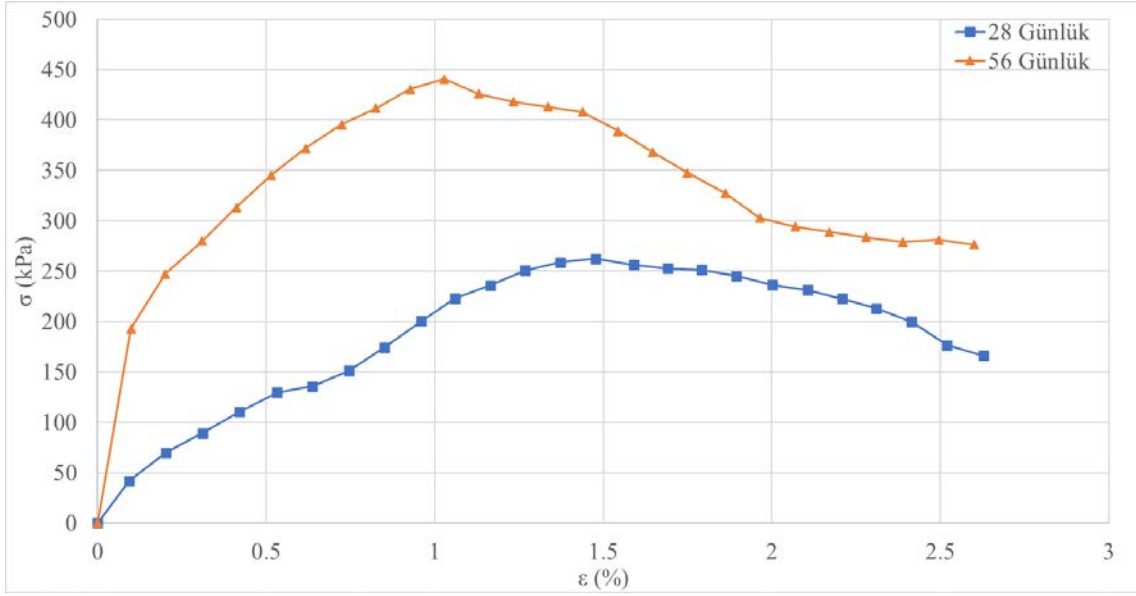
Şekil Ek.1.12. Killi zemin 12. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



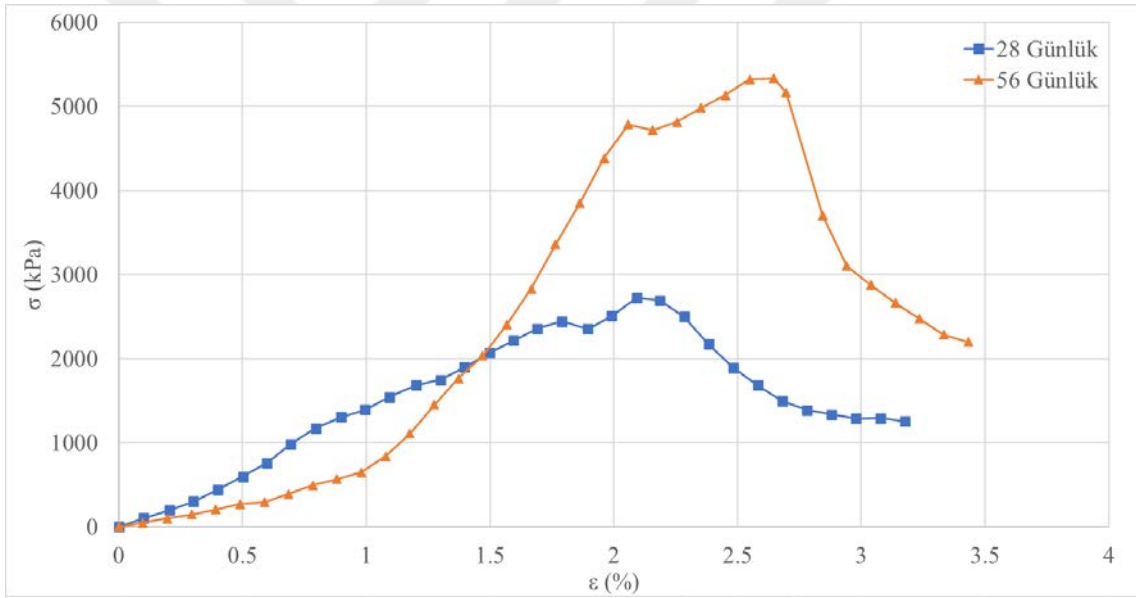
Şekil Ek.1.13. Killi zemin 13. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



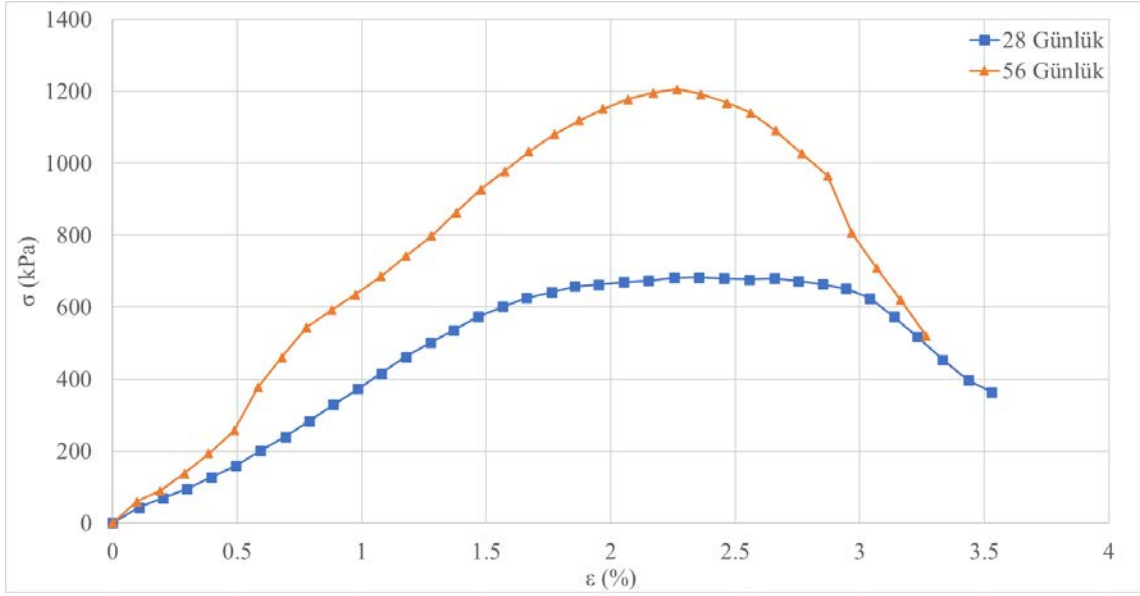
Şekil Ek.1.14. Killi zemin 14. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



