



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



TABAKALI ZEMİN ORTAMLARINDA
OLUŞTURULAN AMORF SİLİKA KATKILI
DERİN KARIŞTIRMA KOLON
DAVRANIŞLARININ MODEL DENEYLERLE
ARAŞTIRILMASI

Bekir FİDAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bekir FİDAN tarafından hazırlanan “Tabakalı Zemin Ortamlarında Oluşturulan Amorf Silika Katkılı Derin Karıştırma Kolon Davranışlarının Model Deneylerle Araştırılması” adlı tez çalışması 25/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL

Danışman

Prof. Dr. Murat OLGUN

Üye

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Üye

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221104011 nolu 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.

Bekir FİDAN

Tarih: 25.01.2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TABAKALI ZEMİN ORTAMLARINDA OLUŞTURULAN AMORF SİLİKA KATKILI DERİN KARIŞTIRMA KOLON DAVRANIŞLARININ MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Bekir FİDAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat OLGUN

2023, 259 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Murat OLGUN

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL

Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ

Bu tez çalışmasında tabakalı zemin ortamında amorf silika katkıli derin karıştırma kolonlarının (DKK) performansını etkileyen faktörler deneysel laboratuvar çalışmalarıyla araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar üç aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada ön tasarım deneyleri ile malzeme kullanım yüzdelilerinin sınırları belirlenmiştir. İkinci aşamada ilk aşamadan elde edilen veriler ışığında Design Expert programı kullanılarak kum ve kil zeminler için iki ayrı 18 seviyeli tasarım yapılmıştır. Tasarım deneyleri için laboratuvar tipi mikser ile zemin-enjeksiyon karışımları (küçük ölçekli DKK) oluşturulmuştur. Tüm tasarım seviyeleri için hem kum hem de kil zeminler kullanılmış, hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri ve üç eksenli deney aletinde permeabilite deneyleri 28 ve 56 günlük kür süreleri için yapılarak serbest basınç mukavemetleri (q_u) ve permeabilite katsayıları (k) belirlenmiştir. Deney sonuçları Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak Design Expert programında analiz edilmiştir. Küçük ölçekli deneylerden alınan numuneler üzerinde kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiş ve optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Üçüncü aşamada optimizasyon çalışmalarından sonra belirlenen optimum tasarımla model tanklar içerisinde laboratuvar tipi derin karıştırma makine düzeneği ile büyük ölçekli derin karıştırma kolonları imal edilmiştir. Model tanklarda oluşturulan derin karıştırma kolonları yükleme deneylerine tabi tutularak taşıma güçleri ve oturma-yük davranışları belirlenmiştir.

Killi zeminde yapılan küçük ölçekli DKK' larda serbest basınç mukavemetleri (q_u) 28 günlük kür süresi için 810 kPa ile 6729 kPa arasında, 56 günlük kür süresi için 886 kPa ile 7125 kPa arasında bulunmuştur. Killi zeminde yapılan küçük ölçekli DKK' larda permeabilite katsayıları (k) 28 günlük kür süresi için $4.32-341 \times 10^{-11}$ aralığında, 56 günlük kür süresi için $3.65-283 \times 10^{-11}$ aralığında bulunmuştur. Kumlu zeminde yapılan küçük ölçekli DKK' larda serbest basınç mukavemetleri 28 günlük kür süresi için 4026 kPa ile 19776 kPa arasında, 56 günlük kür süresi için 886 kPa ile 7125 kPa arasında bulunmuştur. Kumlu zeminde yapılan küçük ölçekli DKK' larda permeabilite katsayıları 28 günlük kür süresi için $4.32-341 \times 10^{-11}$ aralığında, 56 günlük kür süresi için $3.65-283 \times 10^{-11}$ aralığında bulunmuştur. ANOVA analizlerinde amorf silikanın killi zeminlerde serbest basınç mukavemetine etkisi parametrelerden su/bağlayıcı(s/b) oranının 1-1.5 aralığında, amorf silikanın %25-%35 aralığında, süper akışkanlaştırıcı katkının %2.5-%3.5 seçildiği durumlarda olumlu katkısı olmuştur. Kumlu zeminde s/b oranının 0.9-1.0 seçildiği durumda ve diğer parametrelerin killi zemindeki gibi seçildiği durumlarda serbest basınç mukavemetine olumlu katkısı olmuştur. ANOVA analizlerinde amorf silikanın

permeabiliteye katkısının daha baskın olduğu bulunmuştur. Parametrelerin uygun seçiminde killi zeminler için amorf silika permeabilite katsayısını %60, kumlu zeminlerde %70 azaltmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için killi zeminde 28 günlük kür süresinde serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %81 ve 56 günlük kür süresi için %79 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için kumlu zeminde 28 günlük kür süresinde serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %89 ve 56 günlük kür süresi için %86 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için killi zeminde 28 günlük kür süresinde permeabilite deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %83 ve 56 günlük kür süresi için %78 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için kumlu zeminde 28 günlük kür süresinde permeabilite deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %77 ve 56 günlük kür süresi için %93 doğruluk değerine ulaşılmıştır. SEM görüntüleri, EDS, XRD ve XRF analizlerinde küçük ölçekli DKK'lardan alınan numunelerde mikro ölçekteki boşluk durumları, C-S-H jelleri, C-H plakaları ve etrenjit oluşumları incelenerek DKK performansı ile ilişkilendirilmiştir. Büyük ölçekli DKK kolonlarının yükleme deneyleri yapılarak taşıma güçleri farklı yöntemlerle belirlenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Amorf silika, derin karıştırma kolonu, killi ve kumlu zemin, optimizasyon, yanıt yüzey yöntemi, zemin iyileştirme.

ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF AMORPHOUS SILICA-ADDED DEEP MIXING COLUMN BEHAVIOURS PRODUCED IN LAYERED GROUND BY MODEL EXPERIMENTS

Bekir FİDAN

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

Advisor: Prof. Dr. Murat OLGUN

2023, 259 Pages

Jury

Prof. Dr. Murat OLGUN

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Assoc. Prof. Dr. Ali Sinan SOĞANCI

Asst. Prof. Dr. İsa KUL

Asst. Prof. Dr. Atila DEMİRÖZ

In this thesis study, the factors affecting the performance of amorphous silica-added deep mixing columns (DMC) in the layered ground were investigated by experimental laboratory studies. Experimental studies were carried out in three stages. In the first stage, the limits of material usage percentages were determined with preliminary design experiments. In the second stage, two different 18-level designs were made for sand and clay soils by using the Design Expert program in view of the data obtained from the first stage. Soil-injection mixes (small-scale DMC) were created with a laboratory mixer for design experiments. Both sand and clay soils were used for all design levels, and unconfined compressive strengths (q_u) and permeability coefficients (k) were determined by performing free pressure tests on the prepared samples and permeability tests on a triaxial test device for 28 and 56 days curing periods. Experiment results were analyzed using the Response Surface Method in the Design Expert program. Chemical, mineralogical and petrographic analyzes were performed on the samples taken from the small-scale experiments, the results were evaluated and optimization studies were carried out. In the third stage, with the optimum design determined after the optimization studies, large-scale deep mixing columns were manufactured with laboratory-type deep mixing machine setup in model tanks. The deep mixing columns formed in the model tanks were subjected to loading tests and their bearing capacities and settling-load behaviors were determined.

The unconfined compressive strengths (q_u) of small scale DMCs manufactured on clayey soils were found to be between 810 kPa and 6729 kPa for the 28-day curing period, and between 886 kPa and 7125 kPa for the 56-day curing period. The permeability coefficients (k) of small scale DMCs manufactured on clayey soils were found to be in the range of $4.32-341 \times 10^{-11}$ for the 28-day curing period and $3.65-283 \times 10^{-11}$ for the 56-day curing period. The unconfined compressive strengths of small scale DMCs manufactured on sandy soils were found to be between 4026 kPa and 19776 kPa for the 28-day curing period, and between 886 kPa and 7125 kPa for the 56-day curing period. The permeability coefficients of small scale DMCs manufactured on sandy soil were found to be in the range of $4.32-341 \times 10^{-11}$ for the 28-day curing period and $3.65-283 \times 10^{-11}$ for the 56-day curing period. In the ANOVA analyzes, the effect of amorphous silica on the unconfined compressive strength in clayey soils were found to have a positive effect when the water/binder (w/b) ratio was selected in the range of 1-1.5, the

amorphous silica in the range of 25%-35%, and the superplasticizer additive of 2.5-3.5%. It has a positive contribution to the unconfined compressive strength in sandy soils where the w/b ratio is selected as 0.9-1.0 and other parameters are selected as in clayey soils. In ANOVA analysis, it was found that the contribution of amorphous silica to permeability was more dominant. In the appropriate selection of parameters, amorphous silica decreased the permeability coefficient by 60% for clayey soils and 70% for sandy soils. For optimum design in small-scale DMCs, the accuracy of 81% for the 28-day curing time and 79% for 56-day curing time were reached between the results obtained from the unconfined pressure tests and the predicted results in clayey soil. For optimum design in small-scale DMCs, the accuracy of 89% for the 28-day curing time and 86% for 56-day curing time were reached between the results obtained from the unconfined pressure tests and the predicted results in sandy soil. For optimum design in small-scale DMCs, the accuracy of 83% for the 28-day curing time and 78% for 56-day curing time were reached between the results obtained from the permeability tests and the predicted results in clayey soil. For optimum design in small-scale DMCs, the accuracy of 77% for the 28-day curing time and 93% for 56-day curing time were reached between the results obtained from the permeability tests and the predicted results in sandy soil. Micro-scale void states, C-S-H gels, C-H plates and ettringite formations were examined in samples taken from small-scale DKKs in SEM images, EDS, XRD and XRF analyzes and correlated with DMC performance. Loading tests of large-scale DKK columns were carried out, bearing capacities were determined by different methods and the results were evaluated.

Keywords: Amorphous silica, clayey and sandy soil, deep mixing column, optimization, response surface method, soil improvement.

ÖNSÖZ

Akademik çalışmalarında bana her türlü desteği verip emeğini esirgemeyen ve anlayış gösteren, akademisyen ve insani olarak örnek aldığım danışman hocam ve ağabeyim Prof. Dr. Murat OLGUN' a teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alarak değerli bilgi ve görüşleriyle beni yönlendiren ve katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. İhsan ÖZKAN hocama ve Dr. Öğretim Üyesi Atilla DEMİRÖZ' e teşekkürlerimi sunarım. Savunma sınavında jüri üyesi olarak yer alan ve değerli görüşlerini paylaşan Doç. Dr. Ali Sinan SOĞANCI' ya ve Dr. Öğr. Üyesi İsa KUL' a teşekkürlerimi sunarım. Yükseköğrenim hayatıma başladığım 2005 yılından bu yana insani yönden ve akademisyen olarak örnek aldığım, yüksek lisans danışmanım, vefat edene kadar tez izleme komitesi üyem, rahmetli hocam Prof. Dr. Özcan TAN' a vefayı ve teşekkürü borç bilir, rahmet ve minnetle yâd ederim.

Çalışmalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN' a, Öğr. Görevlisi Alican ŞENKAYA' ya şükranlarımı sunarım. Deneyisel çalışmalarında büyük destek ve yardımlarda bulunan meslektaşım İnşaat Mühendisi Hüseyin Furkan YALVAÇ' a, İnşaat Mühendisi Hüseyin İLERİ' ye, İnşaat Yüksek Mühendisi Nasrudin Mahamud Muse' ye teşekkür ederim.

Çalışmalarımın en başında araziden malzeme temininde yardım isteğimi tereddütsüz kabul edip desteklerini esirgemeyen dostlarım İnşaat Mühendisleri Halil ÖNEM' e, Harun ÖZDİL' e, hem malzeme temininde sahada hem de analizlerin yapılmasında destek ve yardımlarını esirgemeyen ağabeyim Maden Mühendisi Hasan ESER' e teşekkürlerimi sunarım.

Uzun ve zorlu doktora çalışmalarım sürecinde fedakarlıkta bulunan, beni idare edip destek olan sevgili eşim Tuğba' ya ve canım kızım Erva Melek' e ve tabi ki bugünlere gelmemde en büyük paya sahip maddi, manevi desteklerini esirgemeyen, dualarıyla beni yalnız bırakmayan saygıdeğer annem Habibe'ye, babam İsmail'e ve ağabeyim Mustafa'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de katkılarından ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Hz. Mevlana'nın da dediği gibi 'Kâmil insan odur ki koya dünyada bir eser, eseri olmayanın yerinde yeller eser'. Bilime ve ilime katkısı olması dileklerle...

Bekir FİDAN
KONYA-2023



Biricik kızım Meleşime...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Hatlarıyla Tez Çalışması	4
1.2. Tezin Organizasyonu	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri	6
2.2. Derin Karıştırma Yöntemi	9
2.2.1. Geçmişten günümüze derin karıştırma yönteminin süreci	11
2.2.2. Derin karıştırma uygulama aşamaları ve uygulama yöntemleri	11
2.2.3. Derin karıştırma yöntemi uygulama alanları ve uygulama geometrileri	23
2.2.4. Derin karıştırma yönteminin avantaj ve dezavantajları	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	28
3.1.1. Zeminler.....	28
3.1.2. Çimento.....	33
3.1.3. Katkı maddesi olarak süper akışkanlaştırıcı	35
3.1.4. Amorf silika	36
3.2. Deneylerde Kullanılan Düzenek, Makine, Teçhizat ve Ekipmanlar	50
3.2.1. PVC kalıplar	51
3.2.2. Laboratuvar mikseri.....	51
3.2.3. Hidrolik ve manuel numune çıkarıcı	52
3.2.4. Laboratuvar tipi konkasör (öğütücü) laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen	53
3.2.4. Laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen.....	53
3.2.4. Deney kalıpları.....	54
3.2.5. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi.....	55
3.2.6. Yükleme ünitesiyle entegre edilebilen modüler enjeksiyon haznesi	57
3.2.7. Karıştırma bıçağı.....	58
3.2.8. Hassas yükleme yapabilen hidrolik yükleme sistemi	59
3.2.9. Veri toplama ünitesi, yük halkası, komparatör saatler ve potansiyometreler.....	60
3.3. Deneysel Çalışmalar ve Süreçleri	62
3.3.1. Ön tasarım deneyleri ile sınır parametrelerinin belirlenmesi.....	62
3.3.2. Yanıt yüzey yöntemi ve istatistiksel deney tasarımı.....	65
3.3.3. Küçük ölçekli derin karıştırma kolon numunelerinin hazırlanması.....	68

3.3.4. Serbest basınç deneyi (UCS)	73
3.3.5. Permeabilite deneyi.....	75
3.3.6. Numuneler için kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler	79
3.3.7. Optimizasyon ve doğrulama deneyleri	81
3.3.8. Enjeksiyon karışımları için reolojik deneyler	83
3.3.9. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarının hazırlanması ve yükleme deneyleri.....	87
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	96
4.1. Küçük Ölçekli DKK Ön Tasarım Deneyleri.....	96
4.2. Küçük Ölçekli DKK Tasarım Deneyleri	97
4.2.1. Serbest basınç mukavemeti deneyi	97
4.2.2. Permeabilite deneyi (geçirimlilik deneyi).....	117
4.3. Optimizasyon Çalışmaları ve Optimum Tasarım (Doğrulama) Deneyleri	142
4.4. Reoloji Deneyleri	160
4.4.1. Marsh hunisi deneyleri.....	160
4.4.2. Sedimentasyon deneyleri (çökelme, stabilite)	167
4.5. Büyük Ölçekli DKK ve Yükleme Deneyleri	172
4.5.1. Terzaghi (1943) taşıma gücü teorisine göre taşıma gücü hesabı	173
4.5.2. Brinch – Hansen %80 yöntemi (1963)	177
4.5.3. De Beer yöntemi (1989)	181
4.5.4. Hirany-Kulhawy yöntemi (2002).....	183
4.5.5. Chin Kondner yöntemi (1970).....	186
4.5.6. Decourt yöntemi (1999).....	189
4.5.7. Eğim-teğet yöntemi.....	192
4.5.8. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemi	194
4.5.9. Genel değerlendirme	197
4.6. Kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler	202
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	220
5.1 Sonuçlar	220
5.2 Öneriler	224
KAYNAKLAR	225
EKLER	238

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

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
$A_{\text{uç}}$	: Kolon ucunun kesit alanı
c	: Kohezyon
C	: Santigrat
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
$CaSO_4$	: Kalsiyum sülfat
C_c	: Eğrilik katsayısı
C-H	: Kalsiyum hidroksit
Cl	: Klorür
CL	: Düşük plastisiteli kil
cm	: Santimetre
cm^2	: Santimetrekaare
cm^3	: Santimetreküp
CO_2	: Karbondioksit
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
Cu	: Bakır
C_U	: Üniformluluk katsayısı
D_{10}	: Efektif çap
dk	: Dakika
Dev	: Devir
D_r	: Rölatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
g	: Gram
IC	: Kıvam indisi
IL	: Likitlik indisi
Kg	: Kilogram
m^3	: Metreküp
Fe_2O_3	: Demir (3) oksit
L_s	: Lineer rötre
PI	: Plastisite indisi
SiO_2	: Silisyum (2) oksit
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
w_S	: Rötire limit

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	: Tek yönlü varyans analizi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ASCE	: American Society of Civil Engineers
BS	: İngiliz Standartları
CDIT	: Coastal Development Institute Of Technology
EDS	: Enerji dispersiv spektrum
DKK	: Derin karıştırma kolonu
DKY	: Derin karıştırma yöntemi
FHWA	: Federal Highway Administration
ISSMGE	: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
k	: Amorf silikanın etkinlik faktörü
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
sd	: Serbestlik derecesi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SHRP	: Strategic Highway Research Program
TS	: Türk Standartları
UCS	: Tek eksenli basınç
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
XRD	: X-Işını difraktometresi
XRF	: X-Işını floresans spektrometresi
YYY	: Yanıt yüzey yöntemi

1. GİRİŞ

Dünyada son yüz-yüz elli yıl içerisinde sanayileşme ve ekonomik gelişim, hızlı nüfus artışı ile birlikte hızla gelişen şehirleşmeleri doğurmuştur. Bunun sonucunda kırsaldan şehirlere göç de artmış ve bu döngü içerisinde şehir merkezlerinde özellikle yüzölçümü bakımından küçük şehirlerde inşaat alanları gittikçe azalmış ve bununla beraber arsa üretmekte zorlanılmaya başlanmıştır, bu da arsa maliyetlerini önemli ölçüde artırmıştır. Tüm bu faktörler problemleri zeminlerin de artık değerlendirilmesi gerekliliğini zorunlu kılmıştır. Hızlı kentleşme neticesinde uygun yerleşim alanlarının azalmasıyla beraber yüksek katlı yapıların inşası önem kazanmıştır. Yapıların giderek artan boyutlarının getirdiği büyük gerilme limitleri taşıma gücü ve oturma açısından zeminleri zorlamaktadır. Yine teknolojinin gelişimiyle nitelikli yapıların yapılması ve büyük projelerin artması (özellikli fabrikalar, akıllı binalar, çok katlı yapılar, barajlar, köprüler, kıyı yapıları vs.) da bu yapıların inşa edildiği zeminlerin daha sağlam ve güvenilir olmasını gerektirmektedir. Yapıları inşa edecek sağlam zemin bulmanın zorluğu, bununla birlikte artık daha problemleri zeminlerin üzerine inşaat yapılıyor olması ve/veya herhangi bir arazide yapılması düşünülen yapıdan vazgeçilememesi (yapının o yerde yapılması zorunluluğu), nedenlerinden dolayı zeminlerin iyileştirilmesi (stabilizasyon, ıslah, modifikasyon) kaçınılmaz hale gelmekte, çoğu projede derin temellerin inşasını ve/veya zemin iyileştirmesini esas kılmaktadır.

Zemin özellikleri kullanımı için yeterli olmadığında; zayıf zemin geçilerek temeli sağlam tabakaya oturtmak, yapı temelini ve yapıyı zayıf zeminin taşıyabileceği özelliklerde yapmak, zayıf zemini tamamen kaldırarak yerini uygun zemin ile doldurmak, zemin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmek, dolgu zeminini inşaat yerinde yapılan işlemlerle (katkı malzemeleri kullanarak) iyileştirmek ve uygun tekniklerle yerleştirmek gibi yöntemler çözüm için seçenek olarak kullanılır.

Problemleri zemin olarak adlandırılan yumuşak veya gevşek zeminlerde zemin iyileştirmesine gidilmezse bazen yüksek deformasyonlar bazen de kayma göçmeleri sonucunda yapı adeta deprem yükü etkisi altında kalmış gibi kullanılamaz hale gelebilmektedir. Gevşek kum zeminlerde taşıma gücünü artırmak ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak için, yumuşak kil zeminlerde ise genelde taşıma gücünü artırmak, konsolidasyon oturmalarını azaltmak veya sınırlandırmak için zemin iyileştirmesine gidilmektedir.

İnşa sahasında zemin iyileştirmesine ihtiyacın olup olmadığına, yapı ve zemin özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi sonucu karar verilebilir. Zeminlerin stabilizasyonu yapı temellerinde zeminin taşıma gücü, izin verilebilir sınır oturma değeri, stabilite ve sıvılaşma şartlarından bir veya birkaçını sağlayamadığı durumlarda gerekmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri yüzeysel ve derin iyileştirme teknikleri olarak iki başlık altında değerlendirilebilir. İyileştirmenin yüzeysel mi derin mi olacağına ise inşa edilecek yapının özellikleri ve yapıdan zemine aktarılan gerilmelerin etkisine göre karar verilir. Daha sonra yapı yükünü emniyetli bir şekilde taşıyacak ve hiç oturma yapmayacak veya izin verilebilir sınır değerler içerisinde oturma yapmasına müsaade edilecek şekilde zeminin yeterli dayanıma getirilmesi ile zeminin iyileştirilmesi (kompaksiyon vb. gibi fiziksel, kimyasal katkılı stabilizasyon veya biyolojik yöntemler) veya zeminin içerisinde zemine göre rijitliği daha yüksek olan kolonlar (kazıklı temel, jet grout, derin karıştırma, taş kolonları) imal edilmesiyle zeminin güçlendirilmesi çalışmaları yapılabilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden en uygun yöntemin seçilmesinde; iyileştirilecek zeminin özellikleri, jeolojik ortam, yer altı suyu durumu, hedeflenen iyileştirme türü ve derecesi, iyileştirme yönteminin maliyeti ve proje boyutları, iyileştirme süresi ve inşaat takvimi, çevreye ve civar yapılara etkileri, hangi amaca yönelik yapılması gerektiği gibi pek çok husus dikkate alınmalıdır.

Derin iyileştirme yöntemi kategorisine dahil edilebilen ve 1950’li yılların ortalarına doğru uygulanmaya başlanan ve zaman içinde geliştirilen, günümüzde ise yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinde biri de derin zemin karıştırma veya daha kısa adıyla derin karıştırma yöntemidir (DKY). DKY günümüzde diğer birçok yöntemde olduğu gibi halen geliştirilmekte olan bir yöntemdir. DKY, delici bir tij üzerinde bulunan delikli kanatlarla (bıçak) oluşturulan aletin, zemin içerisine belli bir dönme-itme-çekme hızıyla itilmesi ve eşzamanlı olarak zemine belirli bir basınçta enjeksiyon verilerek zeminin yerinde karıştırılması ve böylece zeminde mekanik olarak delme/kesme hareketiyle istenilen mukavemette, sürekli ve zemine göre daha rijit bir kolonun (kazığın) oluşturulması esasına dayanır. Enjeksiyon olarak zemine katılan malzemeler bağlayıcı özelliği olan çimento, kireç vb. malzemelerin yanında puzolan özelliği gösteren uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi diğer katkılardır. Genel itibariyle bu yöntem zeminin taşıma gücünün artırılmasında, killi zeminlerde konsolidasyon oturmalarının azaltılmasında, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan kumlu zeminlerde sıvılaşma direncinin artırılarak sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasında ve sıvılaşma sonrası oluşabilecek dinamik oturmaların sınırlandırılmasında, toplam ve farklı

oturmaların kontrol edilerek sınırlandırılmasında, şev ve dolguların stabilitesinin artırılmasında, geçirimsizlik perdelerinin oluşturulmasında oldukça etkilidir. Daha çok killi zeminlerde kullanılmakla beraber, gerekli tasarım koşulları sağlandığında her türlü zeminde uygulanabilen DKY, hızlı ve ekonomik bir çözüm sunması sebebiyle geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

DKY’nde iki tür teknik kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan ıslak yöntemde bağlayıcı olarak genellikle çimento kullanılırken diğer bir yöntem olan kuru yöntemde ise bağlayıcı olarak çimento veya kireçten biri veya belirli oranda karıştırılarak her ikisi kullanılmaktadır. Kuru yöntem ıslak yöntemden farklı olarak suya doymuş zeminlerde veya derin karıştırma kolonunun (DKK) yer altı su seviyesinin altında imal edildiği durumlarda bağlayıcı maddenin hava basıncı ile zemine püskürtülerek karıştırılmasıyla oluşturulur. Çimento gerek zemin iyileştirme yöntemlerinde gerek betonlu üretimlerde kullanılan en önemli ve esas bağlayıcı maddesidir. Çimentonun zemin iyileştirme yöntemlerinde kullanıldığı pek çok araştırma hem arazide hem de laboratuvar ortamında yapılmıştır (Wahidy, 2019; Yi ve ark., 2009; Lorenzo ve Bergado, 2006, 2004; Bergado ve Lorenzo, 2005; Pathivada, 2005; Horpibulsuk ve ark., 2003; Miura ve ark., 2002; Tan ve ark., 2002; Axelsson ve ark., 2002; Porbaha ve ark., 2000; Matsuo ve ark., 1996; Babasaki ve ark., 1996, 1984; Enami ve ark., 1985). Bu kadar yaygın kullanımına rağmen çimentonun üretiminin pahalı olması ve ayrıca çevre ve sağlık açısından büyük zararlarının bulunması da dikkate alınmalıdır. Çimento, üretimi esnasında toksik metal ve organik bileşiklerin salınmasına yol açar (Mishra ve Siddiqui, 2014). Yine çimento üretiminde yoğun olarak karbondioksit (CO_2) salınımı gerçekleşmektedir (Sharp ve ark., 2010). Yapılan hesaplamalara göre her bir ton portland çimento üretiminde yaklaşık olarak bir ton da CO_2 açığa çıktığı ortaya konmuştur. Bu sebeplerle araştırmacılar çimentoya alternatif bağlayıcı özelliği olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, zeolit vb. malzemelerle zemin-bağlayıcı karışımlarının özelliklerini araştırmışlardır (Fidan, 2022; Yenginar, 2020; Arslan, 2020; Noori, 2019; Masike, 2019; Yalçinyiğit, 2019; Bushra ve Robinson, 2013).

Yapılan literatür taramalarında bugüne kadar zemin stabilizasyonunda amorf silikanın kullanıldığı detaylı bir araştırmaya ve çalışmaya rastlanmamıştır. Amorf silikanın beton üretiminde katkı olarak kullanıldığı bir çalışmada beton dayanımında belirli oranlarda kullanıldığında ciddi katkı sağladığı ortaya konmuştur ve bunun için bir etkinlik faktörü tanımlaması yapılmıştır. Amorf silikanın etkinlik faktörü (k), C20 betonu için 2.43, C30 betonu için 1.52 olarak tespit edilmiş ve uçucu küllerin beton

dayanımına katkısıyla (0.25–0.5) kıyaslandığında önemli bir avantaj sağladığı ortaya konmuştur (Davraz, 2004; Davraz ve Gündüz, 2003, 2005).

1.1. Genel Hatlarıyla Tez Çalışması

Tez çalışması kapsamında istatistiki ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deney tasarım tablosunun oluşturulması için Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarında DKY ile daha önce yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Çalışma kapsamında sahadan malzemeler temin edilmiş ve özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda çalışmaya esas kullanılan amorf silika malzemesi kapatılmış bir maden sahasından temin edilerek kimyasal analize tabi tutulmuş ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Malzemenin yüksek oranda SiO_2 içerdiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak malzemelerin deneysel tasarım alt ve üst sınır değerleri belirlenirken önceki yapılan çalışmalar incelenmiştir. Özellikle amorf silikanın alt ve üst sınırlarının belirlenmesi ve malzemenin aktif olup olmadığının (çimento ile reaksiyon verip vermediği, camsı yapıda veya kuartz yapıda olup olmadığının tespiti) tespiti için küçük ölçekli ön tasarım deneyleri yapılmış ve malzemenin çimento ile reaksiyon verdiği tespit edilerek istatistiksel deney tasarımında kullanılacak sınır değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu sınır değerlerle beraber Yanıt Yüzey Yöntemi' ne (YYY) göre Design Expert (versiyon 11) programında küçük ölçekli istatistiksel deney tasarımı için 18 seviyeli bir tasarım tablosu kil ve kum zeminler için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarım tablosuna göre karışım hesapları yapılmıştır. Tasarım tablosundaki her seviye için 28 ve 56 günlük kür süreleri için amorf silika katkılı DKK' nın performansı (dayanım ve geçirimlilik) araştırılmıştır. Bu kapsamda hem kum hem kil zemin için küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanarak serbest basınç dayanım deneyleri ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Her seviye, her zemin türü, her deney türü ve iki farklı kür süreleri için 3'er numune hazırlanarak toplamda 256 adet serbest basınç deneyi ve 256 adet geçirimlilik (permeabilite) deneyi yapılmıştır. Sonuçlarından emin olunmayan numunelerin yerine şahit numuneler hazırlanarak deneyler tekrar edilmiş ve hata oranı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu deneylerden elde edilen deney sonuçları her bir zemin türü ve kür süreleri için farklı kombinasyonlarda analiz edilmiş ve nihai olarak zemin türü ve kür süresi kategorik olarak değerlendirilerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimizasyon çalışmaları sonucu bir optimum tasarım belirlenmiş ve yine her iki zemin türü ve kür süreleri için

doğrulama deneyleri her iki deney türü (serbest basınç dayanımı ve geçirimsizlik) için de yapılmıştır.

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçların optimizasyon sonucu elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunun tespiti sonrasında model tanklar içerisinde büyük ölçekli DKK oluşturulmuştur. Büyük ölçekli deneyler için model tanklarda çeşitli tabaka kalınlıklarında 4 adet DKK'ı oluşturularak 28 günlük kür süresi sonunda kolonlar yükleme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Farklı tabakalanma kalınlıklarının kolon dayanımına etkisi ve yük-oturma ilişkisi irdelenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarla küçük ölçekli deney sonuçları ilintilendirilmiştir.

Kritik görülen tasarımlar için mineralojik-petrografik (SEM-EDS, XRD) ve kimyasal analizler (XRF) yapılmıştır. Bu kapsamda MTA laboratuvarlarında SEM-EDS haritalama görüntüleri alınmış ve karışımda oluşan ürünler, bağ ve reaksiyonlar (C-S-H, C-S-A-H jelleri, CH plakaları ve etrenjit iğneleri) ile performans özellikleri arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu tasarımlar için XRD ve XRF sonuçları da incelenerek tasarım sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir.

1.2. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması temel olarak 5 bölümden oluşturulmuştur. Birinci bölümde çalışmanın amacı ve kapsamı ile ilgili genel bir bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, literatürde DKY ile ilgili yapılan çalışmalara değinilerek derin karıştırma mekanizması, derin karıştırma uygulama yöntemleri, derin karıştırmayı etkileyen faktörler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan malzeme ve materyaller ile deney öncesi yapılan hazırlıklar ve yapılan deneylerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilerek tartışılmış ve sonuçların kapsamlı değerlendirilmesi yapılmıştır. Beşinci bölümde bu tez çalışmasının laboratuvar çalışmalarından elde edilen özet ve sonuçları, bulguların önemi ve gelecekteki araştırma ihtiyaçları ele alınmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

İnşaat mühendisleri yapı tasarımı ve inşasında, 3e kuralı diye adlandırılan emniyet, ekonomi ve estetik (ergonomik ve fonksiyonellik) kurallarına dikkat ederler. Bunların içerisinde emniyet faktörü ilk sırada gelir. Emniyet faktörü yapı inşasında zeminden başlar. Proje sahasındaki zemin koşulları tasarım ve yapım açısından önemli bir etkiye sahiptir. Sorunlu zemin koşulları projenin uygulanabilirliği açısından önemli sorunlara yol açabilir. Sorunlu zeminlerde yapı inşası açısından inşaat sahasının değiştirilmesi, zeminin değiştirilmesi, tasarımın zemin durumuna göre uygun hale getirilmesi ve zeminin iyileştirilmesi çözüm yöntemleri olarak sunulabilir. Bunların içerisinde inşaat sahasının değiştirilmesi son zamanlarda artan yapılaşmayla beraber özellikle şehirleşmenin yoğun olduğu kalabalık yerleşim yerlerinde arsa bulmakta zorlanılması bakımından çok mümkün olmamakla beraber böyle bir arsanın bulunması pahalı bir çözüm olarak karşımıza çıkar. Yine inşaat sahasındaki problemlili zeminin değiştirilmesi ve tasarımın zemin koşullarına uygun hale getirilmesi (derin temeller vs.) de mali açıdan ciddi yük getirebilir. Zemin iyileştirme yöntemleriyle inşaat sahasının yerinde rehabilite edilmesi ise karşımıza mantıklı ve ekonomik yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Zemin güçlendirme (ground reinforcement), zemin iyileştirme (ground improvement), zemin tedavi etme (ground treatment), her ne kadar farklı tabirler olarak görülsede temelde hepsi zemini rehabilite etmeye yönelik tanımlardır. Zemin iyileştirme veya zemin modifikasyonu, tasarım ve/veya operasyonel yükleme koşulları altında daha iyi performans sağlamak için saha temel zeminlerinin değiştirilmesi olarak tanımlanır (Schaefer ve ark., 2012, 2016).

Zemin iyileştirme; zemin özelliklerinin üstyapı inşası için uygun olmadığı durumlarda uygun çeşitli yöntemler kullanarak zeminin amaçlanan ve istenilen düzeyde ıslah edilmesi olarak tanımlanmıştır (Das, 2019). Bugünün İtalya topraklarında bulunan ve Romalılar tarafından Via Appia olarak adlandırılan yolun kireç ile stabilize edilmesi tarihte ilk zemin iyileştirme uygulama örneklerinden biri olarak kabul edilmiştir (Berechman, 2003). Konuyla ilgili ilk konferans Cambridge, Massachusetts'te ASCE (American Society of Civil Engineers) sponsorluğunda 1968 yılında "Placement and Improvement of Soil to Support Structures" adıyla düzenlenmiştir (ASCE,1968). Bu

alandaki ilk kapsamlı ders kitabı Hausmann tarafından yazılmıştır (Hausmann, 1990). Moseley ve Kirsch (2004) zemin iyileştirmesi kitabında ASCE (1978) tarafından düzenlenen zemin iyileştirmesi konferansında kötü zemin koşullarıyla karşılaşıldığında mevcut alternatiflerden birinin ‘zeminin özelliklerini iyileştirmek için zemini tedavi etmek’ olduğundan bahseder.

Tüm zemin iyileştirme teknikleri, bir projede istenilen zemin özelliklerini elde etmek üzere zemini iyileştirme ve stabilite problemlerini önlemek için zeminin kayma direnci, yoğunluğu ve taşıma gücünün artırılması, zeminin sıkışabilirliğinin azaltılması, geçirimsizliğinin azaltılması, deformasyonların kontrol edilmesi, drenajının artırılması, zeminin geçirimsizliğini etkileyen yer altı suyu akışını azaltarak kontrol edilmesi, konsolidasyonu hızlandırarak konsolidasyon oranının artırılması, yanal stabilitenin artırılması, sıvılaşma direncinin artırılması, zeminin daha homojen hale getirilmesi gibi amaçlarla yapılır.

Uzuner (2013) Zemin iyileştirme yöntemleri derin ve yüzeysel stabilizasyon olarak iki ana grupta toplanabilir (Çizelge 2.1.).

Çizelge 2.1. Zemin iyileştirme yöntemler (Uzuner, 2013)

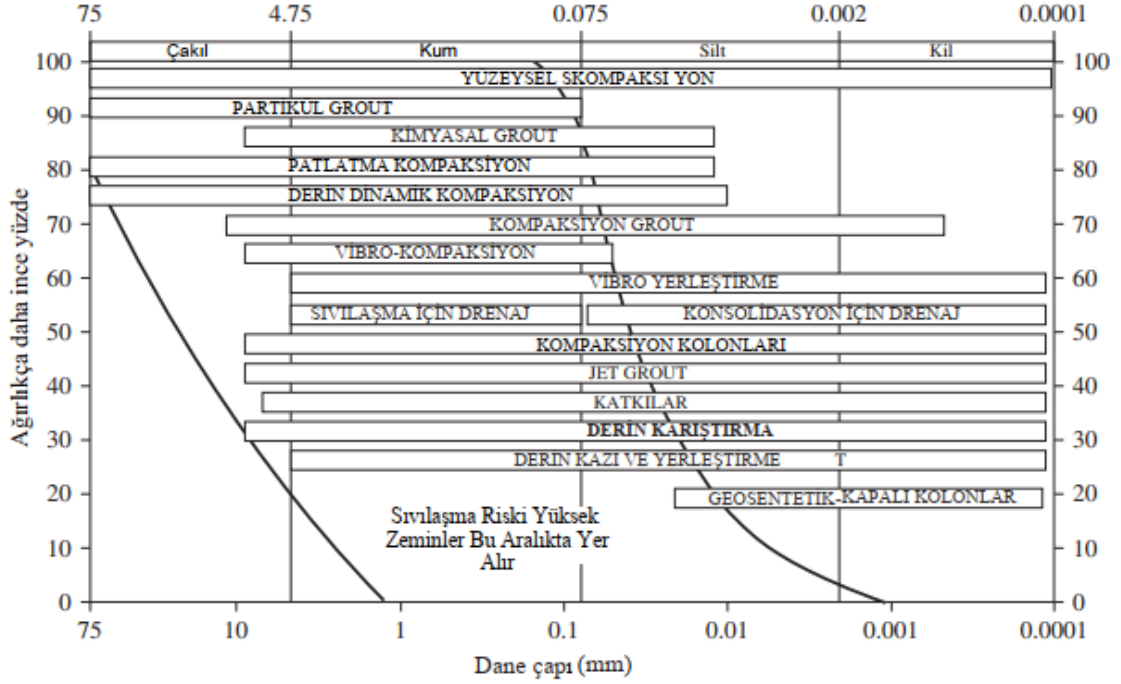
Yüzeysel Stabilizasyon	
Katkısız Stabilizasyon	Katkılı Stabilizasyon
Kompaksiyon Drenaj vb.	Mekanik stabilizasyon Çimento ile stabilizasyon Kireç ile stabilizasyon Bitüm ile stabilizasyon vb.
Derin Stabilizasyon	
Kohezyonlu Zeminler	Kohezyonsuz Zeminler
Derin kompaksiyon (Dinamik konsolidasyon) Derin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

Pek çok araştırmacı ve kuruluş zemin iyileştirme konusunda farklı sınıflandırmalar yapmıştır (Çizelge 2.2.). Amerika stratejik otoyol araştırma programı (SHRP) 46 adet zemin iyileştirme yöntemi tanımlamıştır (Schaefer ve Berg, 2012).

Çizelge 2.2. Zemin iyileştirme yöntemleri sınıflandırması

Referans	Kriter	Kategoriler
Mitchell (1981)	Yapı/Fonksiyon	1. Kohezyonsuz zeminleri yerinde derin sıkıştırılması 2. Ön sıkıştırma 3. Enjeksiyon ve grouting 4. Karışım 5. Termal 6. Güçlendirme
Hausmann (1990)	İşlem	1. Mekanik modifikasyon 2. Hidrolik modifikasyon 3. Fiziksel ve kimyasal modifikasyon 4. Dahil etme ve sınırlama yoluyla modifikasyon
Ye ve ark. (1994)	Fonksiyon	1. Yerine koyma 2. Derin yoğunlaştırma 3. Drenaj ve konsolidasyon 4. Güçlendirme 5. Termal iyileştirme 6. Kimyasal stabilizasyon
ISSMGE TC17 (Chu et al., 2009)	Zemin türü ve içeriği	1. Kohezyonsuz veya dolgu zeminlerde katkısız zemin iyileştirme 2. Kohezyonlu zeminlerde katkısız zemin iyileştirme 3. Katkılarla veya zemine ilavelerle zemin iyileştirme 4. Grouting türü katkılarla zemin iyileştirme 5. Toprakarme
Schaefer and Berg (2012)	Uygulama	1. Toprakarme inşası 2. Kohezyonsuz zeminlerin sıkılaştırılması 3. Yumuşak zemin üzerindeki setler 4. Sızdırmazlık perdeleri 5. Artırılmış kaplama performansı 6. Süreklilik 7. Yumuşak zemin drenaj ve konsolidasyonu 8. Düşey destek yapılarının inşası 9. Yanal dayanma yapıları 10. Sıvılaşmayı azaltma 11. Boşluk doldurma
Han (2015)	Fonksiyon	1. Sıkılaştırma 2. Değiştirme 3. Drenaj ve konsolidasyon 4. Kimyasal stabilizasyon 5. Güçlendirme 6. Termal ve biyolojik iyileştirme

Derin karıştırma yöntemi partikül boyutu çok büyük olmayan çakıllı zeminler hariç hemen hemen tüm zemin türlerinde uygulanabilmektedir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Farklı zemin türleri için mevcut zemin iyileştirme yöntemleri (Schaefer ve ark., 2012).

2.2. Derin Karıştırma Yöntemi

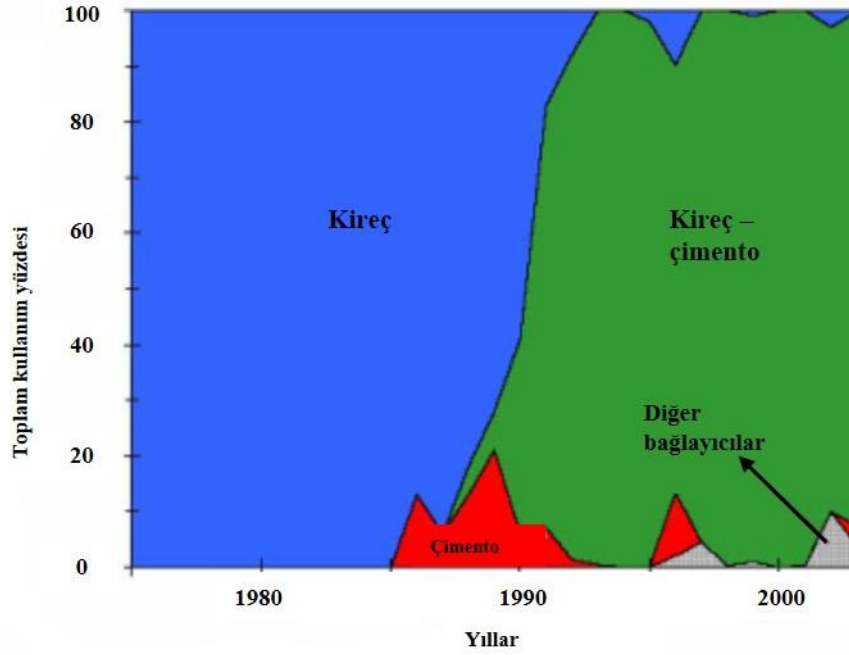
Derin karıştırma yöntemi, büyük derinliklerde zeminlerin stabilizasyonunu içerir. Derin karıştırma bu sebeple derin stabilizasyon sınıfına girer. DKY'nin yerinde stabilizasyon ve yerinde tespit olmak üzere iki ana bakış açısı vardır (Porbaha, 1998). Burada yerinde tespitten kasıt zemine müdahale edilirken herhangi bir kazı, destekleme vb. ekstra işlemlerin yapılmaması, yeraltı suyu seviyesi altında çalışılıyorsa yine suyun drene edilmeden çalışılmasıdır. Derin karıştırma yöntemi, ıslak veya kuru bağlayıcının (çimento, kireç vb.) zemine aynı anda enjekte edilip mekanik olarak zeminle birlikte karıştırılarak zeminde kolon(lar) veya paneller oluşturmak suretiyle zayıf zeminin mühendislik ve çevresel özelliklerini iyileştiren bir yerinde stabilizasyon yöntemidir (Fang, 2006; Gaafer ve ark., 2015).

Bağlayıcı malzemeler, ortası boş bir tijden zemine enjekte edilirken tije bağlı kanatlar ve bıçaklar yardımıyla zeminin içinde ilerleyen tijin rotasyonel hareketiyle zemini kesmesi ve parçalamasıyla DKK oluşturulur.

DKY' de amaç ve nihai hedef diğer zemin iyileştirme tekniklerinde olduğu gibi uygulanabildiği sahalarda, zeminin sıkışabilirliğini azaltmak, zayıf zeminlerde (suya doygun yumuşak killer, taşıma kapasitesi düşük, sıkışabilir, aşırı oturma yapma kapasitesi olan zeminler) zeminin taşıma gücünü artırmak, zemini daha geçirimsiz hale

getirmek, toplam ve farklı oturmaları önlemek veya izin verilebilir değer aralıklarında sınırlamak, zeminin sıvılaşma, kabarma ve büzülme potansiyelini azaltmak, zeminin hidrolik iletkenliğini azaltmak olarak sıralanabilir. DKY ile yer altı suyu akışı da engellenebilir (CDIT, 2002).

DKY' nin ilk uygulanmaya başlandığı ilk yıllarda bağlayıcı olarak kireç kullanılmış daha sonra kireç-çimento karışımları ya da sadece çimento kullanımı yaygınlaşmıştır (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Yıllara göre DKY' de bağlayıcı kullanımı (Rathmayer, 1996; Ahnberg, 2006).

Bağlayıcı maddenin seçimi proje ihtiyaçlarına göre belirlenir. Gevşek kumlu zeminler, yumuşak killer gibi zeminlerde proje bazında ana hedef dayanım ise bağlayıcı madde olarak çimento kullanımı önerilmektedir. Böylece hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar ve çimentolaşma ile beraber kısa zaman zarfında önemli bir dayanım kazanma ve ayrıca iyonik değişkenlik ve flokülasyon oluşmaktadır (Sherwood, 1995; Hosoya ve ark., 1996). Diğer yandan zemin sıkışabilirliğini azaltmak ve istenmeyen oturmaların önüne geçebilmek için bağlayıcı olarak kireç veya kireç-çimento birleşimi veya diğer katkı maddelerin kombinasyonu (cüruf, uçucu kül içeren endüstriyel atıklar vb.) kullanımı önerilmektedir (Puppala, 2003).

DKY yönteminin yumuşak killer, turbalar, karışık zeminler ve gevşek kumlu zeminlerde etkili bir yöntem olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur

(Hausmann, 1990; Rathmayer, 1996; Porbaha, 1998, 2000; Halkola, 1999; Bruce, 2001, Pathivada, 2005).

2.2.1. Geçmişten günümüze derin karıştırma yönteminin süreci

Zemin iyileştirme yöntemi olarak derin karıştırma yönteminin ilk kez uygulanması 1954 yılında tekli burgu sistemle Amerika’da yapılmış ise de bugünkü DKY’nin temelleri Japonya ve kuzey Avrupa ülkelerinde atılmıştır. 1960 ve 1970’li yıllarda Japonya’da bu yöntemin çok fazla uygulaması bulunmaktadır. 1967 yılından itibaren ise ilk kez İsveç’te yumuşak killerde kireç kolonları olarak başlayan uygulama daha sonra diğer Avrupa ülkelerinde, Çin ve güney Asya ülkelerinde ve Amerika’da yayılmaya başlamıştır. Japonya’daki ilk uygulamaları Havalimanı Liman Enstitüsünde, İsveç’te ise İsveç Geoteknik Enstitüsünde yapılmıştır (Porbaha,1998).

1960’ların sonunda Çin’de de denenen DKY daha sonraları yaygın bir iyileştirme metodu olmuştur. 1990’lı yıllarda ise şu anki şekline benzer uygulamalar başlamış, çeşitli ülke ve firmalar tarafından farklı yöntemler ile DKY uygulanmıştır.

1960 lı yıllarda keşfedilen DKY ile ilgili literatür çalışmalarına 1970li yılların başlarında rastlanmaktadır (Broms ve Boman, 1979; Holm ve ark., 1981; Rathmayer, 1996; Okumara, 1996; Kamon, 1996; Porbaha, 1998).

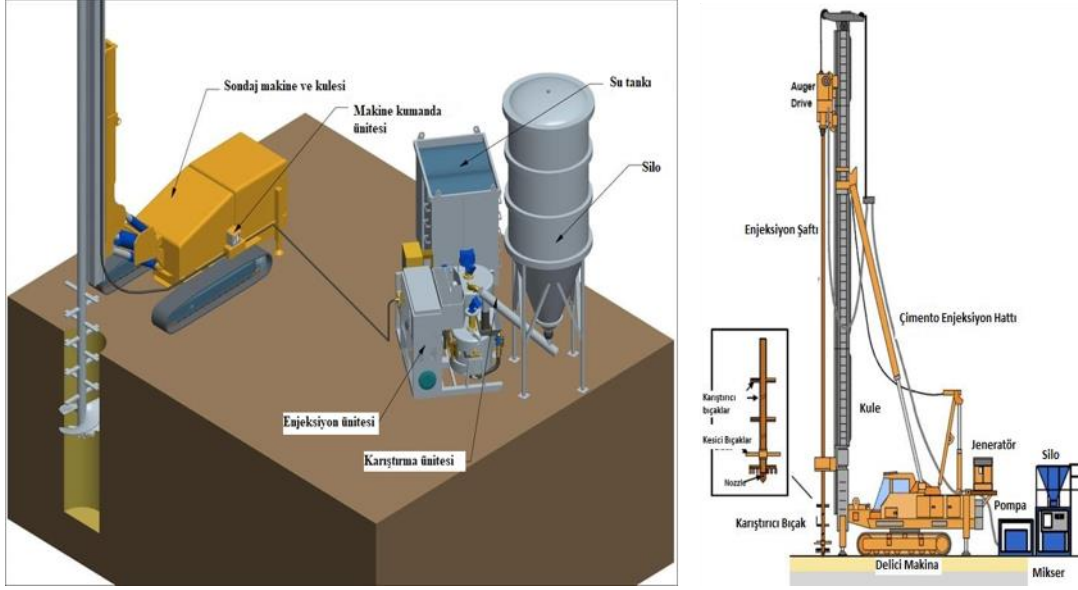
DKY Japonya’da yıllık 5 milyon metreküp uygulama kapasitesine sahipken kuzey Avrupa ülkelerinde 1,2 milyon metreküp uygulaması yapılmaktadır (Topolnicki, 2004).

Bu yöntem ülkemizde 2006 yılında çıkarılan TS-EN14679 numaralı standart ile Türk Standartlarına girmiştir.

2.2.2. Derin karıştırma uygulama aşamaları ve uygulama yöntemleri

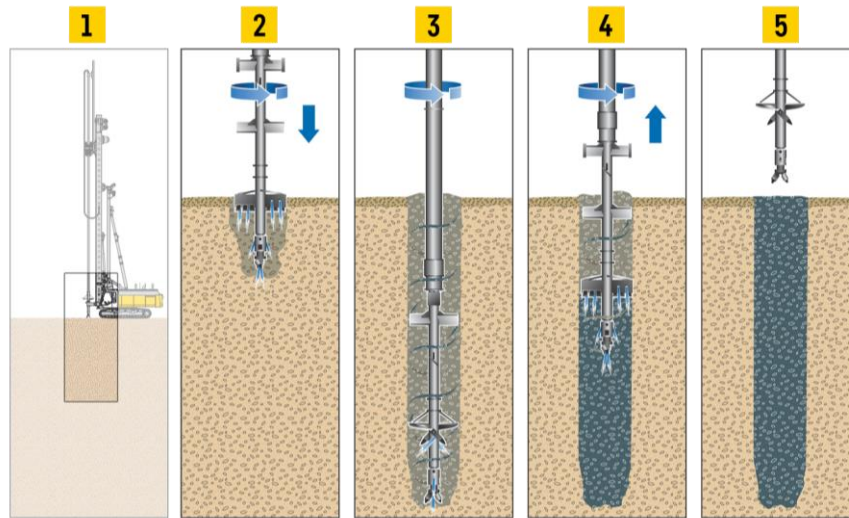
DKY birçok sistem bölgesel pazarların (yerel piyasanın talebi) ihtiyaçlarına ve sınırlamalarına cevap vermek amacıyla ve hâkim olan zemin koşullarında uygulanabilirliği dikkate alınarak geliştirilmiştir (Topolnicki, 2004).

DKK’nın oluşturulabilmesi için kullanılan ekipmanlar karıştırıcı bıçaklı shaft, çimento silosu, su tankı, mikser ve pompadan oluşmaktadır (Şekil 2.3.)



Şekil 2.3. Derin Karıştırma Yöntemi ekipmanı (Model&co,2022; Kılıç, 2013)

DKK'nın oluşturulması için delici paletli makine ve kule proje sahasında kolonun oluşturulacağı koordinatta konumlandırılır. Karıştırıcı ve delici şaft tasarım derinliğine kadar rotasyonel hareketle inerek zemini parçalayarak karıştırır. Bu esnada zemine enjeksiyon malzemesini püskürtür ve karıştırıcı bıçaklar homojen bir kolon oluşana kadar enjeksiyon ve zemini karıştırmaya devam eder. Kolon oluşuktan sonra işlem sonlandırılır (Şekil 2.4.). Burada dikkat edilecek husus kolona enjekte edilen bağlayıcının kolon boyunca zeminin tamamıyla karışmasıdır. Aksi takdirde kolonda süreksizlikler oluşur ve bu da tasarımda ve uygulamada istenilmeyen bir uygulama şeklidir.