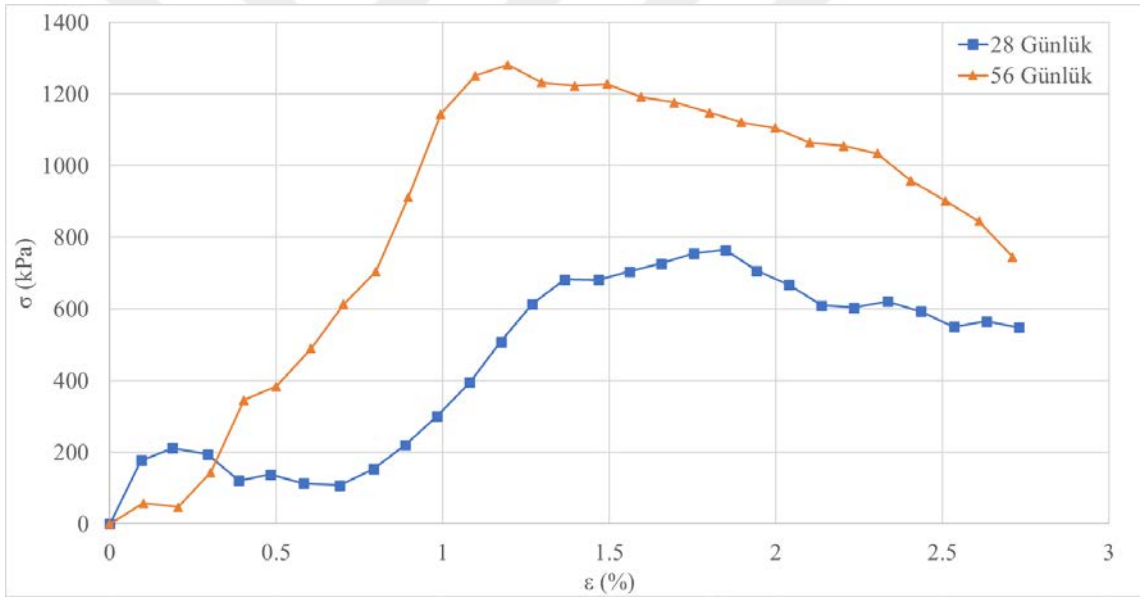
Şekil Ek.1.15. Killi zemin 15. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



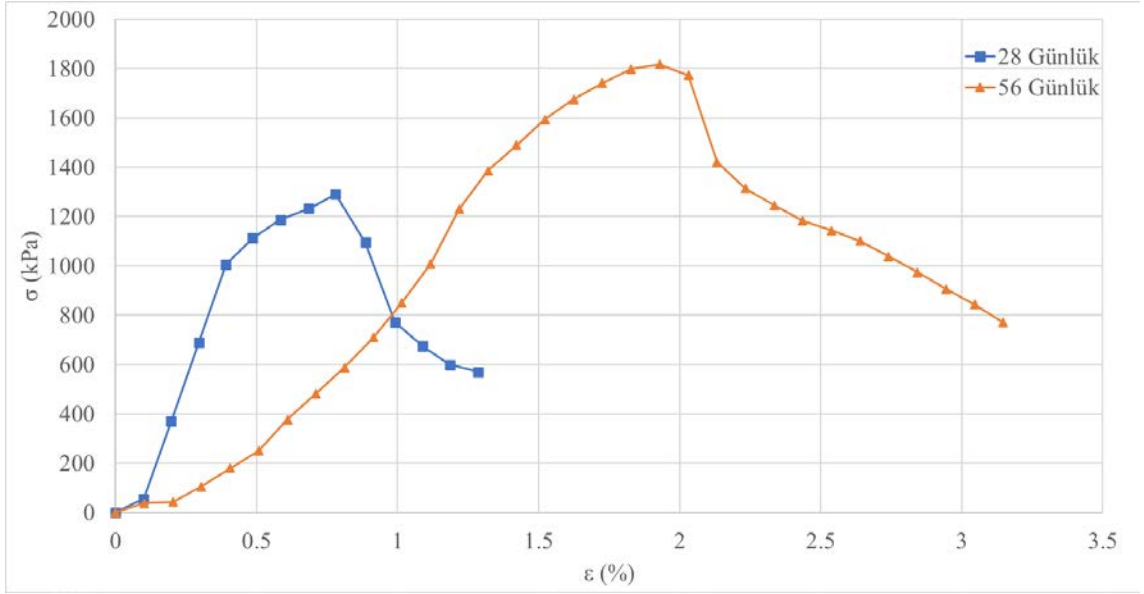
Şekil Ek.1.16. Killi zemin 16. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