Şekil 2.4. DKK oluşturma safhaları (Liebherr, 2022)

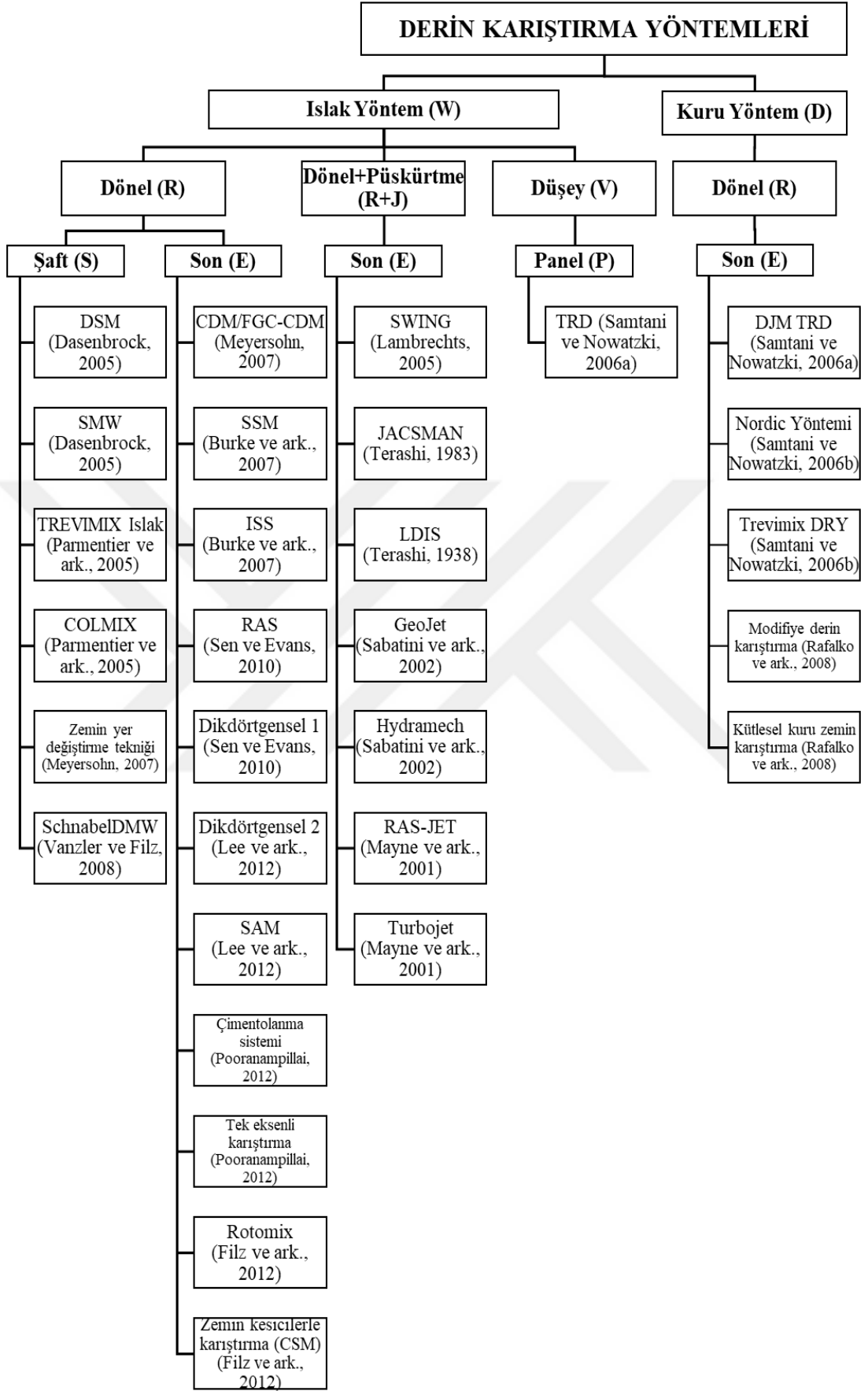
DKY genel itibariyle ıslak ve kuru yöntem olarak ikiye ayrılmaktadır. Araştırmacılar tarafından yapılan farklı sınıflandırmalarda karıştırma mekanizması, bağlayıcı türü, karıştırma araçlarının lokasyonu dikkate alınmıştır (Bruce, 2000a, b). Bu sınıflandırmalar 3 başlık altında toplanabilir:

- **Bağlayıcıyı zemine uygulamak için kullanılan yöntem:** Sınıflandırması W veya D şeklindedir. W (Wet: Islak) yönteminde bulamaç şeklinde zemine karıştırma, D (Dry: Kuru) yöntemde bağlayıcı kuru olarak basınçlı bir şekilde zemine karıştırılır.
- **Şaftın zemine itilmesi veya bağlayıcının karıştırılması için kullanılan yöntem:** Sınıflandırması R, J, V şeklindedir. R (Rotary:Dönel) bağlayıcı düşük basınçta ve dönel bir sistemle yüksek basınçta zemine iletilir, J (Jet:Püskürtme) bağlayıcının bulamaç halinde dönel bir sistemle zemine püskürtülmesi, V (Vertical:Düşey) düşey yönde dönen elektrikli bir testere benzeri düzenekle duvar veya panel oluşturan sistem
- **Zeminde karışmanın meydana geldiği konum veya dikey mesafe:** Sınıflandırması E, S, P şeklindedir. E (End:Son) karıştırma shaftın en sonunda veya shaftın sonundan bir kolon çapı mesafede gerçekleştirilir, S (Shaft:Şaft) delgi shaftı boyunca veya delgi gövdesinin bir kısmında gerçekleştirilir, P (Panel:panel) karıştırma, bir panel veya duvar inşa eden aletin tüm uzunluğu boyunca gerçekleşir.

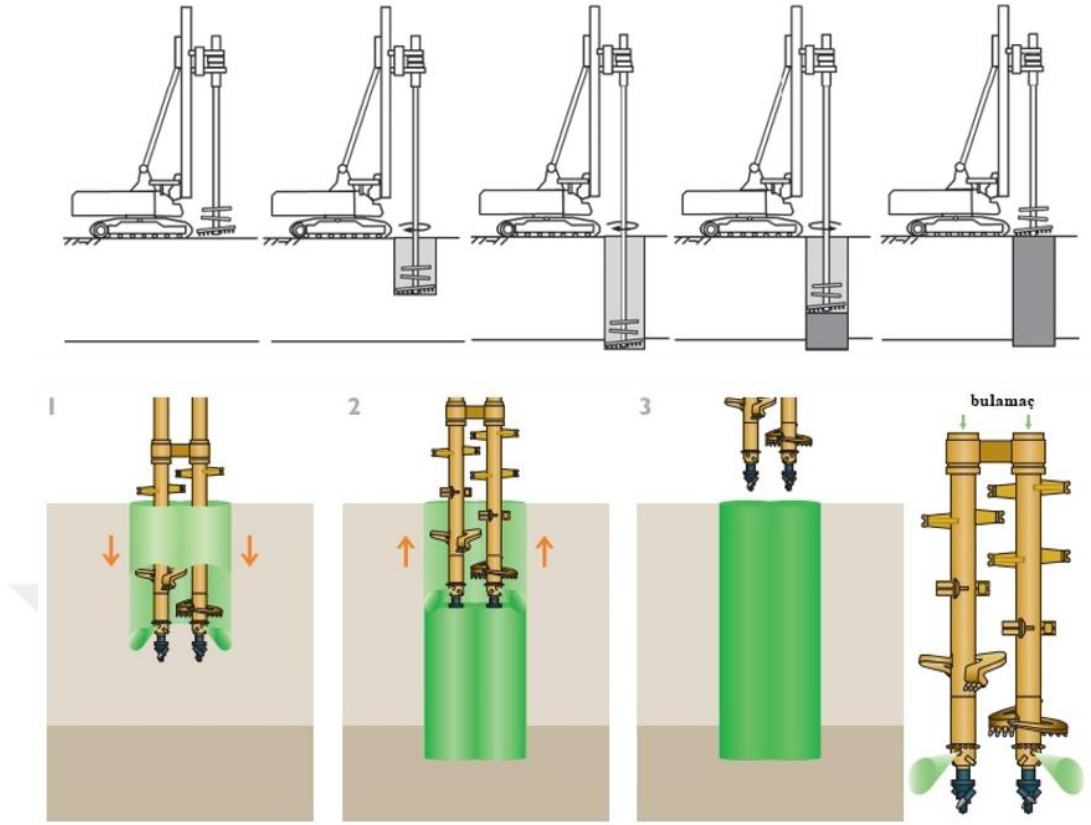
Bu sınıflandırma altında araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve halen de geliştirilmeye devam edilmektedir (Şekil 2.5.).

2.2.2.1. Islak yöntem

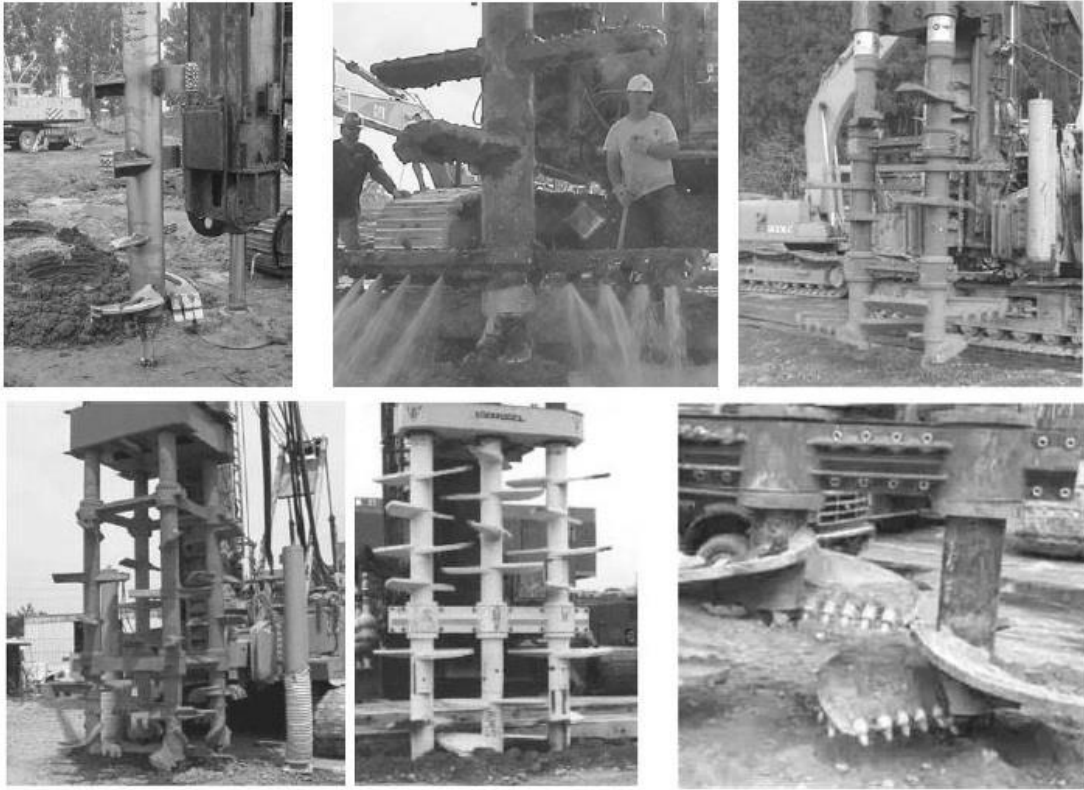
Islak derin karıştırma yönteminde tekil veya çoklu shaftlarla genellikle çimento esaslı bulamaç zemine yüksek oranda enjekte edilip karıştırılarak sürekli duvarlar, tekil veya blok şeklinde kütle elemanlar imal edilir. Bu yöntem zemin kütlelerini stabilize etmek için yüzeysel iyileştirme yöntemi olarak ta kullanılır. Islak karıştırma yöntemi ekipmanları, bağlayıcı (genellikle çimento) ve sudan oluşan bulamacı hazırlamak için bir karıştırma ünitesi, üzerinde kesme, karıştırma bıçakları veya süreksiz burgulardan oluşan tekli veya çoklu karıştırma shaftlarından oluşur (Şekil 2.6. ve Şekil 2.7.). Karıştırma ünitesinde projeye esas belirlenen karıştırma oranlarında hazırlanan bulamaç zemine enjekte edilirken kolon çapıyla aynı çapta olan ve karıştırma işleminin verimliliğinin artıran karıştırıcı bıçaklar vasıtasıyla karıştırılarak imalat yapılır.



Şekil 2.5. DKY' nin imalat yöntemlerine göre sınıflandırması (Bruce, 2000a, b).



Şekil 2.6. Islak DKY üretim aşamaları (Han, 2015; Keller, 2022)



Şekil 2.7. Tekli ve çoklu şaft burgular (Topolnicki, 2004)

Islak yöntem kuru yönteme kıyasla daha büyük kolon çapı oluşturabilme ve daha derinlerde (50 m derinliğe kadar) imalat gibi artıları bulunmaktadır (Gebreselassie ve Kempfert, 2006). İşlenebilirlik açısından kuru yönteme kıyasla zemin mukavemeti ve çimento içeriği yüksek, zeminin su içeriği düşük olduğunda, bulamaç halinde olan bağlayıcıyı zeminle karıştırmak daha kolaydır. Islak yöntemde, kuru yönteme göre daha az kayma mukavemeti değişikliği ortaya çıkmaktadır (Bunawan ve ark, 2017).

Islak yöntemde zeminin mevcut su içeriği göz önüne alındığında, bulamaçla beraber zemine ilave su enjeksiyonu olacağından genellikle ıslak karıştırma yöntemleri %60 veya daha az su içeriğine sahip zeminlerle de uygulanır (Elias ve ark, 2006).

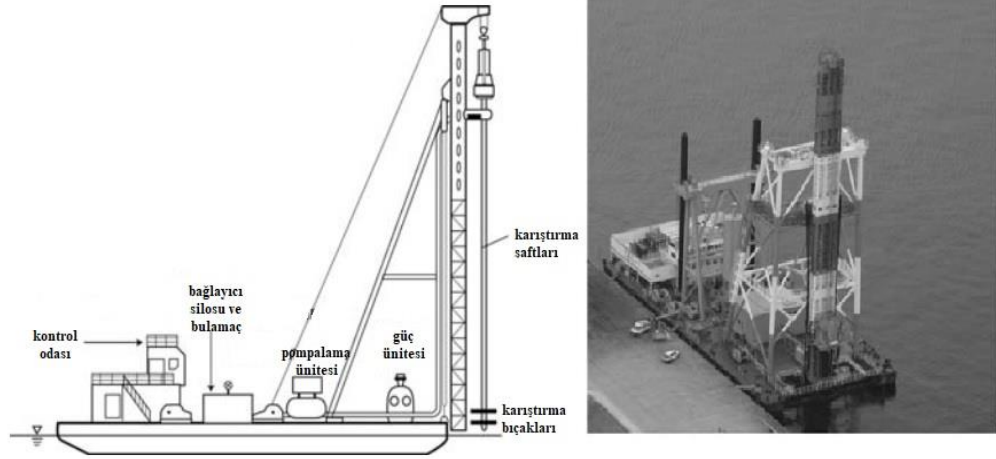
Islak yöntem hem karada hem de açık denizlerde ve liman yapılarında kullanılmaktadır. Açık denizlerde imalat ilk ve genel olarak Japonya'da çokça uygulanmıştır. Açık denizlerde DKY uygulamasında büyük uygulama gemileri üzerinde genellikle burgulu karıştırma makinesi, dozajlama tesisi, silolar ve bir kontrol odası bulunur. Deniz uygulamalarında hızlı bir şekilde iyileştirme sağlanmaktadır (Şekil 2.8.). Karıştırma ve enjeksiyon için proses kontrolü üç seviyede tanımlanabilir (Bruce, 2001);

1. Seviye: Sahada çalışan personelin görmesi için basit alet ve cihazlarla izlenir ve dijital veya analog göstergelerde gösterilir. Bulamaç sıvısının özellikleri üzerinde yoğunluk, akışkanlık (Marsh hunisi), çamur dengesi gibi tespitler yapılır.

2. Seviye: Bu seviyede gerekli olan bulamaç miktarının ayarlanabilmesi için bilgisayar kontrollü sistemler kullanılır. Veriler otomatik olarak kaydedilir ve önceden seçilmiş parametrik bağlayıcı oranlarının doğruluğu makine ve üniteyi kullanan operatör tarafından gözlemlenir ve ihtiyaç halinde düzeltmeler elle yapılır. Her bir kolon için delme ve enjeksiyonlama parametreleri elektronik olarak kayıt altına alınır. Delgi makinesinden gelen bilgiler de düzenli olarak muhafaza edilir. 1. Seviyede tanımlanan akışkanlık özellikleri anlık olarak kontrol edilir.

3. Seviye: Üst düzey bilgisayar kontrolü ve görüntüleme ile birlikte dakikada devir sayısı, penetrasyon oranı, tork, itme, bulamaç yoğunluğu, basınç ve enjeksiyon hızı gibi delme parametrelerinin ölçümü sağlanır. Her katman için iyileştirilmiş zemin özellikleri enjeksiyon parametreleri bilgisayar kontrollü sağlanır. Bununla ilgili komutlar ekrandan verilir. Üretime esas enjeksiyon ve delme parametreleri sürekli olarak kaydedilir.

Rutin olarak çeşitli proses kontrol seviyeleri kullanılıyor olsa da su, çimento ve diğer katkı maddelerinin ağırlıkça standart olarak ölçülmesi için otomatik karıştırma ünitelerinin kullanılması daha uygun olacaktır (Elias ve ark., 2006).



Şekil 2.8. Açık denizde ıslak DKK (Cement Deep Mixing Association, 1999).

Islak DKK üretiminde kullanılan ekipmanlar depolama tankları ve silolar, su tankı, dozajlama ünitesi, harmanlama ve karıştırma sistemi, debi ve basınç kontrollü bulamaç pompaları ve güç kaynağı ünitesini içermektedir. Üretim ünitesi bileşenleri proje ihtiyaçlarına göre basit veya karmaşık olabilir, manuel veya bilgisayar kontrollü kolloidal parçalayıcı karıştırıcılardan gelişmiş jet karıştırma sistemine kadar değişkenlik gösterebilir. Depolama tankları bulamacın bağlayıcı dağılımının homojen olarak kalması ve çökelmemesi için paletli karıştırıcılar içerir. Tipik olarak çift yönlü veya üçlü ileri geri hareket eden pistonlu pompalar veya değişken debili pompalar (0.08-0.25 m³/dk kapasiteli olandan 1 m³/dk kapasiteli olana kadar) kullanılır. Büyük projelerde kullanılan bulamaç hazırlama ve karıştırma ünitesi Şekil 2.9. da gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Bulamaç hazırlama ve karıştırma ünitesi (Hayward Baker Inc.)

Islak DKY genel itibariyle dört grupta sınıflandırılabilir (Çizelge 2.3.). Islak DKY için kapasite ve uygulama değerleri Çizelge 2.4. ve Çizelge 2.5. te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Islak DKY sınıflandırması uygulama şekli (FHWA, 2013)

Sınıflandırma	Genel ekipman ve işlem	Yaygın uygulama
Wet rotary shaft (WRS)	Bir veya birden fazla delgi gövdesi üzerinde bulunan karıştırma bıçakları mekanik olarak zeminine verilen bağlayıcıyı karıştırır.	30 m derinliğe kadar oluşturulan kolonlar, paneller veya bloklar
Wet rotary end (WRE)	Tekli şaft ve tekli karıştırma bıçağı	40 m derinliğe kadar oluşturulan kolonlar, paneller veya bloklar veya 15 m derinliğe kadar geniş hacimde kütle stabilizasyonu
Wet jet end (WJE)	Tekil (yaygın değil) veya çoklu şaft gövdesine bağlı karıştırma bıçaklarına yüksek basınçlı enjeksiyon püskürtün delikler ilave edilmiştir.	25 m derinliğe kadar oluşturulan kolonlar, paneller veya bloklar
Wet vertical panel (WVP)	Elektrikli testere tipi dikey kesme aleti merkezi bir kesici direğe monte edilmiş	50 m derinliğe kadar sürekli(perde) duvarlar

Çizelge 2.4. Islak DKY kapasite değerleri (TS EN 14679, 2006)

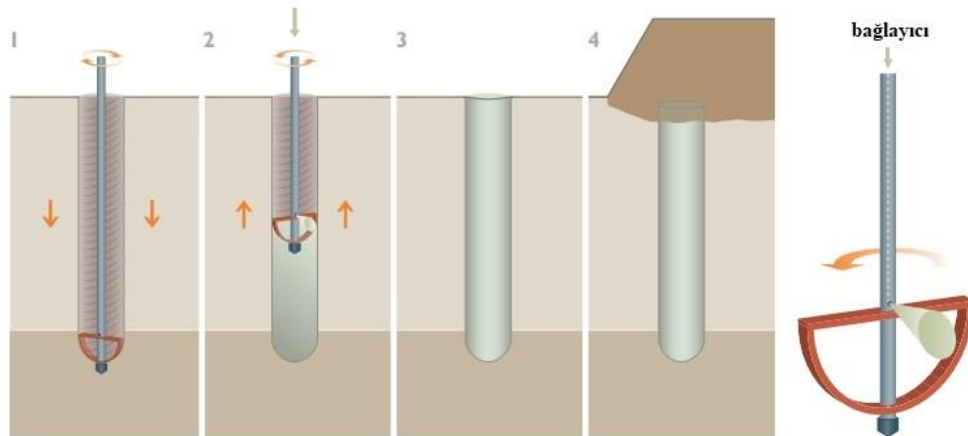
Ekipman	Detay	Karada (Avrupa)	Karada (Japonya)	Denizde (Japonya)
Karıştırma makinesi	Karıştırma mili sayısı	1-3	1-4	2-8
	Karıştırıcı çapı	0.4- 0.9 m	1.0- 1.6 m	1.0- 1.6 m
	Maksimum iyileştirme derinliği	25 m	48 m	70 m
	Enjeksiyon deliklerinin yeri	Delgi gövdesi üzerinde	Delgi gövdesi ve karıştırma bıçağı üzerinde	Delgi gövdesi ve karıştırma bıçağı üzerinde
	Enjeksiyon basıncı	500- 1000 kPa	300- 600 kPa	300- 800 kPa
Enjeksiyon tesisi	Depolanan karışım miktarı	3- 6 m ³	3 m ³	3- 20 m ³
	Depolanan karışım miktarı	0.08 – 0.25 m ³ /dk	0.25 – 1 m ³ /dk	0.5 – 2 m ³ /dk
Bağlayıcı depolama tankı	Maksimum kapasite	-	30 ton	50 ton – 160 ton

Çizelge 2.5. Islak DKY uygulama değerleri (TS EN 14679, 2006)

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

2.2.2.2. Kuru yöntem

Kuru DKY suya doymun zeminlerde veya zeminin yer altı su seviyesinin altında olduğu durumlarda bağlayıcı maddelerin karıştırıcı ucundan kompresörler yardımıyla kuru olarak püskürtülerek zemine enjekte edilmesi şeklinde uygulanır (Şekil 2.10.). Genellikle tekli burguların kullanıldığı kuru yöntemde bağlayıcı madde olarak kireç, çimento ve cüruf karışımları kullanılarak zemini iyileştirmek ve güçlendirmek için DKK'ları, duvarlar ve bloklar oluşturulur. Bu yöntemde bağlayıcı, karıştırma ve hazırlama ünitesi ile derin karıştırma kontrol sistemi kullanılan araçlardır.



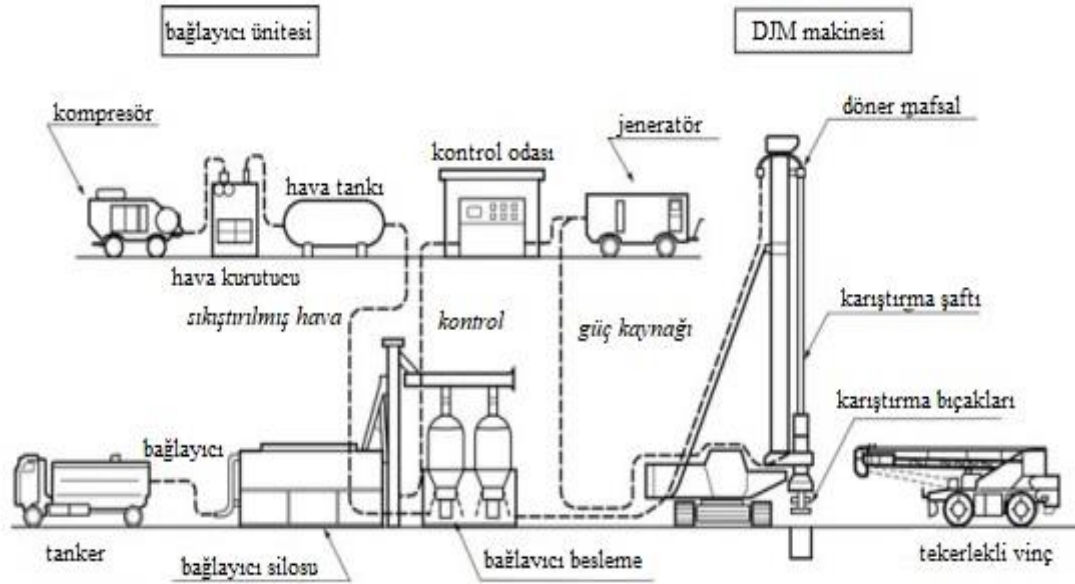
Şekil 2.10. Kuru DKY (Keller,2022)

Kuru DKY 1960 lı yıllarda Japonya ve İsveç'te geliştirilmeye başlanmış ve 1980 yılında Japonya'da ilk olarak uygulanmaya konulmuş ve arazi çalışmalarında sık uygulanmıştır (Dry Jet Mixing Association, 2010). Japonya' da yapılan bu ilk uygulamada bağlayıcı pinomatik besleme sistemi kullanılmış ve bu yöntem kuru jet karıştırma (DJM- dry jet mixing) olarak adlandırılmıştır. Farklı ekipman ve tasarımlarla bu yöntem geliştirilerek dünyada yaygın hale gelmiştir. Japon kuru jet karıştırma (dry jet mixing, DJM) ve Nordik (İskandinav) yöntemleri ise en çok kullanılan kuru karıştırma yöntemleridir.

Kuru DKY de hidrasyon işlemi için zeminin su içeriğinin en az %20 olması gerekmektedir (Gebreselassie ve Kempfert, 2006). Kuru DKY yumuşak kil ve turba zeminlerde kayma mukavemetini arttırmakta ve zeminlerin sıkışabilirliğini azaltmaktadır (Kaya, 2016).

Kuru DKY bağlayıcı enjeksiyon sistemi, sabit veya hareketli bir bağlayıcı depolama/ön karıştırma ve tedarik ünitelerinden oluşur (Şekil 2.11).

Sistemin diğer ekipman bileşenleri bağlayıcı siloları, bağlayıcı besleme sistemine bağlı basınçlı tank, yüksek kapasiteli hava kompresörü, hava kurutucusu, filtre ünitesi, jeneratör, bir kontrol ünitesi ve bağlantı hortumlarından oluşur (Topolnicki, 2004). Kuru bağlayıcı sistemine ait bir örnek Şekil 2. 12.' de verilmiştir.



Şekil 2.11. DJM ekipmanı (Kitazume ve Terashi, 2013).



Şekil 2.12. Kuru derin karıştırma bağlayıcı dağıtma üniteleri (Hayward Baker, Keller)

Geleneksel Nordik sisteminde, kireç ve çimento farklı tanklardan sağlanır ve tozumu önlemek için kapalı bir tank sistemi içerisinde karıştırılır. Kompresörün üzerinde bağlayıcının hidratasyonunu engellemek için kurutucu ve bir elek/filtre bulunur. Tanklar enjekte edilen bağlayıcı malzemenin ağırlıklarını ölçmek için yük hücreleri ile donatılmıştır. Sistemin bir yükleyici ve bir taşıyıcıdan oluşan geliştirilmiş versiyonu da son zamanlarda kullanılmaktadır. Tanklar ve bir kompresör içeren taşıyıcı yükleyici ile radyo sinyalleri vasıtası ile iletişim kurabilmektedir. Taşıyıcı ve yükleyicinin her ikisi de paletli bir teçhizatın üzerine monte edilmiştir ve taşıyıcı yükleyici tarafından kumanda edilir.

Islak karıştırma yönteminde karıştırma bıçaklarının şaft boyunca yerleştirilmesinin aksine kuru DKY de karıştırma bıçakları şaftın sonuna yerleştirilir, böylece kuru DKY de tüm yöntemler DRE (dry-rotary-end) olarak sınıflandırılmaktadır.

DJM karıştırma makinelerinde genellikle iki adet şaft bulunmaktadır fakat dar ve boşluğu küçük alanlarda tekli şaftlar da kullanılabilir. Sistemin temel ekipmanı, özel yapım, paletli veya (nadiren) kızağa monteli vinçlerden oluşur. Karıştırma sistemi, tahrik ünitesi, tahrik şaftı, kesici ve karıştırma bıçağı ve enjeksiyon nozullarından oluşur. Dönen motorlar ve dişli kutuları, teçhizatın tabanına yakın bir yere kalıcı olarak yerleştirilmiştir. Böylece ağırlık merkezi düşürülmüş olur ve stabilitesi artırılarak engebeli arazilerde hareket kolaylaşmış olur.

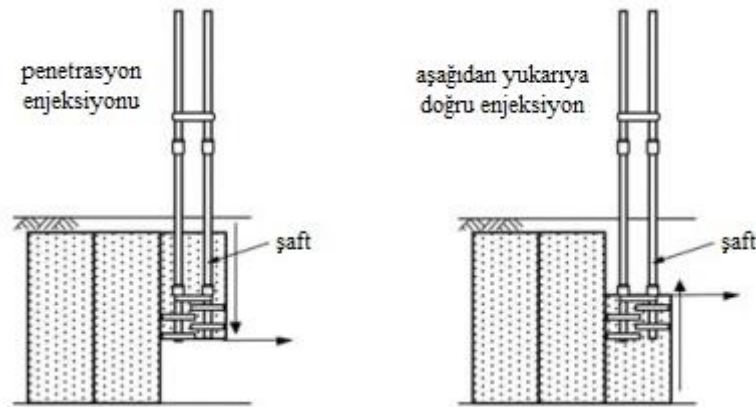
Karıştırma ünitesi, şaftların her birine monte edilmiş birbirine 90 derece olan iki veya üç çift bıçak içerir (Şekil 2.13). Standard bir bıçağın çapı 1 m'dir ve maksimum şaft derinliği 33 m'dir. Ağır dönüşlü motorlar ve dişli kutuları direğin alt kısmında konumlandırılarak mekanik stabilite sağlanır. Üretim parametreleri (derinlik, dakikadaki devir sayısı, penetrasyon ve geri çekilme oranları ve bağlayıcı hacmi) sürekli ve otomatik olarak izlenir.



Şekil 2.13. Kuru karıştırma yönteminde kullanılan tipik karıştırma bıçakları: a) normal ve c) turba zeminler için (Topolnicki, 2004), b) Nordic karıştırma bıçağı (Larsson, 2005)

Nozulların tıkanmasını önlemek için bağlayıcı, basınçlı hava kullanılarak enjekte edilir. Zeminde oluşturulacak DKK'nun alt kotuna ulaştıktan sonra, şaft dönerken ve yukarı çekilirken üst bıçaklarda bulunan nozullardan basınçlı hava ile bağlayıcı kuru malzeme püskürtülür. Bağlayıcı maddenin bir kısmı şaftın batması sırasında (yukarıdan aşağı hareket) verilebilir fakat genel uygulama bağlayıcının şaftın aşağıdan yukarıya doğru hareketi esnasında verilmesi ve imalatın yukarıdan aşağı doğru yapılmasıdır (Şekil 2.14.).

Karıştırma bıçaklarının tasarımından dolayı karıştırma esnasında bıçak altında boşluklar oluşturabilir. Oluşan bu boşluklarda hava basıncı birikebilir. Biriken hava basıncıyla beraber bağlayıcı malzeme şaft boyunca yüzeye doğru çıkar ve yüzeyde bir valf yardımıyla yüzeyde partikül toplama ünitesine aktarılır. Bu sayede kuru olan bağlayıcı malzeme kaybı en aza iner ve yüzeye yakın yerde DKK kolonlarında yüzey bozulmaları minimum olur.



Şekil 2.14. DJM uygulama şekilleri (Kitazume ve Terashi, 2013).

Nordik yönteminde hedeflenen derinliğe ulaşmak için (25m veya daha az) temel ekipman, paletli araca monteli bağımsız bir şekilde dönen bir şafttan ibarettir. Kullanılan şaftlar alt ucu yuvarlak olacak şekilde düzenlenmiş kare kesitli olabilir. Kare kesitli şaftların bir avantajı karıştırma sırasında oluşan havanın, zemin altında basınç oluşturmaya mahal vermeden kolayca yüzeyden çıkmasına olanak sağlamasıdır. 50 cm-160 cm çap aralığında DKK' ları oluşturulabilir. 60 cm çapında DKK üretimi daha yaygın olup özellikle Amerika' da 80 cm çapında DKK' ları üretilmektedir.

Nordik yönteminde karıştırma ve batma işlemi boyunca zemini parçalayarak karıştırmak hem de nozulların tıkanmasını önlemek için bağlayıcı basınçlı hava yardımıyla püskürtülür. Yüzeye yaklaştıkça basınç ta orantılı olarak azaltılır. Bilgisayar sistemleri sayesinde; malzeme miktarlarının kayıtlarının yanı sıra, enjeksiyon, dakikadaki devir sayısı, çekme hızı, hava basıncı, bağlayıcı malzeme bileşimi ve derinlik gibi süreçlerin gerçek zamanlı kontrolü sağlanır (özellikle enjekte edilen malzeme-bağlayıcı miktarı). Şaftın düşeyliği $\pm 0.25^\circ$ hassasiyetle otomatik olarak kontrol edilir.

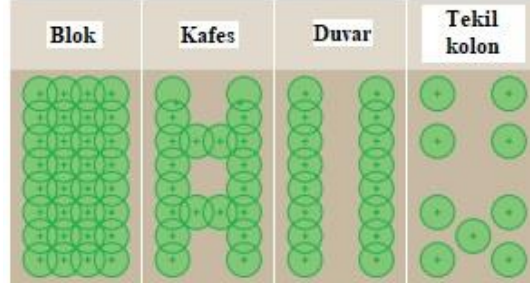
Zemin özellikleriyle değişkenlik göstermekle beraber anlık penetrasyon oranları batma durumu için 150mm/dönme, çekme için 15mm/dönmedir. Böylece bu hızlarla 15m uzunluğundaki bir DKK, 5 dakikalık bir sürede oluşturulabilir.

Aynı miktar bağlayıcı kullanılarak oluşturulan DKK'unda, kuru DKY ıslak yöntemle göre daha yüksek mukavemet sağlar (ıslak yöntemde karıştırma esnasında verilen su nedeniyle). Siltli killerde yapılan DKK üretiminde ıslak yöntem yerine kuru yöntem uygulandığında dayanımda 1.7-3.2 kat artış sağlandığı tespit edilmiştir (Bunawan ve ark.,2017).

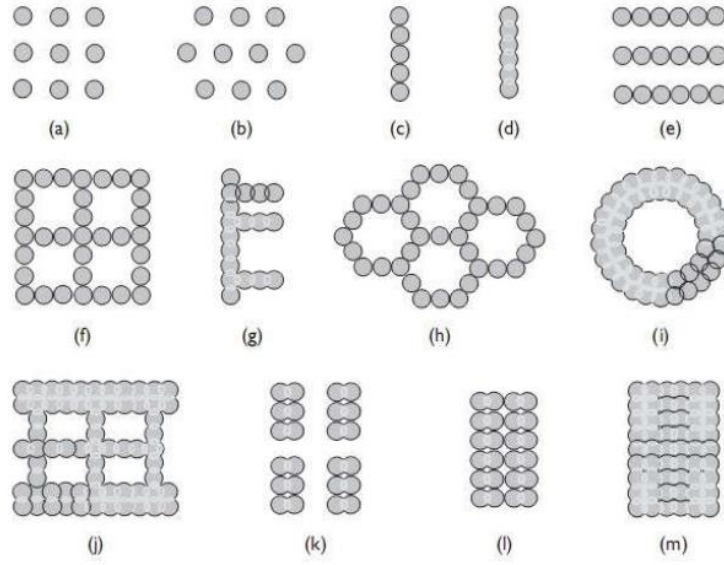
2.2.3. Derin karıştırma yöntemi uygulama alanları ve uygulama geometrileri

DKK'ları blok, kafes (grid), duvar ve tekil olmak üzere dört ana geometride üretilebilir (Şekil 2.15). Burada belirleyici olan zemin ve saha şartları ile projenin hangi amaca yönelik hazırlandığıdır. Sıvılaşmaya karşı derin karıştırma uygulamasında amaç boşluk suyu basıncını azaltarak sıvılaşmanın önlenmesi ve zeminin güçlendirilmesidir. Karayolu ve demiryolu dolgularında DKK uygulamalarının genel amacı oturmanın azaltılması, bazı durumlarda stabilitenin iyileştirmesi olduğundan kare veya tekil-birleşik üçgen ızgara desenli uygulamalar daha uygundur (Şekil 2.16). Uygulama

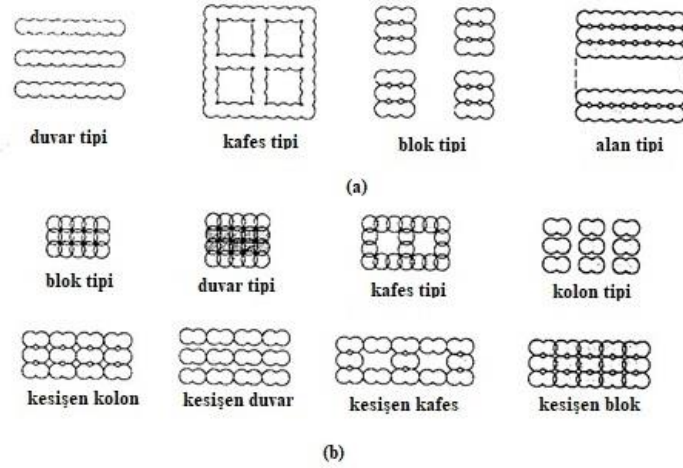
geometrileri kara ve deniz uygulamalarında değişkenlik gösterir. Kara ve deniz uygulamalarına ait geometriler Şekil 2.17.' de verilmiştir.



Şekil 2.15. Uygulama geometrileri (Keller, 2022)

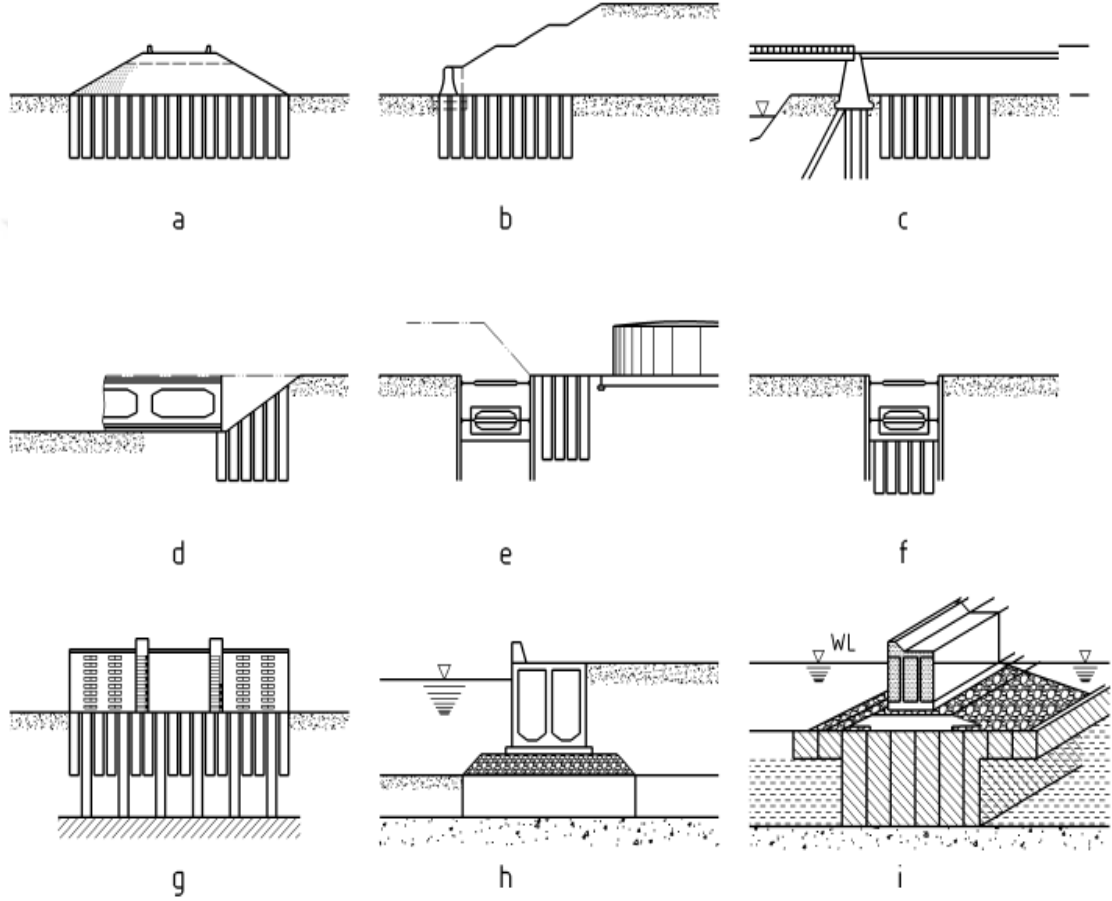


Şekil 2.16. Derin karıştırma uygulama örnekleri a), b) kare ve üçgen tipi düzenlenmiş c) teğet duvar d) bindirilmiş(kesişen) duvar, e) teğet duvarlar f) teğet kafes g) payanda bindirilmiş duvar h) teğet hücreler i) halka, j) kafes, k) kolon grupları, l) temaslı grup kolonları, m) blok



Şekil 2.17. a) Karada uygulama, b) Denizde uygulama

DKY yapı inşasının olduğu her türlü alanda ihtiyaca cevap verecek şekilde üretilebilir. DKY zemin iyileştirmenin yanı sıra metro, tünel gibi yeraltı inşaatları için de zemin hareketlerini kontrol altında tutmaktadır. Kaba taneli zeminlerde sızdırmaz perde duvar oluşturmak, kazı destek duvarları inşa etmek, sıvılaştırılabilir zeminleri stabilize etmek, tünel zeminini desteklemek ve temel takviyesi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır (Şekil 2.18. ve Şekil 2.19.).



Şekil 2.18. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları: a) yol dolgusu altındaki oturmaları kontrol etmek, stabilizeyi sağlamak, dolgu şev kaymalarını önlemek, b) şev stabilitesini sağlamak c) köprü ayağında oturmaları azaltmak d) yamaç eğiminin stabilitesini sağlamak e) bitişik yapılara verilebilecek zararları engellemek f) yeraltı gömülü yapılarında oturmaları önlemek g) bina temellerinin yanal direncini artırmak h) deniz tabanında taşıma gücünü artırmak ı) dalgakıran altında taşıma gücünün artırılması



Şekil 2.19. a) Temelerin güçlendirilmesi b) yapısal duvar olarak c) sızıntı kontrolü ve sızdırmazlık perdesi olarak d) sıvılaşmayı önlemek e) yol dolguları altı stabilizasyonu (Bauer,2022)

2.2.4. Derin karıştırma yönteminin avantaj ve dezavantajları

DKY diğer zemin iyileştirme yöntemleriyle (Jet grout, kompaksiyon, vb.) karşılaştırıldığında çevreye etki, lojistik, fayda-maliyet, performans gibi açılardan avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bazı kısıtlayıcı yönleri olmasına rağmen diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre pratik ve ekonomik sayılabilir. Çok sıkı ve çok kaba taneli zeminler hariç, uygulama derinliğinin 40 m' den az olduğu, iyileştirilmesi istenen zeminin performans limitlerinin sınırlı olduğu (mukavemetin 0.1-5 MPa arasında) durumlarda avantajlı sayılabilir.

DKY' nin olumlu yönleri;

- İyileştirilmiş zemin özellikleri 0.1-5 MPa aralığındadır.
- 40 m derinliğe kadar imalatı mümkün ve maliyeti düşüktür.
- Islak DKY de yüzeyde oluşan bozulmuş zemin sıyrılarak dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.
- Kolon performansı yerinde belirlenebilir.
- Çoğu zemin türü ve dolgularda uygulanabilir.
- Düşey ve yatay yönde uygulanarak zemin iyileştirmesi sağlanabilir.
- Gürültü ve titreşim açısından çevreye etkisi azdır.

- İmalat kapasitesi oldukça yüksektir.
- Kuru DKY' de zemin yüzeyinde çok fazla bozulma olmaz.
- Hem karada hem deniz içinde uygulaması yapılabilir.
- Kolon yerleşim planı kolaylıkla ayarlanabilir.
- Laboratuvar ve arazi çalışmalarının yaygın oluşu teori ve tasarım açısından kolaylık sağlar.
- Özellikle sıkışabilir ve yumuşak zeminlerde yapılacak çok büyük projelerde ekonomik avantaj sağlar.
- Tasarım dayanımı zemin iyileştirme projelerinde genellikle 1 MPa olarak yeterlidir.
- Nispeten hızlı üretim sağlanır.
olarak sıralanabilir.

DKY' nin olumsuz yönleri;

- 40 m derinlikten sonra pratikte uygulanabilirliği olsa da uygulama zorluğu ve maliyet açısından pahalıdır.
- Ekipmanı büyük olduğu için çalışma alanının geniş olması gerekir. Dolayısıyla mevcut yapıların yakınında çalışılması güçtür.
- Islak DKY' de zemin yüzeyi oldukça fazla tahrip olur.
- Makine ve teçhizat açısından kurulum maliyeti oldukça yüksektir.
- Çok sıkı, sert ve kaba taneli zeminlerde uygulanamaz.
- Çok zayıf ve yumuşak zeminlerde ekipman ağırlığı sorun olabilir.
- Kolon boyunca mukavemet açısından homojenliği sağlamak zordur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması tabakalı zemin ortamında (düşük plastisiteli kil ve kum zemin) imal edilen amorf silika katkılı derin karıştırma kolonlarının performansı araştırılmıştır. Deneylerin yürütülebilmesi için araziden temin edilen killi zemin, ocaktan temin edilen kum zemin, araziden doğal olarak temin edilen amorf silika, çimento ve süper akışkanlaştırıcı başlıca malzemeler olarak sıralanabilir. Laboratuvar tipi mikser, PVC deney kalıpları, derin karıştırma makinesi, deney tankları, yükleme çerçevesi, enjeksiyon pompası, potansiyometre ve deformasyon saatleri, multimetreler deneylerde kullanılan başlıca alet ve cihazlardır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Zeminler

Tez çalışması tabakalı zeminlerde DKK performansı üzerinedir. Bu kapsamda hem killi hem de kumlu zeminler kullanılarak deneyler yürütülmüştür.

3.1.1.1. Killi zemin

Çalışmalar kapsamında kullanılan killi zemin Konya İli, Selçuklu İlçesinde bulunan Organize Sanayii Bölgesinden temin edilmiştir. Arazide yapılan muayene çukuru incelemesi sonrasında yaklaşık 4 m derinlikten düşük plastisiteli kil (CL) temin edilmiş ve laboratuvarında uygun yere istiflenerek muhafaza altına alınmıştır (Şekil 3.1.).

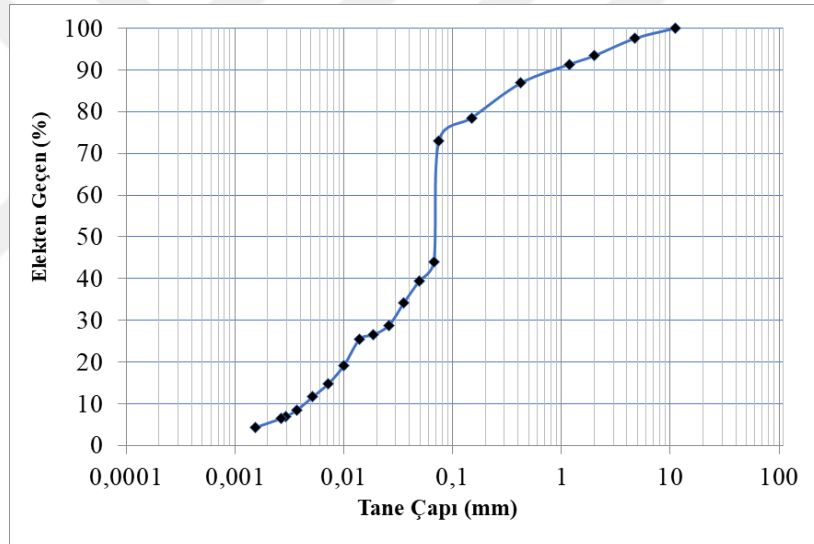


Şekil 3.1. Killi zeminin araziden temini ve istifi.

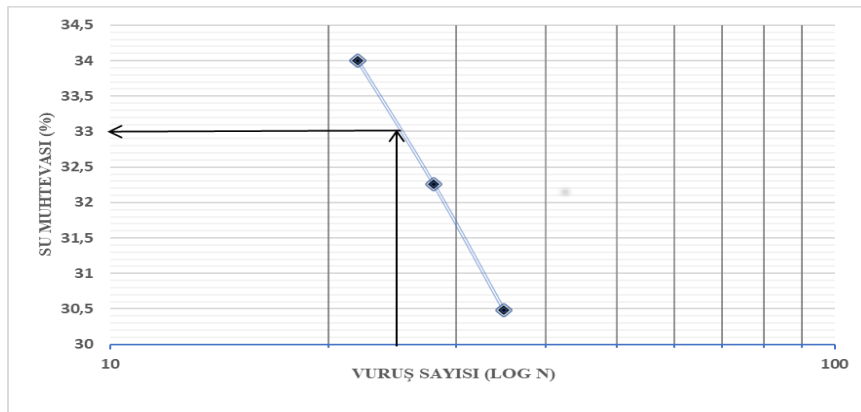
Killi zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için su muhtevası, tane yoğunluğu deneyi, elek analizi, piknometre, Atterberg limitlerinin tayini yapılmıştır.

Zemin Sınıfı:

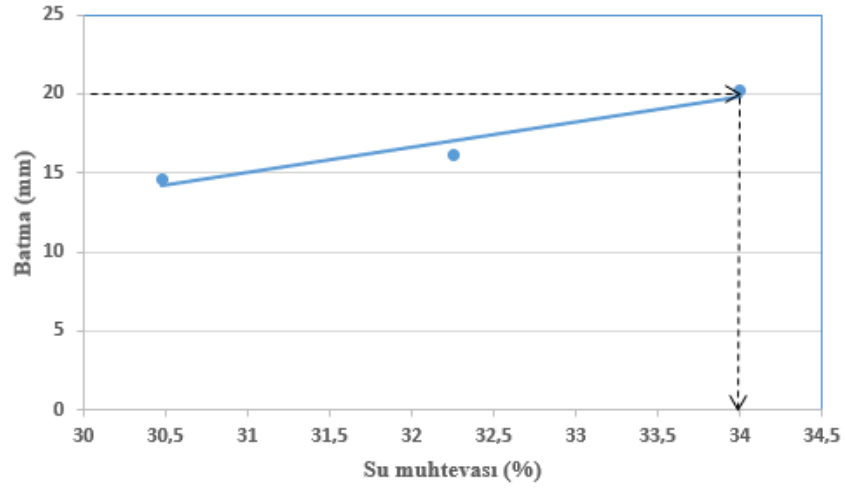
ASTM C136/C136M-19 ve ASTM D6913/D6913M-17 standartlarına göre elek analizi deneyi yapılarak zeminin kaba tane dağılımı belirlenmiştir. Zeminin ince tane içeriği ise ASTM D1140-17 standardına göre yıkamalı elek analizi yapılarak belirlenmiştir. İnce malzemenin tane dağılımı ise ASTM D7928-17 standardına göre hidrometre deneyi yapılarak belirlenmiştir (Şekil 3.2.). Deney sonuçlarına göre zemin %2.5 çakıl, %24.5 kum, %26.7 silt ve %46.3 kilden oluşmaktadır. ASTM D4318-17e1, BS 1377:2 ve TS 1900-1 standartlarına göre Atterberg Limitleri belirlenmiştir. Casagrande yöntemine göre $w_L = 33$ (Şekil 3.3.), düşen koni penetrasyon yöntemine göre (Wasti ve Bezirci, 1986.) $w_L = 33.8$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3.4.).



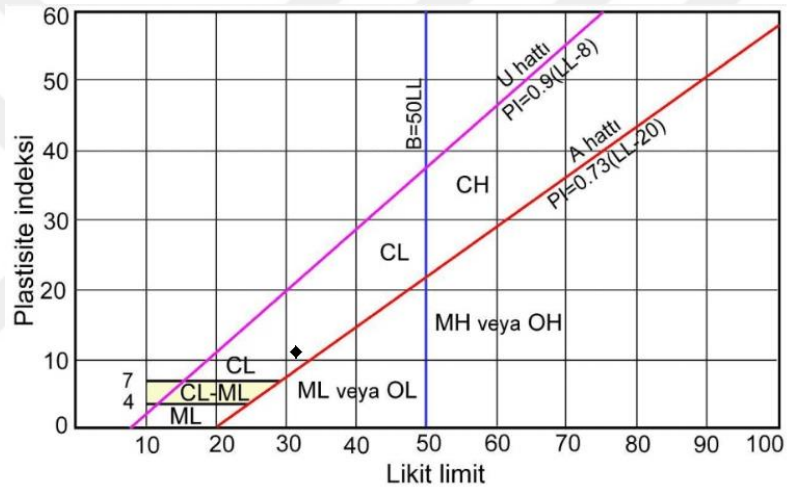
Şekil 3.2. Killi zeminin tane dağılımı



Şekil 3.3. Casagrande yöntemine göre likit limit değerinin belirlenmesi



Şekil 3.4. Düşen koni yöntemine göre likit limit değerinin belirlenmesi



Şekil 3.5. USCS' ye göre kil zeminin sınıflandırması

Zeminin plastik limit değeri $w_p = \%21.75$, rötire limit değeri $w_s = \%7.42$, lineer rötiresi $L_s = \%7$, plastisite indisi $PI = \%11.25$ olarak belirlenmiştir. ASTM D2487-11 USCS zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı CL (düşük plastisiteli kil) olarak belirlenmiştir (Şekil 3.5.).

Su muhtevası:

Kil zeminin doğal su muhtevası değeri ASTM D2216-19 ve TS 1900-1 standartlarına göre $\%12$ olarak belirlenmiştir. Buna göre zeminin (örselenmiş halde) kıvam indisi $IC = 1.86$, likitlik indisi $IL = -0.86$ olarak hesaplanmış olup bu değerler zeminin arazide yarı katı durumda olduğunu göstermektedir.

Tane yoğunluğu:

ASTM C128-15 standardına göre yapılan piknometre deneyi ile kil zeminin tane yoğunluğu 2.64 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

Aktivite:

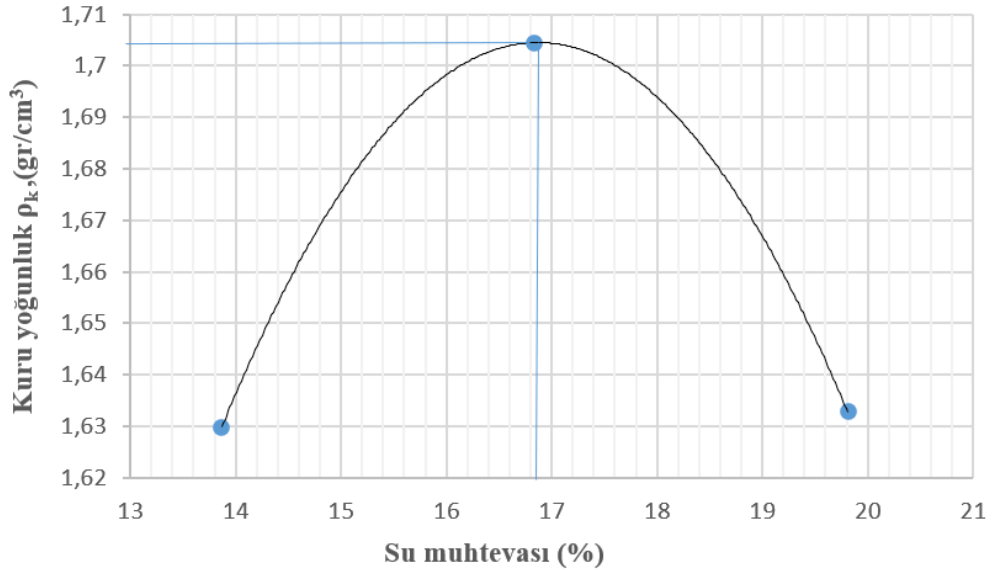
Skempton (1948, 1953) killeri için bir aktivite değeri hesabı tanımlamıştır (Bağıntı 3.1.). Zeminde %46.3 kil bulunmaktadır ve zeminin plastisite indisi %11.25'tir. Bağıntı 3.1.'e zeminin aktivite değeri 0.24 olmaktadır. Bu değer 0.75 ten küçük olduğu için deney çalışmaları kapsamında kullanılan kil aktif olmayan bir kildir.

$$A = PI / C \quad (3.1)$$

Denklemden PI plastisite indisi, C yüzde olarak zemindeki kil miktarını gösterir.

Kompaksiyon davranışı:

ASTM D698-12e2 standardına göre yapılan standart kompaksiyon deneyi ile zeminin optimum su muhtevası $w_{opt} = \%16.9$ ve maksimum kuru yoğunluğu $\rho_{k,max} = 1.705 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Kil zemin için Standart Kompaksiyon deney sonuçları

Zeminin efektif çapı (D_{10}) 0.25 tir. Üniformluluk katsayısı; ($C_U = D_{60}/D_{10}$ bağıntısından) 7.6 olarak ve eğrilik katsayısı ($C_C = D_{30}^2 / (D_{10} \times D_{60})$) 0.9 olarak bulunmuştur. USCS zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir. Zeminin maksimum boşluk oranı 0.76, minimum boşluk oranı 0.36, deney kalıbındaki boşluk oranı 0.62 olarak bulunmuş ve kum zeminin rölatif sıkılığı %36 olarak belirlenmiştir. %65 sıkılık değeri için sıkılık derecesi ‘Orta Sıkı’ olarak belirlenmiştir.

Su muhtevası:

Kum zeminin doğal su muhtevası değeri ASTM D2216-19 ve TS 1900-1 standartlarına göre %0.16 (kuruya yakın) olarak belirlenmiştir.

Tane yoğunluğu:

ASTM C128-15 standardına göre yapılan piknometre deneyi ile kum zeminin tane yoğunluğu 2.69 g/cm^3 olarak belirlenmiştir.

3.1.2. Çimento

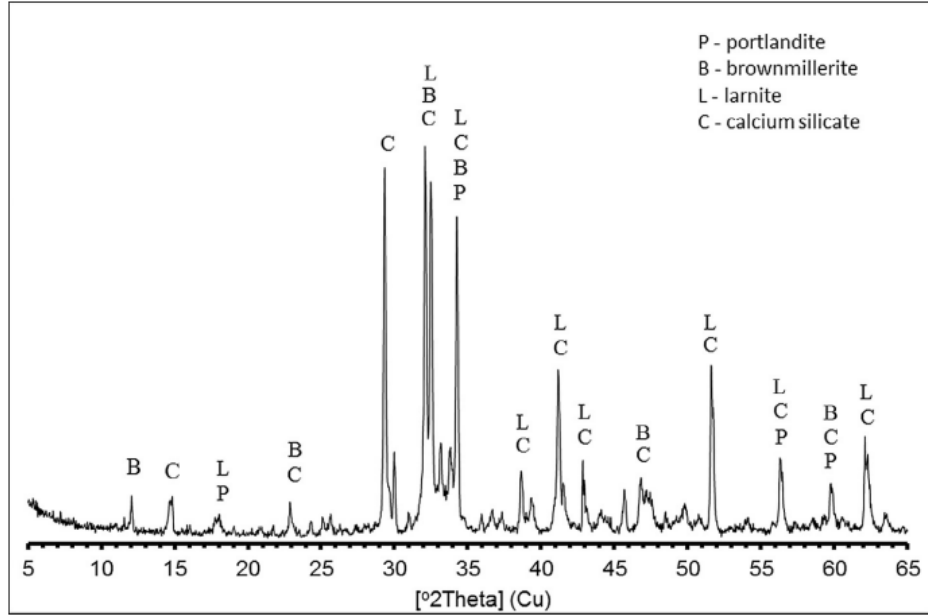
Tez kapsamında imal edilen küçük ölçekli ve büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarında bağlayıcı malzeme olarak CEM-1 42.5 R türü Portland çimento kullanılmıştır. CEM çimentosunun hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu meydana gelir. Portland çimento; klinker (marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit, vb.) hammaddelerinin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek, pişirilmesi sonucu bir miktar priz düzenleyici (genellikle alçıtaşı- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve minör bileşen olarak kalker ile birlikte öğütülmesinden oluşan; su ile karıştırıldıktan belirli bir süre sonra donarak dayanım kazanan üründür. CEM-I 42.5 R çimentosunda %64.37 CaO (C), %20.11 SiO_2 (S), %4.9 Al_2O_3 (A) ve %2.83 Fe_2O_3 (F) bulunmaktadır. Çimento içerisindeki C_3S miktarı %61.41, C_2S miktarı %11.33 ve C_3A miktarı %8.2’dir. Çimento içerisindeki C_3S ve C_2S erken dayanımda etkili olurken, C_3S ve C_3A nihai dayanım üzerinde etkilidir. C_3S ve C_2S miktarının fazla olmasından dolayı CEM-I 42.5 R çimentosu erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. İçindeki reaktif CaO ve reaktif SiO_2 toplamı kütlece en az %50’ dir.

CEM-1 42.5 R çimentosunun TS EN 197-1: 2012 standardıyla ülkemizde ve ASTM C150/C150M-17 standardıyla ABD’ de üretimi yapılmaktadır. Tüm basınç

dayanım sınıflarının üretimine uygundur. Erken ve nihai dayanımda yüksek performans verir. Genel kullanıma uygundur. Erken kalıp alınması gereken durumlarda kullanılması uygundur (Prefabrik uygulamalar). Hazır beton imalatlarında yüksek, erken ve nihai mukavemet sunar. Soğuk havalarda sahip olduğu yüksek hidrasyon ısı ile imalata imkân tanır. CEM-1 42.5 R çimentosuna ait özellikler Çizelge 3.1.' de, XRD analizi Şekil 3.9.' da verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM-1 42.5 R Portland çimentosu özellikleri

Kimyasal Özellikleri	CEM I 42.5 R	TS EN 197-1:2012	ASTM C150/C150M-17
SO ₃ (%)	2.48	≤ %4.0	C ₃ A≤%8, maks. %3.5 C ₃ A>%8, maks. %4.5
MgO (%)	0.85	-	Maks. %6.0
Kızdırma kaybı (%)	2.00	≤ %5.0	Maks. %3.0
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.40	≤ %5.0	Maks. %1.5
Cl (%)	0.0092	≤ %0.1	Maks. %0.1
Fiziksel Özellikleri			
Priz başlangıcı (dk)	200	≥ 60 dk	Min. 45 dk
Priz sonu (dk)	240	-	Maks. 375 dk
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.2	-	-
Hacim genleşmesi (mm)	1.3	≤ 10 mm	Maks. %0.8
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3880	-	-
3 günlük dayanım (MPa)	28.1	-	24 MPa
28 günlük dayanım (MPa)	54.5	42.5 MPa – 62.5 MPa	Min. 42.5 Mpa Maks. 62.5 MPa



Şekil 3.9. CEM-1 42.5 R Portland çimentosu XRD kırınımı (Szelag, 2018).

3.1.3. Katkı maddesi olarak süper akışkanlaştırıcı

Süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kimyasal yapılarında linyosülfanatlar, hidroksikarboksilik asitler ve karbonhidratlar bulunur. Katkılar sadece bağlayıcılar ile reaksiyona girerler. Katkı betona eklendiğinde, çimento tanecikleri tarafından absorbe edilir. Çimento tanecikleri birbirine elektriksel itme uygular. Böylece istenen işlenebilirlik az su miktarı ile elde edilir. Karışımın su miktarının azalması ile doğru orantılı mekanik dayanım artar. Katkı maddeleri ile boşluk oranı daha az beton üretimi yapılabilirken bu sayede dış etkenlere de daha dayanıklı beton elde edilmiş olur. Katkı maddeleri beton karışımındaki su ihtiyacını %6.5 civarında azaltırken her yaştaki basınç dayanımını %10 oranında artırır. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri sayesinde daha az su/çimento oranı ile betonun akışkanlığı (pompalanabilirlik özelliği) artırılır, beton dökümü esnasında segregasyonu en aza indirir. Genellikle çimento miktarının ağırlıkça %0.2-5'si oranında kullanılması üreticiler tarafından tavsiye edilmektedir. Süper akışkanlaştırıcılar betonun karışım suyu miktarını %5-12 oranında azaltmasına rağmen işlenebilirlik değerini önemli ölçüde artırır. Akışkanlaştırıcı özelliğinin yanı sıra priz geciktirme özellikleri de vardır.

Tez çalışması kapsamında TS EN-934-2 ve ASTM C 494 standartlarına uygun BASF MasterRheobuild 1000 marka süper akışkanlaştırıcı katkısı kullanılmıştır. MasterRheobuild 1000, betonun erken ve nihai dayanımını geliştiren, naftalin sülfonat esaslı, yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı bir katkı maddesidir (Çizelge 3.2.).

Uygulama alanları;

- İşlenebilirlik, normal priz süresi ve yüksek dayanım istenen yerlerde,
- Ön gerilimli, prekast ve hazır beton uygulamalarında,
- İnşaat ve madencilik uygulamalarında olarak sıralanabilir.

Çizelge 3.2. BASF MasterRheobuild 1000 süper akışkanlaştırıcı teknik özellikleri

Teknik Özellikleri	
Malzemenin Yapısı	Naftalin Sülfonat Esaslı
Görünüm	Kahverengi
Özgül ağırlık (20°C'de)	1.17 – 1.22 kg/lt
pH değeri	6-8
Alkali içeriği (%)	≤ 10.00
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10
Korozyon davranışı	Sadece BS EN 934 1:2008, EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.

Özellikleri ve yararları;

- Daha düşük yerleştirme enerjisi
- Yüksek verimlilik oranları ve daha düşük maliyet
- Hızlandırılmış imalat yöntemlerine izin veren erken dayanım ile hedef takvimin öncesinde sonuç almak olarak sıralanabilir.

Taze beton için faydaları;

- Kontrollü priz süresi
- Kohezif ve ayrışmayan beton
- Minimum su kuma

Sertleşmiş beton için faydaları;

- Geleneksel su kesici katkılara göre daha yüksek erken dayanım
- Yüksek nihai basınç dayanımı
- Daha yüksek elastisite modülü
- Donatı ile olan aderansın iyileşmesi
- Düşük geçirgenlik
- Yüksek dayanıklılık
- Düşük rötre ve sünme

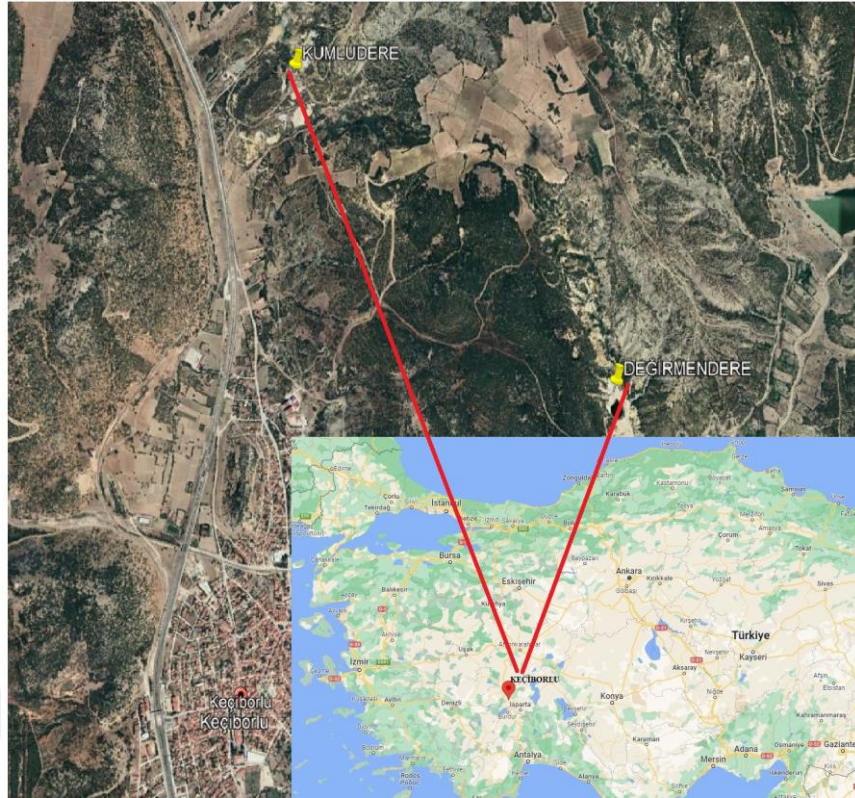
Uygulama yöntemi ve dozaj:

MasterRheobuild 1000 ayrı bir bileşen olarak beton karışımına ilave edilen kullanıma hazır bir katkı maddesidir. Karışım suyunun ilk %80'i eklendikten (tüm katı bileşenler ıslandığında) sonra MasterRheobuild 1000 karışımın içine dağıtılır ise en iyi performans elde edilir. Kuru agregalara katkı maddesi eklemekten kaçınılmalıdır.

MasterRheobuild 1000 katkısı için önerilen dozaj oranı kütlece 100 kg çimento (bağlayıcı) için 1.0 – 2.0 kg arasındadır. Bu miktar bağlayıcının %1-%2 sine tekabül etmektedir. Özel kullanımlar için bu oran %4 e kadar çıkarılabilmektedir.

3.1.4. Amorf silika

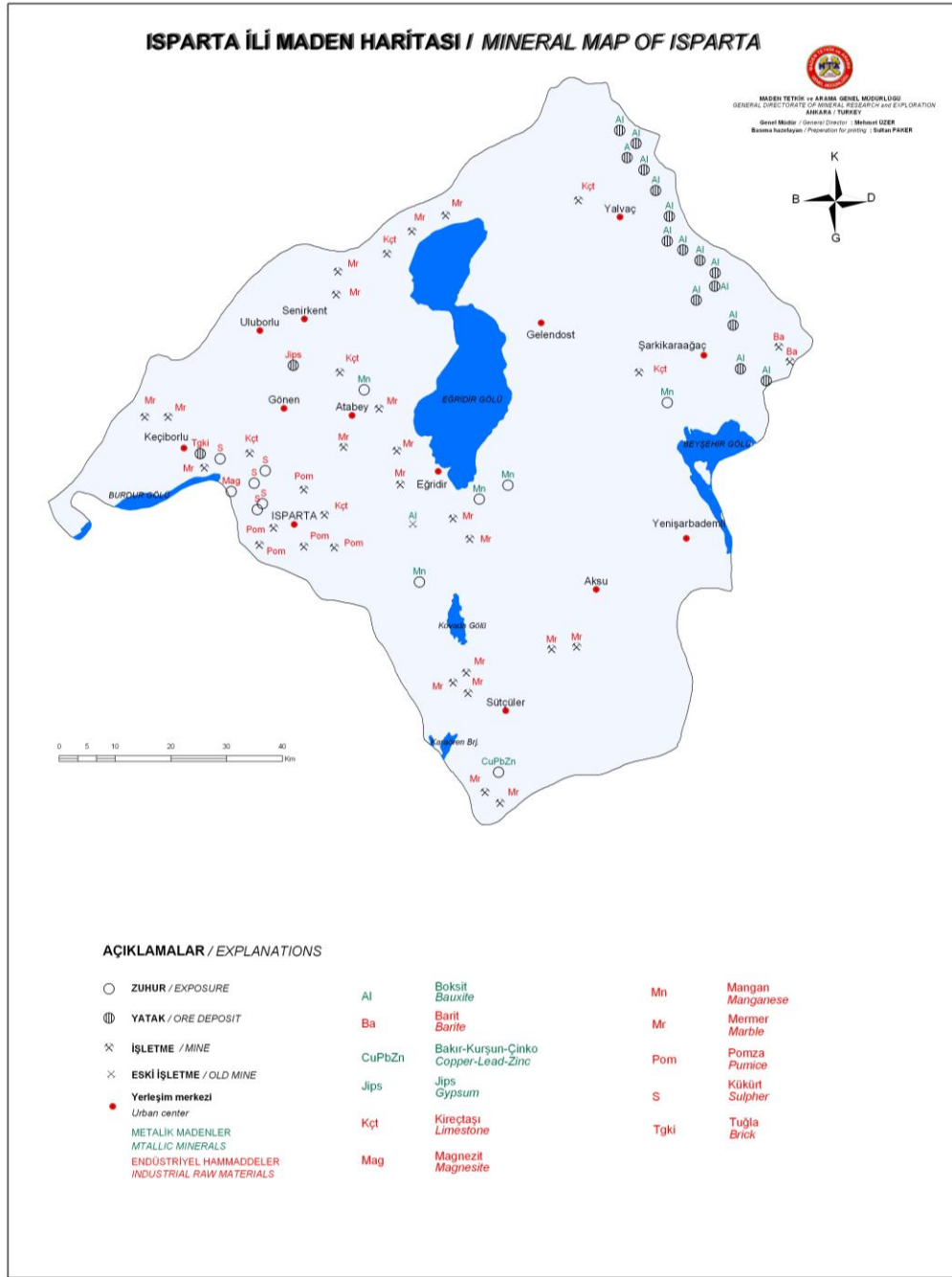
Küçük ölçekli tasarım deneylerinde ve nihayetinde büyük ölçekli tasarım deneylerinde kullanılmak üzere Isparta İli Keçiborlu İlçesinde bulunan Osmanlı'nın son dönemlerinde işletmeye alınan, 1935-1995 yılları arasında ise Etibank A.Ş. tarafından işletilen kükürt sahalarından 3 ayrı lokasyondan amorf silika temin edilmiştir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Amorf silikanın temin edildiği bölgenin yer bulduru haritası.

Numunelerin alındığı saha eski bir kükürt işletmesidir. Değirmendere ve Kumludere mevkieinde bulunan ocaklar ise işletilmiş en önemli kükürt yataklarıdır. Keçiözümlüde bulunan bu kükürt sahası içerisinde bulunan amorf silika oluşumları, kuvarsit maden ocağı olarak Etibank Keçiözümlü Kükürt İşletmesi tarafından işletilmiştir. Kumludere maden ocağının güney batı kısmında açık işletme yöntemiyle kuvarsit olarak üretilen tüvanan amorf silika, maden sahasında kurulu bulunan kuvarsit hazırlama tesisinde kurutulup öğütüldükten sonra “zirai kükürt” hazırlanmasında nem tutucu ve topaklanmayı önleyici katkı maddesi olarak kullanılmıştır (Davraz, 2004).

Uzunca bir süre kükürt işletmesi olarak kullanılan maden sahasının kapatılmasından sonra 1997 yılında, Eti Holding A.Ş. tarafından “diatomit” olarak adlandırılan maden, “diatomit lokal alanı” ilan edilmiş ve özel bir işletme tarafından işletilmiştir. Üretilen hammadde hafif yapı elemanları üretiminde agrega olarak kullanılmıştır (Etiholding, 1998-2000). Bölgenin maden haritası Şekil 3.11.’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Isparta İli Maden haritası (MTA)

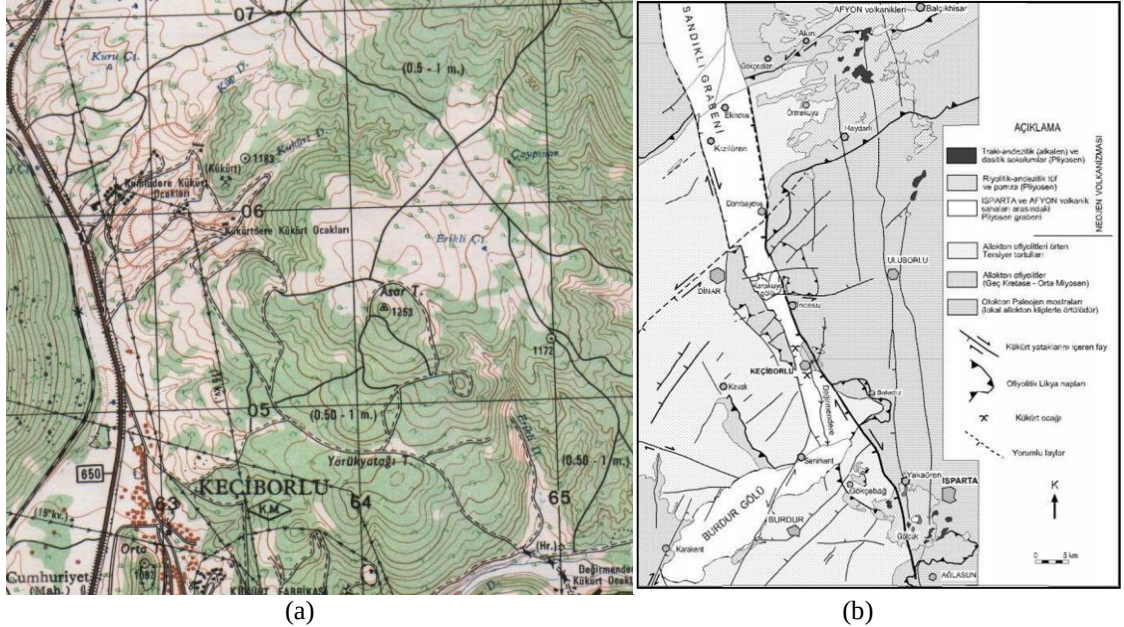
3.1.4.1. Genel hatlarıyla amorf silika

Amorf silika; volkanik-hidrotermal sistemler içinde belirli sıcaklığa sahip ve çözünürlüğü dengeye ulaşmış kolloidal silis partikülleri içeren akışkanların yeryüzüne çıkarak soğuması ve aşırı doygunluğa erişmesi sonucunda yüzeyde silika tortuları, ayrıca pH'ı nötr alkali kloritli sular yakınında ise yeraltı damarları biçiminde oluşan tortul bir kayaç olarak tanımlanmıştır (Davraz, 2004). Amorf silika, silika sinter veya

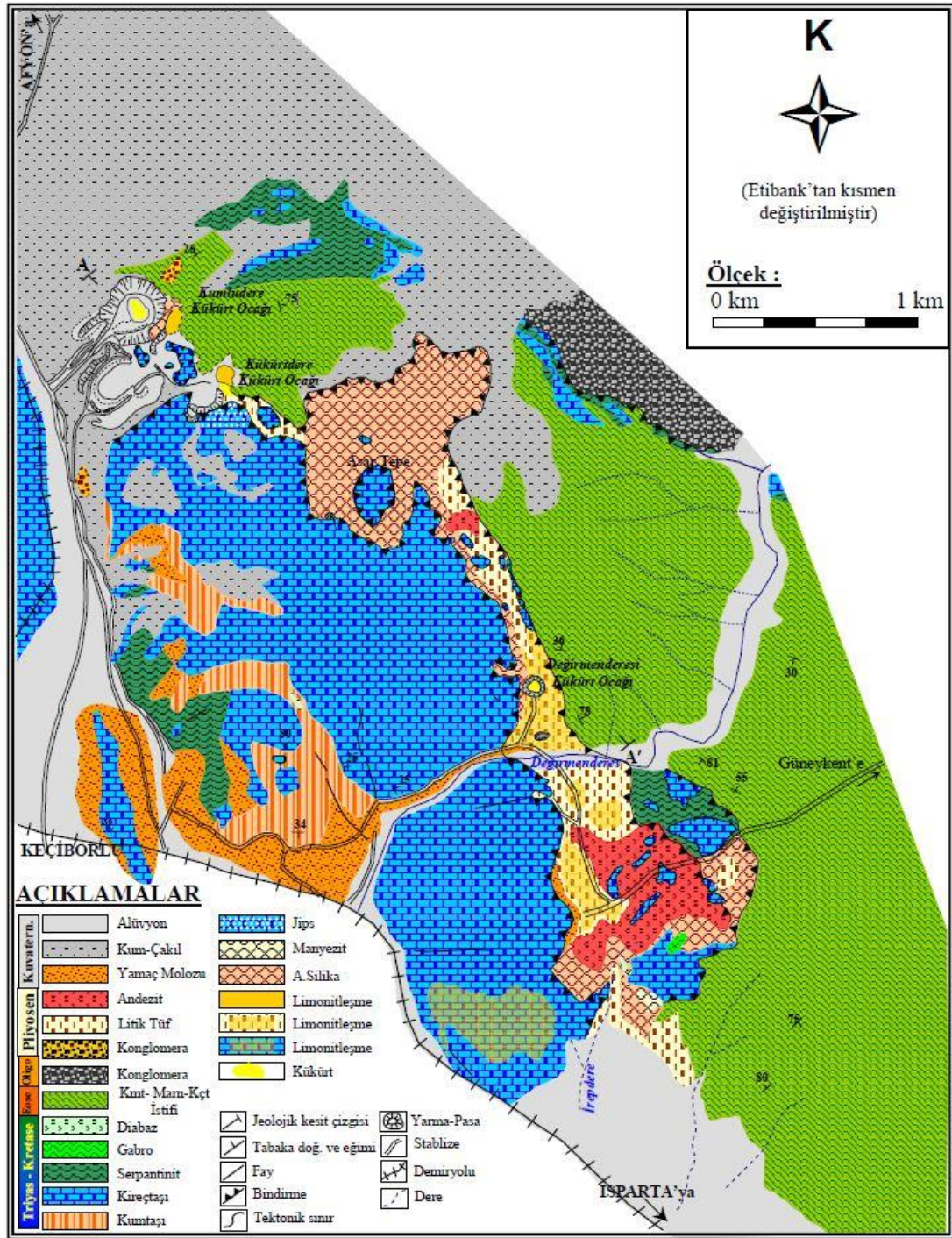
jeosilika olarak da bilinmektedir. Yöreden temin edilen amorf silika kayacı beyaz, gri, sarımsı renklindedir. Amorf silika genellikle sert ve yoğun olmasına karşılık, süngerimsi dokulu çok poroz türleri de vardır.

Malzemenin temin edildiği Kumludere mevkiinde Ofiyolit, kireçtaşı ve alterasyon ürünü kayaçların gözleendiği seviyelerde amorf silika rengi griye doğru değişmektedir. Yatağın erozyondan çok etkilenmiş üst seviyelerinde ofiyolitik kayaçlar daha fazla oranda gözlenmektedir. Kayaç parçaları amorf silikanın çökelişi sonrası taşınma olaylarını göstermektedir. Bölgenin topografik ve jeolojik haritası Şekil 3.12. ve Şekil 3.13.' te verilmiştir.

Amorf silikanın bulunduğu katmanların alt ve üst seviyelerinde demir mineralleri taşınımı sebebiyle bu seviyelerde amorf silikanın rengi sarımsı ve sarımsı kırmızı tonlara evrilmiştir. Üst tabakadaki birikmenin, çevre kayaçlarda demirden zengin kayaçların içerisindeki demir minerallerinin yağmur suları ve diğer etkenlerle çözülerek taşınması sonucu oluştuğu; alt tabakadaki birikmenin ise taban seviyesinde bulunan demirden zengin kayaçların hidrotermal etkilerle olduğu geçmiş çalışmalarda ortaya konmuştur. Yine taban seviyesinde demir minerallerinin yanı sıra mangan ve kükürt gibi hidrotermal kökenli minerallerin bulunması da bu düşüncüyü doğrulamaktadır.



Şekil 3.12. a) Alanın topografik haritası (Güneş, 2017), b) Alanın şematik jeolojik haritası (Özgüner, 1989).



Şekil 3.13. Keçiborlu kükürt sahası jeoloji haritası (Sarıöz,1985; Davraz, 2004).

Malzemenin alındığı ilk bölgede amorf silika tabakası yaklaşık 22 metre kalınlığında olup krem ve açık gri renklindedir (Şekil 3.14.).

Açık gri renkli alterasyon ürünü ve kireçtaşı parçaları yer yer krem renkli amorf silika tabakaları içerisinde yer almaktadır. Bu seviye erozyondan etkilenmiş ve ofiyolitik kayalara ait seviyelere de yer yer rastlanmaktadır.



Şekil 3.14. Amorf silikanın alındığı 1. Bölge



Şekil 3.15. Amorf silikanın alındığı 3. Bölge

Çalışma kapsamında malzemenin temin edildiği 3. Bölge olarak adlandırılan krem, beyaz renkli amorf silika seviyesi ise yaklaşık 30 m kalınlığındadır. Bu seviyede tabaka düzlemleriyle uyumlu bir şekilde Akdağ kireçtaşı, Gökçebağ karmaşığı ve alterasyon ürünlerine (jips) ait kayaç parçaları yerleşmiştir (Güneş, 2017). Ofiyolit ve kireçtaşı parçalarının gözlendiği bölümlerde gri renk tonlarına geçişler gözlenmektedir (Şekil 3.15.).

Amorf silika (silika sinter), silika kalıntısı (gayzerit) ve amorf silis terimleri karıştırılmaktadır. Silika kalıntısı; CO_2 ve H_2S içeren muhteva eden jeotermal sistemlerin, buharında oluşan kuvvetli asitlerin civardaki silisli yüzey kayaçlarını değiştirmesiyle birkaç cm kalınlığında oluşan tabakalar, tortu çökelleri ve damla

tepecikleridir. Amorf silikaya göre daha yüksek oranda kaolin, kükürt ve kristobalit içerir.

Silisyum (Si) periyodik cetvelde IV A grubunda yer alan bir ametal elementtir. Oksijenden sonra doğada en fazla bulunan ikinci elementtir (%27). Silisyum doğada hem serbest halde hem de oksijenle bağ kurarak silikat denilen bileşikler halinde bulunabilir. Silisyumun oksijene bağlanma kapasitesi bir hayli yüksektir ve güçlü Si-Oksijen bağları oluşturabilmektedir. Silisyumun çevresindeki oksijenle ile bağ kurup meydana getirdiği üç boyutlu yapıya silisyum dioksit (SiO_2) veya silis denilmektedir. Dolayısıyla Türkçe’de silis, silisyum elementine karşılık kullanılabildiği gibi, silisyum elementinin oksijen ile değişik bağ yapıları oluşturduğu silikat grubu mineraller veya camsı materyaller için de kullanılmaktadır (Davraz, 2005). Bundan dolayı amorf silika ve amorf silis terimleri kavram karmaşasına neden olmaktadır. Silisyumdan nabit silisyum kristalleri elde edilebilmektedir. Saf silisyum elementinden oluşan materyal amorf yapı göstermez.

Oksijene bağlanma kapasitesi yüksek olan silisyum oksijenle bağ yaparak silikatlar olarak adlandırılan en yaygın mineraller grubunu (yer kabuğunun yaklaşık %55’ini) oluşturur. Kuvars ve feldspat gibi minerallerin tamamı silikatlardır. Silika kavramı daha dar bir ifadedir ve silisyum + oksijen birliğini ifade eder.

Örnek vermek gerekirse, mineral kuvars silikadır. Yine silika formunda mineraller olan tridimit, kohesit ve kristobalit yüksek sıcaklık ve basınç altında kararlı olan minerallerdir ve bunlar aynı zamanda silikatlardır. Bir başka deyişle kuvars saf silikadan oluşan bir silikattır. Fakat feldspat silisyum ve oksijene ilave olarak sodyum, alüminyum, potasyum ve kalsiyum içerir. Bu yüzden feldspatlar silikatlardır ancak saf silika değildir.

Keçiörlüden temin edilen kayaç örnekleri yüksek miktarda silika ($\text{SiO}_2 > \% 90$) ve az miktarda anatas, jarosit, götit ve kükürt vd. mineralleri içermektedir. Temin edilen örnek numuneler bütününde kristalize yapı göstermemektedir. İfade edilen açıklamalar doğrultusunda temin edilen kayaca amorf silika denilmiştir.

Amorf silika, renginin açık oluşundan, mikro gözenekli yapısından dolayı yüksek porozitesi ve su emme kabiliyetinden, hafifliğinden, gevrek ve kolay kırılabilir oluşundan dolayı diğer silikatlı kayaçlardan kolayca ayırt edilebilir (Davraz, 2004).

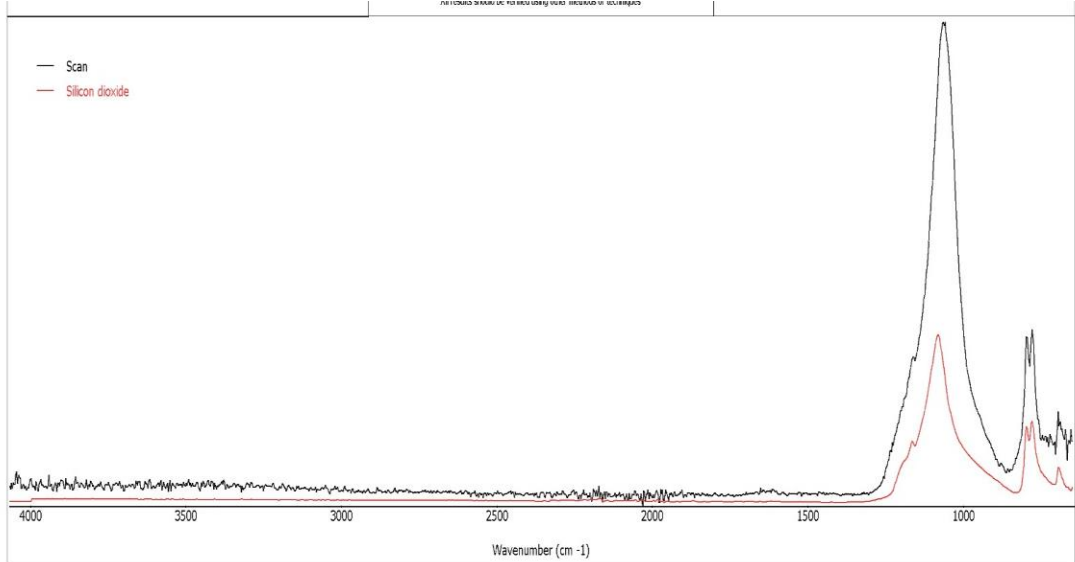
Amorf silikanın belirlenen lokasyonlardan temini esnasında sahadan alınan numune, kızılötesi (IR) spektroskopisi (IR-FTIR) yöntemini kullanan Thermo Scientific

marka Trudefender FTX cihazı kullanılarak analiz edilmiş ve malzemede yüksek miktarda SiO_2 içeriği olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.16. ve Şekil 3.17.).

Yine sahadan alınan numuneler RAMAN spektrometre (RM) teknolojisi kullanan Thermo Scientific marka Firstdefender RM cihazı kullanılarak analiz edilmiş ve malzemede SiO_2 ve TiO_2 içeriği olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.18. ve Şekil 3.19.).



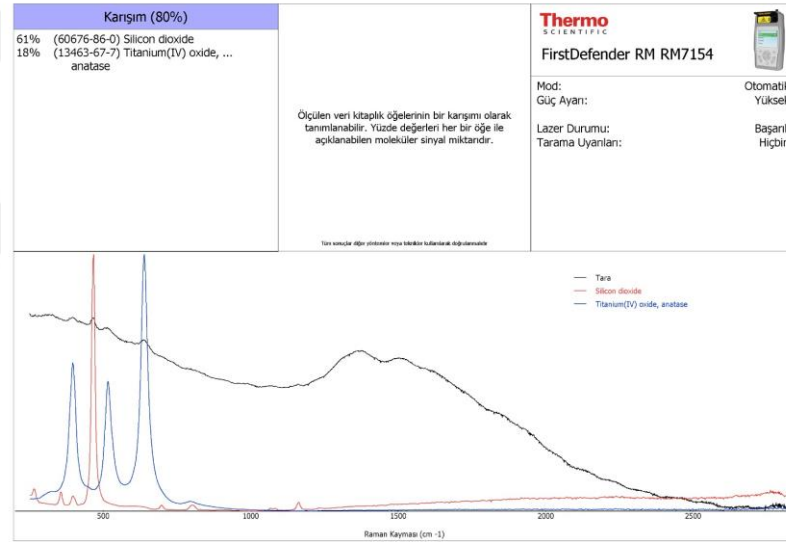
Şekil 3.16. Trudefender FTX cihazı ile analiz.



Şekil 3.17. Trudefender FTX cihazı ile analiz sonucu.



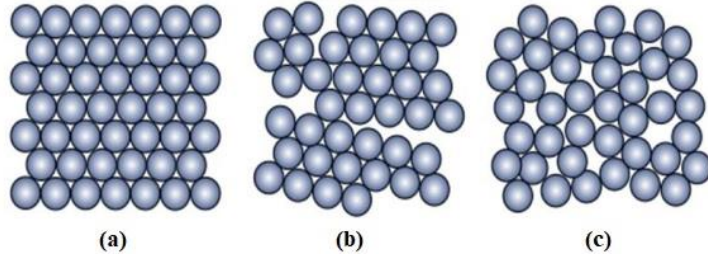
Şekil 3.18. Firstdefender RM cihazı ile analiz.



Şekil 3.19. Firstdefender RM cihazı ile analiz sonucu.

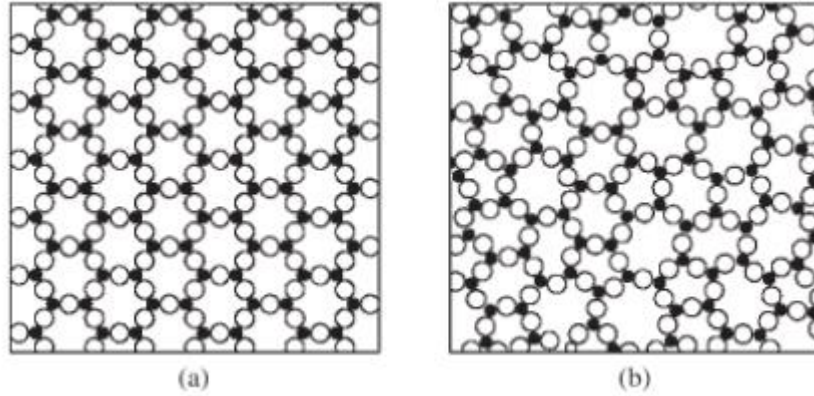
3.1.4.2. Amorf silikanın yapısı

Temel bileşeni silisyum-oksijen tetra hidrat (SiO_4) olan amorf veya kristal silisyum bileşikler doğada kendiliğinden bulunur (Şekil 3.20.) (Anlar ve ark., 2019). Silika ise silisyum dioksit (SiO_2) monomerlerinin polimerizasyonu sonucu oluşan son ürünü ifade eden bir terimdir (Weill ve ark., 1994; Seiler ve ark., 1988).



Şekil 3.20. a) Monokristal, b) polikristal, c) amorf silika allotroplarının şematik yapısı

Kristal yapıdaki silikalar düzenli bir SiO_4 tetrahedra dizilimine sahiptirler. Buna karşılık amorf silikada bu dizilim daha rastgeledir (Şekil 3.21.) (Davila ve ark., 2008; Beall, 1994; Zachariasen, 1932; Warren ve ark., 1936). Kristal halde bulunan silikanın atomlar arası açıları sabitken amorf silikada değişkendir. Doğada amorf ve silika olarak bulunabilen silika sentetik yapay olarak ta üretilebilmektedir. Bölgeden temin edilen kristal yapılu kuvars mineraller Şekil 3.22.'de verilmiştir.



Şekil 3.21. a) İki boyutlu kristal silika b) iki boyutlu kristal olmayan silika yapısı.



Şekil 3.22. Kristal yapılu kuvars mineralleri.

3.1.4.3. Amorf silikanın özellikleri

Kimyasal Özellikler:

Amorf silikanın endüstride kullanımını kimyasal bileşimiyle alakalıdır. Kullanılabilir amorf silikanın kimyasal bileşiminde SiO_2 nin en az %86 olması gerekmektedir. Amorf silikanın izolasyon malzemesi olarak kullanımında ise %70-%80 oranında SiO_2 ise yeterli olmaktadır (Mete, 1982). Filtrasyon sektöründe kullanılacak amorf silikanın SiO_2 içeriği en az %80 olmalıdır (Işık, 1984; Yıldız, 1997; Yıldız, 2012).

Çalışma kapsamında araziden 3 ayrı bölgeden temin edilen malzemelerin kimyasal içeriklerini belirlemek amacıyla Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) jeokimya laboratuvarında XRF (X-Işını Floresans Spektrometresi) analizi yapılmıştır. 1 ve 3. Bölgelerden kayaç ve toz halde olmak üzere 2 ayrı malzeme alınmıştır. Alınan malzemelerden her biri çeyrekleme yöntemiyle azaltılarak ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada kullanılan örneklerin kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde, SiO_2 oranlarının %90.50 ile %94.19 arasında değiştiği görülmüştür. Amorf silika içerisindeki safsızlıkların türü ve miktarı örneklerdeki SiO_2 oranını olumsuz etkilemekte ve SiO_2 dışındaki diğer bileşenlerin oranlarının ise artmasına neden olmaktadır. 2. Bölgeden alınan malzeme deney sonuçlarından amorf silika olmadığı tespit edilmiş olup, amorf silikanın yan kayacı olan ultramafik kayaç olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu örneğin SiO_2 oranı %12.14 olarak bulunmuştur (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. Amorf silika kimyasal bileşenleri

Kumludere mevkii malzeme kimyasal bileşen yüzdeleri						
Kimyasal Bileşenler	1. Bölge (%)		2. Bölge (%)		3. Bölge (%)	
	Toz	Kayaç	Toz	Toz	Kayaç	
Na	11.3	11.24	10.76	10.94	11.09	
SiO ₂	91.38	90.5	12.14	94.19	90.7	
MgO	0.08	0.05	0.14	0.08	0.15	
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	
Al ₂ O ₃	0.28	0.27	0.65	0.49	0.93	
Fe ₂ O ₃	0.13	0.11	0.08	0.17	0.37	
CaO	0.27	0.09	24.63	0.15	0.17	
Ateş Zaiyatı (Kızdırma Kaybı)	2.82	4.39	13.79	2.58	4.54	

Betonda meydana gelen alkali- agrega reaksiyonu bakımından Na_2O ve K_2O alkali metal oksit bileşenleri, sülfat etkisi bakımından ise SO_3 içeriği önemlidir. TS 1114 standardına göre sülfat içeriğinin malzeme ağırlığında %1'den az olmalıdır. Sülfat içeriği bakımından alınan numuneler TS EN 13055 standardına uygundur.

Keçiörlü 1. ve 3. Bölgelerden alınan amorf silika numunelerinin kimyasal bileşenlerinin silis dumanı/mikro silika standartlarına göre değerlendirilmesi Çizelge 3.4.' te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Amorf silika kimyasal bileşenlerinin silis dumanı özelliklerine göre değerlendirilmesi

Toz-Kayaç Kimyasal Bileşen ve Özellikleri	Sınır değerler	TS EN 197-1	ASTM C 1240-03	AASHTO M 307	1. Bölge ve 3. Bölge Toz Kayaç Ortalama Değerleri (%)
SiO_2 (%)	En az	85	85	85	91.69
Na_2O Eşdeğeri Alkali (%)	En fazla	-	1.5	1.5	0.1
SO_3 (%)	En fazla	3.0(V sınıf)	-	3.0	0.09
Kızdırma Kaybı (%)	En fazla	4	6.0	7.0	3.37

Çizelge 3.5. Amorf silika kimyasal bileşenlerinin uçucu kül özelliklerine göre değerlendirilmesi

Kayaç Kimyasal Bileşen ve Özellikleri	Sınır değerler	TS 639 (%)	TS EN 450 (%)	ASTM C 618-F Sınıfı (%)	1. Bölge		3. Bölge	
					Toz	Kayaç	Toz	Kayaç
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	En az	70	-	70	91,79	90,88	94,85	92,0
MgO (%)	En fazla	5.0	-	5.0	0,08	0,05	0,08	0,15
CaO (%)	En fazla	-	-	-	0,27	0,09	0,15	0,17
Na_2O (%)	En fazla	-	-	1.5				
SO_3 (%)	En fazla	5.0	3.0	5.0				
Kızdırma kaybı (%)	En fazla	10.0	5.0	6.0				

Keçiörlü 1. ve 3. Bölgelerden alınan amorf silika numunelerinin kimyasal bileşenlerinin standartlara göre uçucu küllerde aranılan kimyasal özellikler ile karşılaştırılması Çizelge 3.5.' te verilmiştir.

Amorf silikanın kimyasal kararlılığı oldukça yüksektir. Hidroflorik asit dışında diğer tüm asitlere dayanıklıdır, güçlü bazlara da belli bir sınıra kadar dayanır. Örneğin 95°C'de %5'lik HCl çözeltisinde amorf silika kaybı 0,01 mg/cm²'den azdır. Buna karşılık %5'lik NaOH çözeltisinde bu rakam 0,7 mg/cm²'dir. Karbon silikayı 1200°C civarında redükleyebilir buna karşılık çoğu metal silikayla 1000 °C'nin altında

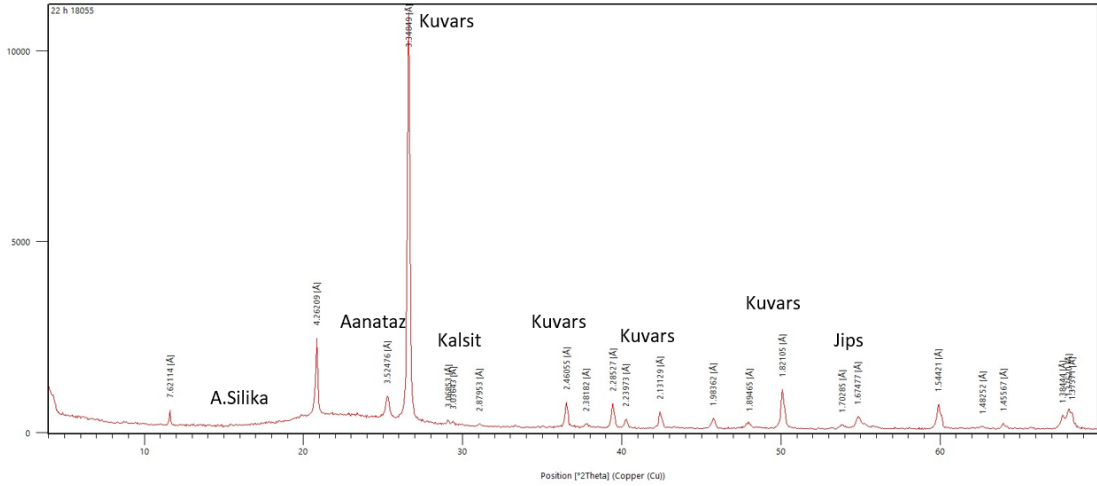
reaksiyon vermezler. Sadece magnezyum, alkali metaller ve alüminyum amorf silikayı 700 °C civarında redükleyebilirler (Shackelford ve ark., 2008; Ateşer, 2010).

Mineralojik ve Petrografik Özellikler:

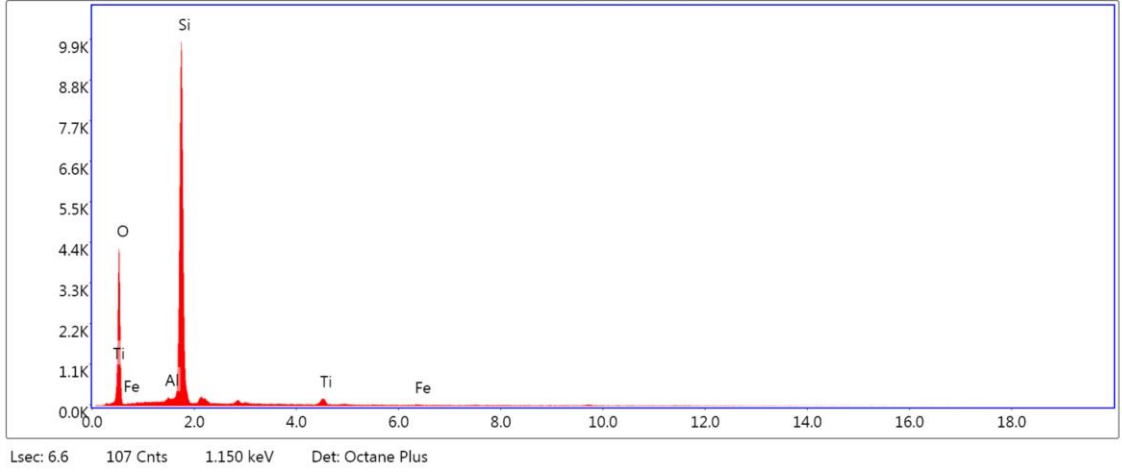
Çalışma kapsamında araziden 3 ayrı bölgeden temin edilen malzemelerin mineralojik ve petrografik özelliklerini belirlemek amacıyla Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) mineraloji ve petrografi laboratuvarında XRD (X-Işını Kırınımı) kalitatif mineral analizi ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizleri yapılmıştır.

Beton-çimento üretimine yönelik tüketimde mineral katkı maddesini oluşturan partiküllerin ilave bağ yapısı oluşturabilmesi bakımından reaktif SiO₂ içermesi gerekmektedir. Bu ise malzemenin amorf yapıda olması ve içerisinde kuvars kristallerinin az olmasına bağlıdır. 1. bölgeye ait numunelerin XRD analiz sonucu Şekil 3.23.'te SEM element grafiği ise Şekil 3.24.'te verilmiştir.

Diyagramlarda eğri üzerindeki tekdüzelik amorf, pikler ise kristal yapıyı göstermektedir, bu da malzemenin kuvars yapıda değil çoğunlukla amorf yapıda olduğunu gösterir. Dolayısıyla araziden temin edilen malzeme aktif bir malzemedir ve çimento ile reaksiyona girebilir sonucuna varılır.



Şekil 3.23. XRD kırınım grafiği.

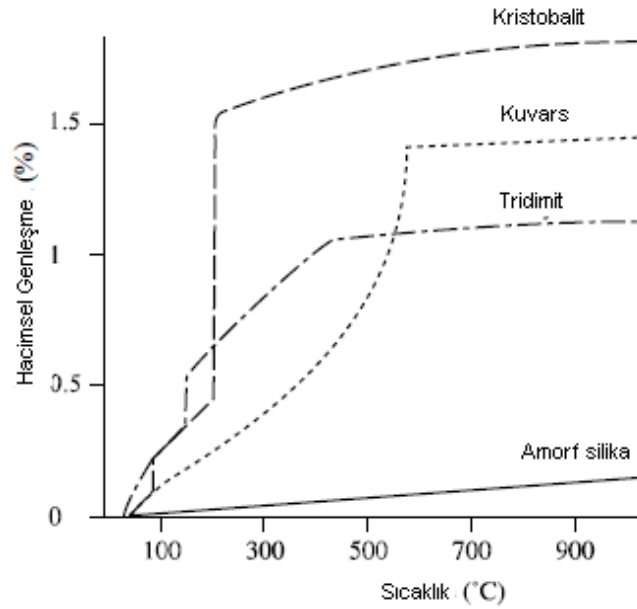


Şekil 3.24. SEM element grafiği.

Diğer Bazı Özellikler:

Amorf silikanın en önemli özelliği düşük termal genleşme katsayısı ($0,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) sayesinde termal sok direncinin çok yüksek olmasıdır. Amorf silika bu özelliği sayesinde yüksek termal şok direncine sahiptir (Chin-Hsiao ve Hong-Yang, 2002). Kristal yapılarıyla hacimsel genleşmenin karşılaştırması Şekil 3.25.'te verilmiştir.

Amorf silikanın mekanik özellikleri Çizelge 3.6. 'da verilmiştir (Lyons, 1990).



Şekil 3.25. Silika polimorfları ve amorf silikanın sıcaklık-hacimsel genleşme grafiği (Bonnet ve Gaillard, 2007).

Çizelge 3.6. Amorf silikanın mekanik bazı özellikleri.

Elastisite Modülü	72,3 GPa
Poisson Oranı	0,17
Eğilme Dayanımı	50 MPa
Kırılma Tokluğu	0,9 MPa/m
Kırılma Yüzey Enerjisi	8,6 J/m ²
Kayma Modülü	31 GPa

3.1.4.4. Amorf silikanın kullanım alanları

Amorf silikanın doğal bir puzolan malzeme olmasının yanında kimyasal, optik, elektrik ve termal özelliklerinden dolayı başta inşaat sektöründen tarıma, kimya sanayinden tıbbi ve elektronik sektörüne kadar geniş bir yelpazede kullanımı vardır. Günümüzde dünya üzerinde en fazla amorf silika yataklarına sahip Yeni Zelenda ve Avustralya’ da inşaat sektöründe beton ve sıva katkısı olarak kullanılmaktadır. Filtrasyon ve absorbe edici özellikleri sayesinde değişik sanayi dallarında birçok kullanım alanına sahiptir.

Tarım alanında toprak iyileştirmesinde toprak düzenleyici organik ve inorganik ıslah malzemesi olarak, gübre dolgu malzemesi, tohum kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Ultraviyole radyasyon dayanımı özelliği sayesinde reaktif optik malzeme olarak kullanılabilir.

Termal genleşme katsayısı ve termal şok direnci sayesinde, termokupl kılıfları, daldırma ısıtıcısı koruyucuları olarak, ayrıca lenslerde, camlarda ve güneş hücresi korumalarında kullanılır.

Boya, deterjan, sabun, kâğıt ve lastik sanayinde katkı malzemesi olarak, telekomünikasyonda kompozit fiber malzemesi olarak, ses ve ısı yalıtımı ihtiyacı olan alanlarda, cam, seramik, metal, elektronik, mücevherat, tıp, genetik, uzay sanayi alanlarında, filtre ve absorbe özellikleri sayesinde ilgili sanayi dallarında kullanılabilir.

3.2. Deneylerde Kullanılan Düzenek, Makine, Teçhizat ve Ekipmanlar

Deneysel çalışmalarda laboratuvar tipi modellenmiş derin karıştırma makinesi, yükleme ünitesiyle entegre edilebilen modüler enjeksiyon haznesi, karıştırma bıçağı,

hassas yükleme yapabilen hidrolik yükleme sistemi, deney tankları, laboratuvar tipi konkasör, laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen, elektrikli testere, laboratuvar mikseri ve PVC numune kalıpları, hidrolik ve manuel numune çıkarıcı kullanılmıştır. Kullanılan tüm ekipmanlarla ilgili detaylar bu bölümde açıklanmıştır.

3.2.1. PVC kalıplar

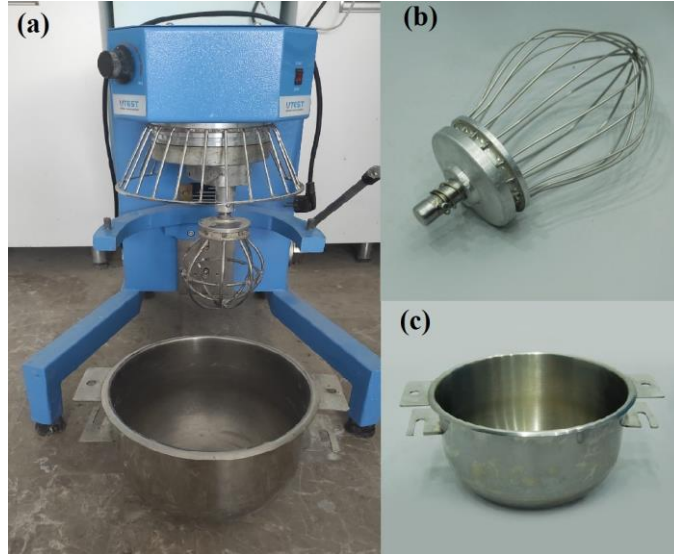
Küçük ölçekli tasarım deneyleri için iki farklı türde PVC deney kalıpları kullanılmıştır. Mukavemet deneyleri için iç çapı 5 cm ve boyu 10 cm PVC numune kalıpları kullanılırken permeabilite deneyleri için iç çapı 5 cm ve boyu 3 cm olan PVC numune kalıpları kullanılmıştır (Şekil 3.26). Tasarım deneylerinde belirlenen oranlarda kullanılan malzemeler laboratuvar mikserinde karıştırılarak PVC kalıplara yerleştirilmiş ve belirlenen süreler için küre bırakılmıştır.