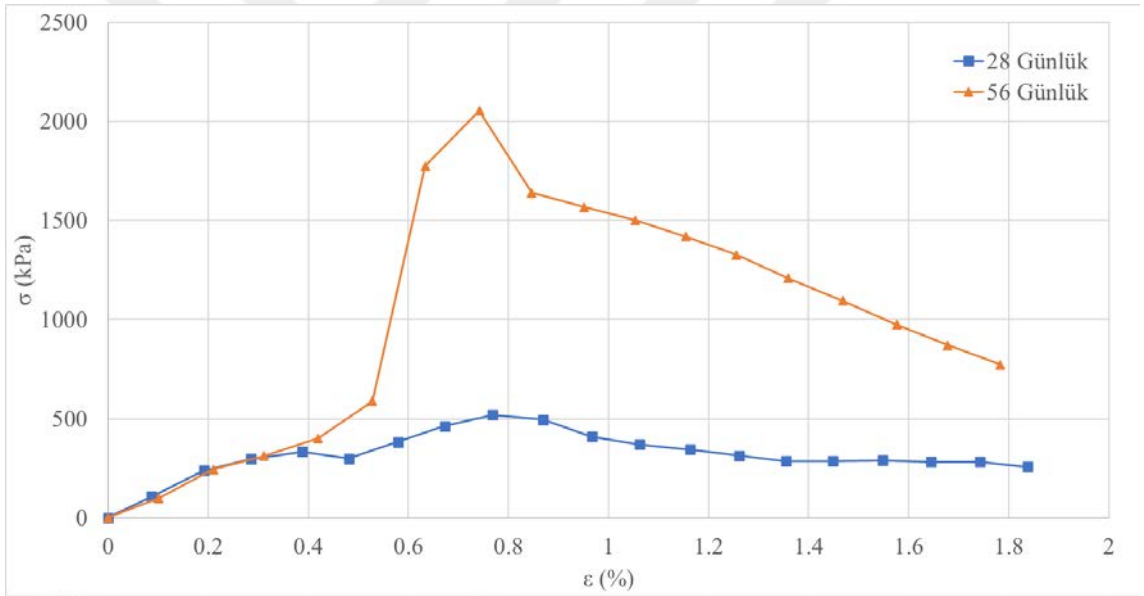
Şekil Ek.1.17. Killi zemin 17. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



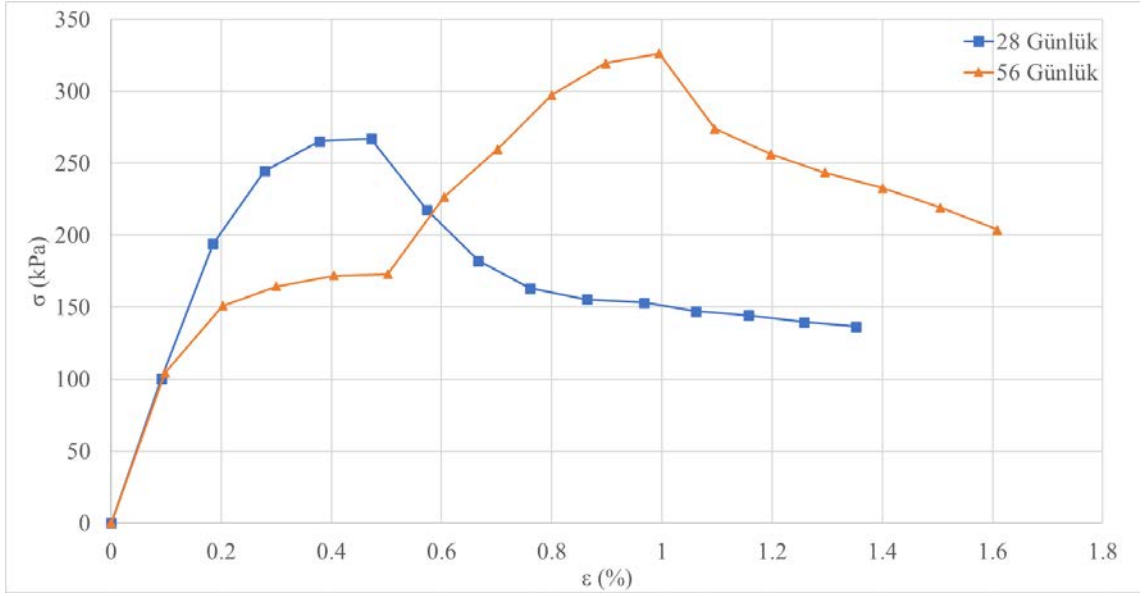
Şekil Ek.1.18. Kumlu zemin 1. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



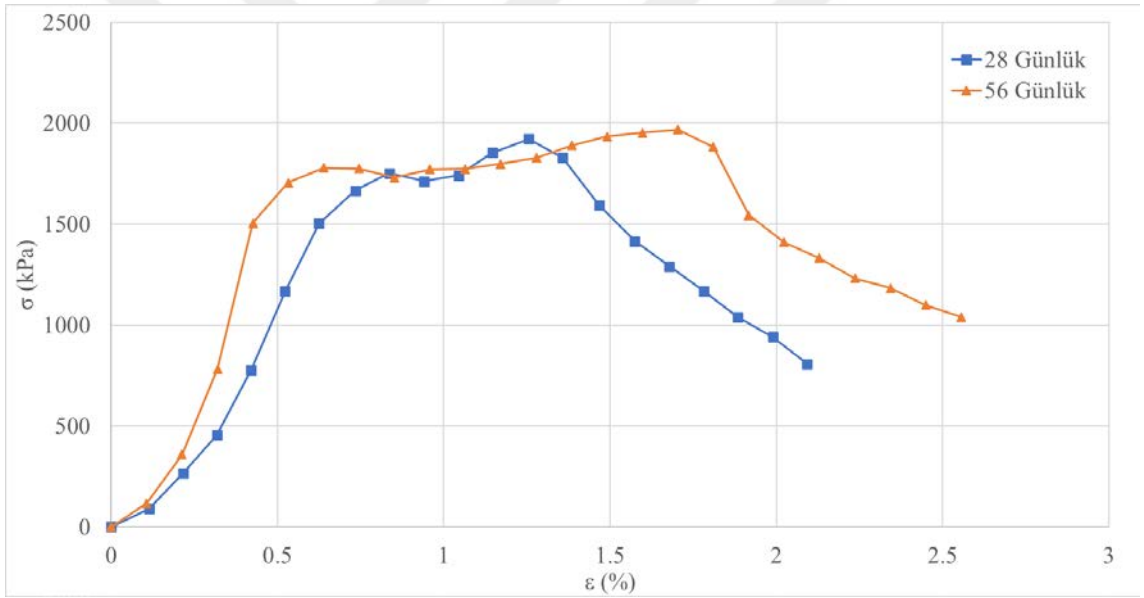
Şekil Ek.1.19. Kumlu zemin 2. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