Şekil 3.26. Dayanım deneyleri için PVC numune kalıpları.

3.2.2. Laboratuvar mikseri

Küçük ölçekli tasarım deneyleri için imal edilen küçük ölçekli DKK' nın imalatında 10 litre hazne kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 3.27.). Çırpıcı-karıştırıcı, karıştırma haznesi yörüngesinde 10 ile 240 dev/dak. aralığında, kendi eksenini etrafında ise 20 ile 480 dev/dak. aralığında hızda dönebilmektedir. Mikser üzerinde bulunan ayarlanabilir panel vasıtası ile devir hızı kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.27. a) Laboratuvar mikseri, b) çırpıcı-karıştırıcı, c) 10 litre kapasiteli hazne.

3.2.3. Hidrolik ve manuel numune çıkarıcı

Küçük ölçekli tasarım deneyleri için PVC kalıplarda hazırlanan dayanım ve permeabilite numunelerinin kalıplardan çıkarılması için hidrolik ve manuel numune çıkarıcı aletler kullanılmıştır (Şekil 3.28.).



Şekil 3.28. a) Manuel numune çıkarıcı, b) hidrolik numune çıkarıcı.

3.2.4. Laboratuvar tipi konkasör (öğütücü) laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen

Tez çalışması kapsamında araziden doğal olarak temin edilen amorf silikanın (kayaç ve toz halde) öğütülmesi için sabit hızla dönen tabla bıçaklı tip laboratuvar tipi öğütücü kullanılmıştır (Şekil 3.29.). Öğütücü ile kayaç haldeki amorf silikalar toz haline getirilmiştir.



Şekil 3.29. Laboratuvar tipi öğütücü.

3.2.4. Laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen

Doğal bir puzolan olan amorf silika doğadan alındığı gibi kullanılamamaktadır. Amorf silikanın çimento ile reaksiyon verebilmesi için tane büyüklüğünün $75\mu\text{m}$ ' dan daha küçük olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında araziden doğal olarak temin edilen amorf silikanın (kayaç ve toz halde) laboratuvar tipi öğütücü ile toz hale getirildikten sonra $75\mu\text{m}$ ' dan daha küçük olacak şekilde öğütülmesi için laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen kullanılmıştır (Şekil 3.30.). Laboratuvar tipi devirme mekanizmalı çubuklu değirmen 1,5 kW, 1400 dev/dak, 220 V, 3 p, 50 Hz özelliklerinde bir elektrik motoru, bir adet sonsuz vidalı dişli redüktör, maksimum 1.5 litre kapasiteli hazne ve çeşitli çap ve ağırlıktaki çubuklardan oluşmaktadır. Değirmen dönme hızı 0–100 dev/dak arası kademesiz ayarlanabilir. Amorf silika öğütülürken her

defasında en fazla 500 gr. numune konularak aynı sürede aynı devirde öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30. a) Devirme mekanizmalı değirmen, b) çelik çubuklar, c) hazne.

3.2.4. Deney kalıpları

Büyük ölçekli deneyler için 60cm çapında ve 110 cm yüksekliğinde bükme sacdan silindirik özel kalıplar imal ettirilmiştir. Kalıplar 75cmx75cm platin bir taban üzerinde iki yarım silindirin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Kalıbın bu şekilde üretilmesinde DKK oluşturulduktan sonra oluşan kolonların kalıplardan kolay bir şekilde ve deforme edilmeden çıkarılması, ayrıca zemin içinde oluşumunun incelemesinde kolaylık sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca her bir kolon oluşturulduktan sonra insan gücüyle hareket ettirilemeyecek kadar ağırlıkta olduğu için platin taban altına 10cmx10cm kutu profil ayaklar eklenmiştir. Böylelikle transpalet yardımıyla kalıplar doluyken de kolaylıkla istenilen yere taşıma imkânı sunmuştur. Deneyde kullanılan kalıplardan bir örnek Şekil 3.31.'de verilmiştir.



Şekil 3.31. Büyük ölçekli deneyler için üretilen Model tanklar.

3.2.5. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi

Büyük ölçekli deneysel çalışmaların yürütülmesinde Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında bulunan ve Tübitak projesi kapsamında imal ettirilen laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.32.). Derin karıştırma makinesinin şematik çizimi Şekil 3.33.'te, makinenin teknik özellikleri ise Çizelge 3.7.'de verilmiştir.

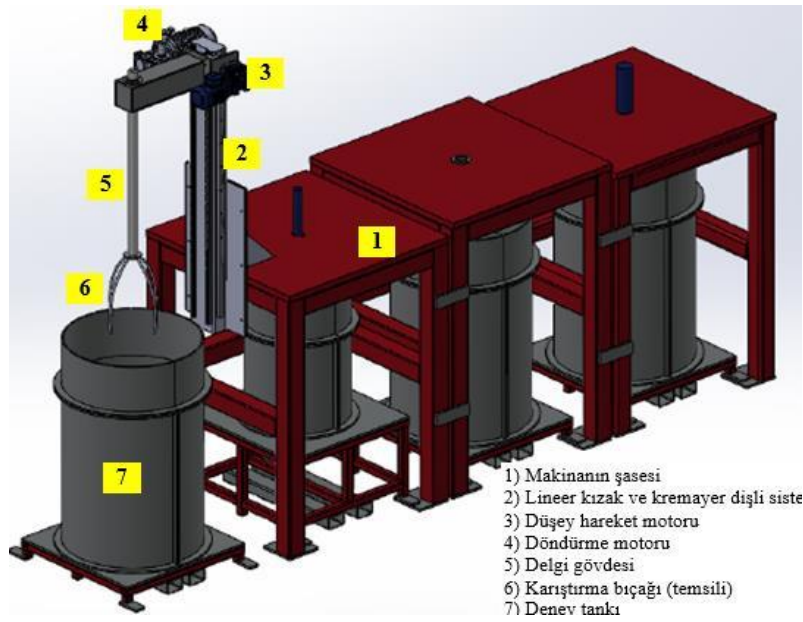
Derin karıştırma makinesi shaftının düşey yöndeki hareket hızı 0-100 cm/dk, kendi eksenini etrafında dönme hızı 0-100 devir/dk arasında istenilen değerde çalışabilmektedir.

Çizelge 3.7. DKK makinesi özellikleri.

Teknik Özellikleri	
Şasi	120x120/4 mm ST37
Üst plaka	1200x1200/40 mm
Dikey hareket redüktörü	Tork:52 Nm Hız:100 cm/dk
Elektrik motoru	Güç: 0.37kW Dönme Hızı:1400 devir/dk
Kramayer (M2 18 diş)	Modül 2-1700mm
Karıştırıcı redüktör	Tork:97 Nm Hız:193 devir/dk
Elektrik motoru	Güç: 2.2 kW Dönme Hızı:1400 devir/dk



Şekil 3.32. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi (1-şasi, 2-dönel hareket motoru, 3-düşey hareket motoru, 4-kontrol paneli, 5-deney tankı, 6-karıştırma bıçağı, 7- şaft, 8- kızak ve kramayer dişli).



Şekil 3.33. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi şematik çizim (Yenginar, 2020).

3.2.6. Yükleme ünitesiyle entegre edilebilen modüler enjeksiyon haznesi

Tübitak projesiyle İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında yaptırılan derin karıştırma deney düzeneğinin tez kapsamında büyük ölçekli deneylerde kullanımının uygun olmayacağından dolayı revize edilmesi kararına varılmıştır. Bu amaçla Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri Koordinatörlüğü (BAP)'ne proje sunulmuş ve proje kapsamında revize edilmesi için araştırmalar yapılmıştır.

Deney düzeneği mevcut haliyle hem derin karıştırma kolonlarının üretilmesinde uygun değildir. Mevcut deney düzeneğinin karıştırma kısmını besleyen ve kolon oluşumunda kullanılacak olan çimento şerbetini sisteme pompalayan arazi tipi pompa kısmı daha çok büyük çaplı (30 cm) kolonları oluşturmak için tasarlanmıştır (Şekil 3.34.).

Mevcut enjeksiyon kısmının enjeksiyon basma kapasitesi ve haznesi büyük olduğundan dolayı, DKK oluşturulurken enjeksiyon miktarının kontrolü mümkün değildir. Yine tez çalışması kapsamında 7 cm çaplı DKK oluşturulurken mevcut enjeksiyon pompasıyla ihtiyaçtan çok daha fazla karışım hazırlanması gerekmekte ve karışımın büyük çoğunluğu israf olmaktadır. Bu da malzeme kaybına sebebiyet verecektir. Başka bir dezavantaj ise arazi tipi pompanın temizliğinin zahmetli ve uzun süre almasıdır.

Tez kapsamında üretilecek kolonlar için daha küçük çaplı bir pompa ve haznesinin kullanımının çalışmalar açısından kolaylık sağlayacağı öngörülmüştür.



Şekil 3.34. Enjeksiyon pompası.

Yine yukarıda belirtilen hususlardan dolayı, portatif 15lt hazneli hareketli ve yükleme düzeneğine entegre edilebilen bir düzenekle yaptırılmıştır. Burada enjeksiyon haznesine basıncı verecek olan düzenek yükleme pistonudur. Yükleme pistonuna o-ringli modüler bir piston başlığı eklenmiştir. Bu sayede maliyetten tasarruf edilerek kolay doldurulup boşaltılabilen bir düzenek kurulmuştur (Şekil 3.35.).



Şekil 3.35. Enjeksiyon sistemi.

3.2.7. Karıştırma bıçağı

Tez çalışması kapsamında büyük çaplı kolonların üretimi için 7 cm çaplı, 37 cm uzunluğunda tek nozullu bir karıştırma bıçağı tasarlanmıştır (Şekil 3.36.). Karıştırma bıçağının nozul çapları 2-3-4 mm olacak şekilde modüler ayarlanabilir olarak tasarlanmıştır. Yine bıçak kademe sayısı 3 olacak şekilde şaşırtmalı olarak her bir bıçak konumu birbirine eşit uzaklıkta olacak ve arasına zemin sıkışmayacak (kohezyonlu zeminlerde) biçimde tasarlanmıştır.



Şekil 3.36. 7 cm çaplı karıştırma bıçağı.

3.2.8. Hassas yükleme yapabilen hidrolik yükleme sistemi

Mevcut deney düzeneğinin yükleme kısmının hassas yükleme yapabilmesi ve çapı daha küçük olan DKK'larının oluşturulabilmesi için yükleme düzeneği modifiye edilmiştir. Çünkü, manuel olarak yükleme durumunda kazık kırıldığı anda yüklerin devrilmesiyle oluşacak iş güvenliği açısından riski bulunmaktadır. Yine manuel olarak yüklemelerde deneyin standartlara uygun olarak yapılması da zorlaşmaktadır. Şöyle ki yüklemeler sırasında DKK'nunda eksantrik oturma ve eğilmelerle beraber eksantrisite oluşabilmektedir (Şekil 3.37).

Tüm belirtilenler kapsamında yükleme düzeneğinin piston kısmı değiştirilmiş ve daha hassas bir yükleme düzeneği kurulmuştur. DKK'larının yüklenmesi esnasında kolonda oturma meydana gelmesi halinde piston yüzeyiyle kolon arasında teması kaybetmeyecek bir düzenek kurulmuştur. Şöyle ki kolon ilk yüklendiğinde kolonda bir oturma meydana gelirse piston belirlenen yükte otomatik olarak inerek teması sağlamaya devam ederek yükleme işlemini devam ettirmektedir. Yine yükleme pistonunun boyu artırılarak bundan sonraki yapılacak laboratuvar deneylerinde de kullanımı sağlanmıştır. Yükleme düzeneğinin daha rahat ve kolay kontrolü için otomasyon sistemiyle beraber dijital dokunmatik pano da sisteme dahil edilmiştir (Şekil 3.38.).



Şekil 3.37. DKK'nın manuel olarak yüklenmesi.



Şekil 3.38. a) Dijital dokunmatik pano, b) Yeni yükleme düzeneği.

3.2.9. Veri toplama ünitesi, yük halkası, komparatör saatler ve potansiyometreler

Büyük ölçekli kolonların yüklenmesi esnasında daha sağlıklı veri toplamak amaçlı 8-64 kanallı veri toplama cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.39). 16-Bit çözünürlükte ADC'leri (Analog Sayısal Çeviricileri) içeren cihazın güç, sensör besleme, sinyal işleme ve filtre devreleri, analog olarak cihaza entegredir. Cihaz, strain gauge'ler, LVDT'ler, potansiyometreler, yük hücreleri, thermocouple'lar ve tüm voltaj çıkışlı sensörler için veri toplayabilmektedir.

DKK'larının yükleme esnasında DKK' ya gelen yükü ölçmek için yüksek hassasiyetle çalışan 50 kN kapasiteli S tipi yük halkası kullanılmıştır (Şekil 3.40.).



Şekil 3.39. Veri toplama ünitesi.



Şekil 3.40. S tipi yük halkası.

DKK'larını yükleme esnasında kolonda ve zeminde meydana gelecek hareketleri ölçmek için 2 adet potansiyometrik cetvel sisteme entegre edilmiş ve kalibrasyonları yapılarak veri toplama cihazına bağlanmıştır (Şekil 3.41.).

DKK'larını yükleme esnasında meydana gelebilecek aksaklıklar (elektrik kesintisi vb.) için yükleme sistemine kolondaki ve zemindeki hareketleri ölçmek üzere 0.01 mm hassasiyetli 4 adet komparatör saat takılmıştır (Şekil 3.42.).



Şekil 3.41. Potansiyometrik cetveller.



Şekil 3.42. Komparatör saatler.

3.3. Deneysel Çalışmalar ve Süreçleri

Tez çalışması kapsamında malzemenin aktivitesinin hangi seviyede olduğu, bundan sonraki süreçte yapılacak küçük çaplı ve büyük çaplı deney tasarımlarında hangi oranlarda kullanılacağını belirlemek üzere bir ön deney tasarımı yapılmıştır. Ön deneylerden elde edilen sonuçlardan küçük ölçekli deneylerin istatistiksel tasarımı için sınır değerler belirlenmiş ve Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak deneysel tasarım çizelgesi oluşturulmuştur. Deney programına göre küçük ölçekli deney numuneleri hazırlanarak mukavemet ve permeabilite özellikleri araştırılmıştır. Küçük ölçekli deneylerden elde edilen veriler ışığında bir optimizasyon yapılarak optimum tasarım belirlenmiştir. Optimum tasarıma uygun doğrulama deneyleri yapılmıştır. Büyük ölçekli deneylere geçmeden önce deney programına göre malzeme reoloji deneyleri yapılmıştır. Optimum tasarıma uygun büyük ölçekli deney numuneleri hazırlanmış ve yükleme deneylerine tabii tutularak deney sonuçları araştırılmıştır. Deneylere ek olarak deney numunelerine SEM-EDS analizi, kimyasal analiz, mineralojik ve petrografik analizler yapılmıştır.

3.3.1. Ön tasarım deneyleri ile sınır parametrelerinin belirlenmesi

Sahadan temin edilen amorf silikanın aktivitesinin hangi seviyede olduğu, bundan sonraki süreçte yapılacak küçük çaplı ve büyük çaplı deney tasarımlarında hangi oranlarda kullanılacağını belirlemek üzere 8 seviyeli bir ön deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 3.8.).

Çizelge 3.8. Ön tasarım deneyleri

Tasarım no	Dozaj (gr/cm ³)	Su/bağlayıcı	Bağlayıcıdaki amorf silika miktarı yüzdeleri
1	0.3	1.75	0
2	0.3	1.75	5
3	0.3	1.75	10
4	0.3	1.75	15
5	0.3	1.75	20
6	0.3	1.75	30
7	0.3	1.75	40
8	0.3	1.75	50

Mineral katkı maddelerinin katkı maddesi olarak kullanımında ilave ve ikame olmak üzere iki yöntem vardır.

3.3.1.1. Amorf silikanın ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi):

İlave yönteminde, karışımda kullanılacak bağlayıcı (çimento) miktarında azaltma yapılmadan amorf silika (mineral katkı maddesi) karışıma eklenir. Böylece karışımdaki etkin bağlayıcı miktarı arttırılmış olmakta ve ilave katkı maddesi zeminin yerini almaktadır.

3.3.1.2. Çimentonun yerine kısmi olarak amorf silika kullanılması (Basit ikame yöntemi):

Basit ikame yönteminde, karışımdan çıkartılan çimentonun yerine, ağırlıkça çıkartılan çimento miktarı kadar mineral katkı maddesi koyulması (yani çimentonun amorf silika ile yer değiştirmesi) usulü geçerlidir. Bu yöntemde mineral katkı maddesinin davranışı, karışımda kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişebilir (Pekmezci ve Uyan, 2001).

Deneylerde kullanılan yöntem, amorf silikanın dayanıma ve geçirimsizliğe olan etkisini görmek üzere olduğu için basit ikame olarak seçilmiştir. İlk kademede amorf silikanın olmadığı, bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı katkısız kontrol (şahit) numuneler hazırlanmıştır. Diğer kademelerde ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 30, 40 ve 50 olmak üzere artan yüzdelerle çimento yerine amorf silika katkı maddesi eklenmiştir.

Tasarımda tüm seviyelerde dozaj 300 kg/m^3 , su/bağlayıcı oranı 1.75 olarak seçilmiştir. Deney kapsamında araziden temin edilen amorf silika malzeme laboratuvarda bulunan değirmende öğütülmüş, 200 Nolu elekten elenerek kullanıma hazırlanmıştır (Şekil 3.43.). Ön tasarım deneylerinde zemin türü olarak kil kullanılmıştır. Karışımında kullanılacak ve araziden getirilen kil 40 Nolu elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Çimento olarak daha önce belirlenen CEM I 42.5 R kullanılmıştır (Şekil 3.44.).

Malzemeler tasarıma göre belirtilen miktarlarda laboratuvarda bulunan laboratuvar mikserinde 5- 10dk karıştırılarak önceden içi yağlanarak hazırlanan 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğindeki plastik kalıplara 3 kademede doldurularak yerleştirilmiştir. Numune boyutları seçiminde literatürde daha önceden yapılan çalışmalar incelenerek belirtilen boyut oranları ve hazırlama şekilleri dikkate alınmıştır. Bununla ilgili detaylar küçük ölçekli DKK numunelerinin hazırlanması kısmında verilmiştir. Deney tasarımı kapsamında 7 gün için 2, 28 gün için 2 ve 56 gün için 1 numune olmak üzere her bir seviye için 5, toplamda 8 seviye için 40 adet numune serbest basınç deneyleri için hazırlanarak küre bırakılmıştır (Şekil 3.45.).



Şekil 3.43. Değirmen, 40 ve 200 Nolu elekler.



Şekil 3.44. Kullanıma hazır amorf silika, CEM I 42.5 R çimento ve kil.



Şekil 3.45. Mikser, yağlanarak hazırlanan boş kalıplar, numuneler.

3.3.2. Yanıt yüzey yöntemi ve istatistiksel deney tasarımı

Ön tasarım deneylerinden elde edilen veriler ışığında ve literatürde daha önceki yapılan çalışmaların incelenmesiyle YYY kullanılarak istatistiksel deney tasarımı oluşturulmuştur.

3.3.2.1. Yanıt yüzey yöntemi (YYY)

İstatistiksel deney tasarımlarında birçok yöntem (faktöriyel tasarım, latin-kare tasarım, iç-içe tasarım, Taguchi vb.) kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında küçük ölçekli DKK deneyleri için YYY seçilmiştir. YYY, istatistiksel ve matematiksel yöntemlerle tasarımın yapılarak optimize edilmesi şeklinde ifade edilmektedir (Myers ve Montgomery, 1995; Eren, 2004; Türkyılmaz, 2011). YYY ile değişken parametrelere göre bir veya birden fazla yanıtlar arasındaki ilişki araştırılır. İlk defa kimya sektöründe kimyasal reaksiyonların optimizasyonunda kullanılan YYY 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiş ve ‘denemelerin optimum koşullara ulaşması’ olarak adlandırılmıştır. (Özdikicierler ve Eren, 2016; Koç ve Ertekin, 2009). Bu yöntemde optimum tasarıma ulaşmak için çeşitli seviyelerde deneyler kullanılır (Box ve Wilson, 1951). Bir yaklaşım olarak araştırmacılar tarafından ikinci derece bir polinom modelinin kullanılması önerilmiştir.

3.3.2.2. Küçük ölçekli DKK deneyleri için istatistiksel deney tasarımı

Küçük ölçekli DKK’ larının serbest basınç ve permeabilite deneyleri için hazırlanacak numunelerinin karışım oranlarını belirlemek üzere Design Expert V11

programı kullanılarak 18 seviyeli deneysel tasarım programı tasarlanmıştır. YYY' de tasarım tablosundaki alt ve üst sınır değerler araştırmacı tarafından belirlenir ve program optimizasyona esas olan ara değerleri kendisi belirler.

YYY tasarım ilkeleri doğrultusunda bağlayıcı oranı, amorf silika, süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi ve su/bağlayıcı oranı olmak üzere 4 farklı parametre ile kum ve kil zeminler için ayrı tasarım tabloları oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan kum zemin ve kil zemin için su/bağlayıcı oranı sınır parametreleri farklı seçilmiş, diğer 3 parametrenin sınır değerleri ise aynı seçilmiştir (Çizelge 3.9. ve Çizelge 3.10.). DKY ile zemin iyileştirmede bağlayıcı dozajı için araştırmacılar tarafından birçok çalışma arazi ve laboratuvar ölçekli yapılmış, dozajın mukavemete etkisi araştırılmış ve çeşitli öneriler ortaya konmuştur. Islak DKY' de genellikle dozaj 100-500 kg/m³ arasında, kuru DKY' de ise 100-300 kg/m³ arasındadır (Bruce ve Bruce, 2003). Decky ve ark. (2013) yaptıkları bir çalışmada çeşitli zemin türleri için bağlayıcı dozajını 120-350 kg/m³ olarak seçmişlerdir. Terashi ve Kitazume (2011) kumlu zeminlerin DKY ile iyileştirilmesinde değişik su/çimento oranlarında dozajın 250-450 kg/m³ arasında kullanılmasının etkili olacağını yaptıkları bir çalışma ile ortaya koymuşlardır. Siltli killi ve kumlu zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılan bir çalışmada ise dozaj 160-260 kg/m³ seçilmiştir (Chen ve ark., 1996). Genel itibariyle değişik zemin türleri ve koşulları için dozaj 100-400 kg/m³ olarak önerilmiştir (FHWA, 2001). Han (2015) ise dozajı bilimsel araştırmalarda kullanılmak üzere kuru zeminin bir yüzdesi olarak, saha çalışmalarında ve uygulamalarda iyileştirilecek zemin hacminin yüzdesi olarak ve doğal zeminin bir yüzdesi olmak üzere üç ayrı kategoride hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. DKY uygulamalarında bağlayıcı dozajı zemin cinsine bağlı olarak 100-500 kg/m³ arasında seçilebilmektedir (Topolnicki, 2004). Literatür ve arazi çalışmaları dikkate alınarak belirtilen dozajların sağlanabilmesi için bağlayıcı sınır değerleri %15-%40 olarak seçilmiştir. Yapılan ön tasarım deneylerinden elde edilen veriler ışığında tasarıma girecek çimentonun ağırlıkça yüzdesi (çimentoya ikame edilerek) olarak amorf silika için sınır değerler %0-%50 olarak belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi üretim tavsiyesinde belirtildiği üzere bağlayıcının ağırlıkça yüzdesi olarak %0.5-%4 sınır değerlerinde belirlenmiştir. Uygulamalarda genellikle su/bağlayıcı oranı 0.8-1.5 aralığında olmaktadır (Wahidy, 2019). Tez çalışması kapsamında daha uygun değer aralıklarının değerlendirilebilmesi amacıyla killi zeminler için yapılan küçük ölçekli DKK deneylerinde su/çimento oranı sınır değerleri 1.0-2.5 olarak, kumlu zeminler için sınır değerler 0.7-1.2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.9. YYY ile killi zemin tabakası için oluşturulan deney tasarımı.

Deney Tasarım Seviyeleri	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı (%)	Su / Bağlayıcı oranı
1	27.5	12.5	4	1
2	15	17.75	4	2.5
3	27.25	25.52	214	1.76
4	32.75	0	2.65	25
5	15	50	4	1.37
6	27.25	25.52	2.14	1.76
7	15	30	0.5	1
8	40	28.27	0.57	2.5
9	31.25	50	0.5	1.5
10	17.5	0	0.5	2.28
11	40	0	0.5	1
12	15	0	2.70	1.32
13	27.25	25.52	2.14	1.76
14	40	10.25	4	1.7
15	34.37	50	4	2.5
16	40	46.25	2.65	1
17	15	50	1.51	2.5
18	23	0	0.55	1.21

Çizelge 3.10. YYY ile kumlu zemin tabakası için oluşturulan deney tasarımı.

Deney Tasarım Seviyeleri	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı (%)	Su / Bağlayıcı oranı
1	40	50	2.67	0.82
2	15	50	1.48	1.2
3	15	175	0.5	0.87
4	15	11.25	4	1.2
5	27.12	25.57	2.12	0.95
6	40	12.5	2.67	1.2
7	27.12	25.57	2.12	0.95
8	40	43.75	0.5	1.13
9	17.37	0	2.68	0.7
10	40	0	0.5	0.7
11	31	50	4	1.2
12	25.5	0	0.5	1.2
13	15.62	35	2.07	0.7
14	27.12	25.57	2.12	0.95
15	34.5	0	4	0.95
16	15	50	4	0.81
17	34.25	25.75	4	0.7
18	25.45	50	0.5	0.7

3.3.3. Küçük ölçekli derin karıştırma kolon numunelerinin hazırlanması

3.3.3.1. Numunelerin hazırlanması

Numuneler hazırlanmaya başlamadan önce, literatürde bu konuda daha önceden yapılmış çalışmalar ve standartlar incelenmiştir. Yapılan araştırmalarda zemin bağlayıcı karışımlarının mikser ile karıştırılarak kalıplara yerleştirilmesiyle ilgili, ASTM D2166/D2166M-16, ASTM D4320/D4320M-09, ASTM C942-15 standartlarıyla Japanese Geotechnical Society (JGS)' ye ait JGS 0821-2000 standardı incelenmiştir. Dolayısıyla numunelerin hazırlanmasında literatürde yapılan çalışmalar ve bahsi geçen iki standart dikkate alınmıştır. Literatürde laboratuvar ortamında zemin bağlayıcı karışımlara özelliklerin araştırılması ile ilgili yapılan çalışmalarda UCS deneyleri için numune boyutları 50 mm çap ve 100 mm boy olarak seçilmiştir (Choi ve ark., 2017; Ramadhan ve Putra, 2021).

JGS 0821-2000 standardında belirtilen numune hazırlama prosedüründe araziden doğal su muhtevası ile temin edilen zemin numunesi temin edildiği şekli ile kullanılır. Karışım, 120-300 devir/dk özelliğine sahip kanca tipi laboratuvar karıştırıcı ile 10 dakika karıştırılır. Hazırlanan karışım 50 mm çap ve 100 mm boya sahip kalıplara 3 tabaka halinde yerleştirilir. Her tabaka yerleştirilirken yavaşça yere vurularak içindeki hava kabarcıkları çıkarılır ve her tabaka 5 mm çaplı çubuk ile şişlenir. Hazırlanan numuneler poşetlenerek 20 ± 3 °C'de %95 bağıl nemde kür edilir.

Jacobson ve ark. (2003) tarafından tavsiye edilen numune hazırlama şeklinde araziden temin edilen zemin örnekleri kullanılabilecek kadar 20°C sıcaklık ve %100 bağıl nemde saklanır. Kendi ekseninde 68 devir/dk ve kazan yörüngesinde 150 devir/dk ile dönen kanca tipli laboratuvar karıştırıcısı ile karışım uygun süre karıştırılır. Hazırlanan numune 50 mm çap ve 100 mm boya sahip kalıplara tabakalar halinde yerleştirilir. Her tabaka doldurulduktan sonra 5 mm çaplı çubukla 25 defa şişlenir ve her tabakaya 5-10 sn süre 100 kPa gerilme uygulanır. Karışım 20 ± 3 °C'de %100 bağıl nemde kür edilir.

EuroSoilStab (2002) de tavsiye edilen numune hazırlama yönteminde araziden tüp veya delft numune alıcı ile temin edilen zemin örneği doğal haliyle kullanıma kadar muhafaza edilir. Zemin türüne göre karıştırma süresi değişiklik göstermekle beraber genel olarak laboratuvar mikserinde karışım 5 dk karıştırılır. Hazırlanan karışım 50 mm çap ve 100 mm boya sahip önceden içi yağ veya parafinle kaplanmış kalıplara tabakalar halinde yerleştirilir. Her bir tabakaya 45 mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki plakaya

50 mm uzunluğundaki çubuk sabitlenerek oluşturulmuş düzenek ile 2 sn süresince 100 kPa sabit gerilme uygulanır. Kalıp doldurulduktan sonra numunenin suyunu kaybetmemesi için poşetlenerek 18-22 °C’de kür edilir.

Bhadriraju ve ark. (2007) yüksek plastisiteli killi zeminler kullanılarak yaptıkları çalışmada hazırladıkları zemin-bağlayıcı karışımları için laboratuvar çalışmalarına esas olacak aşamalar belirlemişlerdir. Çalışmada kapsamında araziden temin ettikleri zemin numunesini 60 °C’de kurutup öğüttükten sonra 0.425 mm çaplı elekten elemişlerdir. Karışımda kullanacakları bağlayıcı miktarı için bir bağlayıcı faktörü(α) tanımlamışlardır (Eşitlik 3.1.).

$$\alpha = \frac{W_b}{W_s} \frac{\gamma_n}{1 + W_n} 100 \quad (3.1)$$

Denklem 3.1. de W_b =bağlayıcının kuru ağırlığı, W_s =zeminin kuru ağırlığı, γ_n =zeminin doğal yoğunluğu, W_n =zeminin doğal su muhtevası olarak tanımlanmıştır. Burada karışım için gerekli su miktarı hesaplanırken, karışım için gerekli su miktarından zeminin doğal su muhtevası miktarı düşülür. Karışım kendi ekseninde 60 devir/dk ve kazan yörüngesinde 152 devir/dk ile dönen laboratuvar karıştırıcısı ile önce kuru halde 2-3 dk karıştırıldıktan sonra enjeksiyon karışıma ilave edilerek tekrar 2 dk karıştırılıp mikser durdurulur. Topaklanma olup olmadığı kontrol edilir ve topaklanma varsa topaklanan parçalar ezilerek parçalanır. Aynı devirde çalıştırılan mikser ile 2-3 dk daha karıştırıldıktan sonra karışım iki yarım silindirin birleşiminden oluşan 70 mm çap ve 156 mm boya sahip önceden içi yağlanmış kalıba 5 tabaka halinde, her tabaka 5mm çaplı çubukla 30 defa şişlenerek yerleştirilir. Oluşabilecek hava kabarcıklarına karşı 2 kg ağırlığındaki tokmak 5 cm yükseklikten 25 defa düşürülerek sıkıştırma yapılır. Hazırlanan numune kalıpla birlikte poşete konularak 2-3 saat bekletildikten sonra poşetten ve kalıptan çıkarılır. Çıkarılan numune tekrar poşetlenerek %100 bağıl nem ortamında küre bırakılır.

Yukarıda belirtilen literatür çalışmaları ve standartlar çerçevesinde belirlenen bir sistematikte küçük ölçekli DKK numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmalar kapsamında araziden temin edilen kil zemin 40 nolu elekten elenerek, kum zemin ise doğal haliyle elenmeden kullanılmıştır.

Küçük ölçekli DKK deneyleri kapsamında serbest basınç ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler killi ve kumlu zemin için 28 ve 56 günlük kür

sürelerinde her bir seviye için 3'er numune olacak şekilde hazırlanmıştır (Çizelge 3.11.). Serbest basınç deneyleri için iç çapı 50 mm ve boyu 100 mm olan PVC kalıplar, permeabilite deneyleri için iç çapı 50 mm ve boyu 30 mm olan PVC kalıplar kullanılmıştır. Permeabilite deneyleri uzun sürelerde tamamlandığı için deneylerin çakışmaması amacıyla numunelerin hazırlanması bir program dahilinde, sürece yayılarak yapılmıştır. Deney programı dikkate alınarak günlük deney programında hazırlanacak tasarım seviyesi ve numune sayısı belirlendikten sonra toplam karışım miktarı hesaplanmıştır. Numune hazırlama sırasında oluşabilecek zayıflar da dikkate alınarak bir miktar fazla karışım (%10) hazırlanmıştır.

Deneylerde kullanılan killi zemin için su muhtevası, zeminin plastik limit değeri (%21.75) ile likit limit değeri (%33) arasında %25.0 olarak belirlenmiştir. Kumlu zemin için ise su muhtevası zemin suya doygun olacak şekilde %10.0 olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.9. ve Çizelge 3.10. da ki her bir tasarım seviyesi için karışıma girecek zemin, çimento, amorf silika, süper akışkanlaştırıcı ve su miktarları hesap edilerek karışım aşamasına geçilmiştir. Laboratuvar tipi mikserin karıştırıcı bıçağının eksenel dönme hızı 65 devir/dk, karıştırma kabında 150 devir/dk olacak şekilde ayarlandıktan sonra karışım önce kuru karışım olarak zemin, çimento ve amorf silika 2-3 dk süresince karıştırılmıştır. Sonrasında kur karışıma su ilave edilerek 4-5 dk daha karıştırıldıktan sonra mikser durdurularak karışımında topaklanma olup olmadığı kontrol edilmiş, topaklanma varsa topaklanan parçalar ezilmiş, karıştırma kabı yüzeyine yapışan malzemeler karışım içine dahil edilerek mikser aynı devirlerde 4-5 dk daha çalıştırılmış ve son karıştırma süresi içerisinde süper akışkanlaştırıcı madde eklenmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı karışım hacmindeki toplam kuru kütlenin ağırlıkça ikamesi, süper akışkanlaştırıcı ise karışımdaki bağlayıcının ağırlıkça yüzdesi olarak hesaplanmıştır.

Tasarım oranlarına göre hazırlanan karışımlar serbest basınç deneyi için çapı 50 mm ve boyu 100 mm olan PVC kalıplara, permeabilite deneyi için çapı 50 mm ve boyu 30 mm olan PVC kalıplara doldurulmuştur (Şekil 3.46.). Hazırlanan karışım kalıplara doldurulmadan önce kalıp içleri gres yağı ile yağlanmıştır. Karışımlar kalıplara 3 kademe halinde her kademe sonunda 5mm çaplı çubukla 30 defa şişlenerek ve şişlenme işi bittikten sonra hava kabarcıklarının çıkması için kalıp çeperine 25 defa plastik tokmakla veya ıspatula ile hafifçe vurularak yerleştirilmiştir. Karışımdaki su içeriği düşük olan numuneler ise yine 3 tabaka halinde numune sıkıştırma bir cihaz ile sıkıştırılıp yerleştirilmiştir (Şekil 3.47.).

Çizelge 3.11. Küçük ölçekli DKK için hazırlanan deney numune sayıları

ZEMİN TÜRÜ	SEVİYE	UCS		PERMEABİLİTE		ZEMİN TÜRÜ	SEVİYE	UCS		PERMEABİLİTE	
		28 GÜN	56 GÜN	28 GÜN	56 GÜN			28 GÜN	56 GÜN	28 GÜN	56 GÜN
KİL	1	3	3	3	3	KUM	1	3	3	3	3
	2	3	3	3	3		2	3	3	3	3
	3	3	3	3	3		3	3	3	3	3
	4	3	3	3	3		4	3	3	3	3
	5	3	3	3	3		5	3	3	3	3
	6	3	3	3	3		6	3	3	3	3
	7	3	3	3	3		7	3	3	3	3
	8	3	3	3	3		8	3	3	3	3
	9	3	3	3	3		9	3	3	3	3
	10	3	3	3	3		10	3	3	3	3
	11	3	3	3	3		11	3	3	3	3
	12	3	3	3	3		12	3	3	3	3
	13	3	3	3	3		13	3	3	3	3
	14	3	3	3	3		14	3	3	3	3
	15	3	3	3	3		15	3	3	3	3
	16	3	3	3	3		16	3	3	3	3
	17	3	3	3	3		17	3	3	3	3
	18	3	3	3	3		18	3	3	3	3
TOPLAM		54	54	54	54	TOPLAM		54	54	54	54
GENEL TOPLAM						432					



Şekil 3.46. Serbest basınç ve permeabilite deneyleri için mikserle hazırlanan numunelerin kalıplara yerleştirilmiş hali.



Şekil 3.47. Karışımların PVC kalıplara yerleştirilmesi.

3.3.3.2. Küçük ölçekli DKK numunelerinin kürlenme şartları

Küçük ölçekli DKK tasarımında hazırlanan numuneler su muhtevasını kaybetmemesi için ASTM C 511/13 standardına ve FHWA (2013) raporuna göre bir kürlenme ortamına bırakılmıştır (Şekil 3.48.). Standart ve rapora göre numunelerin kürlenme şartlarının $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %95 bağıl nem ortamında olması gerekmektedir. Her bir numune içleri eşit miktarda nemlendirilmiş poşetlere konularak ağızları düğümlenmiş ve bu şekliyle yine içi belli bir miktar nemlendirilmiş plastik kaplarda kapağı kapalı bir şekilde kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 3.48. Küre bırakılan numuneler.

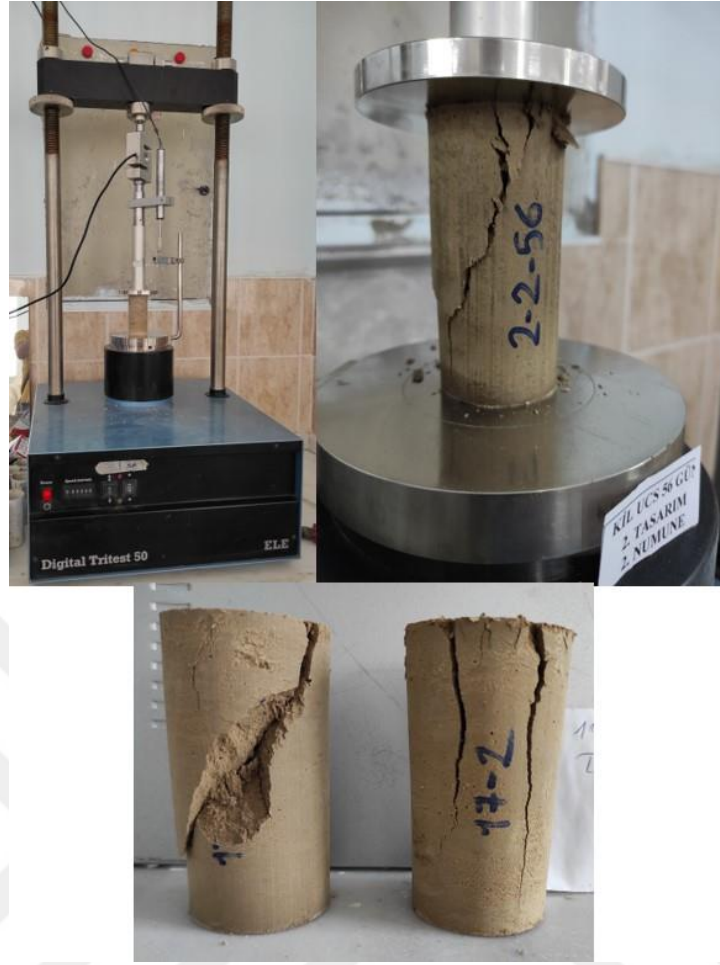
3.3.4. Serbest basınç deneyi (UCS)

Deneyisel çalışma kapsamında hazırlanan serbest basınç deney numuneleri için deneyler Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde ASTM D2166 ve ASTM D4219 standardı esas alınmıştır ve buna göre yapılmıştır. Deney küçük ölçekli DKK numunelerinin yanı sıra büyük ölçekli DKK'larından standarda uygun çap/boy oranında hazırlanan numunelere de yapılmıştır. Deney yükleme hızı 1 mm/dk olarak belirlenmiştir. Deneylere başlamadan önce her numune için boyut ölçümleri yapılmış ve ağırlıkları tartılarak kayıt altına alınmıştır (Şekil 3.49.).

Deney kapsamında çap/boy oranı 0.5 olan (50mm çap ve 100mm boy) numuneler, numune çıkarıcı ile PVC kalıplardan çıkarılmış ve zımpara ile yüzeyleri düzeltildikten sonra deneye hazır hale getirilmiştir. Numune serbest basınç deney aletinin alt ve üst tablaları arasına temas edecek şekilde yerleştirilip deformasyon saati de ayarlandıktan sonra deneye başlanmıştır (Şekil 3.50.). Serbest basınç deney aletinin yükleme hızı numunede dakikada %0.5-2 birim boy kısalması yapacak şekilde ayarlanmıştır. Deney sünek kırılma yapan numunelerde %20 birim boy kısalması yapana kadar devam ettirilmiştir. Yükleme-deformasyon verileri 0.1 mm deformasyon aralığında veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 3.51.). Elde edilen verilerden bilinen bağıntılarla serbest basınç mukavemeti değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 3.2, Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4).



Şekil 3.49. Numune ağırlık ve boyut ölçümleri.



Şekil 3.50. Serbest basınç deneyi ve numuneler.

$$\varepsilon = \Delta H / H_0 \quad (3.2)$$

$$A_f = A_0 / (1 - \varepsilon) \quad (3.3)$$

$$q_u = \sigma_1 = P_{\max} / A_f \quad (3.4)$$

eşitliklerde;

ε : Birim Deformasyon değeri (%)

ΔH : Deformasyon Okuması (mm)

H_0 : Numunenin ilk boyu (mm)

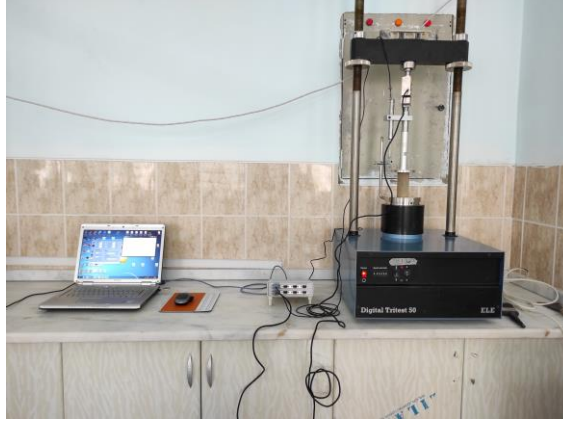
A_f : Numunenin kırılma anındaki enkesit alanı

A_0 : Numunenin ilk enkesit alanı

q_u : Serbest basınç mukavemeti değeri (kPa)

σ_1 : Göçme veya kırılma anındaki gerilme değeri (kPa)

$P_{\max}$: Maksimum kırılma yükü değeri



Şekil 3.51. Deney düzeneği ve veri toplama ünitesi.

Deneylerden sonra numunelerin su muhtevasını belirlemek ve daha sonrası için kimyasal (XRD), mineralojik ve petrografik (XRD, SEM-EDS) analizleri için bir miktar alıp 110 °C etüvde 24 saat kurutulduktan sonra kilitli poşetlerde muhafaza edilmiştir (Şekil 3.52.).



Şekil 3.52. Su muhtevası ve analizler için örnek numuneler.

3.3.5. Permeabilite deneyi

Küçük ölçekli DKK deneysel çalışmalar kapsamında tasarım seviyelerinin her biri için numunelerin geçirimsizlik özellikleri araştırılmıştır. Numunelerin permeabilite katsayılarının çok küçük olabileceği ($k < 10^{-10}$ cm/s) öngörüldüğü için düşen ve sabit seviyeli geçirimsizlik deneylerinin yeterli olmayacağı kanaatine varılmıştır. Bunun için

üç eksenli deney aletinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.53.). Deneylerde üç eksenli deney aletinde daha önce yapılmış literatür çalışmaları incelenmiştir (Murray,2002; Veinovic ve ark., 2003; Goh ve ark., 2015). Deneyler ASTM D5084-16a standardına göre yapılmıştır. Suyun drenaj yolunu kısaltmak için 50 mm çaplı numunelerin boyu 30 mm olarak hazırlanmıştır (Deng ve ark. 2015). Deneylerde geri basınç ve hücre basıncı her bir numunenin serbest basınç mukavemeti de dikkate alınarak belirlenmiştir.

Deneyler şu işlem sırasına göre yapılmıştır:

- Numunelerin suya doymun hale gelmesi için kür kalıplarından çıkarılan numuneler, su içerisinde 2 gün bekletilmiştir. (Şekil 3.54.).
- Deney düzeneğinin içerisine numune parçacıkları kaçmaması için numunenin alt ve üst yüzeyine filtre kâğıdı yerleştirilmiştir (Şekil 3.55. ve Şekil 3.56.).



Şekil 3.53. Permeabilite deneyleri için kullanılan üç eksenli basınç deney düzeneği.



Şekil 3.54. Kür süreleri sonunda suya doymun hale gelmesi için suya bırakılan numuneler.



Şekil 3.55. Permeabilite deney düzeneği ve parçaları.



Şekil 3.56. Filtre kâğıdı ve numunenin yerleştirilmesi.

Numune deney düzeneğinde yerine konulduktan sonra yük başlığı numune üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.57.).

- Sızmayı engellemek amacıyla numunenin alt ve üst kısmı o-ring ile sıkıştırılmıştır (Şekil 3.58.).

- Numune içerisinden suyun geçtikten sonra, geçen suyun toplanması için mavi renkli hortum bağlanmıştır (Şekil 3.59.).

- Üç eksenli basınç deneyi aletinin şeffaf haznesi yerine yerleştirildikten sonra, hazne sabitlenerek ve su ile doldurularak ağzı kapatılmıştır (Şekil 3.60.).

- Hazneye hücre basıncı verildikten sonra geri basınç verilerek deney başlatılmıştır. Burada numune yan yüzeylerinden su sızıntısını ve geçişlerini engellemek için hücre basıncı geri basınçtan yüksek seçilmiştir. Diğer önemli bir husus ise hücre basıncı ne kadar yüksek seçilirse numunenin yanal yüzeylerinde geçebilecek su sızmaları o derece önlenmiş olur ve böylece geri basınçla verilen suyun tamamı numunenin içinden geçerek akar. Bu ise geçirimsizlik deneyinde bizi daha doğru sonuca

ulaştırır. Fakat burada dikkat edilecek diğer bir durum ise seçeceğimiz hücre basıncı numunenin serbest basınç mukavemetinden düşük olmalıdır. Numunenin serbest basınç mukavemetinden daha yüksek seçilebilecek hücre basınç değerleri numunenin içinde çatlaklar oluşmasına hatta numunenin parçalanmasına sebebiyet verebilir. Bu ise geçirimsizlik deneyinin doğruluk oranını düşürür.

- Su çıkışında birim zamanda geçen su çıkışları kontrol edilerek sabit bir hız elde edilene kadar suyun akışına izin verilmiştir. Çıkan suyun buharlaşmasını engellemek için kapalı devre bir hortum düzeneğinin içerisinde toplanması sağlanmıştır. Belirli aralıklarla su çıkış miktarları ölçülmüş, art arda en az 3 okumanın aynı olduğu değerde deney sonlandırılmıştır.



Şekil 3.57. Yük başlığı ve su geçişi sağlayan hortum.



Şekil 3.58. Deneye hazır hale gelmiş numune ve deney düzeneği.

- Sabit geçen su miktarları üzerinden permeabilite katsayıları hesaplanarak optimizasyon hesaplarında veri girişi olarak kullanılmıştır.

Permeabilite katsayıları Darcy yasasına göre hesaplanmıştır.

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

$$v = Q / (t \cdot A) \quad (3.6)$$

$$i = \Delta h / L \quad (3.7)$$

$$k_{(cm/sn)} = \frac{Q_{(cm^3)}}{t_{(s)}} \cdot \frac{1}{A_{(cm^2)}} \cdot \frac{L_{(cm)}}{\Delta h_{(cm)}} \quad (3.8)$$

$$\Delta h = \frac{\sigma_{(kPa)} \cdot 1000}{\rho \cdot g} \quad (3.9)$$

Burada;

- v : Debi hızı (cm/s)
- k : Permeabilite katsayısı (cm/s)
- i : hidrolik eğim
- Q : Numune içerisinden geçen toplam su miktarı (cm³)
- t : geçen süre (s)
- A : numune kesit alanı (cm²)
- Δh : basınç yüksekliği (cm)
- L : numune boyu (cm)
- σ : Geri basınç (kPa)
- ρ : Suyun yoğunluğu (kg/m³)
- g : Yerçekimi ivmesi (m/s²)

3.3.6. Numuneler için kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler

Yapılan tüm analizlerde, UCS ve permeabilite laboratuvar deney sonuçları ile bir bağlantı kurulmaya çalışılmış ve deney sonuçları destekleyen veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında analizler yaptırılmıştır (Şekil 3.59.).



Şekil 3.59. Analizler için hazırlanan numuneler.

3.3.6.1. Kimyasal analizler

Killi ve kumlu zeminle üretilen küçük ölçekli DKK numunelerinden UCS ve permeabilite deney sonuçları incelenerek, en önemli görülen, 3 adet killi zeminde üretilen DKK'larından (tasarım 5, tasarım 11, tasarım 16), 2 adet kumlu zeminde üretilen DKK'larından (tasarım 15 ve tasarım 16) ve 1 adet doğrulama deneylerinden (killi zemin kontrol küçük ölçekli DKK) olmak üzere 6 adet numunenin elementel ve kimyasal kompozisyonu belirleme amaçlı XRF(X-Işını Floresans Spektrometresi) analizleri yapılmıştır. Analizler Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeokimya Laboratuvarında analiz edilmiştir. XRF analizinde numune, selüloz ile 15 dakika boyunca homojen hale gelinceye kadar öğütülür ve pres işlemi ile disk haline getirilerek XRF cihazında numune yapısına uygun programlarda okutulur ve değerlendirilir. Numune yapısına göre pres işlemi yerine eritiş yöntemi kullanılabilir (Şekil 3.60.).



Şekil 3.60. XRF numune hazırlama işlem basamakları.

3.3.6.2. Mineralojik ve petrografik analizler

Killi ve kumlu zeminle üretilen küçük ölçekli DKK numunelerinden UCS ve permeabilite deney sonuçları incelenerek, karakteristik özellikteki en önemli görülen, 3 adet killi zeminde üretilen DKK'larından (tasarım 5, tasarım 11, tasarım 16), 2 adet kumlu zeminde üretilen DKK'larından (tasarım 15 ve tasarım 16) ve 1 adet te doğrulama deneylerinden (killi zemin kontrol küçük ölçekli dkk) olmak üzere 6 adet numunenin mineralojik ve petrografik analizleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Mineraloji ve Petrografi Laboratuvarında yapılmıştır.

Killi ve kumlu zemin ile amorf silika, çimento ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi karışımından oluşan DKK'larının moleküler yapısındaki reaksiyonlar ve boşluklu/boşluksuz yapıları belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile EDS haritalama çalışması ve atomik boyutlardaki yapısını tayin etmek için X-ışını kırınımı (XRD) ile kalitatif mineral analizi yapılmıştır. SEM analizleri için her örnek için 150X, 500X, 1000X, 5000X, 10000X ve 15000X büyütme oranıyla görüntüler alınmıştır.

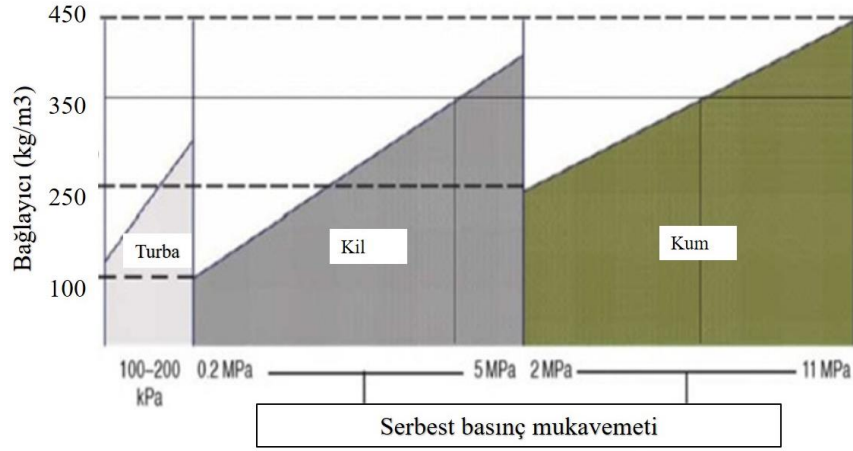
3.3.7. Optimizasyon ve doğrulama deneyleri

Optimizasyon çalışmaları yapılmadan önce literatürden derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş zemin özellikleri araştırılmıştır. Bruce ve Bruce (2003), çeşitli yöntemlerle çeşitli zeminlerde derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş zemin özellikleriyle ilgili çalışmalarda yer alan bilgileri vermişlerdir (Çizelge 3.12).

Yine DKY iyileştirilmiş zemin özellikleriyle ilgili derlenen son çalışmalarda değişen zemin özellikleri ve dozaj miktarına göre serbest basınç mukavemetleri Şekil 3.61.'de verilmiştir. Burada da DKY yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin serbest basınç dayanımları sıcaklık ve diğer çevresel faktörlerden etkilenebilir. Sıcaklık zemin ve bağlayıcı arasındaki kimyasal reaksiyonları etkileyebilir. Zemin bağlayıcı reaksiyonu sırasında farklı türde bağlayıcıların ısı gelişimi farklı olabilir. Yine kür şartları da serbest basınç dayanımını etkilemektedir. EuroSoilStab (2002)' ye göre bağlayıcı olarak çimentonun kullanıldığı DKY' de mukavemet özellikle ilk aylarda daha çok geliştiği belirtilmiştir.

Çizelge 3.12. Islak ve kuru derin karıştırma yöntemleriyle iyileştirilen zeminin özellikleri (Bruce ve Bruce, 2003).

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.)
E₅₀ (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 killer 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



Şekil 3.61. Farklı bağlayıcı dozajı için DKY ile iyileştirilmiş zeminlerin Serbest basınç mukavemetleri, (Kitazume and Terashi, 2012; Abbey ve ark. 2015' ten değiştirilerek).

Çizelge 3.13.' te farklı zemin türlerinde yapılan saha uygulamalarında farklı dozajlarda ıslak derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş zeminlerin serbest basınç mukavemetleri ve permeabilite katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.13. Islak DKY ile iyileştirilen zeminin özellikleri (Kirsch ve Bell, 2019)

Zemin türü	Çimento dozajı(kg/m³)	28 günlük serbest basınç mukavemeti, q_u (Mpa)	Permeabilite katsayısı, k(m/s)
Çamur	250-400	0.1-1.4	1x10 ⁻⁸
Turba, organik silt/kil	150-350	0.2-1.2	5x10 ⁻⁹
Yumuşak killer	150-300	0.5-1.7	5x10 ⁻⁹
Orta/sert killer	120-300	0.7-2.5	5x10 ⁻⁹
Siltler ve siltli kumlar	120-300	1.0-3.0	1x10 ⁻⁸
İnce-orta kumlar	120-300	1.5-5.0	5x10 ⁻⁸
İri kumlar ve çakıllar	120-250	3.0-7.0	1x10 ⁻⁷

Deneyisel çalışmalar kapsamında kumlu ve killi zeminlerden elde edilen serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçları ayrı ayrı ve birlikte değerlendirilerek, optimizasyonda bir değer aralığı belirlenmiş ve buna göre değişik varyasyonlarla optimizasyonlar yapılmıştır. Yapılan optimizasyonlar içinden mantıklı ve uygun olanı seçilmiş ve doğrulama deneyleri için numuneler hazırlanarak serbest basınç ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Optimizasyonla ilgili detaylar dördüncü bölümde verilmiştir.

3.3.8. Enjeksiyon karışımları için reolojik deneyler

DKY kullanılarak iyileştirilen zeminlerin özelliklerini, zemin özellikleri, makine-teçhizattan kaynaklı (şaftın dönme ve batma hızı, bıçak tasarımı, nozul çapları ve sayısı, basınç vb.) parametrelerin yanı sıra enjeksiyonda kullanılacak kıvam, içerik vb. gibi reolojik özellikler de etkilemektedir. Arazide DKK uygulamalarında homojen kolon oluşabilmesi açısından üretim esnasında hortum ve nozulların tıkanmaması, enjeksiyonun zemine rahatlıkla aktarılabilmesi ve zemin bağlayıcı karışımının homojen bir şekilde karışabilmesi gerekmektedir. Bunun içinde belirli bir su/bağlayıcı oranında olması gerekmektedir.

Büyük ölçekli DKK deneylerine geçmeden önce kolon performansını etkileyebilecek tasarım girdilerinin değerlendirilmesi amacıyla reolojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmıştır.

Ön denemelerde DKK makinesinin 4 mm nozul kullanıldığında, Marsh hunisi akma süreleri 90-110 sn aralığında olan karışımları pompalayabildiği görülmüştür. Dolayısıyla arazi şartlarında üretilen DKK'ları da düşünüldüğünde optimum değerle

yapılacak olan büyük ölçekli DKK üretiminde bu sürelerin altında olan bir karışımın kullanılması uygun olacaktır.

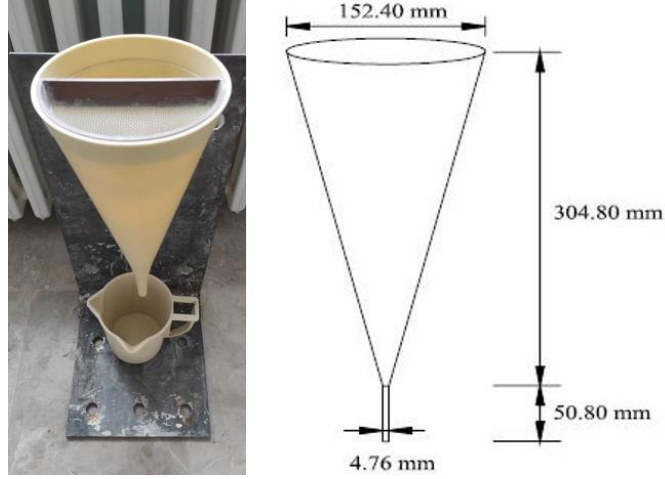
3.3.8.1. Marsh hunisi deneyi

Enjeksiyon akış sürelerinin tespiti için marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Marsh hunisi deneyi akabilen bir sıvının viskozite akış özelliklerinin izafi olarak değişimini izlemek için kullanılan bir reolojik deneydir.

Viskozite sıvının molekülleri arası sürtünmeden dolayı akmaya karşı direncidir. Akma hareketinin başlaması bu direncin aşılmasına bağlıdır. Viskozite komşu iki sıvı tabakasının bağıl hareketinin hangi oranda olduğunu açıklar (Warner, 2004). Newton kanunu viskoziteyi sıvının kayma direniminin (τ), hız eğimine (dv/dz) oranı olarak tanımlar (Hausmann,1990).

Çimento, amorf silika, su/bağlayıcı oranı, sıcaklık ve akışkanlaştırıcı gibi faktörler viskoziteyi etkiler. Sıcaklık ve su/çimento oranı arttıkça viskozite düşerken akışkanlaştırıcı gibi katkı maddeleri de viskozite değerini düşürür (Warner,2004). Marsh hunisi, enjeksiyon harcının reolojik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. ASTM C939/C939M' ye göre enjeksiyon materyalinin akış özelliklerinin belirlenmesinde değişik özelliklerdeki huniler kullanılmaktadır. Birbirine yakın olmakla beraber kullanım amaçlarına göre enjeksiyon sıvısı türleri için de ayrı standartlar tanımlanmıştır (ASTM C939/C939M-16a; ASTM D6910/D6910M-19; ASTM D6910/D6910M-09). Enjeksiyonun akış süresi standartta belirtilen belirli bir miktar enjeksiyonun huniden tamamen atılması için geçen süre olarak tanımlanır. Marsh hunisini Lombardi tarafından izafi viskozite olarak tanımlanmıştır (Hausmann,1990).

Marsh hunisi alt ve üst olmak üzere iki kısımdan oluşur. Üst kısım üst çapı 152.4 mm ve yüksekliği 304.8 mm olan bir koniden oluşur. Akışın meydana geldiği ağzın bulunduğu alt kısım ise 4.76 mm çapında ve 50.8 mm yüksekliğinde silindirik şekilli bir orifistir (Şekil 3.62.). Huni hacmi orifisin alt ucundan huninin çizgi işaretli üst seviyesine kadar 1500 ml'dir. Akış süresinin belirlenmesinde ise yaklaşık 946 ml'lik enjeksiyonun akması için geçen süre ölçülür. Su için akış süresi 21 6 3°C' de 26 ± 0.5 saniyedir. Genel olarak enjeksiyon türleri için bu süre 26-60 s arasındadır. Akış süresi 75 s'den uzun olan enjeksiyon materyalleri için Marsh hunisi yönteminin kullanılması uygun değildir (Warner, 2004).



Şekil 3.62. Marsh hunisi.

Deneyler sırasında, Marsh hunisi akış zamanlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D6910/D6910M-19 'dan faydalanılmıştır. Çizelge 3.9. ve Çizelge 3.10.'daki tasarım seviyelerinin enjeksiyon karışımlarının her biri için ve optimum tasarım için toplamda 37 tane Marsh hunisi deneyi yapılmıştır (Şekil 3.63.). Buna göre deney aşağıdaki adımları içerir;

- Deney yapılacak ortam sıcaklığı $23,0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ olmalıdır.
- Deney öncesinde huni su ile doldurularak kalibre edilir.
- Enjeksiyon homojen olarak karıştırılır ve sıcaklığı ölçüldükten sonra 1500 ml'lik mezüre aktarılır.
- Marsh hunisinin deliği kapatılarak, karışım mezürden huniye aktarılır.
- Karışımın huniden akması için gereken zaman, kronometre ile belirlenerek kaydedilir.



Şekil 3.63. Su ile kalibrasyon ve Marsh hunisi deneyi.

3.3.8.2. Çökelme deneyi (sedimentasyon, stabilite)

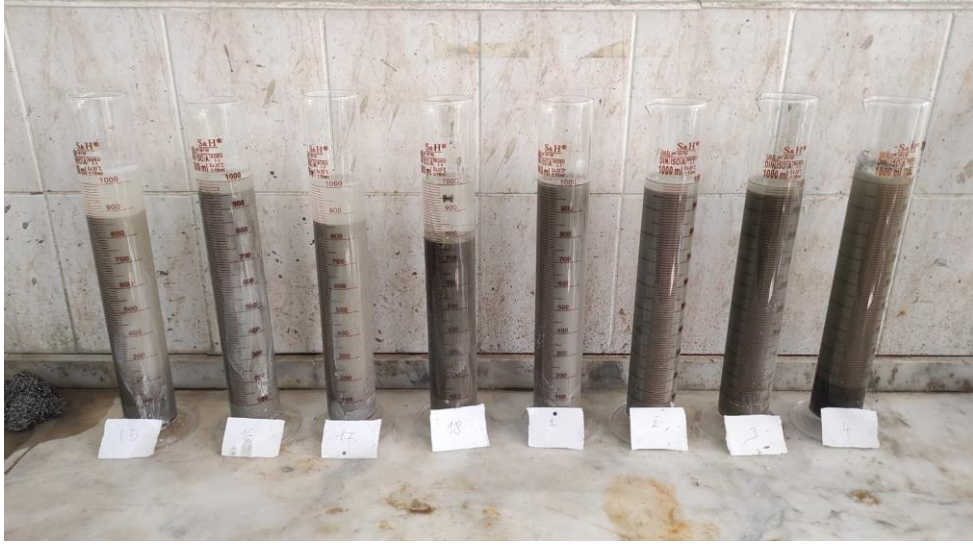
Bir süspansiyonda serbest halde bulunan partiküller çökelme halindedir. Partiküllerin çökelme eğilimlerinin artması sonucu partiküller dibe çöker ve çökelen partiküllerin üzerinde berrak su toplanır. Bu olay sedimentasyon (çökelme, bleeding, kuma,) olarak adlandırılır (Warner, 2004).

Sedimentasyon Stokes yasasına göre tanımlanır. Buna göre yer çekimi etkisiyle süspansiyon içerisindeki tanecikler, tanecik çapının karesi ile doğru orantılı bir hızla çöker. Dolayısıyla büyük çaplı taneler küçük çaplı tanelere göre daha hızlı çöker. Çökelmede önce iri tanecikler sonrasında ise küçük tanecikler çöker. Çok küçük tanecikler ise yerçekimi kuvvetinin yanı sıra elektrokimyasal kuvvetin de etkisi altındadır. Bu sayede tanecik çapı 1 μm den küçük olan taneciklerde Brownian hareketi görülür. Böyle taneciklerde çökelme hızı Stokes yasasına göre beklenen den daha yavaş gerçekleşir (Nonweiler, 1989).

Çökelme deneyi için hazırlanan süspansiyonda, su ile karışımındaki taneciklerin birbirinden ayrılması, tüm taneciklerin çökelmelerini tamamlaması ve en küçük taneciklerin de çökeldikten sonraki yüzdeye dayanır.

Sedimentasyon deneyleri ASTM C940-16 standardına göre yapılmıştır. Deneyin yapıldığı ortam $23,0 \pm 2$ °C olmalıdır. Hazırlanan enjeksiyon 1000 ml lik mezüre konulduktan sonra ilk bir saat içinde 15 dk da bir ve sonraki zamanlarda 10 dk da bir ölçümler alınır. Ard arda iki okumanın aynı olduğu durumda deney sonlandırılır. Deney 3 saatten fazla sürdürülmez. Deney sonunda yüzeyde berraklaşan su hacmi süspansiyonun başlangıç hacmine göre %5 ve daha küçük ise süspansiyon stabildir. Çizelge 3.9. ve Çizelge 3.10. daki tasarım seviyelerinin enjeksiyon karışımlarının her biri için ve optimum tasarım için toplamda 37 tane sedimentasyon deneyi yapılmıştır (Şekil 3.64.).

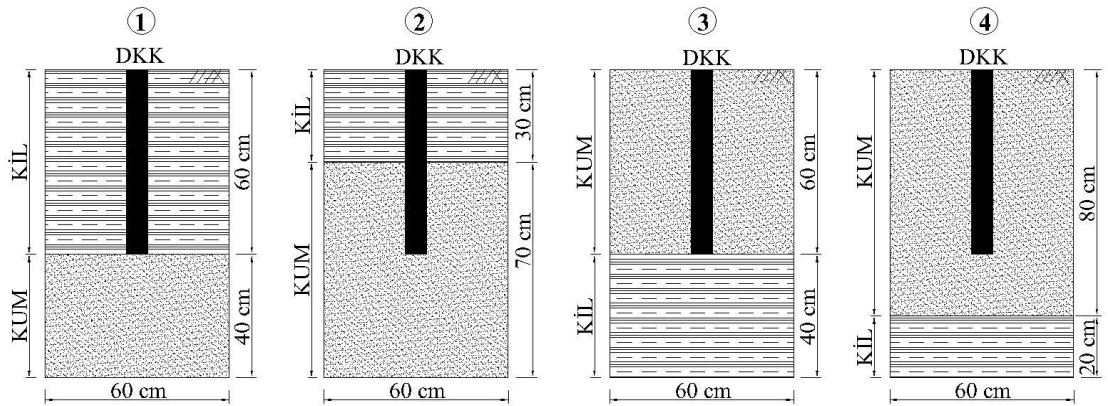
Stabilite enjeksiyon karışımındaki malzemelerin tane dağılımına, taneciklerin özgül yüzey alanına ve tanecik-sıvı arası yüzeysel kuvvet etkileşimine bağlıdır (Shroff, 1993). Enjeksiyon süspansiyonunda akışkanlaştırıcı katkı madde kullanılması, ince tane oranının artması ve karıştırma işleminin iyi yapılması stabiliteyi artırır.



Şekil 3.64. Sedimentasyon deneyleri.

3.3.9. Büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarının hazırlanması ve yükleme deneyleri

Küçük ölçekli derin karıştırma kolon deneylerinin tamamlanmasından sonra deney sonuçları Design Expert V11 programında analiz edilmiş ve bir optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyona göre bir optimum karışım oranı seçilmiştir. Bu karışım oranına göre tanklar içerisinde farklı tabakalanma yüksekliklerine sahip zeminler modellenerek 4 adet 7 cm çapında derin karıştırma kolonu tanklarda ayrı ayrı oluşturulmuş ve belirlenen süreler sonunda yükleme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.65.).



Şekil 3.65. Farklı tabakalanma yüksekliklerine sahip zeminlerde derin karıştırma kolonları.

3.3.9.1. Zeminlerin modellenmesi ve derin karıştırma kolonlarının imalatı

Büyük ölçekli DKK deneyleri kapsamında farklı tabaka yüksekliklerinde ve farklı tabakalanma koşullarında 4 tane tank içerisinde (60 cm çapında ve 100 cm boyunda) zemin modelleri oluşturulmuştur.

Yüklemeye tabi tutulacak DKK'larından ilkinde ucu kum zemine oturan ve tamamı killi zeminde imal edilen ve çevre sürtünmesini killi zeminden alan derin karıştırma kolonu imal edilmiştir. İkinci modelde ucu kumlu zemine oturan, çevre sürtünmesinin yarısını kumlu zeminden yarısını killi zeminden alan DKK imal edilmiştir. Üçüncü modelde ucu killi zemine oturan ve tamamı kumlu zeminde imal edilen ve çevre sürtünmesini kumlu zeminden alan derin karıştırma kolonu imal edilmiştir. Dördüncü model deneyde ise ucu kum zemine oturan ve tamamı kumlu zeminde imal edilen, çevre sürtünmesini ve uç direncini kumlu zeminden alan ve kazık ucundan 20 cm aşağıda killi zemin tabakası olan bir tasarım yapılmıştır.

Arazi uygulamalarında ve laboratuvar çalışmalarında imal edilen DKK boyutları da dikkate alınarak, tez çalışması kapsamında 60 cm boyunda ve 7 cm çapında DKK'larının imal edilmesine karar verilmiştir (Bouassida ve Porbaha, 2004a; 2004b). Boyut seçimlerinde dikkat edilen diğer bir husus ise derin karıştırma kolonunun yüklemeler esnasında tank çeperlerinden reaksiyon almaması, bu sayede deneyin hassasiyetinin ve doğruluğunun olabildiğince yüksek tutulmaya çalışılmasıdır.

Zeminler tanklara doldurulmadan önce kür süresi boyunca DKK'larının ve zeminlerin suyunu kaybetmemesi için tank içerisine büyük naylon torbalar yerleştirilmiştir. Killi zeminin yerleştirilmesinde su içeriği, önceki çalışmalar da dikkate alınarak homojen bir kolon oluşması açısından likit limite plastik limit değerleri arasında likit limite yakın bir değer seçilmiştir (%28). Tanka doldurulacak kil seviyesinin hacminden ve zeminin kuru yoğunluğundan zeminin ağırlığı hesaplanmıştır. Hesaplanan miktar kadar zemin laboratuvarda bulunan 150 cm x 400 cm x 50 cm boyutlarındaki tankın içerisine aktarılmıştır. Zeminin mevcut su muhtevası tespit edilmiştir. İstenilen su muhtevasında homojen karıştırılabilmesi için tankın içerisinde zeminin toprak parçaları bir tokmak vasıtasıyla ezilmiştir. Hedef su muhtevası ile mevcut su muhtevası arasındaki fark kadar su zemine katılarak zemin tankın içerisinde çizmeyle ezilmiş homojen karışım elde edilmesi için kürek ile alt üst edilmiştir (Şekil 3.66.).

Kumlu zemin belirli bir rölatif sıklığa göre doldurulmuştur. Önce istenilen sıklık için tokmalama sayısı ve düşme enerjisi hesabı yapılmıştır. Daha sonra tank içerisinde doldurulacak zeminin yüksekliği ve hacmi hesaplanmıştır. Bilinen hesaplamalarla tank içerisine yerleştirilecek zemin ağırlığı hesaplanmıştır. Hedeflenen su muhtevası (%10) ile kumlu zeminin mevcut su muhtevası arasındaki fark kadar su zemine katılmış ve homojen bir şekilde karışana kadar kürekle alt üst edilmiştir. Kumlu zemin tabakalar halinde serilip sıkıştırılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.67.).

4 numaralı kolonun yükleme deneylerinde direnç-yük, direnç- oturma ilişkisi de araştırılacağı için bu kolonun zemin yerleştirme işlemi sırasında bakır levha ve kablolar da eklenmiştir (Şekil 3.68.).



Şekil 3.66. a) Kil zeminin parçalanması, b) kil zeminin istenilen su muhtevasında karıştırılması ve ezilmesi, c) zeminin tanka yerleştirilmiş hali.



Şekil 3.67. Kumlu zeminin istenilen su muhtevasında karıştırılması ve tanka yerleştirilmesi.



Şekil 3.68. 4 numaralı kolonun hazırlanması.

4 adet model tankın dışında iki adet küçük tanklarda da ön-deneme deneyleri için zemin modellemesi yapılmıştır. Deneme deneylerinin ilki kum zeminde, ikincisi yarısı kum ve yarısı kil zemin olacak şekilde modellenmiştir.

Zeminlerin modellenmesinden sonra laboratuvarda dönme ve çekme-batma hızları için derin karıştırma makinasının kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon yapılırken her bir kolon için seçilen dozajda hazırlanacak enjeksiyon karışım miktarının zemine enjekte edilebilmesi için makinenin yükleme-pompa kısmının bar basıncına göre çekme-batma hızının ne olacağı araştırılmıştır. Yükleme-pompa kısmı için çok yüksek olmayacak bir hızda ve dolayısıyla zemine enjeksiyonun nozullar tıkanmadan verilebileceği bir bar basıncı seçilmiştir. Seçilen bu hız ve bar basıncına göre de enjekte edilecek enjeksiyon miktarıyla beraber makinenin şaftının batma hızı tespit edilmiştir (Şekil 3.69.).



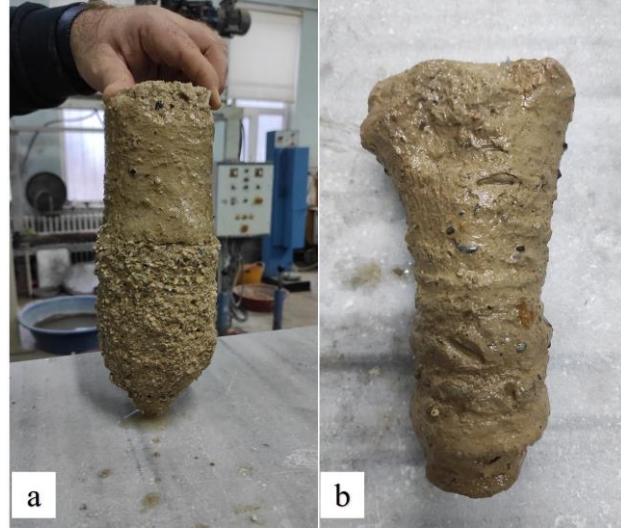
Şekil 3.69. Derin karıştırma makinesi şaft batma hızı kalibrasyonu.

Tank içerisindeki derin karıştırma kolonları oluşturulmadan önce kalibrasyondan sonra sistemde meydana gelebilecek sorunlar ve oluşum sırasındaki hataları en aza indirebilmek için iki adet küçük tankta modellenen zeminlerde derin karıştırma kolonları oluşturulmuştur (Şekil 3.70.).

Büyük tanklarda derin karıştırma kolonları oluşturulmadan önce, küçük tanklarda ön deney kapsamında oluşturulan iki adet derin karıştırma kolonları kalıplardan çıkarılarak en kesit ve boy kesitler alınmış, kesitler üzerinden oluşumları incelenmiş ve boyut ölçümleri yapılmıştır. Oluşturulan bu kolonların homojen olarak karıştığı görülmüştür (Şekil 3.71.).



Şekil 3.70. Küçük tanklarda DKK imalatı.



Şekil 3.71. Küçük tanklarda oluşturulan derin karıştırma kolonları a) Kumlu ve killi olmak üzere tabakalı zeminde oluşturulan DKK b) Killi zeminde oluşturulan DKK.

Kolonların yapımına başlanmadan önce belirlenen dozaja göre enjeksiyon karışımı hazırlanmıştır. Bu kapsamda hesaplanan miktar su içerisine sırasıyla çimento, amorf silika ve süper akışkanlaştırıcı eklenerek 10-15 dk süresince hiç topaklanma kalmayacak şekilde karıştırılmış ve enjeksiyon haznesine aktarılmıştır (Şekil 3.72.).

Derin karıştırma kolonları şaft zemine batarken enjeksiyon verilmesi şeklinde oluşturulmuştur. Enjeksiyon şaft zemin seviyesindeyken verilmeye başlanmış ve kolon boyuna ulaşıldığında enjeksiyon verme işlemi durdurulmuştur. Böylece makine şaftını kolon boyuna ulaştığında kolon için hesap edilen enjeksiyon miktarı kadar enjeksiyon zemine verilerek kolon oluşturulmuştur. Şaftın batma hızı enjeksiyon hacmine göre hesaplanmıştır. Şaftın dönme hızı 80 devir/dk olarak seçilmiş ve 4 mm lik nozul kullanılmıştır.

Kolonlar oluşturulurken enjeksiyonla beraber parçalama-karıştırma işlemi bittikten sonra, kolonların homojen oluşabilmesi için 10'ar kez tarama yapılmıştır. Hazırlanan derin karıştırma kolonlarının üzerleri naylon torba ile kapatılarak yüklemeye kadar küre bırakılmıştır (Şekil 3.73.).



Şekil 3.72. Enjeksiyon karışımının hazırlanması.



Şekil 3.73. a), b) Tankın hizalanması, c, d), e) derin karıştırma kolonlarının oluşturulması, f) yükleme deneylerine kadar küre bırakılması.

3.3.9.2. Derin karıştırma kolonlarının yüklenmesi

Oluşturulan derin karıştırma kolonları belirlenen kür süreleri sonunda hassas yükleme yapabilen yükleme çerçevesinde yüklenmiştir. Kolonlar yüklenmeye başlanmadan önce zemin yüzeyindeki harç kalıntıları temizlenmiş, kolon başlığı belirginleştirilerek yüklemeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.74.).



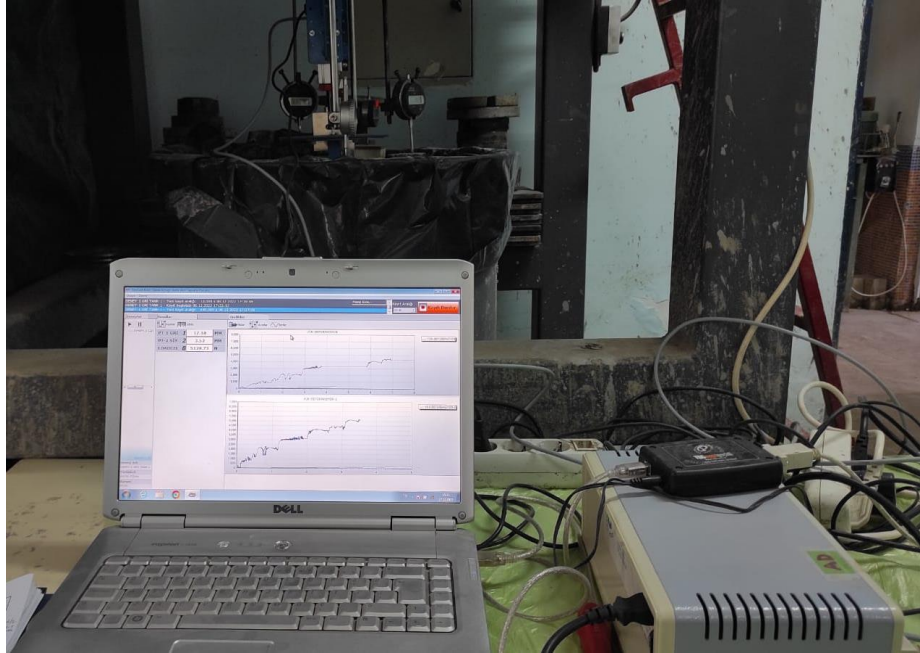
Şekil 3.74. Derin karıştırma kolonunun yüklemeye hazır hale getirilmesi.

Kazığa aktarılan yükleri kayıt altına almak için bir adet S tipi yükleme halkası, yine kazıkta meydana gelecek deformasyonları ölçmek üzere 2 adet potansiyometrik cetvel ve 2 adet komparatör saat sisteme kurularak değerler veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Zeminde meydana gelebilecek deformasyonların ölçümü için de 3 adet komparatör saatle yükleme esnasındaki zemin deformasyonları kayıt altına alınmıştır. Yükleme oturma kontrollü olarak yapılmıştır. İlk kademe yük verildikten sonra oturmalar sona erene dek beklenmiş, oturmalar durduktan sonra yük artırılarak bir sonraki yük kademesine geçilmiş ve bu yöntem izlenerek kazık veya zemin göçene kadar yüklemelere devam edilmiştir (Şekil 3.75. ve Şekil 3.76.).



Şekil 3.75. Deneylerde kullanılan yükleme düzeneği.



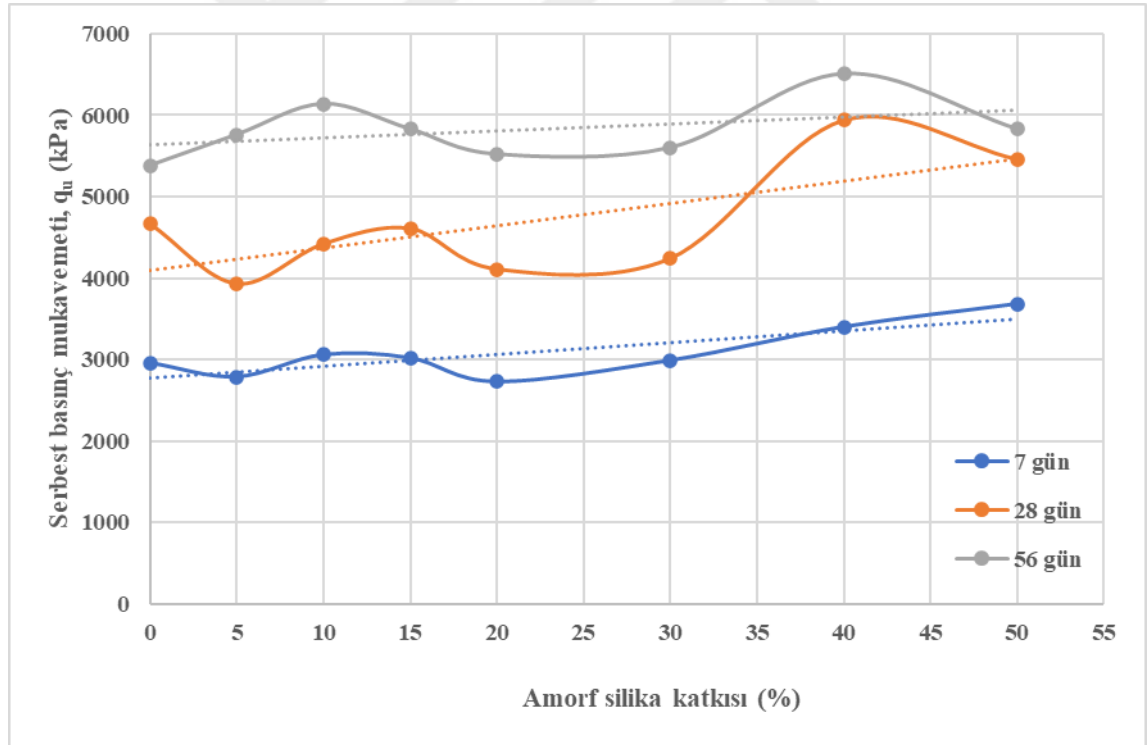
Şekil 3.76. Veri toplama cihazıyla verilerin bilgisayara aktarılması.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Küçük Ölçekli DKK Ön Tasarım Deneyleri

Deneysel çalışmaların ilk aşaması olan küçük ölçekli ön tasarım deneylerinde, kullanılan amorf silikanın dayanıma olan katkısı araştırılmıştır. Bu kapsamda sabit bir dozaj ve sabit bir su/bağlayıcı oranı seçilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Biri kontrol numunesi olmak üzere 7 seviyeli bir tasarım yapılmıştır. Tasarımda çimento miktarı her seviyede azaltılarak yerine amorf silika eklenmiştir (ikame yöntemi). Her seviyede 7 günlük için 2, 28 günlük için 2 ve 56 günlük için 1 numune olmak üzere toplamda 5'er numune hazırlanarak serbest basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (Çizelge 4.1.).

Deney sonuçlarına göre amorf silikanın ikame yöntemiyle katkısının dayanımı belirgin oranda arttırdığı (~%25) görülmüştür (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Ön tasarım deneyleri serbest basınç mukavemeti- amorf silika katkısı (%) ilişkisi.

Çizelge 4.1. Ön tasarım Serbest basınç mukavemeti deneyi sonuçları.

Tasarım No	Tasarım parametreleri			Serbest basınç mukavemeti (q_u) (kPa)		
	Dozaj (gr/cm ³)	Su/bağlayıcı oranı	Bağlayıcıdaki amorf silika miktarı (%)	7 günlük kür	28 günlük kür	56 günlük kür
1	0.3	1.75	0	2960	4670	5380
2	0.3	1.75	5	2790	3930	5760
3	0.3	1.75	10	3060	4420	6140
4	0.3	1.75	15	3020	4610	5830
5	0.3	1.75	20	2730	4110	5520
6	0.3	1.75	30	2990	4240	5600
7	0.3	1.75	40	3400	5940	6510
8	0.3	1.75	50	3680	5460	5830

4.2. Küçük Ölçekli DKK Tasarım Deneyleri

4.2.1. Serbest basınç mukavemeti deneyi

Küçük ölçekli tasarım deneyleri kapsamında kumlu ve killi zemin ortamlarının 18 seviyeli tasarımlarının her bir seviyesinde altışar numune (28 ve 56 günlük kürler) olmak üzere toplamda 216 serbest basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonuçlarına ait detaylı veriler alt başlıklarda verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ön tasarım deneylerinden de yola çıkılarak ön görüldüğü gibi 56 günlük kür sürelerinden elde edilen serbest basınç mukavemetleri daha yüksek olmuştur. Kumlu zeminlerden elde edilen serbest basınç mukavemetleri killi zeminden elde edilen serbest basınç mukavemetlerine göre daha yüksek olmuştur.

4.2.1.1. Killi zeminlerde DKK'nın serbest basınç mukavemeti

Killi zeminlerde 28 ve 56 günlük tasarım deneylerinin sonuçları Çizelge 4.2. de verilmiştir. Bu deneylere ait gerilme-birim deformasyon grafikleri (q_u - ϵ) EK-1' de verilmiştir.

Genel olarak gerilme-birim deformasyon grafikleri ve çizelge incelendiğinde kür süresinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.2. Killi zemin için 28-56 günlük Serbest basınç mukavemeti deney sonuçları.

Tasarım No	Tasarım parametreleri				Serbest basınç mukavemeti (q_u) (kPa)	
	Bağlayıcı (%)	Amorf silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı katkısı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	27.50	12.50	4.00	1.00	5159.57	6203.43
2	15.00	17.75	4.00	2.50	807.55	1265.45
3	27.25	25.53	2.15	1.76	1515.11	1872.63
4	32.75	0.00	2.65	2.50	1101.70	1524.41
5	15.00	50.00	4.00	1.38	2132.41	2659.07
6	27.25	25.53	2.15	1.76	1515.11	1872.63
7	15.00	30.00	0.50	1.00	2652.33	3349.96
8	40.00	28.27	0.57	2.50	1717.31	2171.55
9	31.25	50.00	0.50	1.56	1841.02	2283.11
10	17.50	0.00	0.50	2.28	977.03	1415.90
11	40.00	0.00	0.50	1.00	6729.96	6829.74
12	15.00	0.00	2.71	1.32	2503.18	2919.51
13	27.25	25.53	2.15	1.76	1515.11	1872.63
14	40.00	10.25	4.00	1.79	2072.24	2271.47
15	34.38	50.00	4.00	2.50	828.69	886.27
16	40.00	46.25	2.65	1.00	6626.09	7125.95
17	15.00	50.00	1.52	2.50	1208.95	1313.15
18	23.00	0.00	0.56	1.22	3845.13	5153.52

Deney sonuçları YYY kullanılarak analiz edilmiştir. 28 günlük serbest basınç mukavemeti sonuçlarına ait tasarım denklemi Eşitlik 4.1.'de; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.3.' te verilmiştir.

$$(q_u)_{28\text{gün,kil}} = +1626.76 + (813.67*A) - (208.84*B) + (9.13*C) - (1918.90*D) - (256.42*A*C) - (693.95*A*D) + (421.25*B*C) + (155.29*B*D) - (291.59*C*D) + (1401.27*D^2) - (432.42*A*B*D) \quad (4.1.)$$

Eşitlik 4.1. de geçen A, B, C, D terimleri Çizelge 4.3. te tanımlanmıştır. Çizelge 4.3.'te F değerinin 414.56 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde A, B, D, AC, AD, BC, BD, CD, D^2 , ABD terimleri anlamlı çıkarken C terimi anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir.

Çizelge 4.3. te hassasiyet değeri 64.62 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden oldukça büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

56 günlük serbest basınç deney sonuçlarına ait tasarım denklemi Eşitlik 4.2.'de; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.4. te verilmiştir.

$$(q_u)_{56\text{gün,kil}} = +1822.61 + (758.89*A) - (360.93*B) - (3667.06*D) - (782.30*A*D) - (472.79*C*D) + (1776.94*D^2) + (1660.92*D^3) \quad (4.2.)$$

Eşitlik 4.2. de geçen A, B, C, D terimleri Çizelge 4.4. te tanımlanmıştır. Çizelge 4.4.' te F değerinin 59.64 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde A, B, D, AD, CD, D^2 , D^3 terimleri anlamlı çıkmıştır. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Çizelge 4.4. te hassasiyet değeri 23.77 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden oldukça büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model 56 günlük deney sonuçları irdelendiğinde tasarım için uygundur denilebilir.

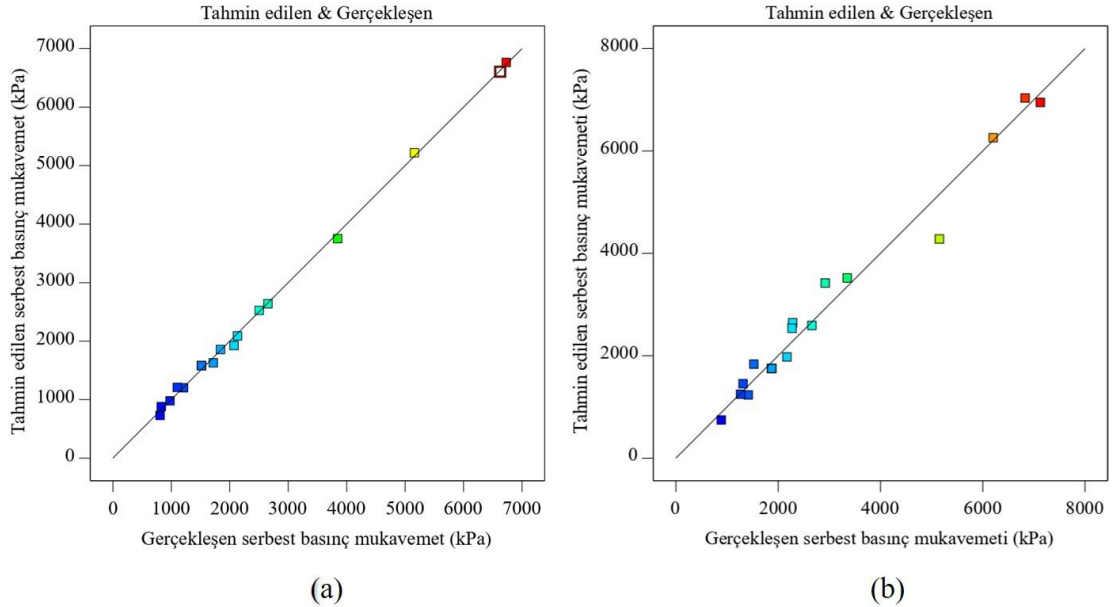
Çizelge 4.3. Killi zemin için Anova Analizleri (28 günlük kür).

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	5.96E+07	11	5.42E+06	414.56	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	6.62E+06	1	6.62E+06	506.54	0.0001	
B-Amorf Silika	4.27E+05	1	4.27E+05	32.65	0.0012	
C-Süper Akışk.	893.05	1	893.05	0.0683	0.8026	
D-Su/bağlayıcı	3.67E+07	1	3.67E+07	2810.11	0.0001	
AC	4.11E+05	1	4.11E+05	31.43	0.0014	
AD	3.34E+06	1	3.34E+06	255.74	0.0001	
BC	8.24E+05	1	8.24E+05	63.03	0.0002	
BD	1.49E+05	1	1.49E+05	11.39	0.0149	
CD	5.19E+05	1	5.19E+05	39.69	0.0007	
D^2	5.90E+06	1	5.90E+06	451.63	0.0001	
ABD	4.54E+05	1	4.54E+05	34.74	0.0011	
R^2	0.9987					
Düzeltilmiş R^2	0.9963					
Tahmin Edilen R^2	0.9806					
Hassasiyet	64.6116					

Çizelge 4.4. Killi zemin için Anova Analizleri (56 günlük kür).

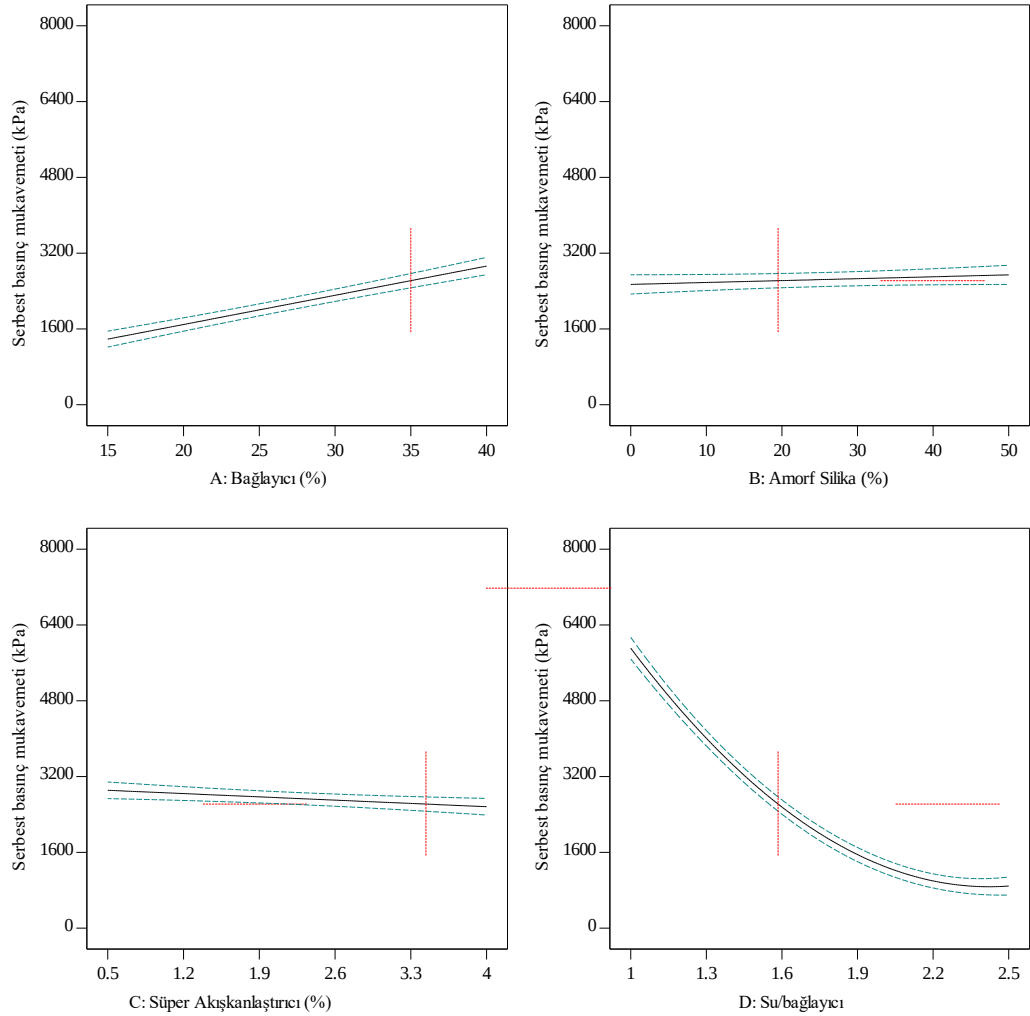
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	6.576E+07	7	9.394E+06	59.64	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	5.462E+06	1	5.462E+06	34.68	0.0001	
B-Amorf Silika	1.269E+06	1	1.269E+06	8.06	0.0012	
D-Su/bağlayıcı	5.327E+06	1	5.327E+06	33.82	0.0001	
AD	3.846E+06	1	3.846E+06	24.41	0.0001	
CD	1.553E+06	1	1.553E+06	9.86	0.0007	
D ²	9.761E+06	1	9.761E+06	61.97	0.0001	
D ³	9.454E+05	1	9.454E+05	6.00	0.0011	
R ²	0.9966					
Düzeltilmiş R ²	0.9902					
Tahmin Edilen R ²	0.9138					
Hassasiyet	23.7664					

Killi zemine ait 28 ve 56 günlük serbest basınç mukavemeti deneyleri sonuçlarıyla yapılan analizlerde gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.2.). Şekil 4.2.'de doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır, hatta doğru üzerinde toplanmıştır. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.

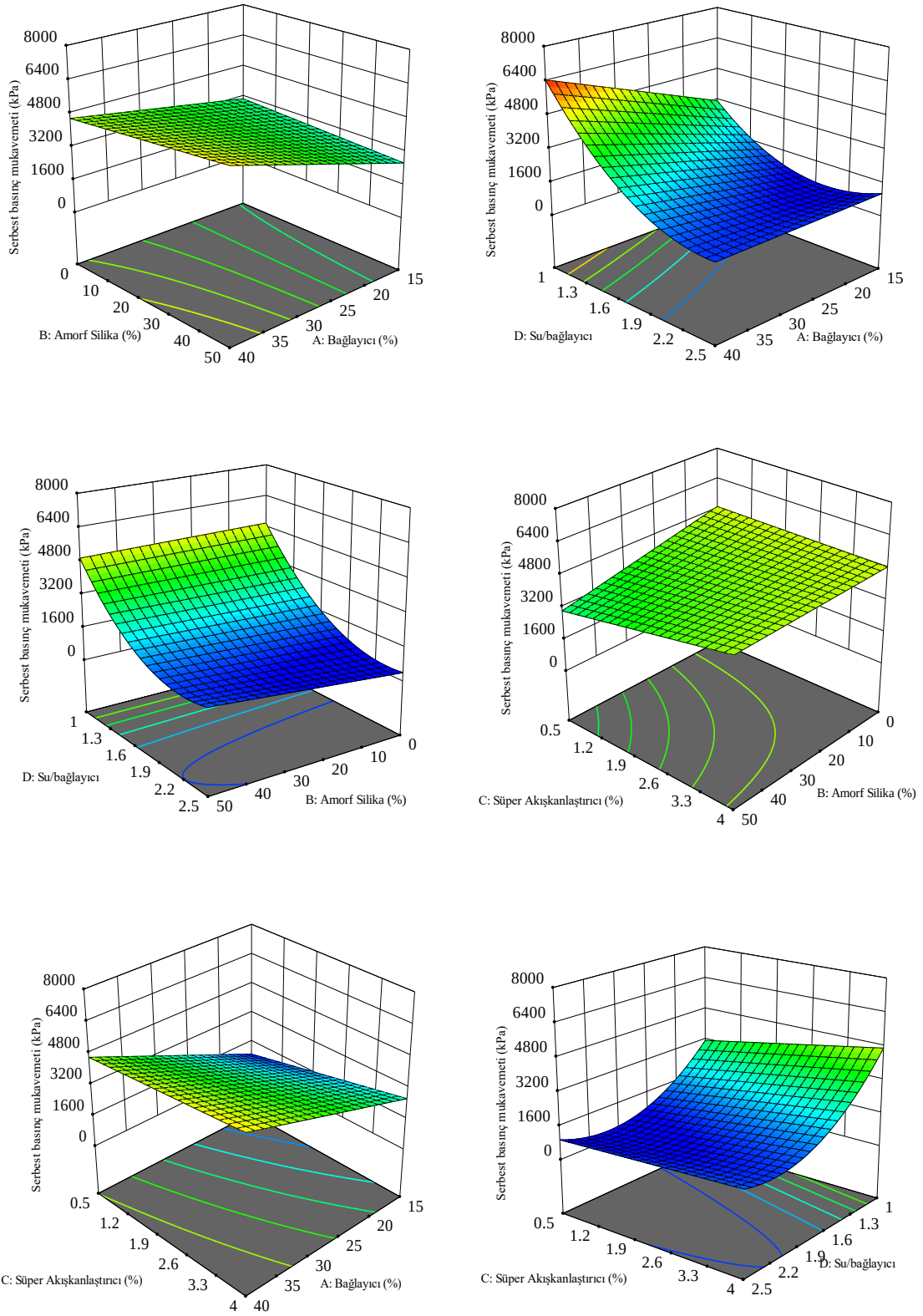
**Şekil 4.2.** Killi zemin için tahmin edilen & gerçekleşen deney sonuçları grafiği, **a)**28 gün, **b)**56 gün.

28 günlük analizler sonucu parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri

Şekil 4.3.' te verilmiştir. Bağlayıcı miktarındaki artış dayanımı artırırken, su/bağlayıcı oranının artırılması dayanımda azalmalara sebebiyet vermektedir. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4. teki grafikler incelendiğinde amorf silikanın düşük su/bağlayıcı oranlarında birim yüzey alanı büyük olduğu için karışım su ihtiyacı fazlalaşacağından dayanıma katkısı daha düşük olmaktadır. Su/bağlayıcı oranının belirli bir miktar artırılmasıyla amorf silikanın dayanıma olan katkısı daha da artmaktadır. Burada süper akışkanlaştırıcı malzeme de amorf silikanın artan oranlarında dayanıma daha çok katkı yapabilmektedir. Bu ise arazi de uygulanabilecek derin karıştırma yönteminde avantaj sağlayabilir. Şöyle ki daha akışkan bir karışım sistemde ve nozullarda tıkanmaları engelleyecek ve DKK oluşumunda olumlu katkı sağlayacaktır. Özetle belirli bir su/bağlayıcı içeriğinde (~ 1.5) hem amorf silikanın bağlayıcıdaki yüzdesi hem de akışkanlaştırıcı katkının kullanılabilir yüzdesi de artmaktadır. Bu ise enjeksiyon sıvısının işlenebilirliğini artırmaktadır.

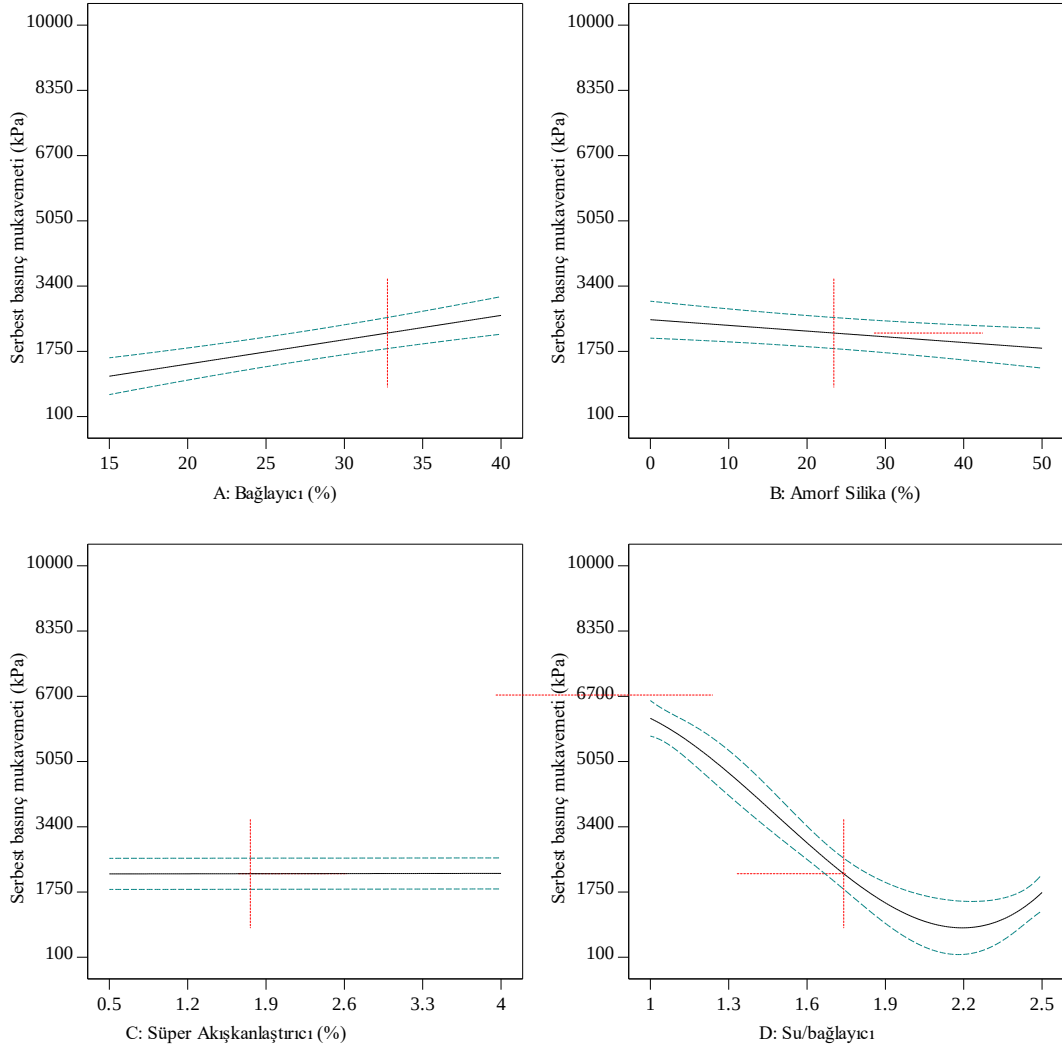


Şekil 4.3. Killi zeminde 28 günlük deney sonuçlarına göre parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri.

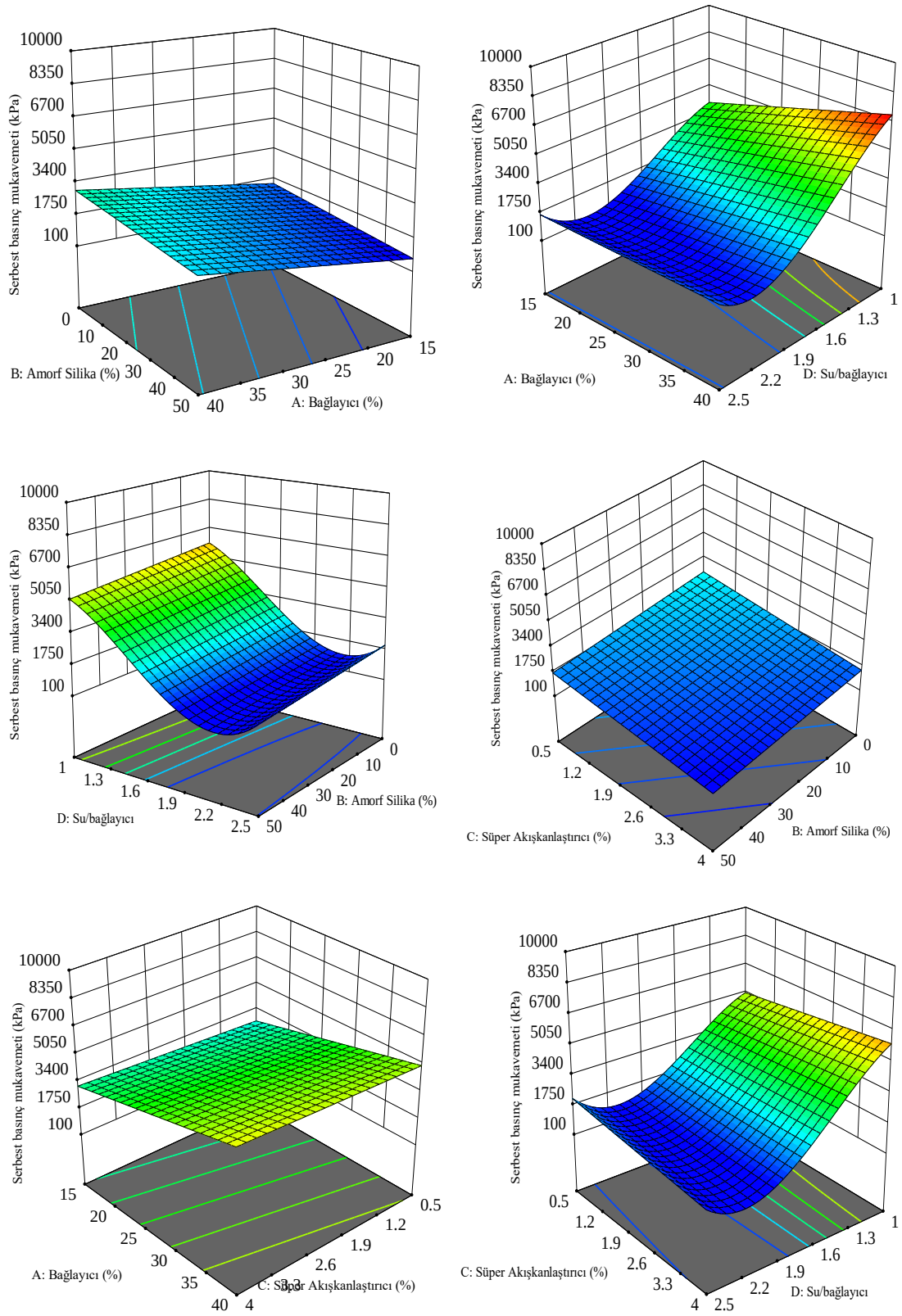


Şekil 4.4. Killi zeminde 28 günlük kür süresi için ikili etkileşim grafikleri.