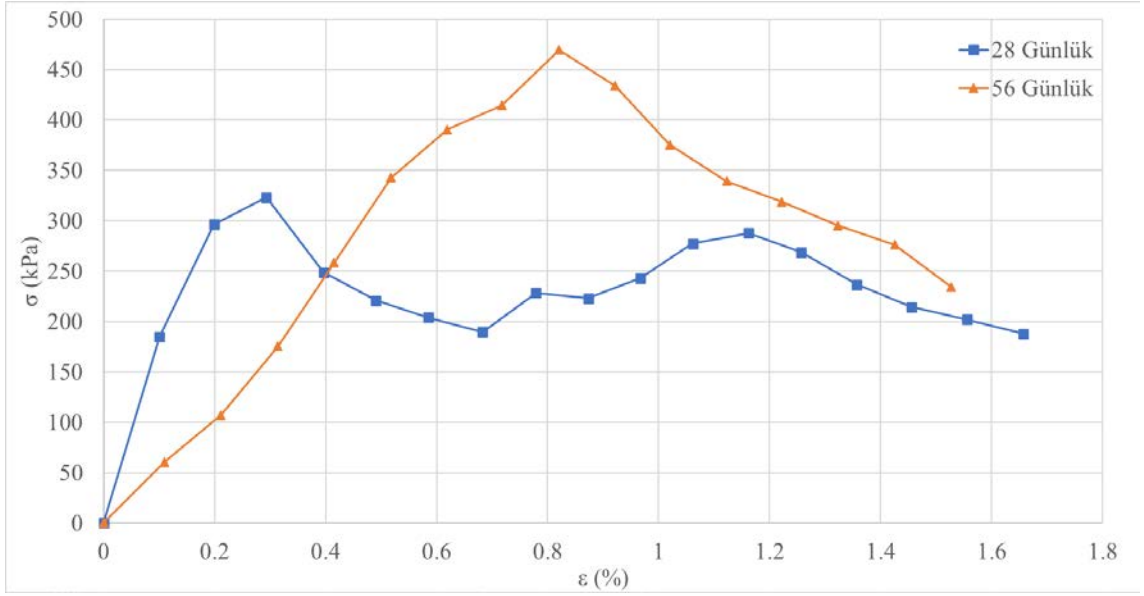
Şekil Ek.1.20. Kumlu zemin 3. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



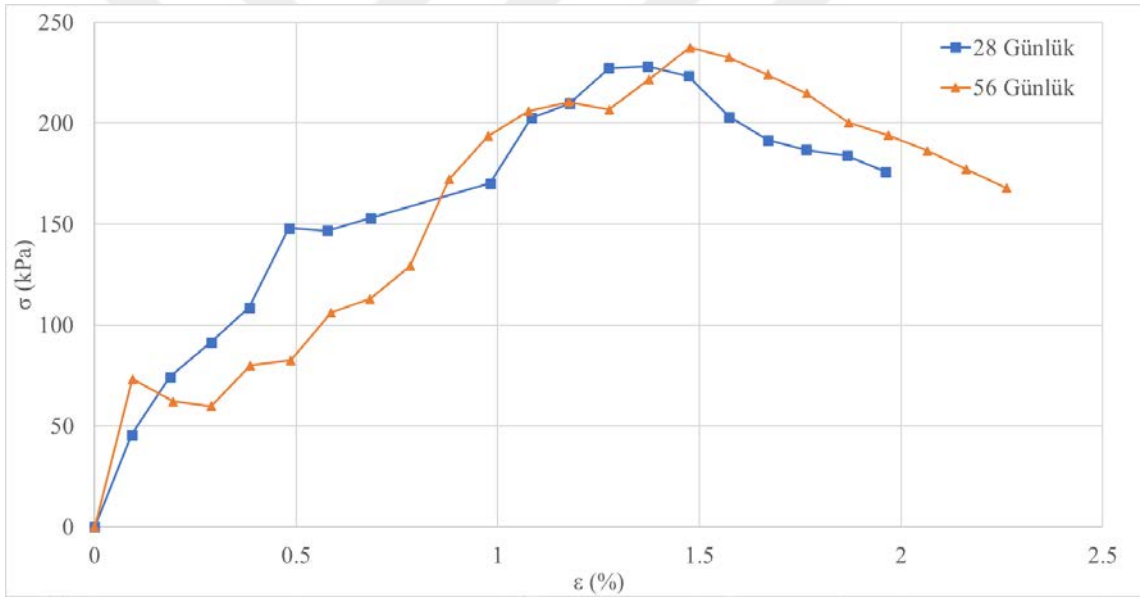
Şekil Ek.1.21. Kumlu zemin 4. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