56 günlük küre maruz kalmış numuneler için elde edilen etkileşim grafikleri incelendiğinde 28 günlük kürlenmiş numuneler için elde edilen etkileşim grafiklerine benzediği görülmektedir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Süper akışkanlaştırıcı katkının düşük seviyeli kullanımlarında amorf silikanın 56 günlük serbest basınç mukavemetine katkısının az bir miktar ($\sim\%1-2$) düşürücü etki ettiği gibi görünse de bu seviyedeki serbest basınç mukavemeti dahi literatürde kohezyonlu zeminlerde belirtilen (Kitazume ve Terashi, 2012; Bruce ve Bruce, 2003) ve hedef olarak belirlenen serbest basınç mukavemetlerinin çok üzerindedir. Süper akışkanlaştırıcı katkının artırılmasıyla bu azalma da ortadan kalkmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının serbest basınç mukavemetinde pozitif yönde bir etki ettiği söylenebilir. Aksini düşündüğümüzde arttırıcı etkisi olmasa bile hatta amorf silika katkısının kontrol



Şekil 4.5. Killi zeminde 56 günlük deney sonuçlarına göre parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri.



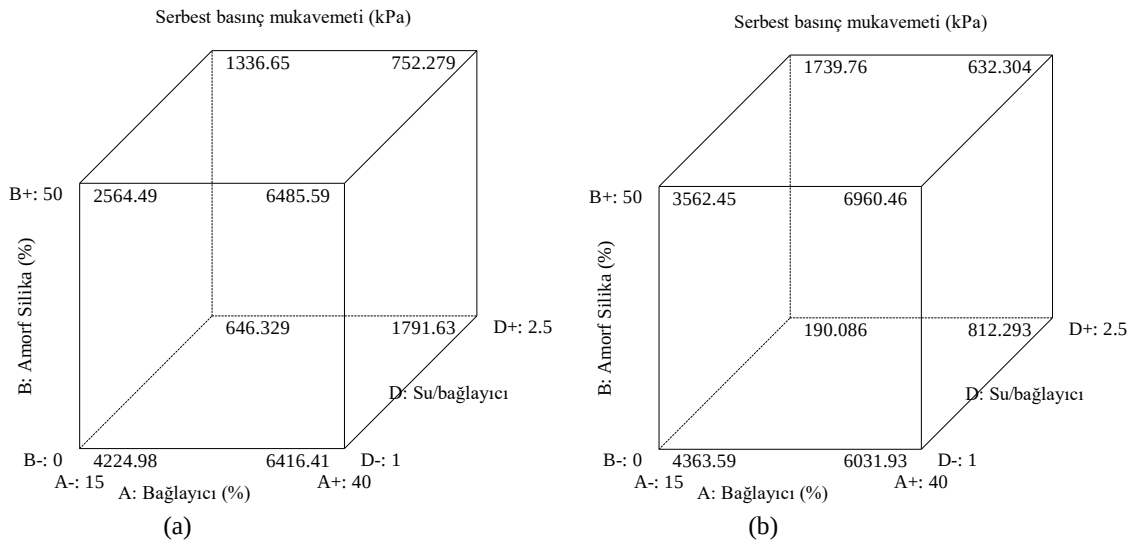
Şekil 4.6. Killi zemin için 56 günlük kür süresi ikili etkileşim grafikleri.

numunelerine göre düşürücü etki ettiğini varsaysak bile bu düşüşle beraber elde edilecek serbest basınç mukavemeti literatürde ve arazi de killi zeminlerde istenen dayanımın çok üzerinde bir değer olmaktadır.

Amorf silikanın araziden temin edildiği gibi doğal halde kullanılabilmesi, üretim maliyetinin çimentoyla kıyaslanamayacak derecede düşük olması, çevre ve sağlık açısından ise sağlığa zararlı olmaması (çimentonun çevre ve sağlığa ciddi zararları vardır) düşünüldüğünde killi zeminlerin DKY ile iyileştirilmesinde iyi bir katkı olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 4.7. de bağlayıcı miktarı, amorf silika miktarı ve su/bağlayıcı oranının üçlü etkileşimi görülmektedir. Süper akışkanlaştırıcının %1.5, amorf silika miktarının %0 ve su/bağlayıcı oranının minimum olduğu (1.0) durumda, bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki artış %51.86 olurken, süper akışkanlaştırıcının %3.2, amorf silika miktarının %0 ve su/bağlayıcı oranının minimum olduğu (1.0) durumda, bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki artış ise %38.23 olmaktadır.

Yine süper akışkanlaştırıcının %1.5, amorf silika miktarının %0 ve su/bağlayıcı oranının maksimum olduğu (2.5) durumda, bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki artış %177.20 olurken, süper akışkanlaştırıcının %3.2, amorf silika miktarının %0 ve su/bağlayıcı oranının maksimum olduğu (2.5) durumda, bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki artış ise %327.32 olmaktadır. Burada ilk durumda



Şekil 4.7. Killi zeminde üçlü etkileşim grafiği, a) Süper akışkanlaştırıcı % 1.5, b) Süper akışkanlaştırıcı % 3.2

baskın parametre su/bağlayıcı oranı olurken ikinci durumda baskın parametre hem su/bağlayıcı hem de akışkanlaştırıcı olmuştur. Şekil 4.7. a ve b grafikleri incelendiğinde her seviyede su/bağlayıcı oranı arttığı zaman belli oranlarda mukavemet azalmaktadır. Su/bağlayıcı oranının artırılması mukavemeti azaltırken, su/bağlayıcı oranının minimum ve maksimum seviyelerde ayrı ayrı sabit tutularak çimento miktarlarının artmasıyla su/bağlayıcı oranının mukavemete etkisi oransal olarak fazla olmaktadır.

Şekil 4.7. a durumunda amorf silika miktarının %0 ve bağlayıcı miktarının minimum olduğu durumda, su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki azalış yaklaşık 7 kat olurken, Şekil 4.7. b) durumunda, amorf silika miktarının %0 ve bağlayıcı miktarının minimum olduğu durumda, su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki azalış ise yaklaşık 22 kat olmaktadır. Bu durumda bağlayıcının ve amorf silikanın minimum olduğu durumlarda süper akışkanlaştırıcının mukavemette azalış meydana getirdiği görülmektedir. Bu azalış miktarı, süper akışkanlaştırıcı miktarının yüksek olduğu durumda daha fazla olmaktadır.

Şekil 4.7. a durumunda amorf silika miktarının %0 ve bağlayıcı miktarının maksimum olduğu durumda, su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki azalış yaklaşık 3.5 kat olurken, Şekil 4.7. b) durumunda, amorf silika miktarının %0 ve bağlayıcı miktarının maksimum olduğu durumda, su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye çıkmasıyla q_u değerindeki azalış ise yaklaşık 7.5 kat olmaktadır. Böylece iki durum arasındaki kıyasta; bağlayıcı miktarının minimumken süper akışkanlaştırıcının %1.5 olduğu durumdan %3.2 durumuna çıkmasıyla mukavemetteki azalış 7 kattan 3.5 kata düşerken, bağlayıcı miktarı maksimumken süper akışkanlaştırıcının %1.5 olduğu durumdan %3.2 durumuna çıkmasıyla mukavemetteki 22 kattan 7.5 kata düşmesi sadece bağlayıcı miktarının artmasıyla değil aynı zamanda süper akışkanlaştırıcının da yüzde olarak miktarının artması ve çimentoyla etkileşime girmesi olarak açıklanabilir.

Şekil 4.7. a durumunda su/bağlayıcı oranı 1.0, amorf silika minimum (%0) seçildiğinde bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla mukavemetteki artış %51 olurken, su/bağlayıcı oranı 1.0, amorf silika maksimum (%50) seçildiğinde bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla mukavemetteki artış %152 olmuştur.

Şekil 4.7. b durumunda ise su/bağlayıcı oranı 1.0, amorf silika minimum (%0) seçildiğinde bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla

mukavemetteki artış %38 olurken, su/bağlayıcı oranı 1.0, amorf silika maksimum (%50) seçildiğinde bağlayıcı miktarının minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla mukavemetteki artış %95 olmuştur.

Amorf silikanın minimum olduğu (%0) bağlayıcının ise maksimum olduğu (%40) durumda süper akışkanlaştırıcı katkının kullanımı artırıldığında mukavemette %6'lık bir düşüş yaşanırken, amorf silikanın maksimum olduğu (%50), bağlayıcının maksimum olduğu (%40) durumda süper akışkanlaştırıcı katkının kullanımı artırıldığında mukavemette %6.5'lik bir artış meydana gelmektedir.

Su/bağlayıcının 1, bağlayıcının minimum (%15), süper akışkanlaştırıcı katkının %1.5 olarak seçildiği durumda amorf silikanın minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla mukavemette %39'luk bir azalış meydana gelirken, aynı şartlarda süper akışkanlaştırıcı miktarı %3.2 seçildiğinde bu azalış %18'e gerilemektedir. Su/bağlayıcının %1, bağlayıcının maksimum (%40), süper akışkanlaştırıcı katkının %1.5 olarak seçildiği durumda amorf silikanın minimumdan maksimum seviyeye çıkarılmasıyla mukavemette %6.5'lik bir artış meydana gelirken, aynı şartlarda süper akışkanlaştırıcı miktarı %3.2 seçildiğinde bu artış %15.40'a çıkmaktadır.

Su/bağlayıcının %1, bağlayıcının minimum (%15), amorf silikanın minimum (%0) seçildiği durumda süper akışkanlaştırıcı miktarı %1.5'tan %3.2'ye çıkarıldığında mukavemette %3.2'lik bir artış meydana gelmiştir. Su/bağlayıcının %1, bağlayıcının minimum (%15), amorf silikanın maksimum (%50) seçildiği durumda süper akışkanlaştırıcı miktarı %1.5'ten %3.2'ye çıkarıldığında mukavemette %38'lik bir artış meydana gelmiştir.

Su/bağlayıcının %1, bağlayıcının maksimum (%40), amorf silikanın minimum (%0) seçildiği durumda süper akışkanlaştırıcı miktarı %1.5'tan %3.2'ye çıkarıldığında mukavemette %6'lık bir düşüş meydana gelirken, Su/bağlayıcının %1, bağlayıcının maksimum (%40), amorf silikanın maksimum (%50) seçildiği durumda süper akışkanlaştırıcı miktarı %1.5'tan %3.2'ye çıkarıldığında ise mukavemette %7.32'lik bir artış meydana gelmiştir.

4.2.1.2. Kumlu zeminlerde DKK'nın serbest basınç mukavemeti

Kumlu zeminlerde 28 ve 56 günlük tasarım deneylerinin sonuçları Çizelge 4.5. te verilmiştir. Bu deneylere ait gerilme-eksenel birim deformasyon grafikleri (q_u - ϵ) EK-2' de verilmiştir.

Genel olarak gerilme-eksenel birim deformasyon grafikleri ve Çizelge 4.5. incelendiğinde kür süresinin artmasıyla q_u değerlerinin arttığı görülmektedir.

Deney sonuçları YYY kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde 28 ve 56 günlük serbest basınç deneyleri ayrı ayrı ve birlikte analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Değerlendirmede iki kür süresinin beraber analizinde daha anlamlı sonuçlar edildiğinden iki kür süresi birlikte değerlendirilmiştir. İki kür süresinin analizinde deney sonuçları yanıt olarak analiz edilirken kür süreleri kategorik olarak analize dahil edilmiştir. Analize ait kodlanmış denklem Eşitlik 4.3. te, gerçek denklemler ise 28 günlük kür süresi için Eşitlik 4.4.'te, 56 günlük kür süresi için Eşitlik 4.5.' te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kumlu zeminde 28 ve 56 günlük serbest basınç mukavemeti değerleri.

Tasarım no	Tasarım parametreleri				Serbest basınç mukavemeti (q_u) (kPa)	
	Bağlayıcı (%)	Amorf silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı katkısı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	40.00	50.00	2.67	0.82	9115.51	11479.05
2	15.00	50.00	1.48	1.20	3348.14	4699.84
3	15.00	17.50	0.50	0.88	7643.02	10155.64
4	15.00	11.25	4.00	1.20	4026.80	4548.12
5	27.13	25.57	2.13	0.96	6285.15	7520.61
6	40.00	12.50	2.67	1.20	4480.09	4913.50
7	27.13	25.57	2.13	0.96	6285.15	7520.61
8	40.00	43.75	0.50	1.14	4740.35	5088.83
9	17.38	0.00	2.69	0.70	13159.50	14796.37
10	40.00	0.00	0.50	0.70	19776.93	20611.48
11	31.00	50.00	4.00	1.20	2857.86	3327.52
12	25.50	0.00	0.50	1.20	4216.93	4664.47
13	15.63	35.00	2.08	0.70	9252.41	9319.50
14	27.13	25.57	2.13	0.96	6285.15	7520.61
15	34.50	0.00	4.00	0.96	7602.65	7899.91
16	15.00	50.00	4.00	0.82	7540.94	8886.49
17	34.25	25.75	4.00	0.70	12275.60	14031.95
18	25.45	50.00	0.50	0.70	10399.40	12207.58

Analize ait ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Anova Tablosu incelendiğinde F değerleri en yüksek su/bağlayıcı oranı ve amorf silika yüzdesi için bulunmuştur ve baskın parametreler bunlar olmuştur.

Çizelge 4.6. Kumlu zemin için Anova Analizleri (28 - 56 günlük kür süreleri)

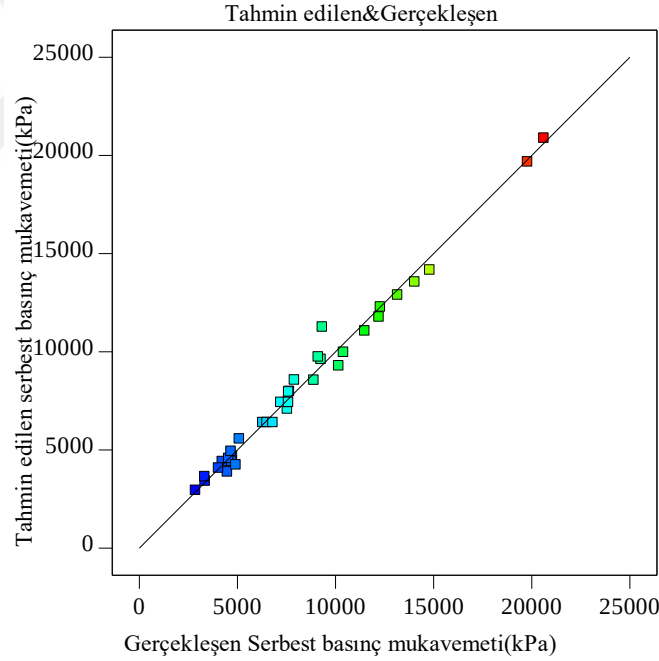
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	6.42E+08	19	3.38E+07	60.14	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	2.29E+07	1	2.29E+07	40.82	0.0001	
B-Amorf Silika	3.40E+07	1	3.40E+07	60.59	0.0001	
C-Süper Akışkan.	6.78E+06	1	6.78E+06	12.07	0.0031	
D-Su/bağlayıcı	4.79E+08	1	4.79E+08	852.81	0.0001	
E-Gün	9.40E+06	1	9.40E+06	16.74	0.0009	
AB	3.96E+05	1	3.96E+05	0.71	0.4133	
AC	2.45E+06	1	2.45E+06	4.37	0.053	
AD	1.74E+07	1	1.74E+07	31.02	0.0001	
AE	6.74E+04	1	6.74E+04	0.12	0.7335	
BC	2.59E+06	1	2.59E+06	4.62	0.0472	
BD	1.17E+07	1	1.17E+07	20.86	0.0003	
BE	2.63E+05	1	2.63E+05	0.47	0.5034	
CD	1.35E+06	1	1.35E+06	2.40	0.1412	
CE	6.63E+04	1	6.63E+04	0.12	0.7357	
DE	9.42E+05	1	9.42E+05	1.68	0.2135	
A ²	3.17E+06	1	3.17E+06	5.65	0.0303	
B ²	6.62E+05	1	6.62E+05	1.18	0.2938	
C ²	1.99E+04	1	1.99E+04	0.04	0.8531	
D ²	4.01E+06	1	4.01E+06	7.14	0.0167	
R ²	0.9862					
Düzeltilmiş R ²	0.9698					
Tahmin Edilen R ²	0.9311					
Hassasiyet	32.1108					

$$\begin{aligned}
(q_u)_{28\&56\text{gün,kum}} = & + 7130.17 + (1086.04*A) - (1314.85*B) - (575.11*C) - (4499.36*D) \\
& + (513.03*E) - (182.59*A*B) - (489.58*A*C) - (1157.66*A*D) - (57.59*A*E) + \\
& (437.88*B*C) + (923.01*B*D) + (113.25*B*E) + (315.28*C*D) - (56.64*C*E) - \\
& (205.73*D*E) + (736.87*A^2) + (353.61*B^2) + (55.70*C^2) + (830.20*D^2) \quad (4.3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(q_u)_{28\text{gün,kum}} = & 33418.11 + (249.00*A) - (232.16*B) - (697.47004*C) - (38338.64*D) - \\
& (0.58*A*B) - (22.38*A*C) - (370.45*A*D) + (10.00*A*E) + (147.68*B*D) + \\
& (720.64*C*D) + (4.71*A^2) + (0.56*B^2) + (18.18*C^2) + (13283.17*D^2) \quad (4.4)
\end{aligned}$$

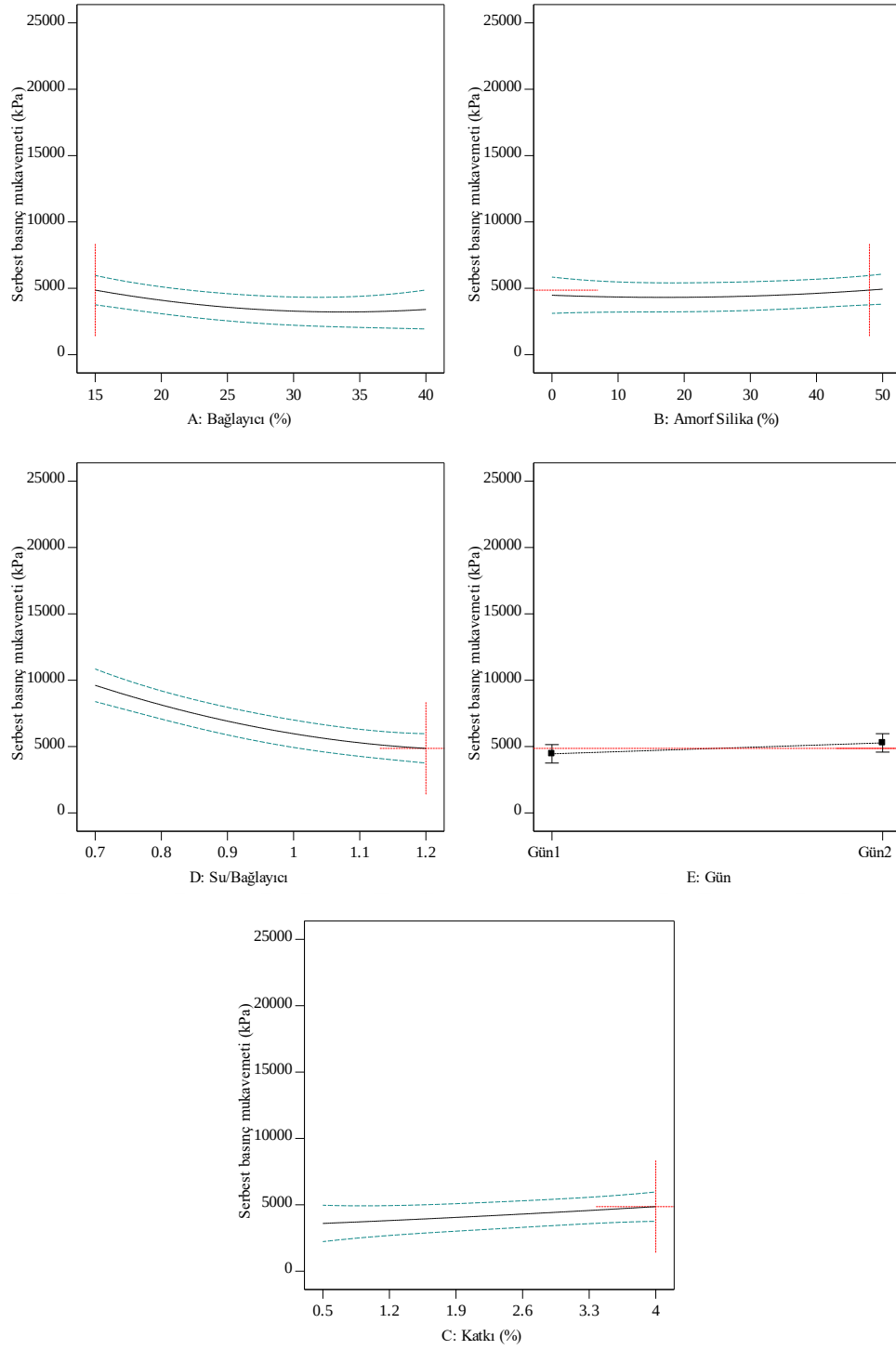
$$(q_u)_{56\text{gün,kum}} = 36180.24 + (239.79*A) - (223.10*B) - (762.19*C) - (39984.48*D) - (0.58*A*B) - (22.38*A*C) - (370.45*A*D) + (10.00*B*C) + (147.68*B*D) + (720.64*C*D) + (4.71*A^2) + (0.56*B^2) + (18.18*C^2) + (13283.17*D^2) \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.3., 4.4. ve 4.5.'te geçen A, B, C, D terimleri Çizelge 4.6.'da tanımlanmıştır. Çizelge 4.6.'da F değerinin 60.14 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde A, B, C, D, E, AD, BD, A², D² terimleri anlamlı parametreler olmuştur. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla model anlamlıdır. Hassasiyet değeri 32.11 olarak hesaplanmıştır ve dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir. Kumlu zemine ait 28 ve 56 günlük serbest basınç deney sonuçlarıyla yapılan analizlerde gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu sonucu çıkmıştır (Şekil 4.8.).

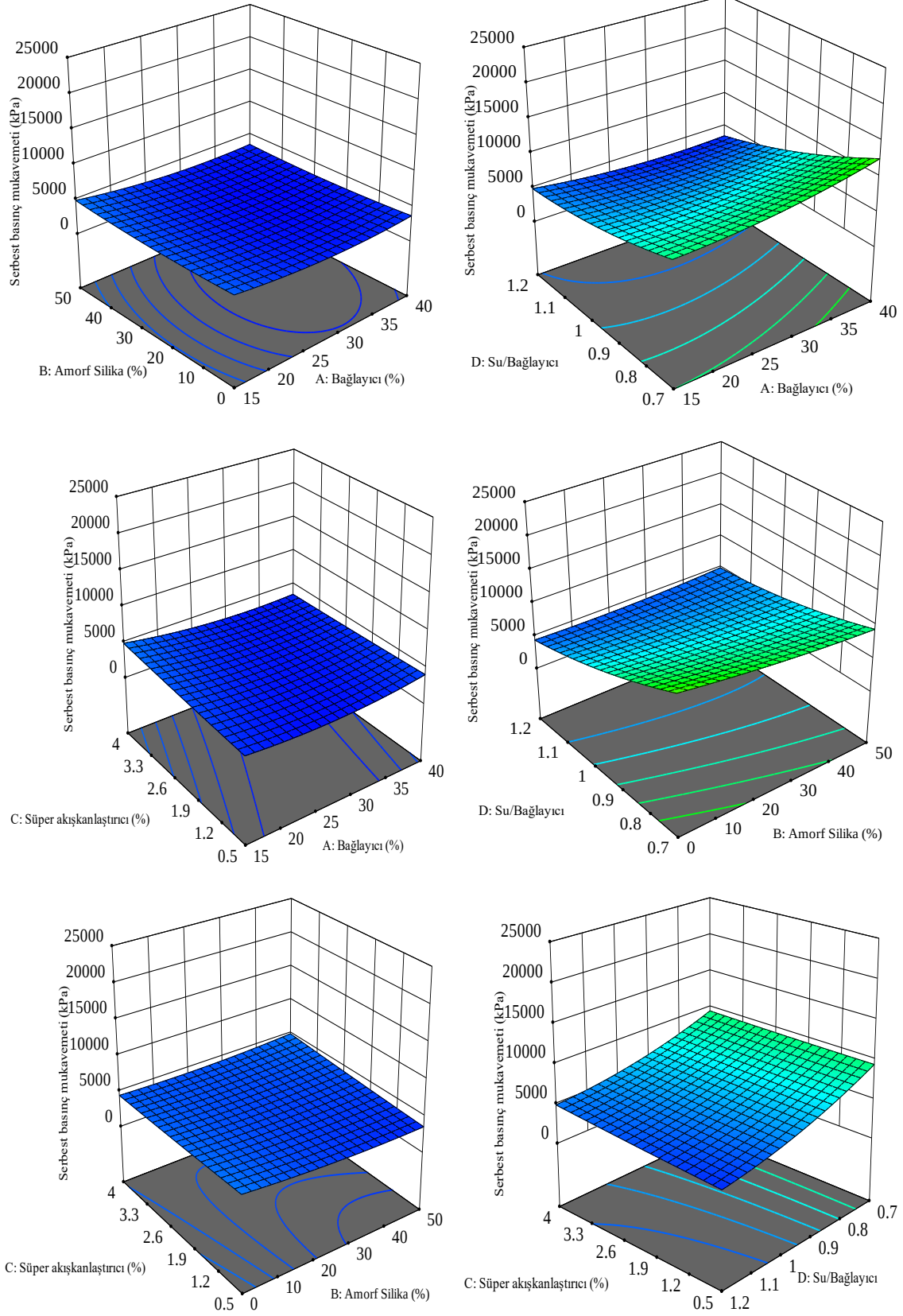


Şekil 4.8. Kumlu zemin için tahmin edilen & gerçekleşen deney sonuçları grafiği, 28 -56 günlük kür

Şekil 4.8.'de doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır, hatta doğru üzerinde toplanmıştır. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir. Şekil 4.9.'da parametrelerin q_u değerlerine etkileri ve Şekil 4.10.'da parametrelerin ikili etkileşimleri görülmektedir.



Şekil 4.9. Kumlu zeminde 28-56 günlük kür süreleri için parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri



Şekil 4.10. Kumlu zeminde 28-56 günlük kür süresi için ikili etkileşim grafikleri

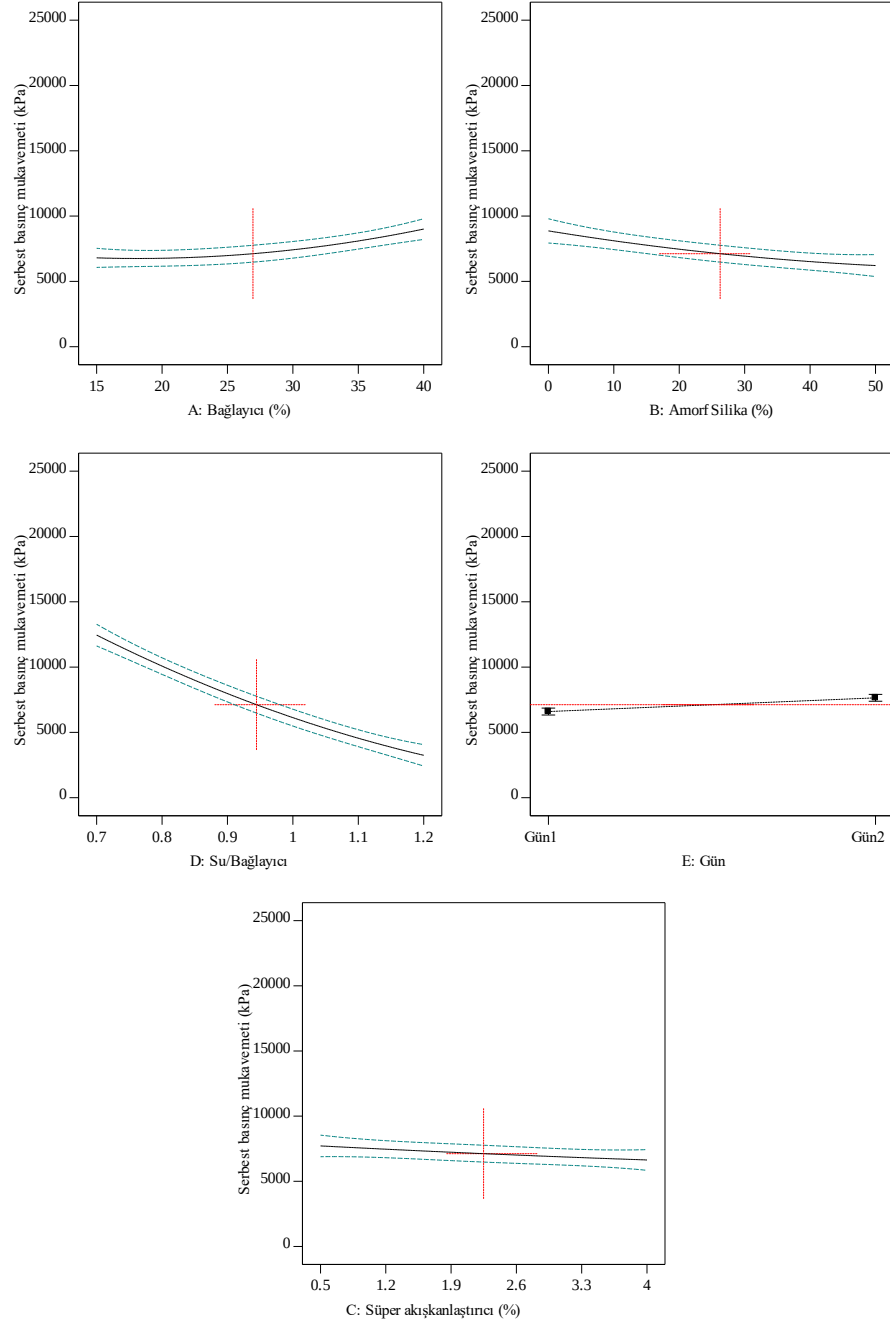
Şekil 4.9. ve 4.10. incelendiğinde su/bağlayıcının maksimum (1.2), süper akışkanlaştırıcı katkının maksimum (%4), bağlayıcı miktarının minimum (%15), ve amorf silika miktarının maksimum (%50) seçildiği durumlar için q_u değerindeki değişimler açıklanmıştır. Buna göre su/bağlayıcı oranının artmasıyla mukavemette beklenildiği gibi azalmalar meydana gelmektedir. Bağlayıcı miktarı minimum ve su/bağlayıcı oranı maksimum iken amorf silikanın süper akışkanlaştırıcı ile beraber maksimum seviyede kullanılması amorf silikanın etkinliğini mukavemet açısından arttırmaktadır. Seçilen bu parametrelerle mukavemet değeri açısından 5000 kPa civarında bir dayanım elde edilmiştir. Mukavemet değerleri (q_u) literatürde granüler zeminlerde DKY ile iyileştirilen zeminler için istenen değerleri sağlamaktadır (Kitazume ve Terashi, 2012; Bruce ve Bruce, 2003).

Şekil 4.11. ve 4.12. incelendiğinde ve Şekil 4.9. Şekil 4.10 ile karşılaştırıldığında parametrelerin ortalama değerleri; su/bağlayıcı=0.9, süper akışkanlaştırıcı katkısı=%2.2, bağlayıcı miktarı=%26 ve amorf silika miktarı=%26 seçildiğinde mukavemet değeri 7000 kPa değerlerine çıkmaktadır. Granüler zeminler için literatürde ve arazide yapılan çalışmaların ortalama değeri alındığında DKY ile iyileştirilen zeminlerde 1250-8000 kPa arasında değerlerde mukavemet değerleri elde edildiği görülmektedir. Dolayısıyla kumlu zeminde elde edilen bu değer literatürde belirtilen değerlerin üst sınırına yaklaşmaktadır. Özellikle Ek-2 de grafikleri verilen tasarımlara ait 13. 17. ve 18. tasarımlar incelendiğinde bağlayıcı miktarının orta seviyelere yakın, amorf silika katkısının orta-üst seviyelerde olduğu tasarımlarda 28 günlük q_u değerleri dikkate alındığında 9000-12000 kPa arası değerlerin elde edilmesi literatürde elde edilen çalışmalarla kıyaslandığında oldukça iyi seviyededir. Bu tasarım seviyelerinde amorf silika katkısının ikame olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

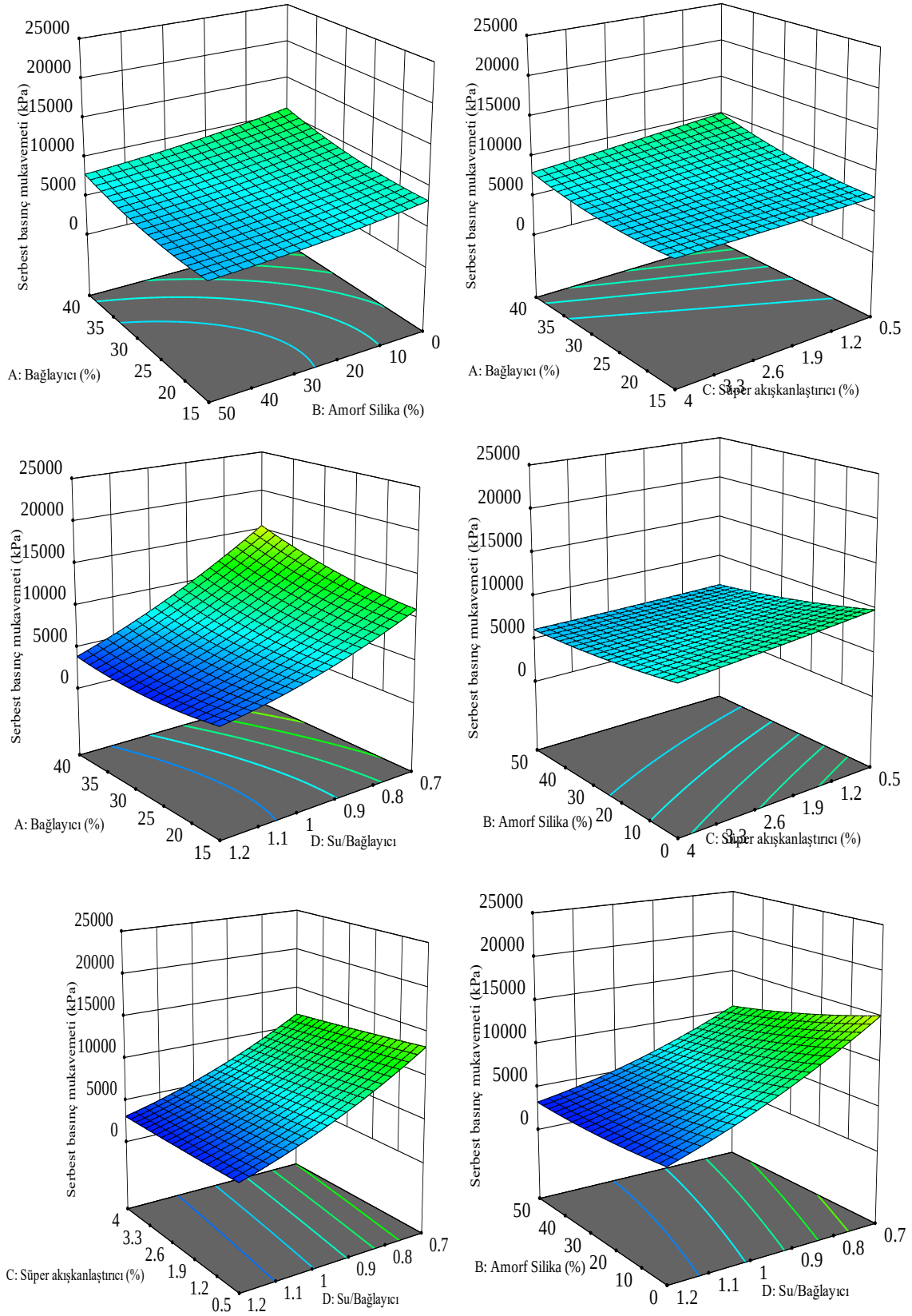
Amorf silikanın minimum (%0), bağlayıcı miktarı minimum (%15) olarak seçildiği durumda su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye (0.7'den 1.2'ye) çıkarıldığında mukavemet %64 azalırken, amorf silika miktarı minimum (%0), bağlayıcı miktarı maksimum (%40) olarak seçildiği durumda su/bağlayıcı oranı minimumdan maksimum seviyeye (0.7'den 1.2'ye) çıkarıldığında mukavemet %77 azalmaktadır.

Amorf silikanın maksimum (%50), bağlayıcı miktarının minimum (%15) olarak seçildiği durumda su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye (0.7'den 1.2'ye) çıkarıldığında mukavemet %48 azalırken, amorf silikanın maksimum (%50), bağlayıcı miktarı maksimum (%40) olarak seçildiği durumda su/bağlayıcı oranının

minimumdan maksimum seviyeye (0.7'den 1.2'ye) çıkarıldığında q_u değerleri %72 oranında azalmaktadır. Bu seviyede amorf silika katkısı ile bağlayıcının minimum olduğu durumda mukavemetteki azalma %64'ten %48'e gerilerken, yine bağlayıcının maksimum olduğu durumda amorf silika katkısı ile mukavemetteki azalma %77' den %72' ye gerilemektedir. Dolayısıyla amorf silikanın mukavemete katkısı görülmektedir.

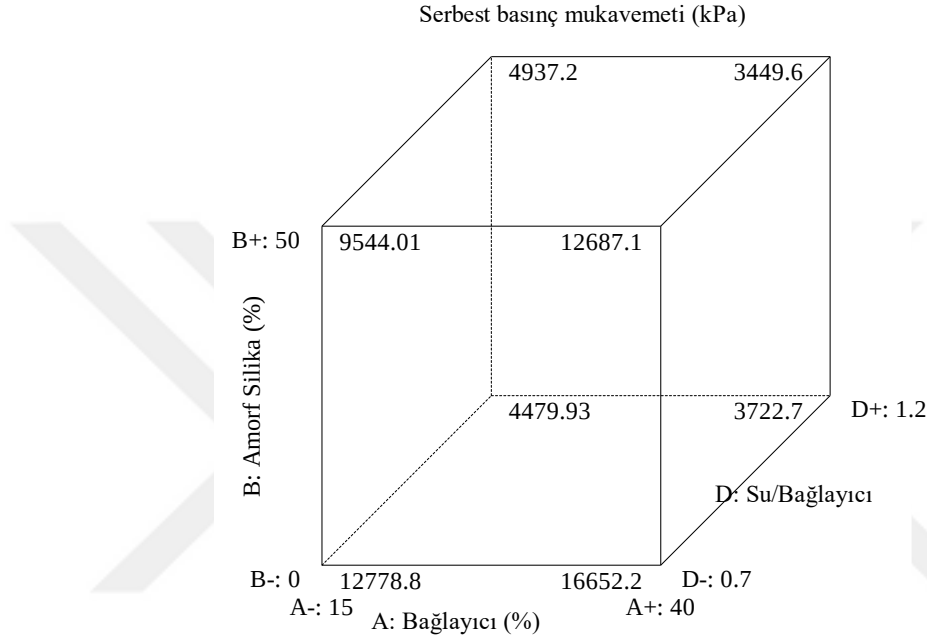


Şekil 4.11. Kumlu zeminde 28-56 günlük kür sürelerinde parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri (parametreler ortalama değerlerinde kullanıldığında)



Şekil 4.12. Kumlu zeminde 28-56 günlük kür süreleri için parametrelerin serbest basınç mukavemetine etkileri

Kumlu zemine ait parametrelerin üçlü etkileşim grafiği Şekil 4.13.'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde amorf silikanın minimum (%0), su/bağlayıcı oranının 0.7 olarak seçildiği durumda bağlayıcı miktarı minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %40'a) çıkarıldığında mukavemet %30 artarken, amorf silikanın minimum (%0), su/bağlayıcı oranının 1.2 olarak seçildiği durumda bağlayıcı miktarı minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %40'a) çıkarıldığında mukavemet %16 azalmıştır.



Şekil 4.13. Kumlu zemin için üçlü etkileşim grafiği, 28-56 günlük kür süreleri için

Amorf silikanın maksimum (%50), su/bağlayıcı oranının 0.7 olarak seçildiği durumda bağlayıcı miktarı minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %40'a) çıkarıldığında mukavemet %32 artarken, amorf silikanın minimum (%0), su/bağlayıcı oranının 1.2 olarak seçildiği durumda bağlayıcı miktarı minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %40'a) çıkarıldığında mukavemet %30 azalmıştır. Amorf silikanın kullanılmadığı, su/bağlayıcının düşük olduğu değerlerde bağlayıcı yüzdesi minimumdan maksimuma çıkarılırken ki artış %30 iken, aynı su/bağlayıcı oranında amorf silikanın yüzdesinin maksimum seçilmesiyle artış %32 ye çıkmıştır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımı bu seviyede %2'lik bir katkı sağlamıştır.

Su/bağlayıcı oranının minimum (0.7), bağlayıcı miktarı minimum (%15) olarak seçildiği durumda; amorf silika yüzdesi minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %15'e) çıkarıldığında mukavemet %25.31 azalırken, su/bağlayıcı oranının minimum (0.7), bağlayıcı miktarı maksimum (%40) olarak seçildiği durumda; amorf silika

yüzdesi minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %15'e) çıkarıldığında mukavemet %23.81 azalmaktadır.

Su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), bağlayıcı miktarı minimum (%15) olarak seçildiği durumda; amorf silika yüzdesi minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %15'e) çıkarıldığında mukavemet %10 artarken, su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), bağlayıcı miktarının maksimum (%40) olarak seçildiği durumda; amorf silika yüzdesi minimumdan maksimum seviyeye (%0'dan %15'e) çıkarıldığında mukavemet %7 azalmaktadır. Dolayısıyla su/bağlayıcı oranının minimumdan maksimum seviyeye çıkarıldığı bu seviyede %25.31 lik azalmadan %7 lik bir artışa geçiş, toplamda yaklaşık %32 lik bir artış söz konusu olmaktadır. Bu seviyedeki (su/çimentonun 0.7'den 1.2 ye çıkarılmasında) amorf silikanın minimumdan maksimuma geçerken ki artışı, amorf silikanın mikro yapısından dolayı özgül yüzey alanının büyük olmasıyla su ihtiyacının fazla olması ve su miktarını artışıyla etkisinin artması olarak açıklanabilir.

4.2.2. Permeabilite deneyi (geçirimlilik deneyi)

Küçük ölçekli tasarım deneyleri kapsamında killi ve kumlu zeminler için 18 seviyeli tasarımların her bir seviyesinde altışar numune (28 ve 56 günlük kürler) olmak üzere toplamda 216 adet permeabilite deneyi üç eksenli basınç deney aletinde yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin permeabilite katsayıları, 28 günlük küre maruz kalmış numunelere göre daha düşük olmuştur. Kür süresi arttıkça numuneler daha geçirimsiz olmaktadır. Killi zeminlerde kumlu zeminlere göre geçirimlilik daha düşük olmuştur. Deney sonuçlarına ait detaylı veriler alt başlıklarda verilmiştir.

4.2.2.1. Killi zeminlerde derin karıştırma kolonlarının permeabilitesi

Killi zeminlerle hazırlanan 28 ve 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin permeabilite katsayısı değerleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde kür süresinin artmasıyla permeabilite katsayısının azaldığı, dolayısıyla numunelerin daha geçirimsiz hale geldiği görülmüştür.

Deney sonuçları YYY kullanılarak analiz edilmiştir. 28 günlük permeabilite deney sonuçlarına ait tasarım denklemi eşitlik 4.6.' da; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.8.' de verilmiştir.

$$k_{28\text{gün,kil}} = +238.88 + (7.38*A) - (51.65*B) + (14.47*C) + (115.91*D) + (46.25*B*C) - (50.73*B*D) + (33.75*C*D) - (97.52*A^2) - (71.80*B^2) \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6.' da geçen A, B, C, D terimleri Çizelge 4.8. de tanımlanmıştır. Çizelge 4.8.' de F değerinin 23.25 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde B, D, BC, BD, CD, A², B² terimleri anlamlı çıkarken A ve C terimleri anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Çizelge 4.8. te hassasiyet değeri 14.9236 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Çizelge 4.7. Killi zemin numuneleri için permeabilite deney sonuçları (28 ve 56 günlük kür)

Tasarım No	Tasarım parametreleri				Permeabilite katsayısı (k) (x10 ⁻¹¹ m/s)	
	Bağlayıcı (%)	Amorf silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı katkısı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	27.50	12.50	4.00	1.00	84.09	12.81
2	15.00	17.75	4.00	2.50	341.02	283.64
3	27.25	25.53	2.15	1.76	240.07	227.09
4	32.75	0.00	2.65	2.50	385.31	49.20
5	15.00	50.00	4.00	1.38	4.32	3.65
6	27.25	25.53	2.15	1.76	240.07	227.09
7	15.00	30.00	0.50	1.00	7.25	6.79
8	40.00	28.27	0.57	2.50	198.21	23.06
9	31.25	50.00	0.50	1.56	33.00	27.55
10	17.50	0.00	0.50	2.28	268.90	210.17
11	40.00	0.00	0.50	1.00	58.70	53.00
12	15.00	0.00	2.71	1.32	12.90	12.02
13	27.25	25.53	2.15	1.76	240.07	227.09
14	40.00	10.25	4.00	1.79	84.92	38.16
15	34.38	50.00	4.00	2.50	243.43	88.88
16	40.00	46.25	2.65	1.00	15.50	14.56
17	15.00	50.00	1.52	2.50	43.63	31.71
18	23.00	0.00	0.56	1.22	111.33	21.94

Çizelge 4.8. Killi zemin numuneleri için Anova Analizleri (28 günlük kür süresi-permeabilite)

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	2.532E+05	9	28131.56	23.25	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	549.57	1	549.57	0.4541	0.5194	
B-Amorf Silika	26475.43	1	26475.43	21.88	0.0016	
C-Süper Akışk.	2239.27	1	2239.27	1.85	0.2108	
D-Su/bağlayıcı	1.385E+05	1	1.385E+05	114.48	0.0001	
BC	11855.23	1	11855.23	9.80	0.0140	
BD	16052.34	1	16052.34	13.26	0.0066	
CD	7849.94	1	7849.94	6.49	0.0343	
A ²	32974.28	1	32974.28	27.25	0.0008	
B ²	15388.02	1	15388.02	12.72	0.0073	
R ²	0.9632					
Düzeltilmiş R ²	0.9217					
Tahmin Edilen R ²	0.8088					
Hassasiyet	14.9236					

28 ve 56 günlük permeabilite deney sonuçları kür süreleri kategorik olarak seçilmiş ve birlikte analiz edilmiştir. Analiz sonucu tasarım denklemi Eşitlik 4.7.' de; ANOVA tablosu, R², düzeltilmiş R², tahmin edilen R² ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.9.' da verilmiştir.

$$k_{56\text{gün,kil}} = +220.89 - (12.65*A) - (33.10*B) + (8.51*C) + (83.351*D) - (30.65*E) - (43.98*A*D) - (18.46*A*E) + (48.42*B*C) - (37.70*B*D) + (28.28*C*D) - (31.05*D*E) - (88.46*A^2) - (103.42*B^2) \quad (4.7)$$

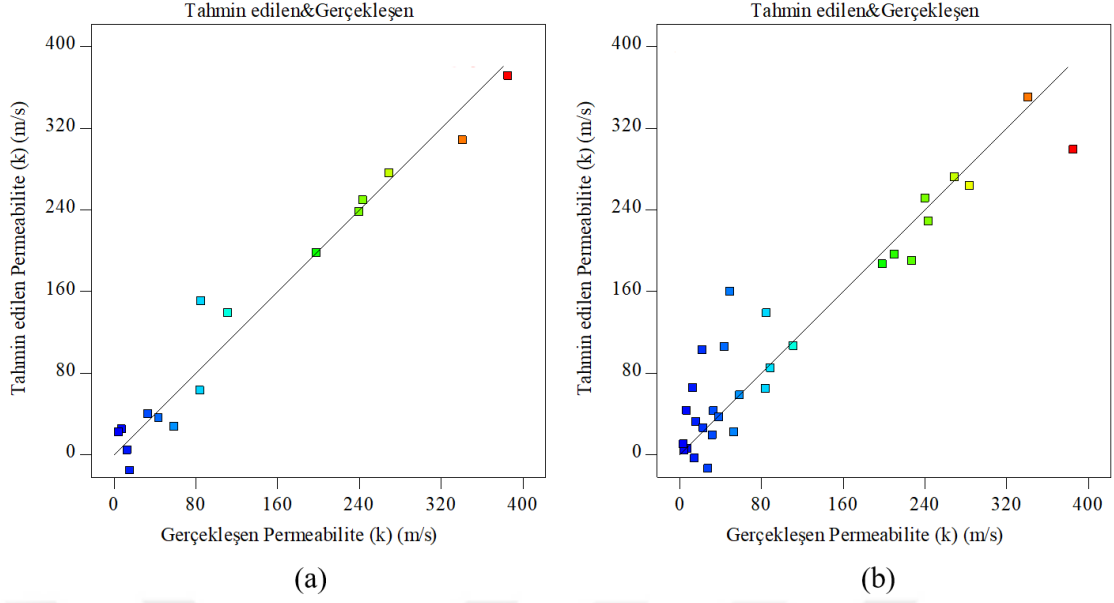
Eşitlik 4.7.' de verilen A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.9. Killi zemin numuneleri için Anova Analizleri (28-56 günlük kür süresi-permeabilite).

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	4.049E+05	13	31149.01	13.40	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	3223.92	1	3223.92	1.39	0.2516	
B-Amorf Silika	21734.34	1	21734.34	9.35	0.0058	
C-Süper Akışk.	1547.66	1	1547.66	0.6656	0.4233	
D-Su/bağlayıcı	1.432E+05	1	1.432E+05	61.58	0.0001	
E-Gün	33647.31	1	33647.31	14.47	0.0010	
AD	27201.92	1	27201.92	11.70	0.0024	
AE	7010.09	1	7010.09	3.01	0.0965	
BC	25937.74	1	25937.74	11.15	0.0030	
BD	17729.94	1	17729.94	7.62	0.0114	
CD	10993.93	1	10993.93	4.73	0.0407	
DE	20495.27	1	20495.27	8.81	0.0071	
A ²	53222.93	1	53222.93	22.89	0.0001	
B ²	62202.93	1	62202.93	26.75	0.0001	
R ²	0.8878					
Düzeltilmiş R ²	0.8216					
Tahmin Edilen R ²	0.6890					
Hassasiyet	12.9845					

Çizelge 4.9.' da F değerinin 13.40 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde B, D, E, AD, AE, BC, BD, CD, DE, A², B² terimleri anlamlı çıkarken A ve C terimleri anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değeri 12.9845 olarak hesaplanmıştır ki bu değer sınır değer olan 4'ten büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

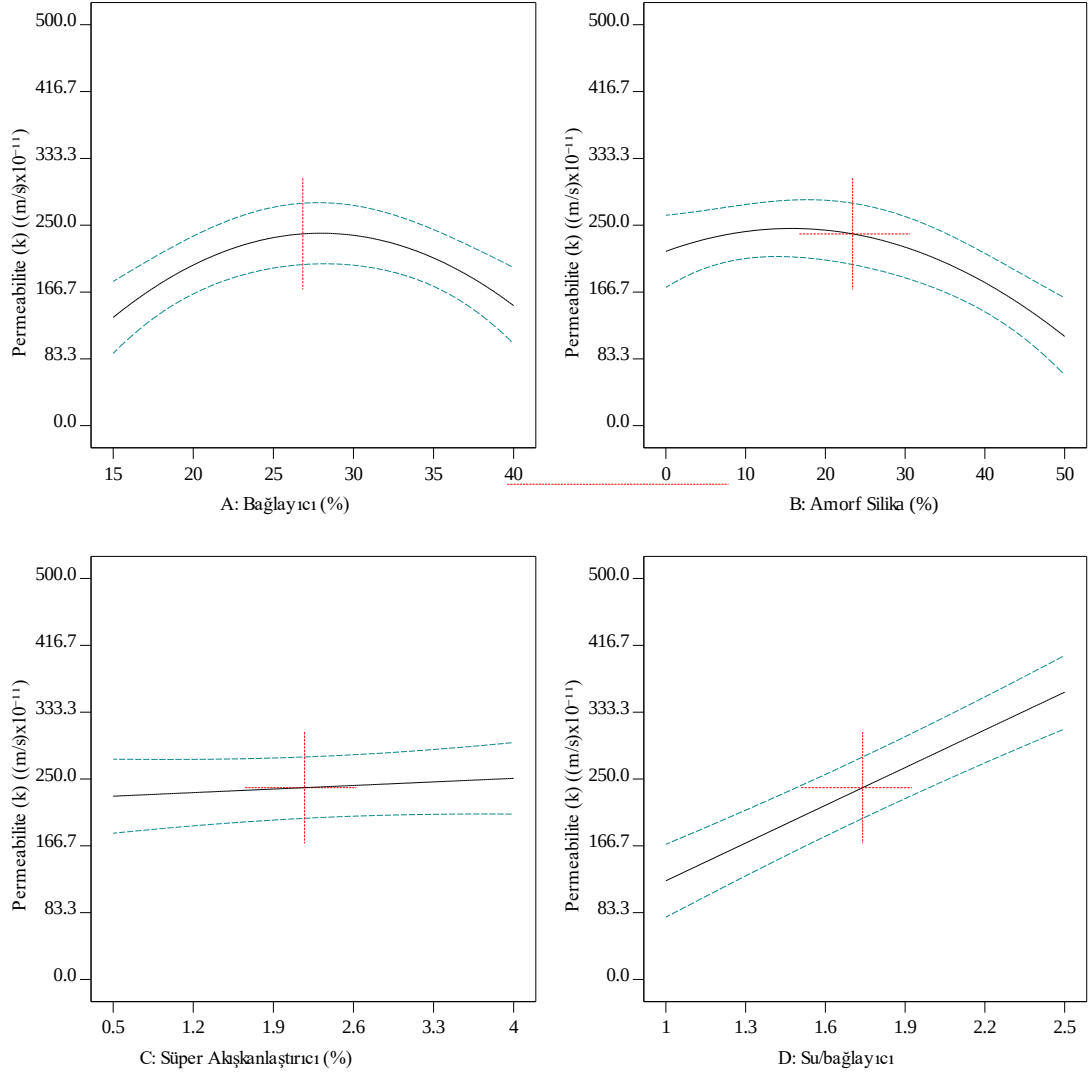
Killi zemine ait 28 ve 28-56 günlük permeabilite deney sonuçlarıyla yapılan analizlerde, gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.13.). Şekil 4.13.'te doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır. Bu durum gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.