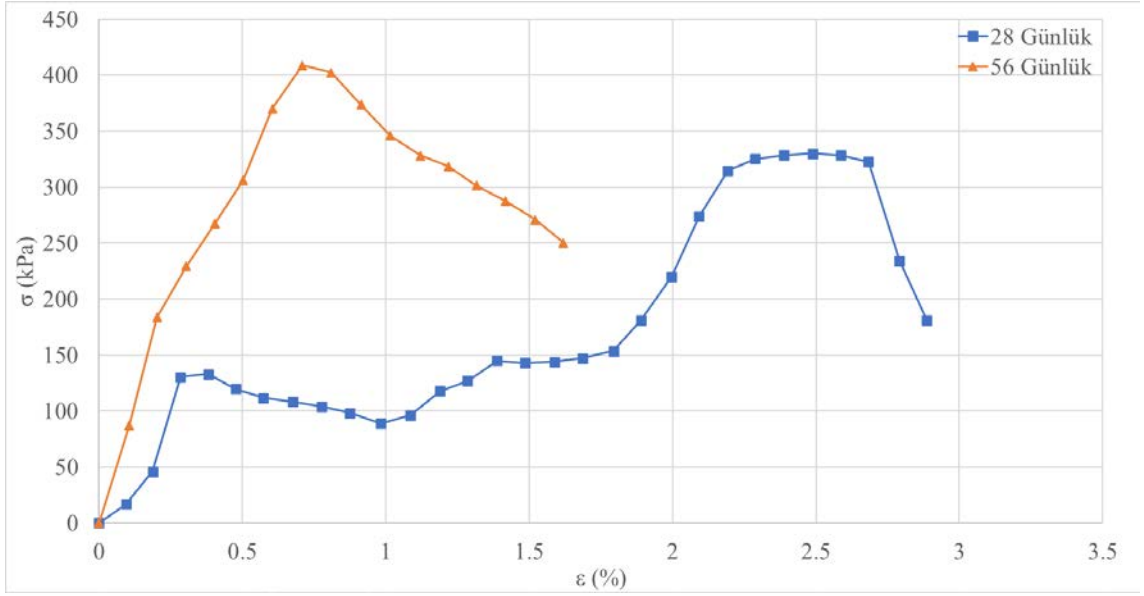
Şekil Ek.1.22. Kumlu zemin 5. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



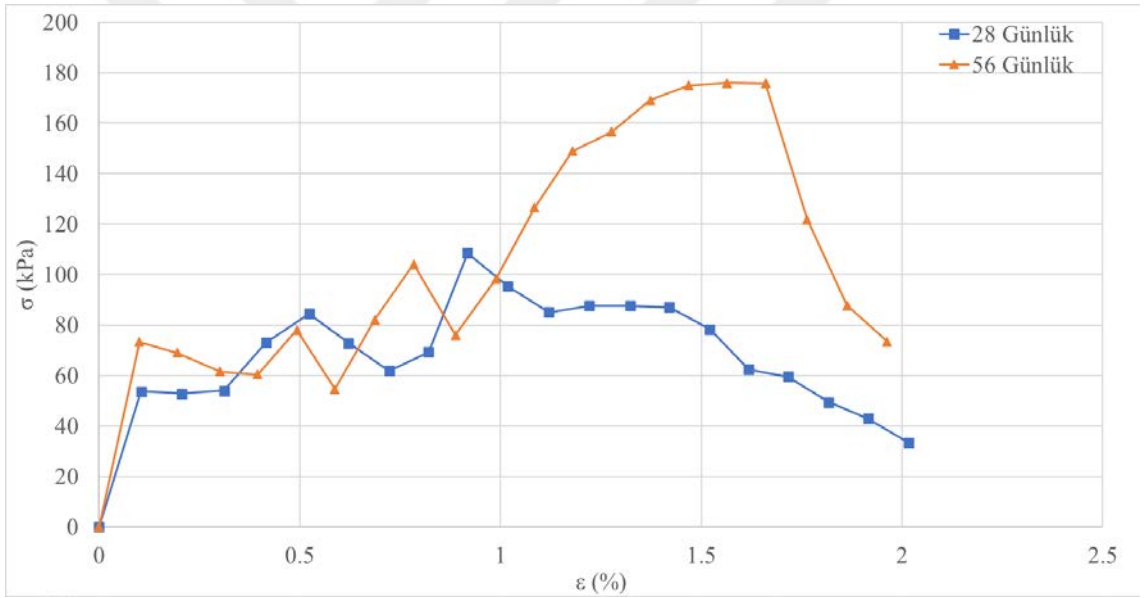
Şekil Ek.1.23. Kumlu zemin 6. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



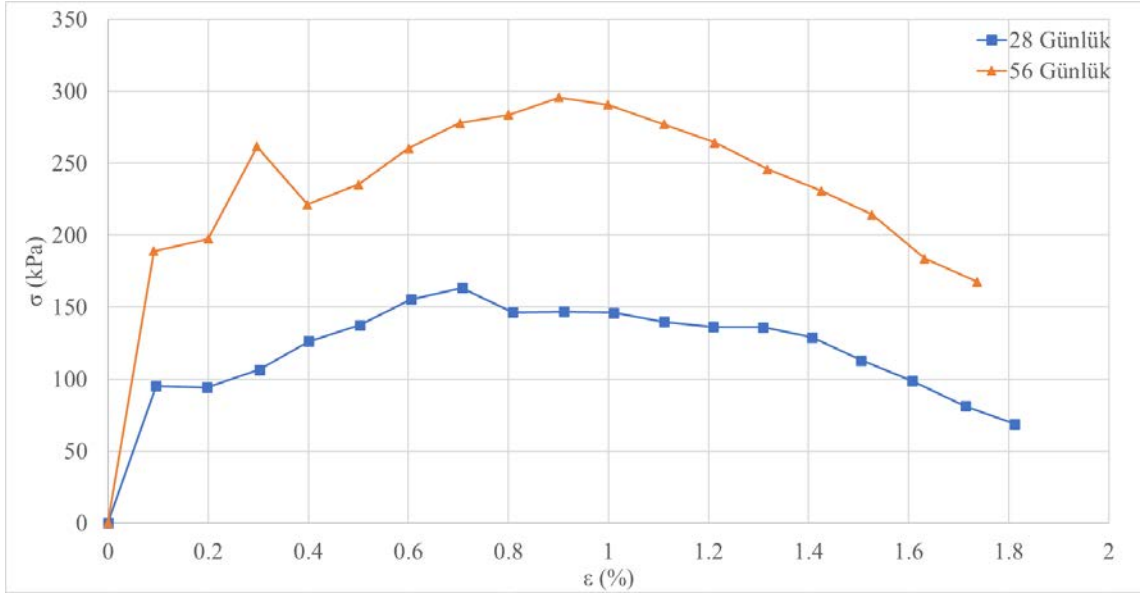
Şekil Ek.1.24. Kumlu zemin 7. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



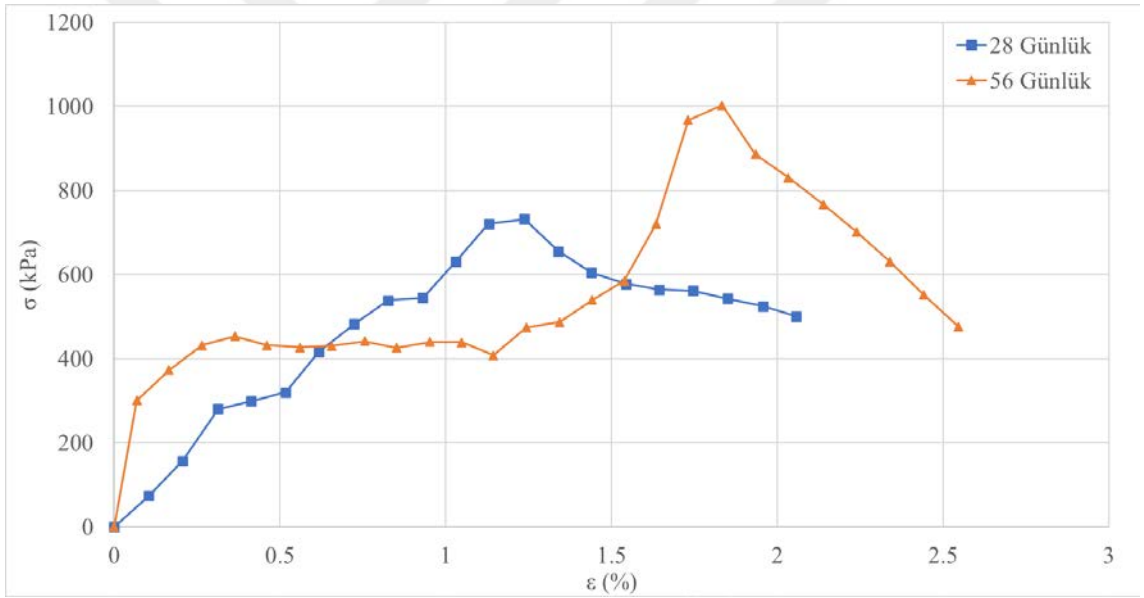
Şekil Ek.1.25. Kumlu zemin 8. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



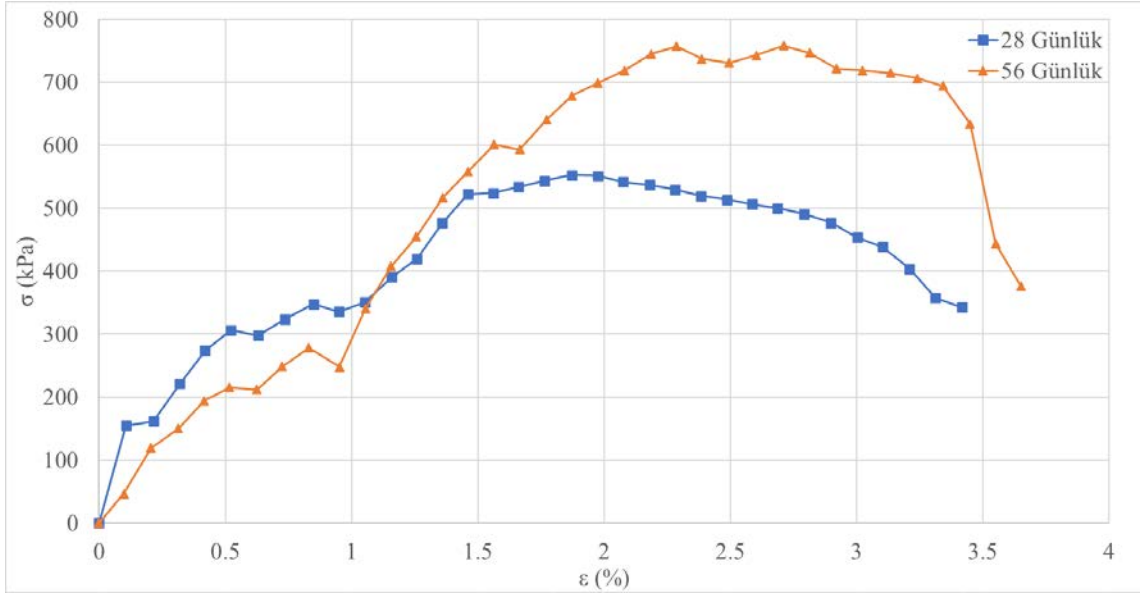
Şekil Ek.1.26. Kumlu zemin 9. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