Şekil 4.13. Killi zemin için tahmin edilen ve gerçekleşen permeabilite deney sonuçları
a) 28 gün b) 28-56 gün.

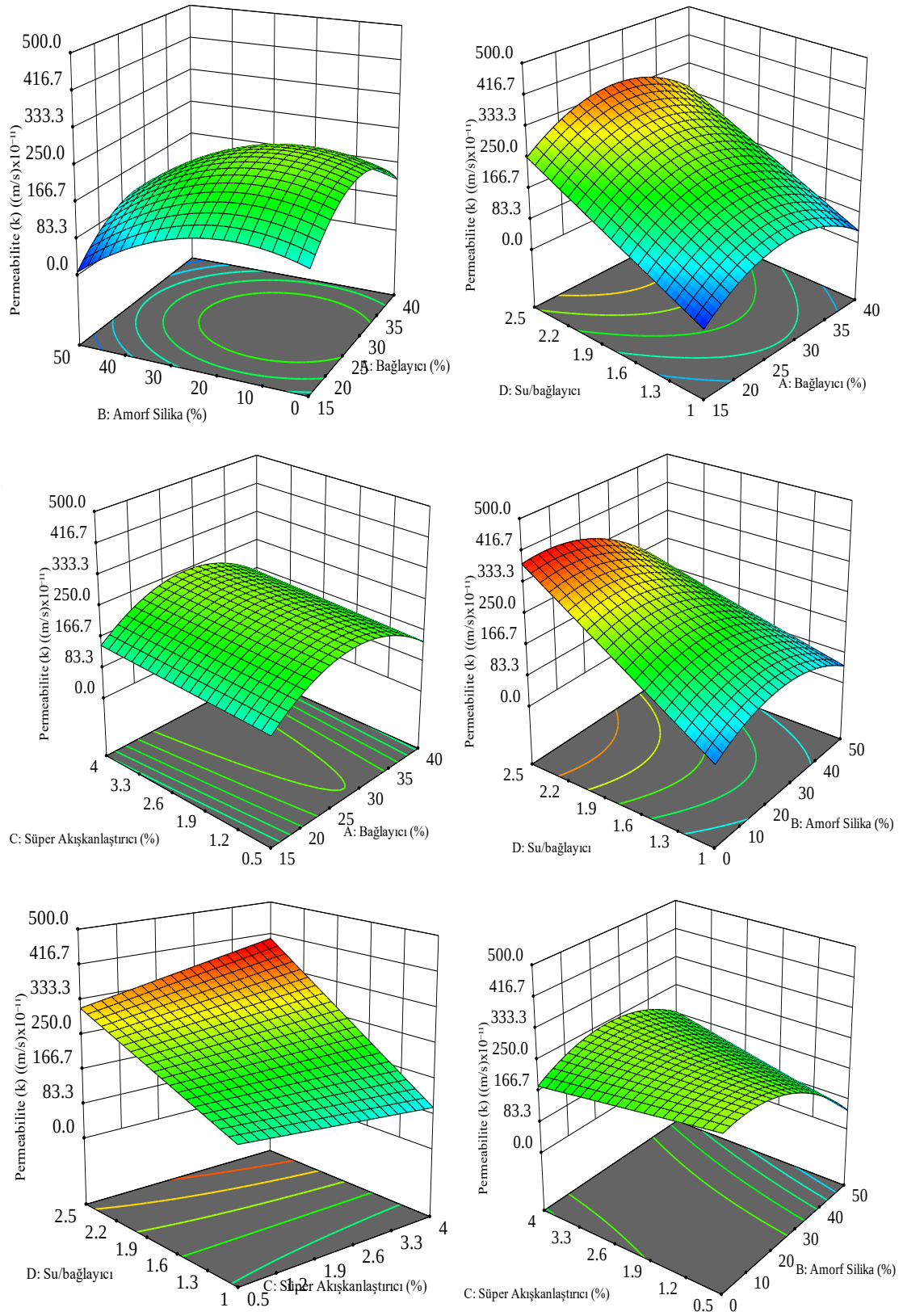
Yapılan analizlere göre parametrelerin geçirimsizlik katsayılarına olan etkileri 28 günlük kür süresi için Şekil 4.14.'te, 28 günlük kür süresi için parametrelerin ikili etkileşim grafikleri ise Şekil 4.15.'te verilmiştir. Çimento su ile karıştırıldığında birtakım reaksiyonlarla beraber C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) ve C-H (kalsiyum hidroksit) oluşmakta ve bunun neticesinde dayanım kazanma ve sertleşme başlamaktadır. Bu reaksiyonların oluşabilmesi için su miktarının yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Su miktarının fazla olması durumunda da çimentoyla reaksiyona giren su miktarından artı kalan kısmı boşluk hacmini doldurmakta, daha sonra buharlaşarak boşluklar oluşturmakta ve zemini geçirimli hale getirmektedir.

Grafikler incelendiğinde bağlayıcı yüzdesinin minimumdan belirli bir seviyeye kadar tek başına kullanımı geçirimsizliğe olumlu etki yapmazken, bağlayıcı yüzdesinin %25-30 miktarından sonra diğer parametrelerin de belirli bir seviyede kullanımıyla geçirimsizlik katsayısı azalmaktadır.

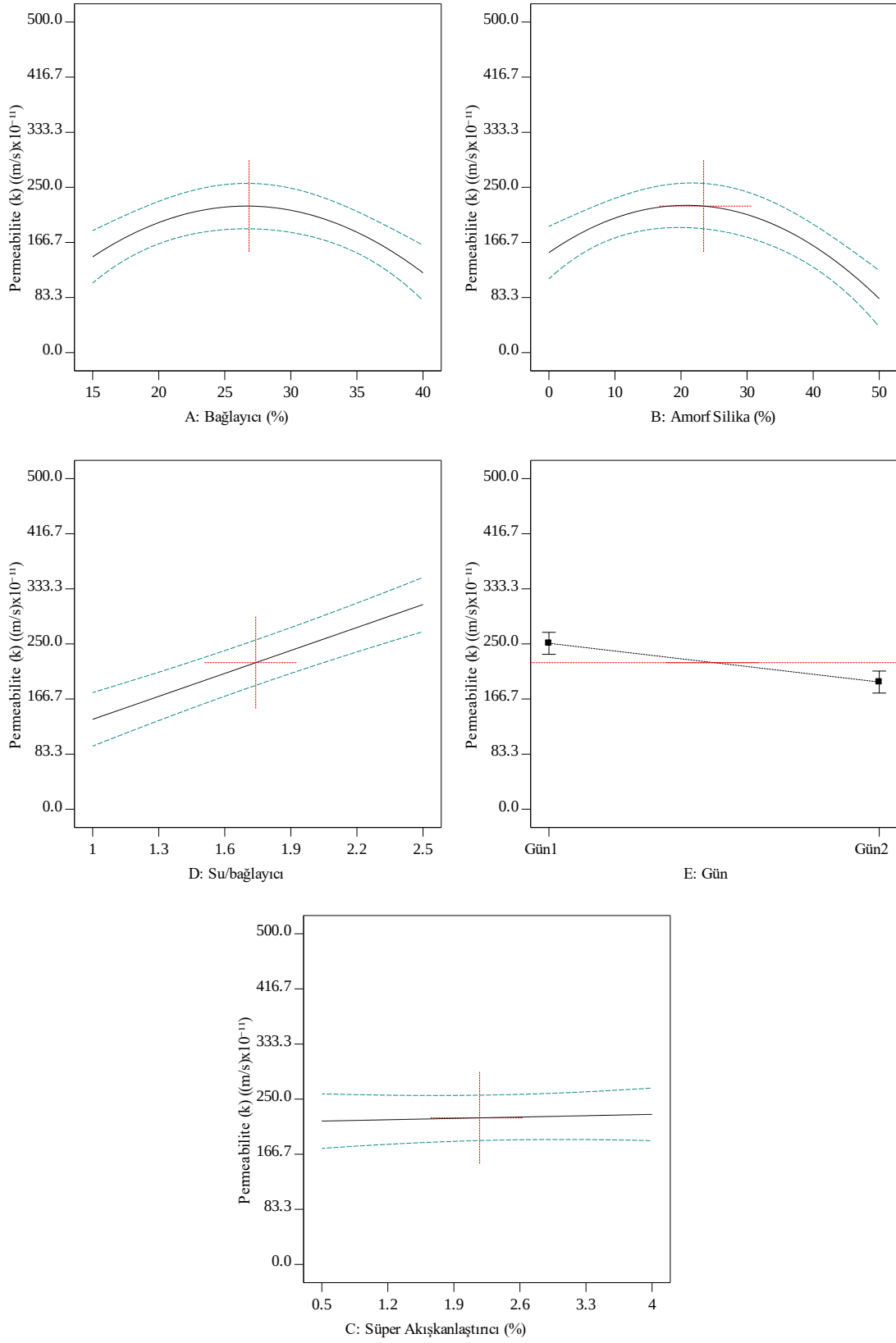


Şekil 4.14. Killi zemin için parametrelerin geçirimsizlik katsayısına etkileri (28 günlük kürlü numuneler)

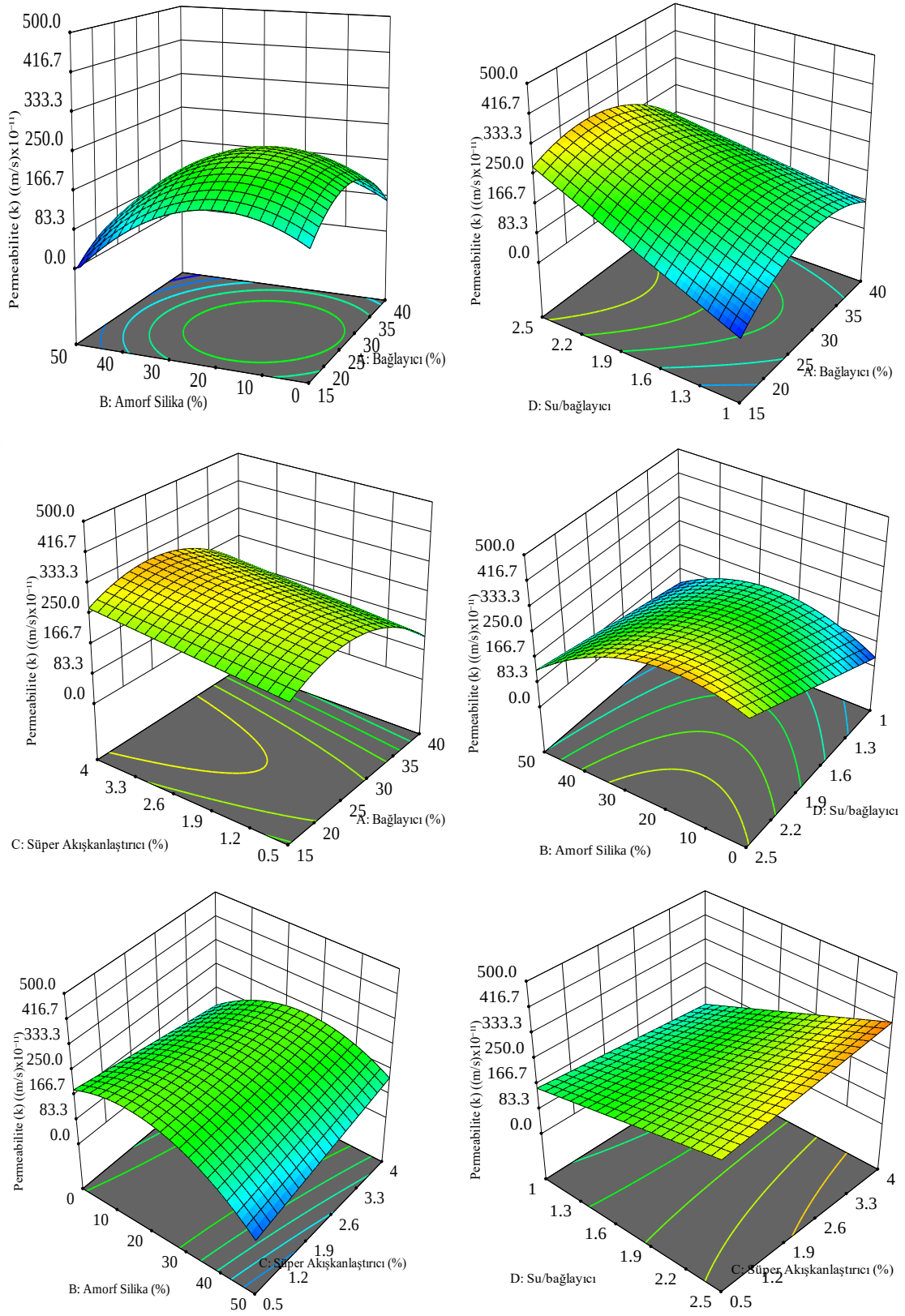
Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin hem 28 günlük kür hem de 28-56 günlük kürler beraber değerlendirildiğinde diğer parametrelerin ortalama kullanıldığı durumlarda geçirimsizliği artırdığı, su/bağlayıcı oranının düşürüldüğü seviyelerde geçirimsizliği azalttığı sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.). Enjeksiyon harcının işlenebilirliği ve enjeksiyonun pompalamada tıkanmalar yaşanmadan aktarılabilmesi için akışkanlaştırıcı katkı maddesinin kullanımı bu seviyelerde uygun olabilir. Süper akışkanlaştırıcının geçirimsizliğe etkisi ikili etkileşim grafikleri ile incelenirse (Şekil 4.15. ve Şekil 4.17.) su/bağlayıcı oranının azalması ile daha geçirimsiz bir numune elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.15. Killi zemin için parametrelerin ikili etkileşimlerinin geçirimsizlik katsayısına etkileri (28 günlük kürlü numuneler)



Şekil 4.16. Killi zemin için parametrelerin geçirimsizlik katsayısına etkileri (28-56 günlük kürlü numuneler)



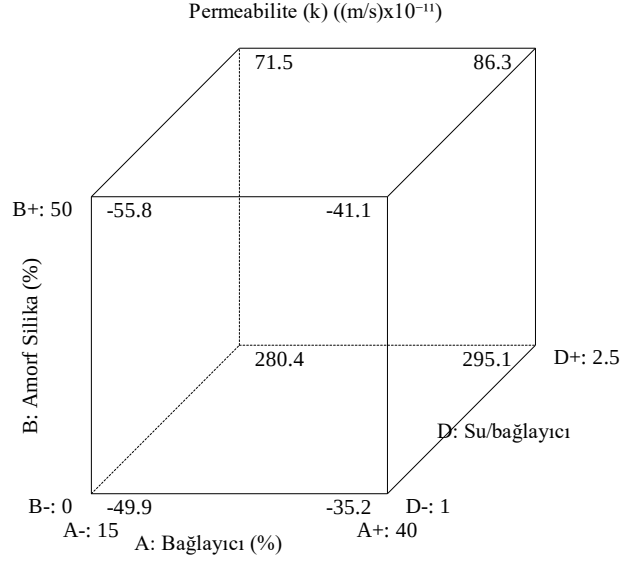
Şekil 4.17. Killi zemin için parametrelerin ikili etkileşimlerinin geçirimsizlik katsayısına etkileri (28-56 günlük kürlü numuneler)

Su/bağlayıcı oranının artması zeminin daha geçirimli hale gelmesine neden olmaktadır. Bağlayıcının hidratasyon mekanizmasının tamamlanması için gerekli olan su miktarından daha fazla suyun ortamda bulunması, bu suyun fazlasının zemin boşluklarını doldurmasına ve zaman içerisinde bu suyun buharlaşmasıyla daha boşluklu bir zemin yapısının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Fazla su zeminin geçirimliliğini artırmaktadır, ancak enjeksiyon harcının rahatlıkla pompalanabilmesi için belirli bir su/bağlayıcı oranının sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple derin karıştırma kolonlarında hedef dayanım ve hedef geçirimsizliği elde etmek için parametrelerin optimum kullanımıyla beraber su/bağlayıcı oranının da belirli bir sınır değerde kullanılması gerekmektedir.

Amorf silikanın artan yüzdesi ile birlikte parametrelerin hemen hemen her kullanım aralığında permeabilite katsayısı azalarak çok küçük seviyelere inmekte ve böylece daha geçirimsiz DKK oluşmaktadır (Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.). Tüm grafikler incelendiğinde amorf silikanın geçirimsizliğin azalması yönündeki etkisi net bir şekilde görülmektedir. Özellikle bağlayıcı yüzdesi içerisindeki amorf silika ikame yüzdesi %50 ye kadar çıktığında oldukça geçirimsiz DKK'ı elde edilmektedir. Amorf silikanın tanecik boyutlarının çok küçük olması ve mikro yapısal özellikleri, amorf silikanın artan yüzdelinde DKK'nın oluşturulabilmesi için daha fazla su ihtiyacına neden olmaktadır. Su/bağlayıcı oranının 1.30-1.50 civarında süper akışkanlaştırıcının 2.50 civarında ve amorf silika yüzdesinin %40-%50 aralıklarında olduğu durumlarda permeabilite katsayısı en düşük değerlerini (4×10^{-11} – 15×10^{-11}) almaktadır.

Şekil 4.14. ve Şekil 4.16. birlikte değerlendirildiğinde; DKK'nın özelliklerinin oluşmasında kür süresinin etkisi açıkça görülmektedir. Kür süresi 28 günden 56 güne çıktığında permeabilite katsayısı (k) yaklaşık %35 azalmakta ve daha geçirimsiz DKK oluşmaktadır.

Şekil 4.18. de 28 günlük kür süresi için permeabilite deney sonuçlarının analizine ait üçlü etkileşim grafiği verilmiştir. Amorf silikanın bağlayıcı yüzdesi içerisindeki ikame olarak kullanım yüzdesi artırıldığında (%0 dan %50 ye), su/çimento oranının 1.5-2.0 aralıklarında kullanıldığında permeabilite katsayısını %60 civarında azaltarak geçirimsizliğe büyük etki etmektedir.



Şekil 4.18. Killi zemin için permeabilite deneyinde parametrelerin üçlü etkileşim grafiği (28 günlük kürlenme)

4.2.2.2. Kumlu zeminlerde derin karıştırma kolonlarının permeabilitesi

Kumlu zeminlerle hazırlanan, 28 ve 56 günlük küre maruz bırakılmış numunelere ait permeabilite deney sonuçları Çizelge 4.10.'da verilmiştir. Deney sonuçlarına göre kür süresinin artmasıyla permeabilite katsayısının azaldığı, dolayısıyla numunelerin daha geçirimsiz hale geldiği görülmüştür.

Deney sonuçları YYY kullanılarak analiz edilmiştir. 28 günlük permeabilite deney sonuçlarına ait tasarım denklemi Eşitlik 4.8.'de; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.11.'de verilmiştir.

$$k_{28\text{gün,kum}} = 223.38 + (40.24*A) - (85.68*B) - (46.64*C) + (104.78*D) - (41.46*A*C) + (21.62*A*D) + (34.50*B*C) - (32.53*B*D) - (36.10*C*D) - (44.53*B^2) + (29.44*D^2) \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte verilen A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.10. Kumlu zemin için 28-56 gün kürlü numunelerin permeabilite deney sonuçları

Tasarım no	Tasarım parametreleri				Permeabilite katsayısı (k) (x10 ⁻¹¹ m/s)	
	Bağlayıcı (%)	Amorf silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı katkısı (%)	Su/bağlayıcı oranı	28 günlük kür	56 günlük kür
1	40.00	50.00	2.67	0.82	80.22	47.23
2	15.00	50.00	1.48	1.20	138.30	82.84
3	15.00	17.50	0.50	0.88	179.94	59.54
4	15.00	11.25	4.00	1.20	291.75	289.34
5	27.13	25.57	2.13	0.96	230.50	81.09
6	40.00	12.50	2.67	1.20	445.57	256.97
7	27.13	25.57	2.13	0.96	230.50	81.09
8	40.00	43.75	0.50	1.14	339.46	120.23
9	17.38	0.00	2.69	0.70	137.83	105.95
10	40.00	0.00	0.50	0.70	273.99	178.12
11	31.00	50.00	4.00	1.20	157.48	21.33
12	25.50	0.00	0.50	1.20	519.56	435.59
13	15.63	35.00	2.08	0.70	95.54	64.32
14	27.13	25.57	2.13	0.96	230.50	81.09
15	34.50	0.00	4.00	0.96	184.05	22.15
16	15.00	50.00	4.00	0.82	81.33	15.77
17	34.25	25.75	4.00	0.70	111.81	74.19
18	25.45	50.00	0.50	0.70	28.96	22.44

Çizelge 4.11.'de F değeri 361.14 olup kurulan model anlamlıdır. p değerleri incelendiğinde A, B, C, D, AC, AD, BC, BD, CD, B², D² terimleri anlamlı çıkmıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Hassasiyet değeri 71.86 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

56 günlük kürlü numunelerin permeabilite deney sonuçlarına ait tasarım denklemi Eşitlik 4.9.'da; ANOVA tablosu, R², düzeltilmiş R², tahmin edilen R² ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.12.'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 k_{56\text{gün,kum}} = & 81.28 + (2.09*A) - (77.65*B) - (33.3*C) + (64.71*D) + (19.11*A*B) - \\
 & (39.67*A*C) - (24.73*A*D) + (33.29*B*C) - (64.67*B*D) - (25.22*C*D) - (12.32*B^2) \\
 & - (25.90*C^2) + (97.42*D^2)
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte verilen A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.11. Kumlu zemin için ANOVA Analizleri (28 günlük kür -Permeabilite).

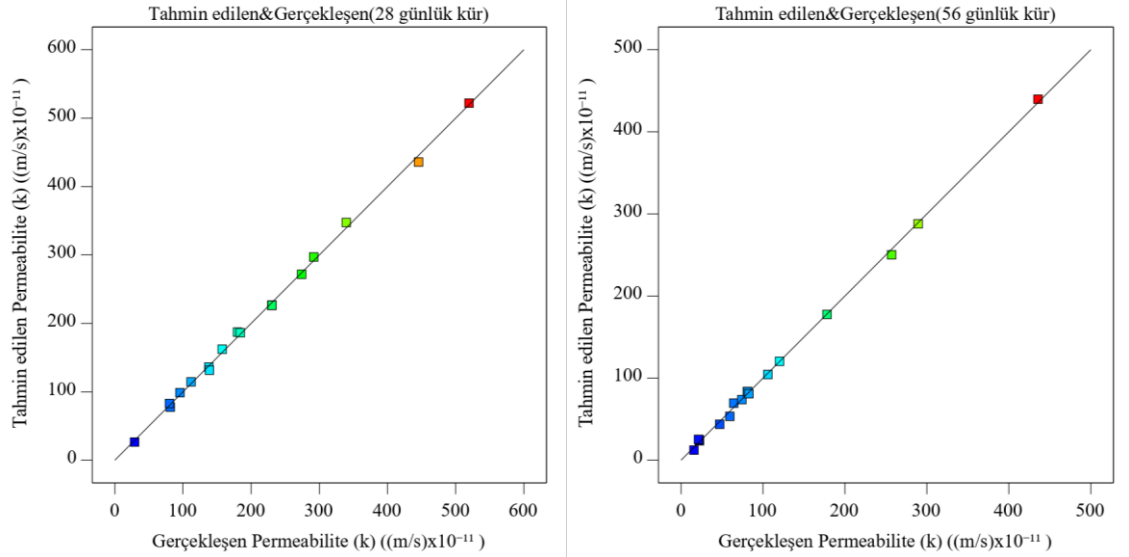
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	2.832E+05	11	25744.18	361.14	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	16119.25	1	16119.25	226.12	0.0001	
B-Amorf Silika	73024.43	1	73024.43	1024.39	0.0001	
C-Süper Akışk.	22337.92	1	22337.92	313.36	0.0001	
D-Su/bağlayıcı	1.200E+05	1	1.200E+05	1682.88	0.0001	
AC	9848.97	1	9848.97	138.16	0.0001	
AD	3150.12	1	3150.12	44.19	0.0006	
BC	8282.52	1	8282.52	116.19	0.0001	
BD	7635.70	1	7635.70	107.11	0.0001	
CD	4660.06	1	4660.06	65.37	0.0002	
B ²	5764.37	1	5764.37	80.86	0.0001	
D ²	2583.41	1	2583.41	36.24	0.0009	
R ²	0.9985					
Düzeltilmiş R ²	0.9957					
Tahmin Edilen R ²	0.9617					
Hassasiyet	71.8646					

Çizelge 4.12.' de F değerinin 316.81 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri için; A, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, B², C² D² terimleri anlamlı çıkarken B değeri anlamlı çıkmamıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçük olup, kurulan model anlamlı ve mantıklıdır. Hassasiyet değeri 67.95 olarak hesaplanmıştır ve istenilen değer olan 4'ten büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Kumlu zemine ait 28 ve 56 günlük kürlenmiş numunelerin permeabilite deney sonuçları kullanılarak yapılan analizlerde, gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.19.). Şekil 4.19.'da doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır hatta noktalar doğru üzerindedir. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.

Çizelge 4.12. Kumlu zemin için ANOVA Analizleri (56 günlük kür -permeabilite)

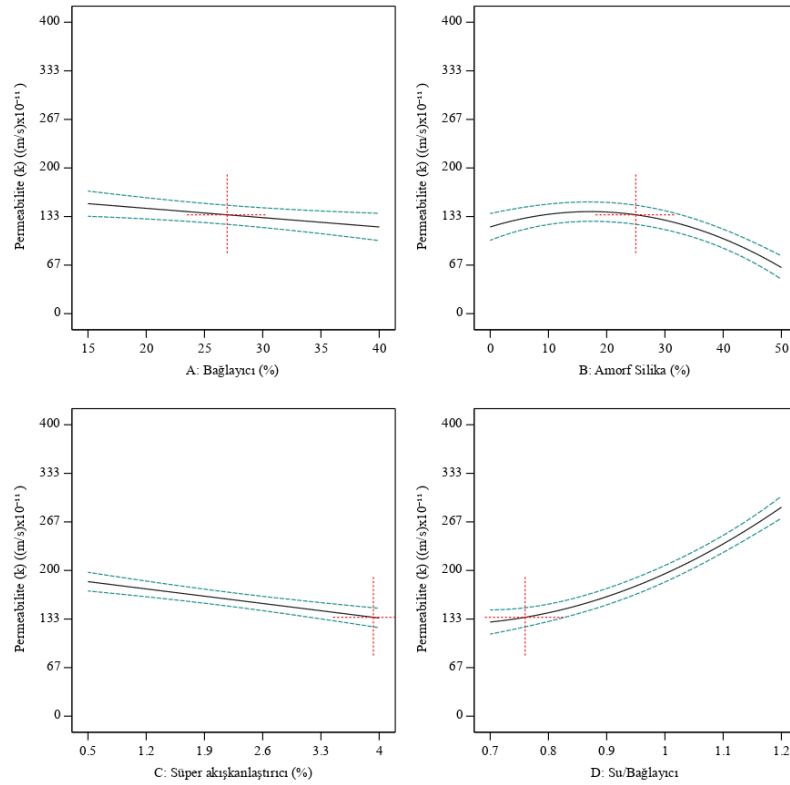
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	2.094E+05	13	16104.92	316.81	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	43.03	1	43.03	0.8465	0.4096	
B-Amorf Silika	59496.08	1	59496.08	1170.40	0.0001	
C-Süper Akışk.	11453.07	1	11453.07	225.30	0.0001	
D-Su/bağlayıcı	45360.51	1	45360.51	892.32	0.0001	
AB	2181.78	1	2181.78	42.92	0.0028	
AC	8900.31	1	8900.31	175.09	0.0002	
AD	3975.99	1	3975.99	78.21	0.0009	
BC	7531.63	1	7531.63	148.16	0.0003	
BD	29254.84	1	29254.84	575.50	0.0001	
CD	4318.81	1	4318.81	84.96	0.0008	
B ²	401.83	1	401.83	7.90	0.0482	
C ²	2152.33	1	2152.33	42.34	0.0029	
D ²	28046.04	1	28046.04	551.72	0.0001	
R ²	0.9990					
Düzeltilmiş R ²	0.9959					
Tahmin Edilen R ²	0.8783					
Hassasiyet	67.9563					

**Şekil 4.19.** Kumlu zemin için tahmin edilen - gerçekleşen deney sonuçları (28 ve 56 günlük kür)

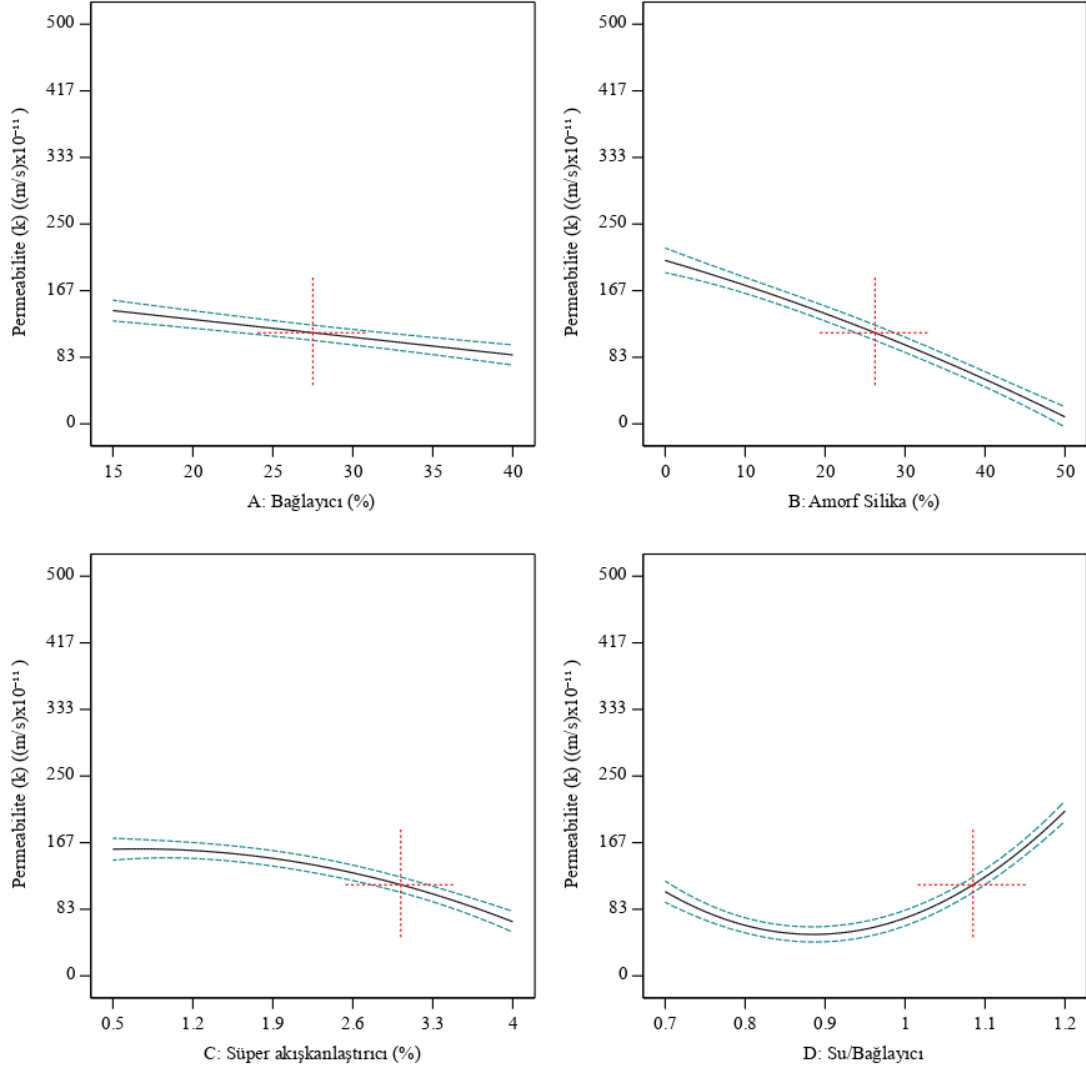
Yapılan analizlere göre parametrelerin geçirimsizlik katsayılarına olan etkileri 28 günlük kür süresi için Şekil 4.20.'de ve 56 günlük kür süresi için Şekil 4.21'de verilmiştir. Her iki kür süresi için de bağlayıcı miktarı arttıkça geçirimsizlik

azalmaktadır. Çizelge 4.12.'de F değerleri incelendiğinde geçirimsizliğin azalmasında parametreler içinde en az etkili olan parametre bağlayıcıdır.

ANOVA analizleri, Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'e göre permeabiliteye en çok etkisi olan parametre ise amorf silikadır. Permeabilite katsayısının minimum değeri amorf silikanın maksimum, diğer parametrelerin ise minimum olduğu durumda elde edilmiştir. Su/bağlayıcı oranını belli bir seviyenin üzerinde artırdığımızda bağlayıcı yüzdesi minimum seviyedeysen, amorf silikanın geçirimsizliğe olan etkisi azalmaktadır. Burada ki azalma, amorf silikanın geçirimsizliğe etkisinin olmadığı şeklinde yorumlanmamalıdır. Su/bağlayıcının yüksek seviyelerde kullanımının her şartta geçirimsizliği artırdığı unutulmamalıdır. Su/bağlayıcının en yüksek seviyede kullanımında dahi, amorf silikanın katkısıyla permeabilite katsayısı istenilen seviyelerin çok altında olmaktadır. Su/bağlayıcının yüksek seviyelerde kullanımında permeabilite katsayısını artırdığı durumlarda süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesinin artırılması ise bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı katkısının kullanımı enjeksiyon harcının işlenebilirliği açısından önemlidir. Süper akışkanlaştırıcı katkının her seviyede kullanımı permeabilite katsayısını azaltmakta ve daha geçirimsiz bir numune elde edilmesine katkı sağlamaktadır.



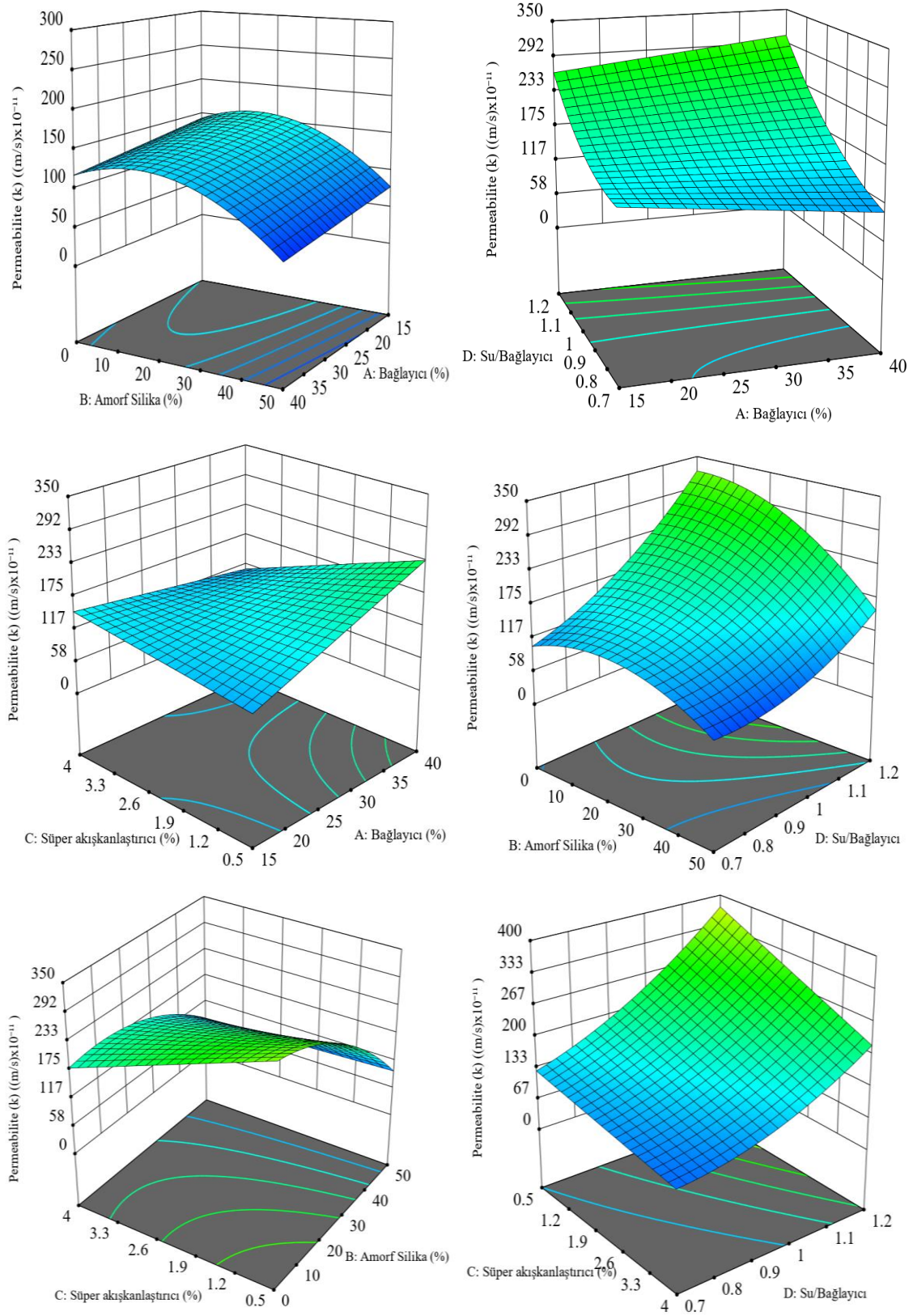
Şekil 4.20. Kumlu zemin için parametrelerin permeabiliteye etkileri (28 günlük kür)



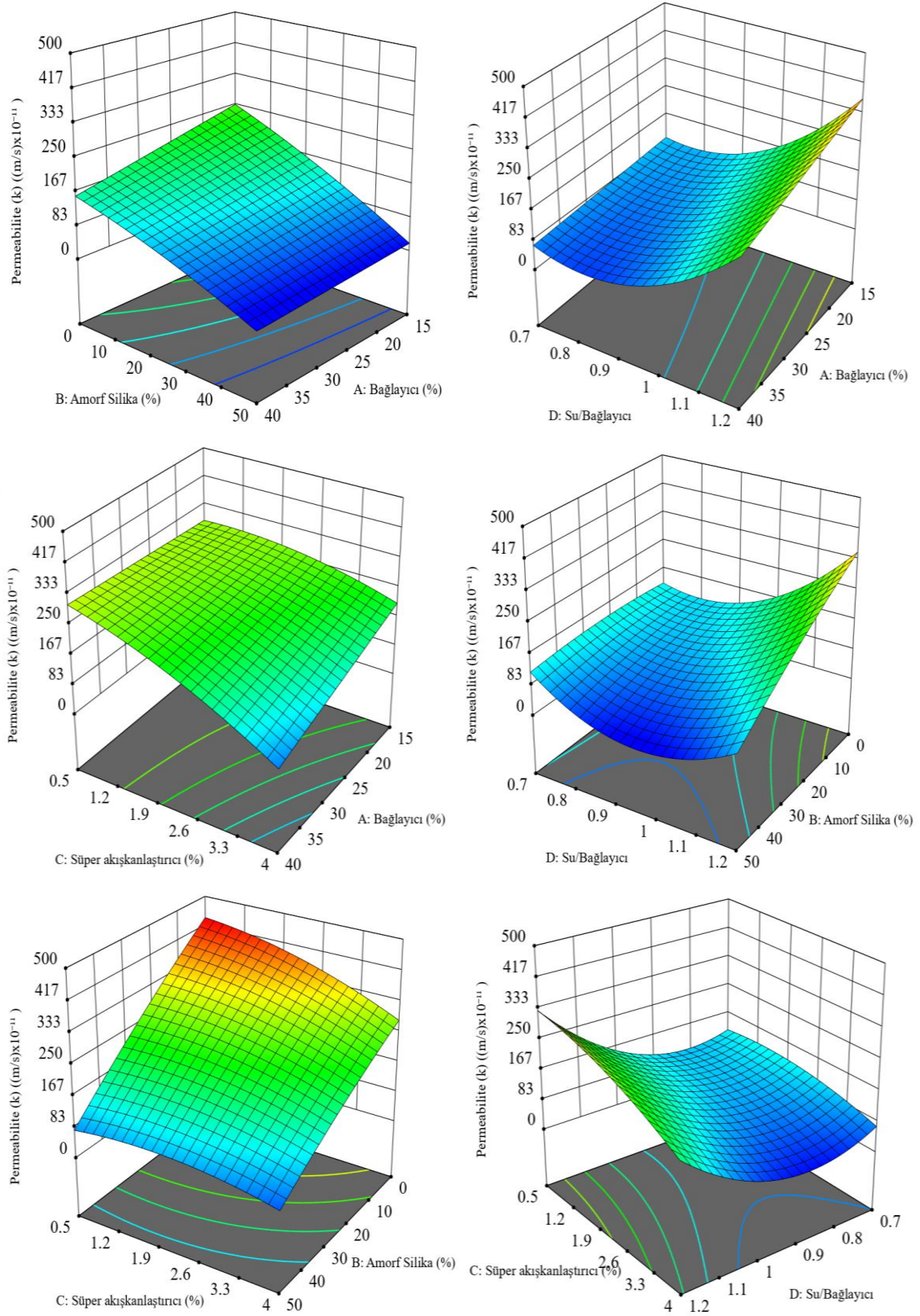
Şekil 4.21. Kumlu zemin için parametrelerin permeabiliteye etkileri (56 günlük kür)

Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.'te ikili etkileşim grafikleri incelendiğinde bağlayıcı yüzdesi ve amorf silika yüzdesinin artan oranlarında geçirimsizlik artmaktadır. Geçirimsizliğin arttığı bu durum aynı zamanda süper akışkanlaştırıcı katkısının maksimum ve su/bağlayıcı oranının minimum olduğu durumları da içermektedir. Bağlayıcı ve su/bağlayıcı parametrelerinin ikili etkileşimleri incelendiğinde; bağlayıcı miktarının su/bağlayıcı oranının düşük seviyelerinde daha etkin olduğu, bağlayıcı miktarının her seviyede kullanımında su/bağlayıcı oranının artmasının permeabilite katsayısını artırdığı görülmektedir.

Su/bağlayıcı oranının düşük oranlı kullanımı durumunda; permeabilite katsayısının düşük olması için bağlayıcı miktarının artan yüzdelere süper akışkanlaştırıcı katkısının da artırılması gerekmektedir (Şekil 4.22c).



Şekil 4.22. Kumlu zemin için parametrelerin ikili etkileşim grafikleri (28 günlük kürlenme)



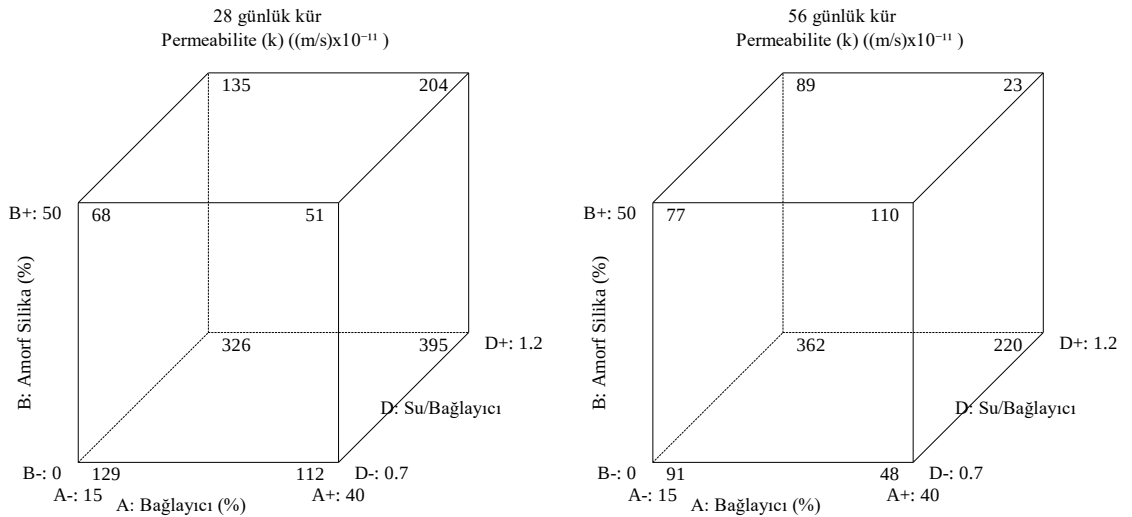
Şekil 4.23. Kumlu zemin için parametrelerin ikili etkileşim grafikleri (56 günlük kürlenme)

Su/bağlayıcı oranı ve amorf silika yüzdesinin ikili etkileşim grafiği incelendiğinde (Şekil 4.23d) amorf silika yüzdesinin maksimum olduğu seviyede su/bağlayıcı oranının artması permeabilite katsayısında artmaya sebep olurken, bu artış amorf silikanın minimum seviyede kullanımında daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının etkinliği için su/bağlayıcı oranının belirli bir orandan düşük olması gerekmektedir.

Şekil 4.24. te 28 günlük ve 56 günlük kür süreleri için permeabilite deney sonuçlarının analizine ait üçlü etkileşim grafikleri verilmiştir. Her iki kür süresi için de amorf silikanın her durumda kumlu zeminlerde permeabilite katsayısını azalttığı görülmektedir.

Kumlu zeminde 28 günlük ve 56 günlük kür süreleri sonunda numuneler üzerinde yapılan permeabilite deneylerinden elde edilen veriler birlikte değerlendirilmiştir. Verilerin analiziyle elde edilen tasarım denklemi Eşitlik 4.10.'da; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.13.'te verilmiştir.

$$k_{28\text{ve}56\text{gün,kum}} = 1055.24 + (21.70*A) - (232.10*B) - (125.97*C) + (1445.27*D) - (103.59*E) - (39.48*A*C) - (20.21*A*E) + (31.97*B*C) - (141.73*B*D) - (80.54*C*D) - (51.09*D*E) - (33.89*B^2) + (558.03*D^2) \quad (4.10)$$



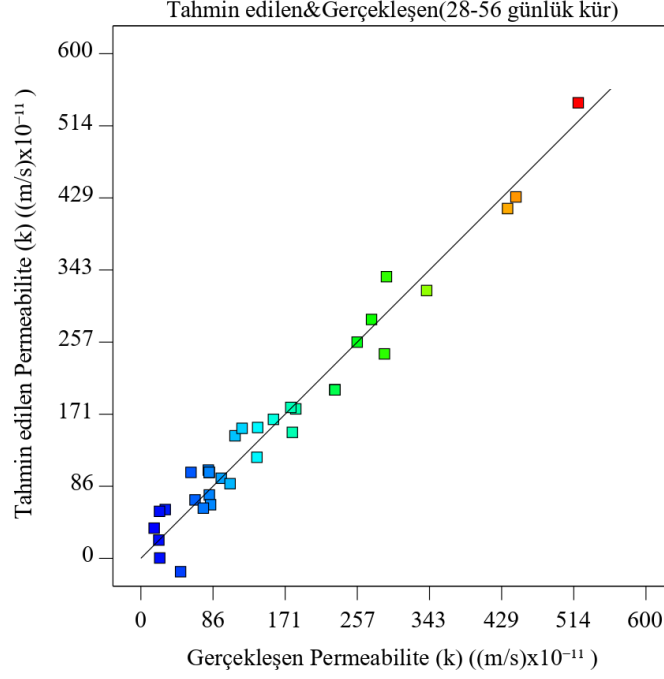
Şekil 4.24. Kumlu zemin için parametrelerin üçlü etkileşimi (28 ve 56 günlük kürlenme)

Çizelge 4.13.' te F değerinin 39.01 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde tüm terimler anlamlı çıkmıştır. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Çizelge 4.13. te hassasiyet değeri 27.12 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur.

Kumlu zemine ait 28- 56 günlük permeabilite deney sonuçlarıyla yapılan analizlerde, gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.25.). Şekil 4.25. te doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.

Çizelge 4.13. Kumlu zemin için ANOVA analizleri (28-56 günlük kür -permeabilite).

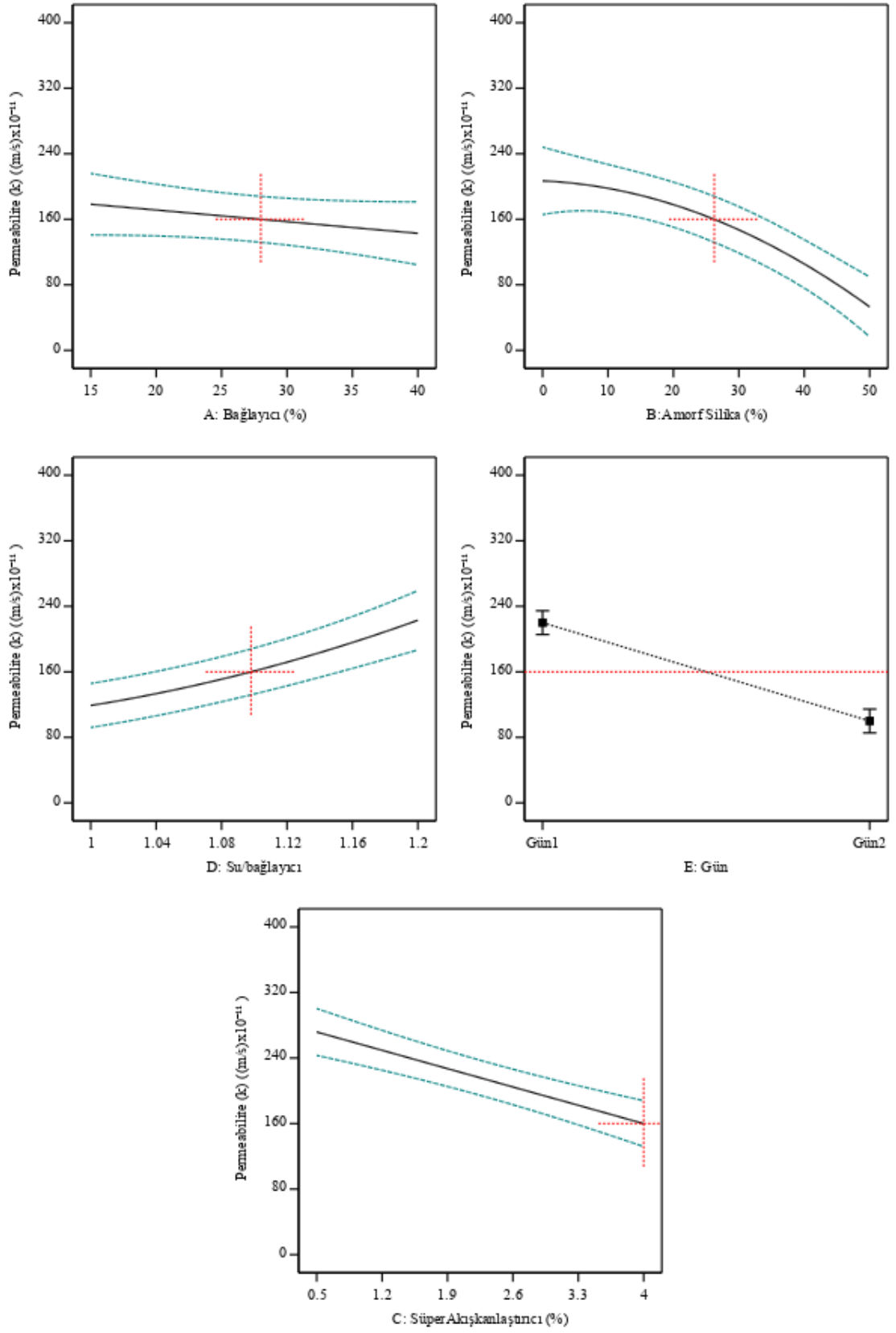
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	5.513E+05	13	42407.71	39.01	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	9380.66	1	9380.66	8.63	0.0076	
B-Amorf Silika	70125.96	1	70125.96	64.51	0.0001	
C-Süper Akışk.	20413.13	1	20413.13	18.78	0.0003	
D-Su/bağlayıcı	33969.39	1	33969.39	31.25	0.0001	
E-Gün	21723.79	1	21723.79	19.98	0.0002	
AC	17867.69	1	17867.69	16.44	0.0005	
AE	8363.50	1	8363.50	7.69	0.0111	
BC	14263.49	1	14263.49	13.12	0.0015	
BD	32373.49	1	32373.49	29.78	0.0001	
CD	10019.69	1	10019.69	9.22	0.0061	
DE	6471.81	1	6471.81	5.95	0.0232	
B ²	6742.29	1	6742.29	6.20	0.0208	
D ²	22913.96	1	22913.96	21.08	0.0001	
R ²	0.9584					
Düzeltilmiş R ²	0.9339					
Tahmin Edilen R ²	0.8793					
Hassasiyet	27.1214					



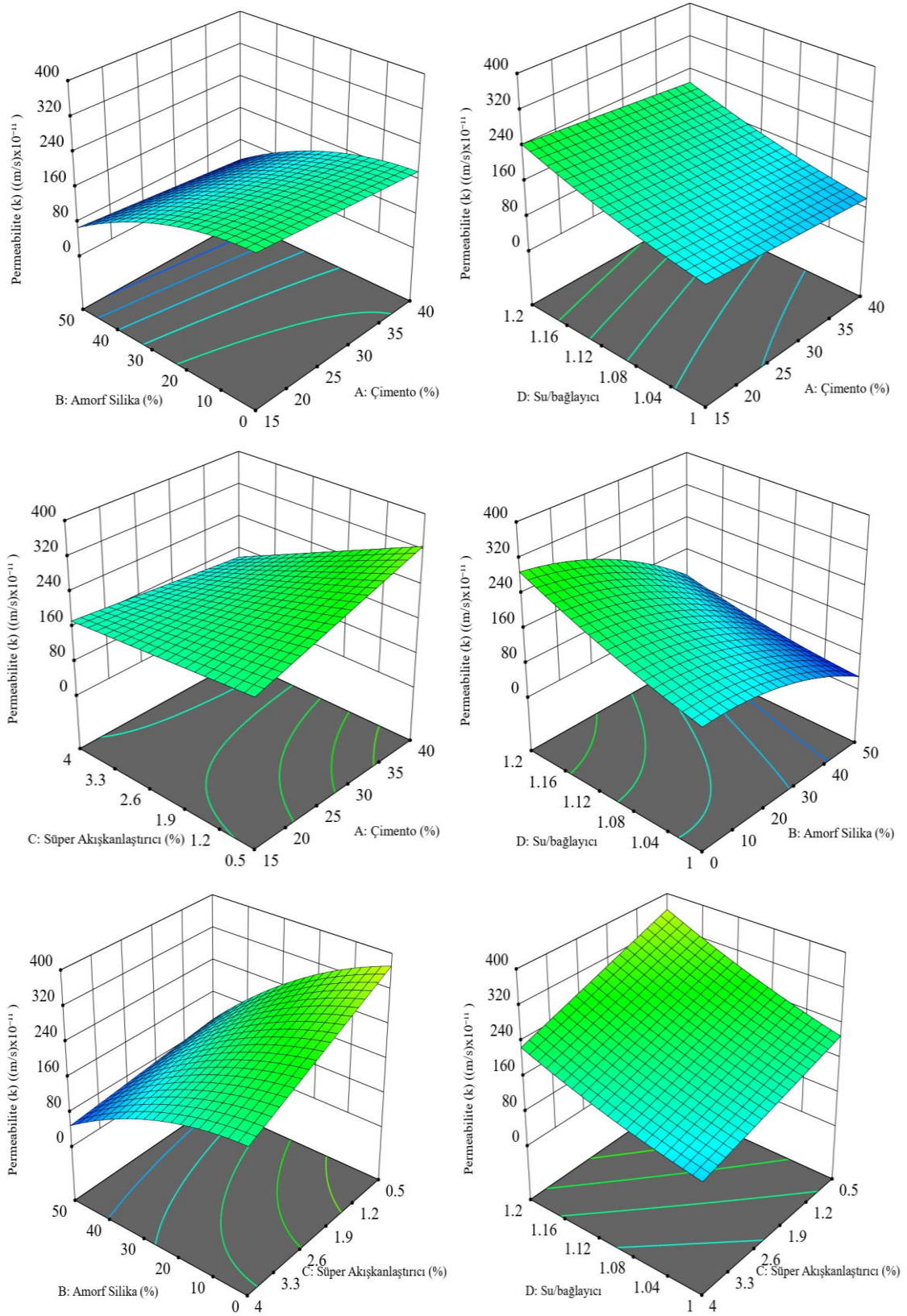
Şekil 4.25. Kumlu zemin için tahmin edilen ve gerçekleşen permeabilite katsayısı değerleri (28-56 günlük kürlenme)

Şekil 4.26.'da 28-56 günlük kürlenme süreleri sonunda yapılan deneylerde elde edilen permeabilite katsayılarının birlikte değerlendirilmesiyle, parametrelerin permeabilite katsayısına olan etkileri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 28 günlük kür süresi için ve 56 günlük kür süresi için ayrı ayrı yapılan analizlerin sonuçlarıyla benzer ve daha anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Amorf silikanın bağlayıcı miktarı içerisindeki yüzdesi artırıldığında (ikame yöntemle) permeabilite katsayısı azalmış ve numune daha geçirimsiz hale gelmiştir. Yine bağlayıcı yüzdesi artırıldığı zaman da permeabilite katsayısı azalmıştır. Su/bağlayıcı oranı artırıldığında ise permeabilite katsayısı değerleri beklenildiği gibi artmaktadır. Özellikle bağlayıcı ve amorf silikanın artan yüzdelerinde, süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesinin de artan miktarda kullanımı permeabilite katsayısını azaltmada olumlu yönde katkıda bulunmuştur.