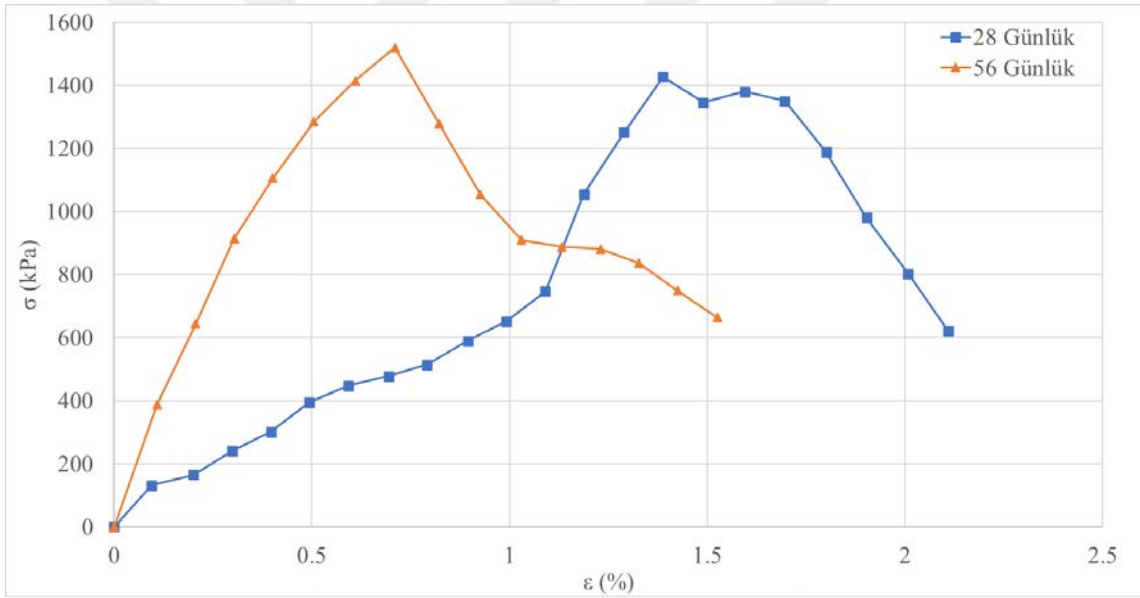
Şekil Ek.1.27. Kumlu zemin 10. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



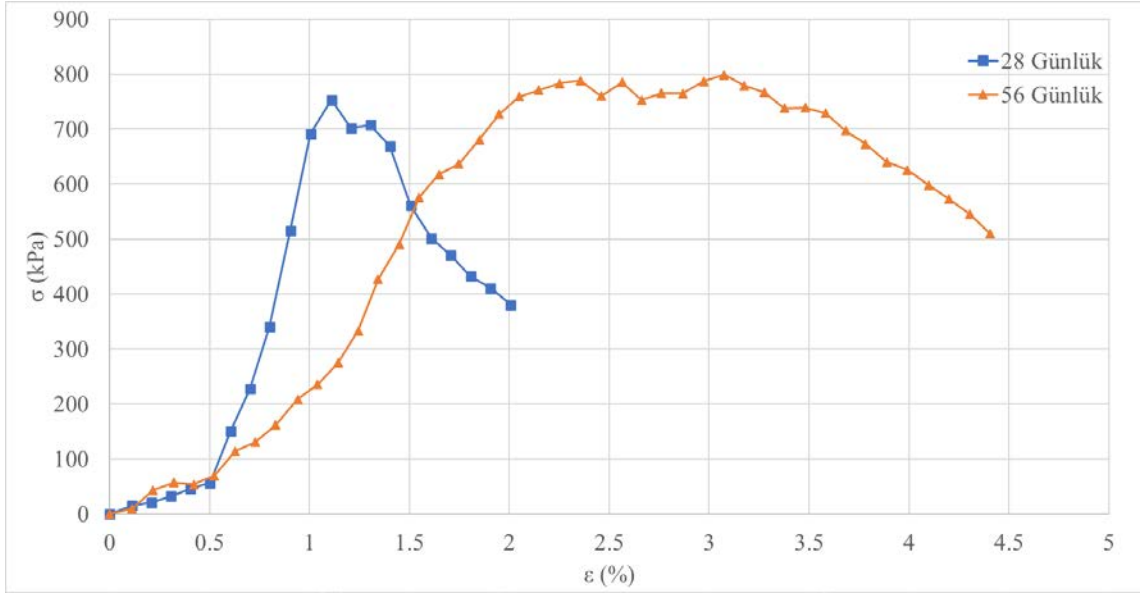
Şekil Ek.1.28. Kumlu zemin 11. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



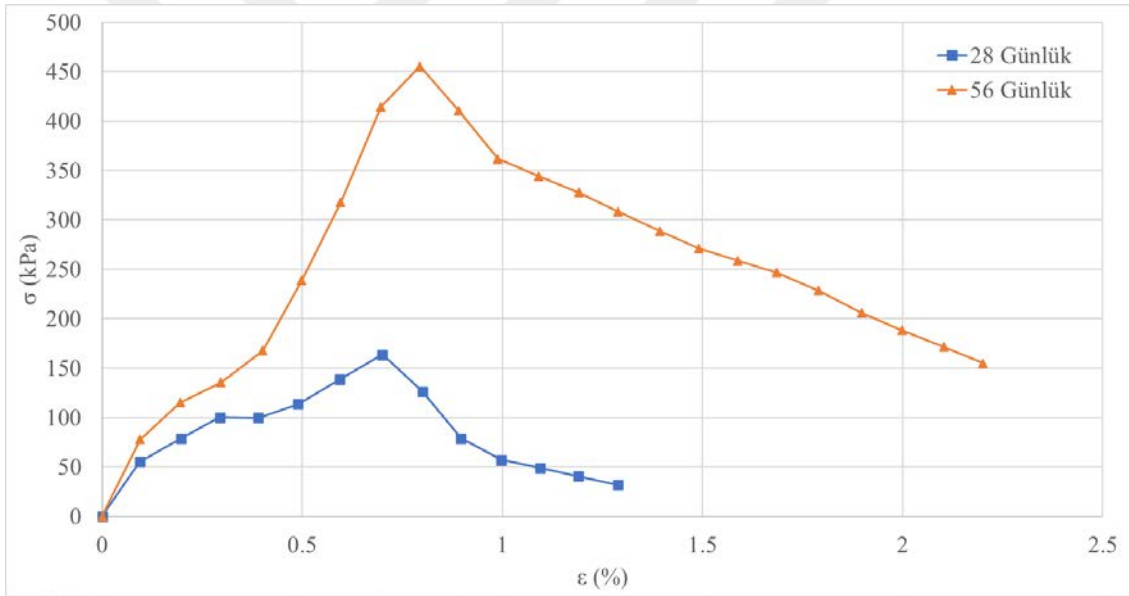
Şekil Ek.1.29. Kumlu zemin 12. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



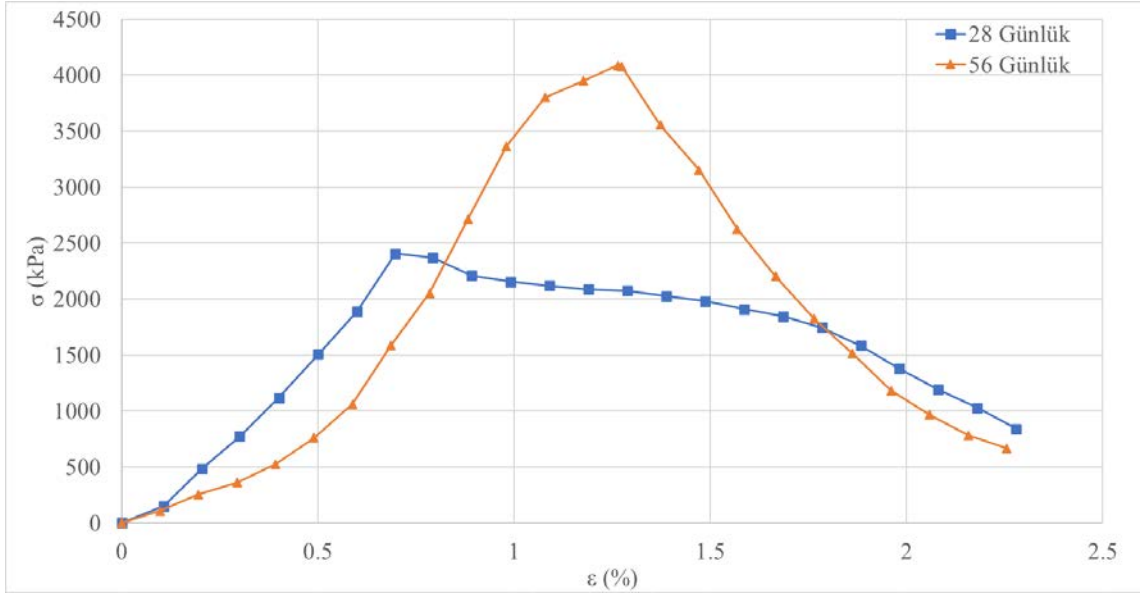
Şekil Ek.1.30. Kumlu zemin 13. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



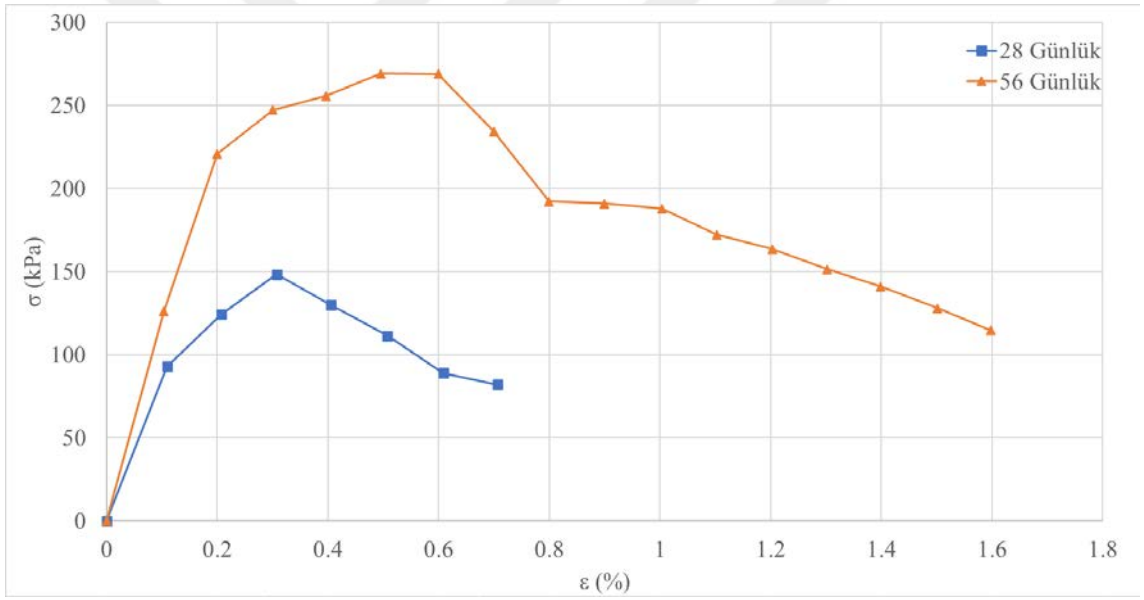
Şekil Ek.1.31. Kumlu zemin 14. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



Şekil Ek.1.32. Kumlu zemin 15. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ε grafiği



Şekil Ek.1.33. Kumlu zemin 16. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği



Şekil Ek.1.34. Kumlu zemin 17. tasarım için Serbest Basınç Deneyi σ - ϵ grafiği

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Furkan Arslan
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Bakırköy, 24/07/1996
Telefon : +(90)5362066397
E-Posta : furkanarslann@hotmail.com.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Akşemsettin Anadolu Lisesi	Bağcılar	İstanbul	2014
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	Selçuklu	Konya	2018

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016	Sur Yapı	Stajyer Mühendis
2017	Kare Mimarlık	Stajyer Mühendis

UZMANLIK ALANI

İnşaat Mühendisliği

YABANCI DİLLER

İngilizce (B1 Seviyesi)

YAYINLAR

Derin Karıştırma Kolonu İmalatında Zeolit Kullanımının Kolonun Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi (Furkan Arslan, Murat Olgun), INSAC-2020 (Konya)