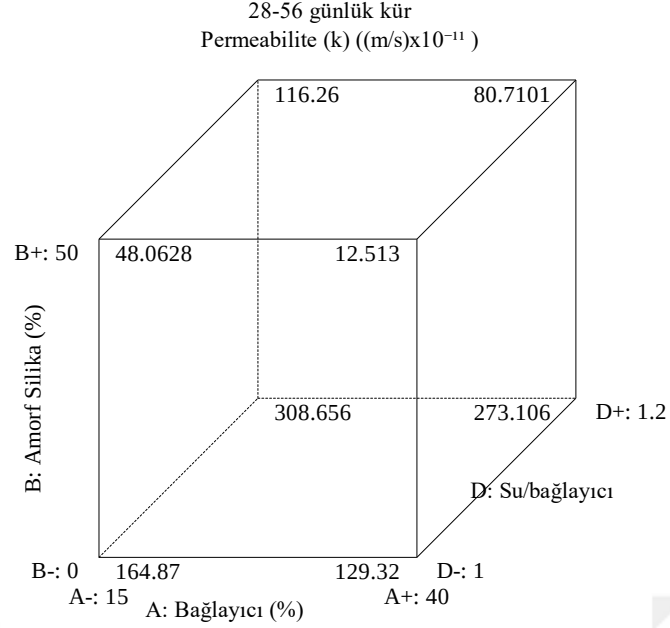
Kür süreleri analizlerde kategorik olarak değerlendirilmiştir. 28 günlük kür süresinden 56 günlük kür süresine geçişte permeabilite katsayısı azalmıştır. Grafikte Gün-1 olarak tarif edilen 28 günlük kür süresi ve Gün-2 olarak tarif edilen 56 günlük kür süresidir (Şekil 4.26d). Şekil 4.27.'de ise ikili parametrelerin permeabilite katsayısına olan etkileri verilmiştir. Bağlayıcı yüzdesinin permeabilite katsayısını azaltmada etkili olabilmesi için süper akışkanlaştırıcı katkının da %2.5 – 4.0 miktarında kullanılması gerekmektedir.



Şekil 4.26. Kumlu zemin için parametrelerin permeabiliteye etkileri (28-56 günlük kürlenmiş numuneler)



Şekil 4.27. Kumlu zemin için parametrelerin ikili etkileşimleri (28-56 günlük kürlenme süresi için)



Şekil 4.28. Kumlu zemin için parametrelerin üçlü etkileşimi (28- 56 günlük kür süreleri)

Şekil 4.28.'de 28 ve 56 günlük kür sürelerinin birlikte analiz edilmesi sonucu üçlü parametrelerin permeabiliteye olan etkileri verilmiştir. Su/bağlayıcı oranının minimum (1.0), amorf silika yüzdesinin minimum (%0) seçildiği durumda bağlayıcı yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%15 ten %40'a) permeabilite %21 azalırken, Su/bağlayıcı oranının minimum (1.0), amorf silika yüzdesinin maksimum (%50) seçildiği durumda bağlayıcı yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%15 ten %40'a) permeabilite %73 miktarında azalmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının bu seviyede permeabilite katsayısını azaltmada ki etkisi %52 olmuştur. Bu değişim miktarı oldukça önemlidir.

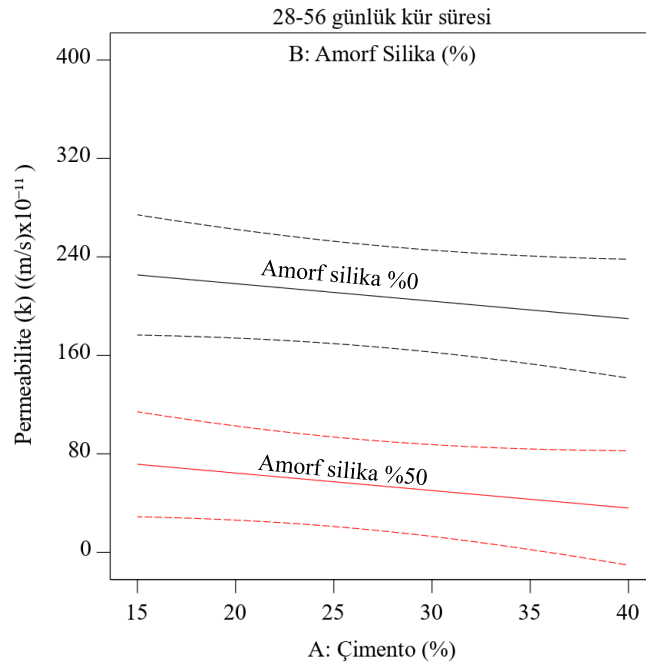
Su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), amorf silika yüzdesinin minimum (%0) seçildiği durumda bağlayıcı yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%15 ten %40'a) permeabilite %11 azalırken, su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), amorf silika yüzdesinin maksimum (%50) seçildiği durumda bağlayıcı yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%15 ten %40'a) permeabilite %31 azalmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının bu seviyede permeabiliteyi azaltmada %20 katkısı olmuştur.

Su/bağlayıcı oranının minimum (1.0), bağlayıcı yüzdesinin minimum (%15) seçildiği durumda amorf silika yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%0 ten %50'ye) permeabilite %70 azalırken, su/bağlayıcı oranının

minimum (1.0), bağlayıcı yüzdesinin maksimum (%40) seçildiği durumda amorf silika yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%0 ten %50'ye) permeabilite %90 azalmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının bu seviyede permeabiliteyi azaltmada %20 etkisi olmuştur.

Su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), bağlayıcı yüzdesinin minimum (%15) seçildiği durumda amorf silika yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%0 ten %50'ye) permeabilite %62 azalırken, su/bağlayıcı oranının maksimum (1.2), bağlayıcı yüzdesinin maksimum (%40) seçildiği durumda amorf silika yüzdesinin minimum seviyeden maksimum seviyeye artırılmasıyla (%0 ten %50'ye) permeabilite %70 azalmaktadır. Dolayısıyla amorf silikanın kullanımının bu seviyede permeabiliteyi azaltmada %8 etkisi olmuştur.

Şekil 4.29. da amorf silikanın kumlu zeminlerde permeabiliteye olan etkisi görülmektedir. Amorf silikanın kullanılmadığı bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı durumda permeabilite katsayıları daha büyük olurken, amorf silikanın bağlayıcı yüzdesi içerisinde çimentodan eksiltiilerek ikame yöntemle artan yüzdeyle %50 ye kadar kullanımında permeabilite katsayısının oldukça düşük değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 4.29. Kumlu zemin için amorf silikanın permeabiliteye etkisi (28-56 günlük kürlenme)

4.3. Optimizasyon Çalışmaları ve Optimum Tasarım (Doğrulama) Deneyleri

Deneyisel çalışmalar kapsamında İstatistiksel varyans analizleri (ANOVA) Design Expert V11 programı ile gerçekleştirilmiştir. Design Expert V11 istatistiksel deney tasarımları yapmaya yarayan bir programdır. Deney tasarım metotları ile işlemlerin ve ürünlerin daha verimli olmasını sağlar. Küçük ölçekli deneylerden elde edilen veriler hem killi hem de kumlu zeminlerde 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda yapılan serbest basınç ve permeabilite deneyleri için ayrı ayrı; kür süreleri ve zemin türleri kategorik olarak değerlendirilerek birlikte olmak üzere analiz edilmişlerdir. Optimizasyonda yer alan parametreler ile analiz sonucu yanıtlar arasındaki ilişkiyi açıklayan matematiksel modeller ise çoklu lineer regresyon analizleri ile oluşturulmuştur. Programın tarafından oluşturulan modellere her bir parametrenin lineer, quadratik, kübik, 2FI, quartik etki terimleri eklenerek sonuçlar analiz edilmiştir. Analizlerde anlamsız etki terimleri elenerek modeller modifiye edilmiş ve en anlamlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Optimizasyon çalışmaları sürecinde yapılan analizlerde; Serbest basınç mukavemeti (q_u) açısından yüksek dayanım, permeabilite açısından minimum geçirimsizlik ve bağlayıcı miktarı içerisindeki çimentonun minimize edilip amorf silikanın ise daha fazla kullanılması hedeflenmiştir. Belirlenen bu hedefe göre literatürdeki laboratuvar ve arazi çalışmalarının sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle serbest basınç mukavemeti ve geçirimsizlik açısından uygun değer aralıkları belirlenerek optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Design Expert V11 programı kullanılarak YYY ile oluşturulan modellerde programa istenilen değer aralıkları veya hedeflenen değerler araştırmacı tarafından önerilmekte, bu öneriye ulaşacak şekilde program parametrelere uygun miktarlar ve oranlar tahmin etmektedir.

DKK için hazırlanan projelerde serbest basınç mukavemeti genellikle 2000-5000 kPa aralıklarında seçilmektedir (Miyoshi ve Hirayama, 1996). Bruce ve Bruce (2003) ıslak derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilen kohezyonlu zeminlerde serbest basınç dayanımının 0.2-2 MPa, granüler zeminlerde ise 0.5-5 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Kitazume ve Terashi (2012) ise derin karıştırma yöntemiyle farklı bağlayıcı dozajı için iyileştirilmiş zeminlerin serbest basınç mukavemet değerlerini killi zeminler için 0.2-5 MPa, kumlu zeminler için 2-11 MPa olarak belirtmişlerdir. Marzano ve ark. (2009) yaptıkları laboratuvar çalışmalarında iyileştirilmiş tabakalı zeminin geçirimsizlik ve

mukavemet özelliklerini araştırmışlar ve farklı tür zemin ve farklı miktar dozajlarda yaptıkları zemin iyileştirmeleriyle serbest basınç mukavemetini 200-10000 kPa, permeabilite katsayılarını ise $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-10}$ m/s aralıklarında bulmuşlardır. Chew ve ark. (2020) farklı tür zemin ve farklı miktar dozajlarda yaptıkları derin karıştırma yöntemiyle zemin iyileştirmesinde serbest basınç mukavemetini 500-4000 kPa, permeabilite katsayılarını ise $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-10}$ m/s aralıklarında bulmuşlardır.

Literatür, arazi şartları ve tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları irdelenerek, serbest basınç mukavemeti ve permeabilite katsayısı için belirli bir hedef yerine değer aralıkları verilerek optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Her iki zemin türü, her iki kür süresi ve her iki deney türü için ayrı ayrı ve birlikte optimizasyon denemeleri yapılmıştır. Dolayısıyla toplamda 19 farklı optimizasyon çalışması yürütülmüştür.

Killi zeminde 28 günlük kürlenmiş deney numunelerinin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.14.'te verilmiştir. Optimizasyon sonucu programın sağlamış olduğu 100 çözümlemeden 10 tanesi verilmiştir.

Çizelge 4.14. Killi zeminde 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	35.68	33.52	0.98	1.49	3018.03	1.0
2	36.49	28.60	2.90	1.95	1556.08	1.0
3	30.69	26.67	1.95	2.45	1135.77	1.0
4	33.05	33.91	0.51	2.30	1192.16	1.0
5	30.40	34.07	3.17	1.91	1377.20	1.0
6	32.50	26.23	1.34	1.71	2081.30	1.0
7	36.53	28.28	2.58	1.49	3213.76	1.0
8	33.82	27.79	2.51	1.90	1604.04	1.0
9	39.05	26.32	3.45	1.47	3436.82	1.0
10	36.34	34.12	3.95	1.43	3543.10	1.0

Killi zeminde 56 günlük kürlenmiş deney numunelerinin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının analiziyle bulunan optimizasyon verileri Çizelge 4.15.'te verilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen 100 çözümlemeden 10 tanesi Çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Killi zeminde 56 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	37.34	29.15	1.94	1.08	6331.29	1.0
2	38.71	34.36	3.00	1.48	4168.97	1.0
3	36.44	33.64	0.98	1.03	6147.58	1.0
4	39.34	32.76	3.27	1.96	1288.61	1.0
5	38.90	31.21	1.11	1.95	1504.23	1.0
6	37.49	30.41	3.51	1.82	1949.73	1.0
7	39.26	34.79	3.71	1.37	5055.54	1.0
8	38.63	31.96	0.59	1.62	3125.84	1.0
9	37.69	28.46	3.35	2.49	1199.40	1.0
10	37.83	26.20	3.14	2.07	946.62	1.0

Killi zeminde 28 ve 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının kür süresinin kategorik olarak değerlendirilerek birlikte analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.16.'da verilmiştir. Optimizasyon sonucu programın sağlamış olduğu 100 çözümlemeden 10 tanesi verilmiştir. Çizelgede Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük kür süresini ifade etmektedir.

Killi zeminde 28 günlük kürlenmiş numunelerin permeabilite deney sonuçlarının analiziyle bulunan optimizasyon verileri Çizelge 4.17.'de verilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen 100 çözümlemeden 10 tanesi verilmiştir.

Çizelge 4.16. Killi zeminde 28-56 günlük kür süresi sonunda elde edilen serbest basınç mukavemeti değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	32.31	35.00	3.21	1.29	Gün2	4127.14	1.0
2	39.91	35.00	0.86	1.29	Gün2	4488.79	1.0
3	35.92	35.00	3.51	1.92	Gün2	1633.29	1.0
4	36.61	35.00	3.54	1.91	Gün2	1692.11	1.0
5	31.82	35.00	2.54	1.36	Gün1	3612.26	1.0
6	30.33	35.00	3.83	2.19	Gün1	938.17	1.0
7	37.53	35.00	2.03	1.30	Gün1	4363.01	1.0
8	33.82	35.00	2.58	1.87	Gün1	1767.23	1.0
9	39.61	35.00	2.33	2.40	Gün2	1335.35	1.0
10	34.75	35.00	2.34	1.61	Gün2	2684.86	1.0

Çizelge 4.17. Killi zeminde 28 günlük kür süresi sonunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Permeabilite(k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	34.87	25.82	2.17	1.71	201.40	1.0
2	36.57	32.48	2.61	1.10	83.13	1.0
3	35.89	25.75	3.15	1.03	79.56	1.0
4	34.92	26.02	3.72	1.26	127.18	1.0
5	36.15	33.71	3.41	1.34	124.98	1.0
6	30.66	31.70	0.82	2.31	249.28	1.0
7	33.13	29.33	2.86	1.44	170.55	1.0
8	34.15	34.79	3.53	1.00	87.08	1.0
9	34.12	25.84	1.69	1.52	177.05	1.0
10	37.44	32.72	1.76	1.40	110.11	1.0

Killi zeminde 56 günlük kürlenmiş numunelerin permeabilite deney sonuçlarının optimizasyonu ile bulunan sonuçlar Çizelge 4.18.'de verilmiştir.

Killi zeminde 28 ve 56 günlük küre tabii tutulan deney numuneleri üzerinde yapılan geçirimsizlik deneylerinde elde edilen permeabilite katsayılarının, kür sürelerinin kategorik olarak değerlendirilip birlikte analiziyle yapılan optimizasyon çalışması sonuçları Çizelge 4.19.'da verilmiştir. Çizelgede Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük kür süresini ifade etmektedir.

Çizelge 4.18. Killi zeminde 56 günlük kür süresi sonunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Permeabilite(k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	36.33	30.64	2.39	1.15	119.35	1.0
2	35.00	31.37	1.56	1.12	99.54	1.0
3	30.79	29.21	2.07	1.01	71.38	1.0
4	32.03	33.38	2.24	1.02	63.93	1.0
5	39.29	34.52	0.63	2.27	91.66	1.0
6	35.49	31.14	3.15	2.49	118.63	1.0
7	31.04	32.03	3.80	1.03	84.23	1.0
8	34.70	29.98	3.27	1.11	113.24	1.0
9	36.73	33.69	2.70	2.50	96.82	1.0
10	39.76	25.33	3.46	2.43	106.34	1.0

Çizelge 4.19. Killi zeminde 28-56 günlük kür süresi sonunda elde edilen permeabilite katsayısı değerleri için optimizasyon çalışmaları

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Permeabilite(k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	38.08	27.74	0.76	2.18	Gün2	76.41	1.0
2	39.95	25.02	3.97	1.00	Gün1	79.87	1.0
3	39.91	25.04	4.00	1.00	Gün1	79.94	1.0
4	40.00	25.00	3.99	1.01	Gün1	79.82	1.0
5	37.34	25.63	3.93	1.03	Gün2	77.30	1.0
6	37.90	34.18	3.52	1.05	Gün2	75.24	1.0
7	38.29	34.23	3.36	1.17	Gün2	73.61	1.0
8	38.77	29.74	3.32	1.05	Gün2	69.84	1.0
9	38.54	34.56	2.03	1.23	Gün2	65.71	1.0
10	39.88	31.28	1.87	1.45	Gün2	56.14	1.0

Killi zeminde 28 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.20.'de verilmiştir. Optimizasyon sonucu programın sağlamış olduğu 94 çözümlerden 10 tanesi verilmiştir.

Killi zeminde 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.21.'de verilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen 100 çözümlerden 10 tanesi verilmiştir.

Çizelge 4.20. Killi zeminde 28 günlük kürlenmiş numuneler için serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	39.92	29.25	0.82	1.63	3046	148.43	1.0
2	35.79	33.55	2.49	1.25	4825	132.67	1.0
3	38.54	26.53	1.20	1.28	4785	148.06	1.0
4	32.68	28.62	2.09	1.21	4821	141.59	1.0
5	34.09	34.01	1.62	1.29	4268	140.57	1.0
6	36.88	28.78	2.90	1.32	4581	142.18	1.0
7	30.66	28.20	1.86	1.23	4432	148.61	1.0
8	38.01	25.79	3.71	1.44	4042	139.89	1.0
9	33.30	34.06	3.09	1.22	4879	130.62	1.0
10	34.51	34.21	3.43	1.27	4748	135.88	1.0

Çizelge 4.21. Killi zeminde 56 günlük kürlenmiş numuneler için serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	38.20	32.14	3.50	1.24	4760	69.94	1.0
2	38.07	33.04	2.34	1.02	6151	56.45	1.0
3	39.33	33.18	0.73	1.05	5708	73.20	1.0
4	34.21	26.99	3.60	1.00	6032	77.08	1.0
5	37.95	30.93	1.81	1.06	5823	76.65	1.0
6	39.91	28.35	3.17	1.38	4072	75.61	1.0
7	37.47	30.27	2.75	1.14	5353	77.71	1.0
8	39.58	34.63	3.57	1.31	4451	54.23	1.0
9	39.98	34.84	0.80	1.16	5064	65.25	1.0
10	35.66	25.00	3.93	1.02	6062	55.23	1.0

Killi zeminde 28-56 günlük kürlenmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının kür süresinin kategorik olarak değerlendirilerek birlikte analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.22.'de verilmiştir.

Kumlu zeminde 28 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.23.'te verilmiştir. Çizelgede optimizasyon sonucu programın sağlamış olduğu 100 çözümlemenden 10 tanesi verilmiştir.

Çizelge 4.22. Killi zeminde 28-56 günlük kürlenmiş numuneler için serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışk. (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	39.38	34.39	3.92	1.08	Gün1	5920	79.05	1.0
2	39.87	26.94	3.99	1.08	Gün1	5973	76.85	1.0
3	39.91	31.51	3.91	1.10	Gün1	5819	78.84	1.0
4	39.96	31.71	3.75	1.09	Gün1	5897	79.37	1.0
5	39.92	31.34	1.61	1.45	Gün2	4012	77.07	1.0
6	39.99	33.66	0.53	1.43	Gün2	3975	73.89	1.0
7	37.13	30.05	2.84	1.11	Gün2	5920	75.18	1.0
8	35.96	25.20	3.99	1.12	Gün2	5852	69.53	1.0
9	33.01	34.98	3.53	1.07	Gün2	5900	78.14	1.0
10	39.02	29.59	2.35	1.13	Gün2	5945	66.14	1.0

Çizelge 4.23. Kumlu zeminde 28 günlük kürlenmiş numuneler için serbest basınç mukavemeti değerlerinin optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	38.98	29.43	1.35	0.81	11589	1.0
2	37.46	33.70	2.36	0.94	7255	1.0
3	36.79	28.35	2.65	0.85	9407	1.0
4	34.73	34.62	1.51	0.94	7544	1.0
5	31.53	25.22	3.83	0.89	7652	1.0
6	36.64	26.81	2.90	0.92	7787	1.0
7	39.20	27.03	3.95	0.82	9616	1.0
8	39.75	28.80	3.63	0.97	6110	1.0
9	37.24	34.88	2.71	0.86	8609	1.0
10	30.95	27.32	1.31	0.83	10042	1.0

Kumlu zeminde 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının analiziyle bulunan optimizasyon sonuçları Çizelge 4.24.'te verilmiştir.

Kumlu zeminde 28 ve 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarının kür süresinin kategorik olarak değerlendirilmesi ve birlikte analiziyle elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 4.25.'te verilmiştir. Çizelgede Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük kür süresini ifade etmektedir.

Çizelge 4.24. Kumlu zeminde 56 günlük kürlenmiş numuneler için serbest basınç mukavemeti değerlerinin optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	39.12	28.29	2.30	0.86	11434.18	1.0
2	37.30	27.41	0.85	0.95	10112.24	1.0
3	36.16	34.24	1.01	1.00	8643.84	1.0
4	31.09	25.99	3.18	0.87	10259.18	1.0
5	33.81	28.10	1.71	0.75	13289.28	1.0
6	31.36	30.41	1.55	0.85	11125.43	1.0
7	31.90	28.18	1.44	0.74	13366.63	1.0
8	38.42	28.37	3.71	0.92	9707.97	1.0
9	35.42	31.74	3.94	0.77	12020.14	1.0
10	34.64	25.07	1.16	0.93	10182.57	1.0

Çizelge 4.25. Kumlu zeminde 28-56 günlük kürlenmiş numuneler için Serbest basınç mukavemeti değerlerinin optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	İstenirlik yüzdesi
1	37.15	32.65	2.26	1.01	Gün2	7143.67	1.0
2	34.25	25.75	4.00	0.70	Gün2	13564.92	1.0
3	31.10	32.50	2.54	1.09	Gün1	4263.16	1.0
4	37.30	31.25	1.46	1.16	Gün1	4030.40	1.0
5	33.81	31.42	1.77	0.81	Gün1	10213.26	1.0
6	36.74	26.67	2.84	0.90	Gün1	8516.52	1.0
7	31.95	27.38	0.71	1.20	Gün1	3350.03	1.0
8	39.73	28.43	2.53	0.82	Gün1	11034.46	1.0
9	39.78	32.27	3.64	0.83	Gün1	9905.70	1.0
10	37.93	30.14	3.19	1.11	Gün1	4415.53	1.0

Kumlu zeminde 28 günlük kürlenmiş numuneler üzerinde yapılmış permeabilite deney sonuçlarının analiziyle elde edilen optimizasyon verileri Çizelge 4.26.'da verilmiştir. Çizelgede optimizasyon ile belirlenmiş olan 100 adet çözümden 10 tanesi verilmiştir.

Kumlu zeminde 56 günlük küre maruz kalmış numuneler üzerinde yapılmış permeabilite deney sonuçlarının kullanımıyla optimizasyonu ile elde edilen veriler Çizelge 4.27.'de gösterilmiştir. Çizelgede elde edilen 100 adet çözümden 10 tanesi verilmiştir.

Çizelge 4.26. Kumlu zeminde 28 günlük kürlenmiş numuneler için permeabilite katsayılarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Permeabilite(k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	36.74	28.73	2.25	0.90	219.21	1.0
2	33.27	27.32	2.25	1.00	256.79	1.0
3	38.66	26.10	2.25	0.96	259.36	1.0
4	30.09	28.36	2.25	0.90	197.61	1.0
5	34.54	29.39	2.25	0.86	194.90	1.0
6	32.91	33.69	2.25	0.86	173.12	1.0
7	30.08	25.23	2.25	1.00	252.19	1.0
8	34.43	31.79	2.25	0.84	175.98	1.0
9	32.93	32.46	2.25	0.95	212.33	1.0
10	31.68	30.07	2.25	0.80	165.20	1.0

Çizelge 4.27. Kumlu zeminde 56 günlük kürlenmiş numuneler için permeabilite katsayılarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Permeabilite(k) 10^{-11} m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	30.26	29.57	3.03	1.14	132.21	1.0
2	38.42	26.39	3.21	0.90	34.48	1.0
3	39.60	27.39	1.94	0.80	100.42	1.0
4	38.52	27.89	3.49	0.87	21.36	1.0
5	39.08	29.73	1.14	1.05	134.40	1.0
6	30.18	28.31	2.78	0.99	66.68	1.0
7	30.43	32.94	3.66	0.82	32.49	1.0
8	33.41	26.51	1.96	0.92	80.47	1.0
9	31.71	34.29	1.02	1.02	86.56	1.0
10	38.02	31.22	1.08	0.86	91.49	1.0

Kumlu zeminde 28 ve 56 günlük küre maruz kalmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen permeabilite deney sonuçlarının kür süresinin de kategorik olarak dikkate alınmasıyla analiz edilmesi sonucu elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 4.28.'de verilmiştir. Çizelgede Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük kür süresini ifade etmektedir.

Kumlu zeminde 28 günlük küre maruz bırakılmış numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimize edilmesiyle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.29.'da verilmiştir.

Çizelge 4.28. Kumlu zeminde 28-56 günlük kürlenmiş numuneler için permeabilite katsayılarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Permeabilite(k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	37.74	19.76	3.07	0.91	Gün2	72.75	1.0
2	34.25	25.75	4.00	0.70	Gün2	54.91	1.0
3	39.97	26.28	0.97	0.98	Gün1	311.09	1.0
4	39.17	19.59	3.37	1.04	Gün1	235.89	1.0
5	38.78	15.35	3.83	0.70	Gün1	134.74	1.0
6	39.16	23.21	3.06	0.77	Gün1	170.93	1.0
7	37.87	29.36	2.95	0.77	Gün1	164.91	1.0
8	30.04	33.41	1.58	0.71	Gün1	160.01	1.0
9	30.93	29.99	1.39	0.72	Gün1	173.54	1.0
10	31.09	20.12	2.13	1.12	Gün1	341.33	1.0

Çizelge 4.29. Kumlu zeminde 28 günlük kürlenmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	34.23	29.46	3.98	0.82	9.00	118.36	1.0
2	36.43	30.77	3.82	0.94	6.49	168.45	1.0
3	37.67	27.79	3.31	0.97	6.42	195.02	1.0
4	37.83	26.44	0.80	0.88	10.37	161.29	1.0
5	34.24	29.93	2.63	0.83	9.65	118.56	1.0
6	30.03	31.44	2.03	0.85	8.82	112.25	1.0
7	37.70	29.88	2.15	0.93	7.99	170.96	1.0
8	32.53	28.68	3.84	0.85	8.32	129.08	1.0
9	37.80	27.51	3.04	0.91	7.81	172.74	1.0
10	33.05	26.23	1.75	0.99	6.76	197.39	1.0

Kumlu zeminde 56 günlük küre maruz kalmış numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonundan elde edilen sonuçlar Çizelge 4.30.'da verilmiştir.

Kumlu zeminde 28-56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının, kür süresinin de kategorik değişken olarak dikkate alındığı durumda değerlendirilmesiyle elde edilen optimizasyon sonuçları Çizelge 4.31.'de verilmiştir. Optimizasyon sonucu 100 adet çözüm elde edilmiş olup, ilk 10 sonuç çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.30. Kumlu zeminde 56 günlük küre maruz kalmış numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışkanlaştırıcı (%)	Su/bağlayıcı	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	32.06	30.89	3.98	0.81	10.92	63.46	1.0
2	39.87	31.20	3.48	0.81	11.85	43.07	1.0
3	34.09	33.61	3.85	0.81	10.94	52.43	1.0
4	33.58	34.56	3.99	0.97	7.88	55.34	1.0
5	35.59	32.21	3.97	0.92	9.06	41.66	1.0
6	39.77	30.26	3.27	0.80	12.04	68.50	1.0
7	38.05	29.95	3.89	0.84	10.91	26.22	1.0
8	33.87	30.20	3.99	0.84	10.52	55.14	1.0
9	39.37	34.06	3.55	0.81	11.64	30.11	1.0
10	39.88	34.56	3.16	0.87	10.59	62.78	1.0

Çizelge 4.31. Kumlu zeminde 28-56 günlük kürlenmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti ve permeabilite deney sonuçlarının birlikte optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışk. (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	35.80	33.45	2.68	0.90	Gün2	123.04	35.80	1.0
2	34.25	25.75	4.00	0.70	Gün2	48.29	34.25	1.0
3	36.30	28.99	2.91	0.88	Gün1	126.21	36.30	1.0
4	38.60	28.70	3.67	0.86	Gün1	107.32	38.60	1.0
5	33.20	28.18	2.21	1.00	Gün1	182.07	33.20	1.0
6	39.63	25.80	0.80	0.76	Gün1	149.65	39.63	1.0
7	35.76	31.65	3.50	0.88	Gün1	103.72	35.76	1.0
8	39.06	33.42	3.94	1.01	Gün1	137.57	39.06	1.0
9	31.64	31.38	2.92	0.87	Gün1	107.61	31.64	1.0
10	36.87	32.28	1.08	0.87	Gün1	153.45	36.87	1.0

Tez çalışması kapsamında iki tür zemin iki farklı kür süresi ve iki farklı deney sonuçlarının ayrı ayrı ve birlikte analizleriyle 18 farklı optimizasyon ortaya çıkmış ve dolayısıyla bu optimizasyon verilerinin matematiksel modellerle hesaplanması daha zor olmuştur. Bunun yerine kür süreleri ve zemin türlerinin kategorik olarak değerlendirildiği ve iki farklı deney sonucunun birlikte analiz edilerek tek bir optimizasyon yapılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.32.' de F değerinin 41.33 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde A, B, D, E, F, AD, DF, D^2 terimleri anlamlı çıkmıştır. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu fark, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Çizelge 4.32. de hassasiyet değeri 25.95 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Çizelge 4.32. ANOVA tablosu (Killi-Kumlu zemin- serbest basınç mukavemeti deneyi 28-56 gün).

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	1.285E+09	25	5.139E+07	41.33	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	1.268E+07	1	1.268E+07	10.20	0.0025	
B-Amorf Silika	1.431E+07	1	1.431E+07	11.51	0.0014	
C-Süper Akışk.	4.332E+06	1	4.332E+06	3.48	0.0683	
D-Su/bağlayıcı	2.788E+08	1	2.788E+08	224.27	0.0001	
E-Gün	5.507E+06	1	5.507E+06	4.43	0.0408	
F-Zemin	4.537E+07	1	4.537E+07	36.49	0.0001	
AB	1.518E+05	1	1.518E+05	0.12	0.7284	
AC	4.028E+06	1	4.028E+06	3.24	0.0784	
AD	1.232E+07	1	1.232E+07	9.91	0.0029	
AE	1.585E+05	1	1.585E+05	0.12	0.7226	
AF	2.306E+06	1	2.306E+06	1.85	0.1799	
BC	2.564E+06	1	2.564E+06	2.06	0.1577	
BD	2.527E+06	1	2.527E+06	2.03	0.1607	
BE	56459.44	1	56459.44	0.04	0.8322	
BF	2.767E+06	1	2.767E+06	2.23	0.1425	
CD	1.012E+06	1	1.012E+06	0.81	0.3717	
CE	55505.78	1	55505.78	0.04	0.8336	
CF	4.840E+06	1	4.840E+06	3.89	0.0545	
DE	5.124E+05	1	5.124E+05	0.41	0.5241	
DF	6.617E+07	1	6.617E+07	53.23	0.0001	
EF	1.807E+05	1	1.807E+05	0.14	0.7048	
A ²	2.932E+06	1	2.932E+06	2.36	0.1314	
B ²	2.914E+06	1	2.914E+06	2.34	0.1326	
C ²	39123.07	1	39123.07	0.03	0.8600	
D ²	7.616E+06	1	7.616E+06	6.13	0.0171	
R ²	0.9574					
Düzeltilmiş R ²	0.9342					
Tahmin Edilen R ²	0.8875					
Hassasiyet	25.9502					

Serbest basınç mukavemeti deneylerinin birlikte değerlendirilmesiyle killi zemine ait 28 günlük küre maruz kalmış numuneler için elde edilen matematiksel denklem Eşitlik 4.11.'de, 56 günlük küre maruz numuneler için denklem Eşitlik 4.12.'de, kumlu zemine ait 28 günlük küre maruz kalmış numuneler için denklem Eşitlik 4.13.'te ve 56 günlük küre maruz kalmış numuneler için denklem Eşitlik 4.14.'te verilmiştir.

$$(q_u)_{opt,28gün,kil} = 7783.60 + (106.87*A) - (100.19*B) - (629.00*C) + (7159.69*D) - (0.25*A*B) - (18.51*A*C) - (95.34*A*D) + (7.29*B*C) + (22.82*B*D) - (196.97*C*D) + (3.19*A^2) + (0.78*B^2) + (17.61*C^2) + (2064.89*D^2) \quad (4.11)$$

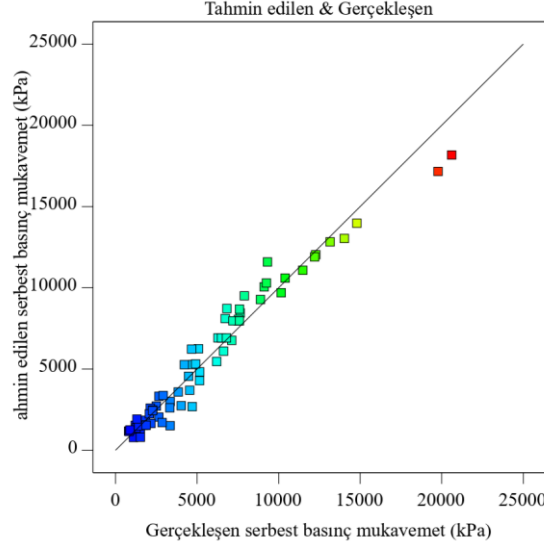
$$(q_u)_{opt,56gün,kil} = 9214.27 + (96.93*A) - (97.22*B) - (587.69*C) + (7553.53*D) - (0.25*A*B) - (18.51*A*C) - (95.34*A*D) + (7.29*B*C) + (22.82*B*D) - (196.97*C*D) + (3.19*A^2) + (0.78*B^2) + (17.61*C^2) + (2064.89*D^2) \quad (4.12)$$

$$(q_u)_{opt,28gün,kum} = 25604.62 + (56.47*A) - (128.69*B) - (115.17*C) + (19679.07*D) - (0.25*A*B) - (18.51*A*C) - (95.34*A*D) + (7.29*B*C) + (22.82*B*D) - (196.97*C*D) + (3.19*A^2) + (0.78*B^2) + (17.61*C^2) + (2064.89*D^2) \quad (4.13)$$

$$(q_u)_{opt,56gün,kum} = 25604.62 + (56.47*A) - (128.69*B) - (115.17*C) + (19679.07*D) - (0.25*A*B) - (18.51*A*C) - (95.34*A*D) + (7.29*B*C) + (22.82*B*D) - (196.97*C*D) + (3.19*A^2) + (0.78*B^2) + (17.61*C^2) + (2064.89*D^2) \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.11., Eşitlik 4.12., Eşitlik 4.13. ve Eşitlik 4.14.' de verilen A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı olarak tanımlanmıştır.

Killi ve kumlu zemine ait 28- 56 günlük kürlenmiş numunelerin serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarıyla yapılan analizlerde, gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.30.). Şekil 4.30.' da doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.



Şekil 4.30. Killi-Kumlu zemin için serbest basınç mukavemeti deney sonuçlarına göre tahmin edilen ve gerçekleşen deney sonuçları (28-56 günlük kür)

28-56 günlük kürlenmiş numunelerin permeabilite deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle matematiksel denklemler elde edilmiştir. Killi zeminde 28 günlük kürlü numuneler için Eşitlik 4.15., 56 günlük kürlü numuneler için Eşitlik 4.16., kumlu zeminde 28 günlük kürlü numuneler için Eşitlik 4.17., 56 günlük kürlü numuneler için Eşitlik 4.18. verilmiştir.

$$k_{opt,28gün,kil} = -623.36 + (20.33*A) + (3.47*B) + (0.96*C) + (433.15*D) + (0.04*A*B) - (1.43*A*C) - (3.08*A*D) + (0.85*B*C) - (2.38*B*D) + (20.06*C*D) - (0.21*A^2) - (0.08*B^2) - (3.02*C^2) - (49.86*D^2) \quad (4.15)$$

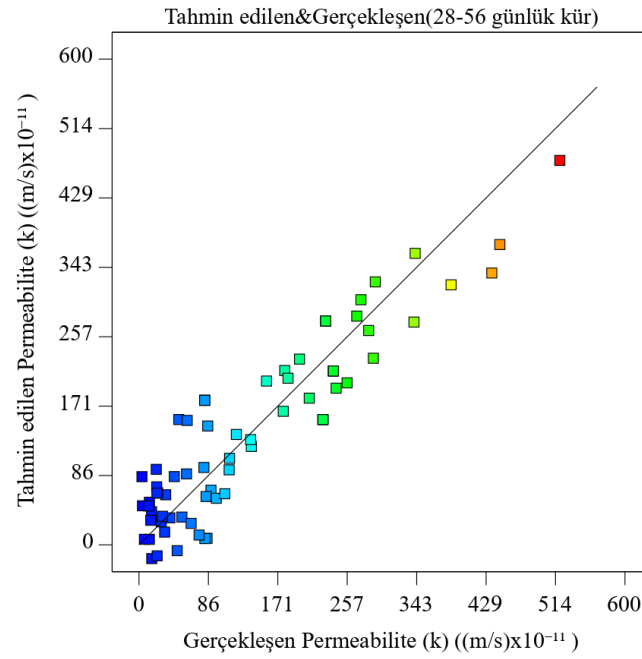
$$k_{opt,56gün,kil} = -463.09 + (17.26*A) + (4.35*B) + (1.69*C) + (341.87*D) + (0.044*A*B) - (1.43*A*C) - (3.08*A*D) + (0.85*B*C) - (2.38*B*D) + (20.06*C*D) - (0.21*A^2) - (0.08*B^2) - (3.02*C^2) - (49.86*D^2) \quad (4.16)$$

$$k_{opt,28gün,kum} = -409.06 + (19.62*A) - (0.12*B) - (12.64*C) + (585.44*D) + (0.04*A*B) - (1.43*A*C) - (3.08*A*D) + (0.85*B*C) - (2.38*B*D) + (20.06*C*D) - (0.21*A^2) - (0.08*B^2) - (3.02*C^2) - (49.86*D^2) \quad (4.17)$$

$$k_{opt,56gün,kum} = -360.78 + (16.55*A) + (0.75*B) - (11.91*C) + (494.15*D) + (0.04*A*B) - (1.43*A*C) - (3.08*A*D) + (0.85*B*C) - (2.38*B*D) + (20.06*C*D) - (0.21*A^2) - (0.08*B^2) - (3.02*C^2) - (49.86*D^2) \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.15., Eşitlik 4.16., Eşitlik 4.17. ve Eşitlik 4.18.' de verilen A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranı olarak tanımlanmıştır.

Killi ve kumlu zemine ait 28- 56 günlük kürlü numunelerin permeabilite deney sonuçlarıyla yapılan analizlerde, gerçekleşen-tahmin edilen deney sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.31.). Şekil 4.31.'de doğru etrafındaki noktalar doğruya oldukça yakındır. Bu, program ile gerçekleştirilen analizlerin doğru olduğunun göstergesidir.



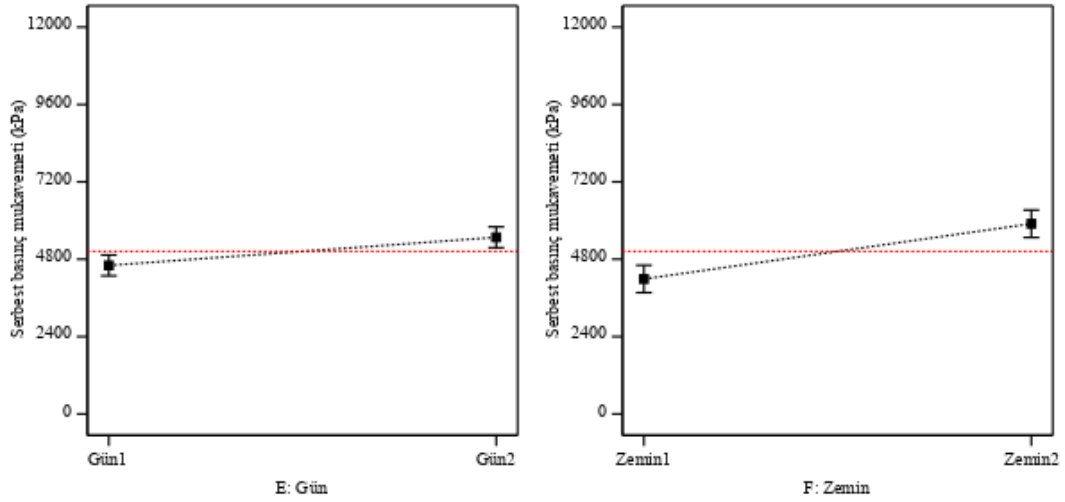
Şekil 4.31. Killi-Kumlu zemin için permeabilite deney sonuçlarına göre tahmin edilen ve gerçekleşen deney sonuçları (28-56 günlük kür)

Çizelge 4.32.' de F değerinin 9.26 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. p değerleri incelendiğinde B, D, E, F, AC, BC, BD, BF, DE, EF, B² terimleri anlamlı çıkmıştır. Düzeltilmiş R² değeri ile Tahmin Edilen R² değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değeri 13.89 olarak hesaplanmıştır ki bu değer istenilen 4 değerinden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Çizelge 4.32. Anova tablosu (Killi-Kumlu zemin- Permeabilite deneyi 28-56 gün).

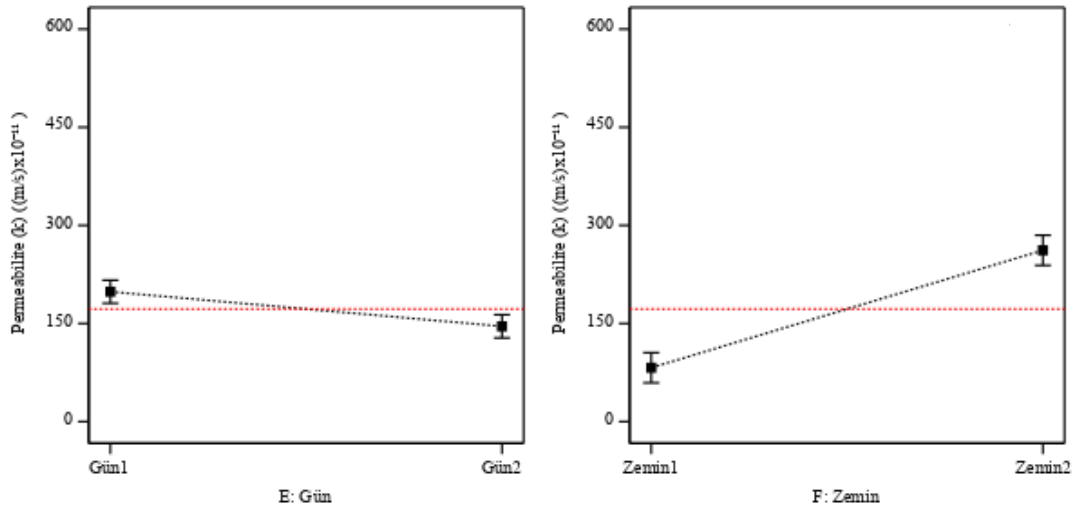
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	8.910E+05	25	35641.03	9.26	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	773.91	1	773.91	0.20	0.6559	
B-Amorf Silika	1.563E+05	1	1.563E+05	40.63	0.0001	
C-Süper Akışk.	2489.03	1	2489.03	0.64	0.4254	
D-Su/bağlayıcı	1.296E+05	1	1.296E+05	33.68	0.0001	
E-Gün	1.379E+05	1	1.379E+05	35.85	0.0001	
F-Zemin	1.096E+05	1	1.096E+05	28.48	0.0001	
AB	4631.61	1	4631.61	1.20	0.2783	
AC	24098.77	1	24098.77	6.26	0.0159	
AD	12874.30	1	12874.30	3.35	0.0739	
AE	15050.43	1	15050.43	3.91	0.0540	
AF	456.05	1	456.05	0.11	0.7322	
BC	34897.78	1	34897.78	9.07	0.0042	
BD	27580.25	1	27580.25	7.17	0.0103	
BE	5019.99	1	5019.99	1.30	0.2593	
BF	44189.73	1	44189.73	11.48	0.0014	
CD	10498.61	1	10498.61	2.73	0.1054	
CE	17.47	1	17.47	0.004	0.9466	
CF	3396.07	1	3396.07	0.88	0.3524	
DE	27529.76	1	27529.76	7.15	0.0103	
DF	9791.07	1	9791.07	2.54	0.1175	
EF	29908.60	1	29908.60	7.77	0.0077	
A ²	13238.21	1	13238.21	3.44	0.0700	
B ²	34995.43	1	34995.43	9.09	0.0042	
C ²	1150.83	1	1150.83	0.29	0.5871	
D ²	4440.77	1	4440.77	1.15	0.2883	
R ²	0.8343					
Düzeltilmiş R ²	0.7442					
Tahmin Edilen R ²	0.5974					
Hassasiyet	13.8926					

Sonuçların birlikte analiziyle kür süresi ve zemin türüne göre serbest basınç mukavemetinin değişimi Şekil 4.32.'de verilmiştir. Grafikte Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük kür süresini, Zemin1 killi zemini, Zemin2 kumlu zemini temsil etmektedir. Buna göre; serbest basınç mukavemeti kumlu zeminde killi zemine göre daha büyük değerlerde olurken, 56 günlük kür sürelerinde mukavemet değerleri 28 günlük kür sürelerine göre daha büyük olmuştur.



Şekil 4.32. Kür süresi ve zemin türünün serbest basınç mukavemetine etkisi.

Sonuçların birlikte analiziyle kür süresi ve zemin türüne göre permeabilite katsayısının değişimi Şekil 4.33.'te verilmiştir. Grafikte Gün1 28 günlük kür süresini, Gün2 56 günlük süresini, Zemin1 killi zemini, Zemin2 kumlu zemini temsil etmektedir. Buna göre; permeabilite katsayısı kumlu zeminde killi zemine göre daha büyük değerler alırken, 56 günlük kür sürelerinde permeabilite katsayısı değerleri 28 günlük kür sürelerine göre daha küçük olmuştur.

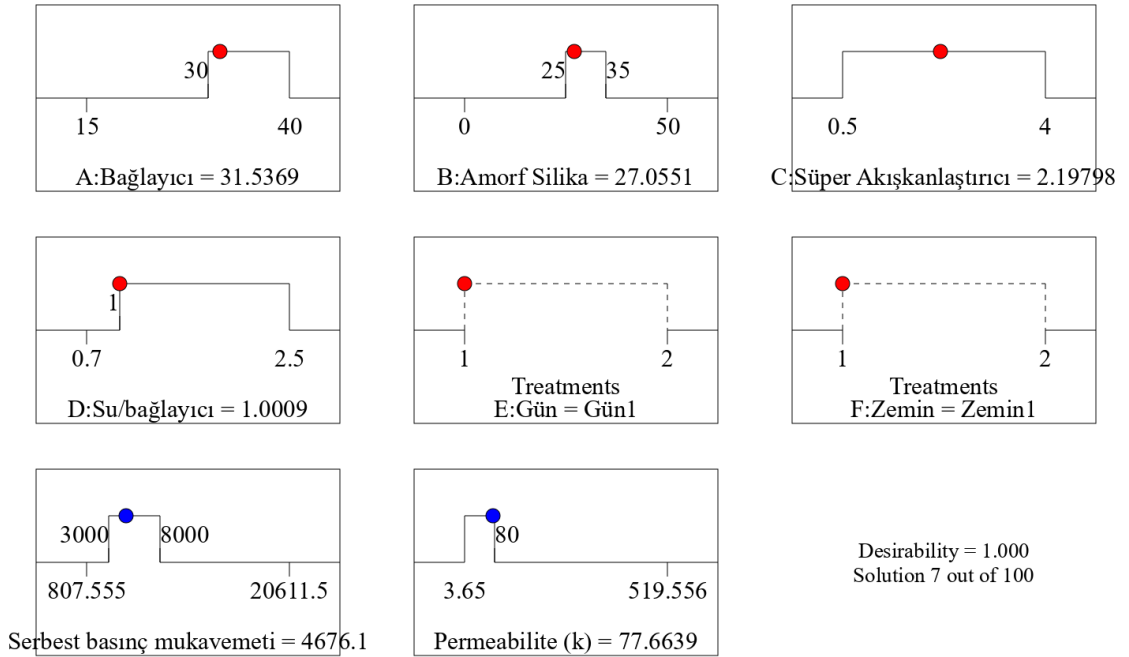


Şekil 4.33. Kür süresi ve zemin türünün permeabilite katsayısına etkisi.

Deney sonuçlarına göre her iki zemin türü için de permeabilite katsayıları oldukça düşük değerlerdedir ve literatürde farklı zeminlerle yapılan permeabilite katsayılarından daha düşük değerler elde edilmiştir. Permeabilite deneyleri için sınır

hedef değerleri belirlenmiştir. Yine deney sonuçları ve literatür taramaları dikkate alınarak serbest basınç mukavemeti deneyleri için de bir hedef alt ve üst limitler belirlenmiştir. Şekil 4.34.'te programa girilen hedef sınır değerler ve programın optimizasyon sonucu hesapladığı 100 çözümleme içinden seçilen optimum tasarım verilmiştir.

Çizelge 4.33.'te 100 çözümlemenden ilk 10 tanesi verilmiştir. Seçilen optimum tasarım için matematiksel model formülleri kullanılarak farklı kür süreleri ve farklı zemin türleri için tahmin edilen serbest basınç mukavemetleri ve permeabilite katsayıları hesaplanmıştır. Seçilen optimum tasarıma ait tasarım değerleriyle serbest basınç mukavemeti ve permeabilite doğrulama deneyleri için 28 ve 56 günlük kürlenmeye tabii tutulan deney numuneleri hazırlanmıştır. Her bir deney için altışar adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kür süreleri sonunda deneylere tabii tutulmuştur. Analiz sonucu elde edilen ve deneylerde bulunan değerler Çizelge 4.34.'te verilmiştir. Kontrol deneylerinde doğruluk yüzdeleri genel olarak %77-%93 aralığında bulunmuştur.



Şekil 4.34. Optimizasyon analizi sonucu seçilen optimum tasarım

Çizelge 4.33. Killi-Kumlu zeminlerde 28-56 günlük kürlenmeye maruz bırakılmış numunelerin Serbest basınç ve permeabilite deney sonuçlarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışk. (%)	Su/bağlayıcı	Gün	Zemin	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	Permeabilite (k) ($\times 10^{-11}$ m/s)	İstenirlik yüzdesi
1	37.10	32.60	4.00	1.00	Gün2	Zemin2	7044.59	80.00	1.0
2	38.00	30.35	3.02	1.10	Gün1	Zemin1	5218.75	79.13	1.0
3	35.08	25.48	3.80	1.13	Gün1	Zemin1	4672.46	69.87	1.0
4	36.85	28.00	2.71	1.02	Gün1	Zemin1	5501.74	73.62	1.0
5	32.48	34.44	2.59	1.00	Gün1	Zemin1	4743.22	68.27	1.0
6	35.04	33.11	2.50	1.03	Gün1	Zemin1	5041.88	77.23	1.0
7	31.54	27.06	2.20	1.00	Gün1	Zemin1	4676.10	77.66	1.0
8	32.39	34.97	1.11	1.00	Gün1	Zemin1	4502.78	77.29	1.0
9	38.27	27.05	2.38	1.00	Gün1	Zemin1	5916.28	75.90	1.0
10	37.58	34.83	2.27	1.01	Gün1	Zemin1	5586.53	74.70	1.0

Çizelge 4.34. Optimum tasarım için doğrulama deney sonuçları

Zemin Türü	Deney Türleri	28 günlük kür			56 günlük kür		
		Analiz Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk (%)	Analiz Sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk (%)
Killi Zemin	q_u (kPa)	4675.51	3826.31	81.84	5387.90	4256.18	79.00
	k (m/s) $\times 10^{-11}$	77.69	65.12	83.82	75.53	59.18	78.35
Kumlu Zemin	q_u (kPa)	6474.71	5764.28	89.03	7462.37	6427.46	86.13
	k (m/s) $\times 10^{-11}$	294.72	227.91	77.33	180.57	168.66	93.40

4.4. Reoloji Deneyleri

4.4.1. Marsh hunisi deneyleri

Arazide derin karıştırma yönteminin performansını etkileyen makine ve teçhizattan kaynaklı, enjeksiyon reolojisi kaynaklı vb. pek çok faktör bulunmaktadır. Çalışma kapsamında büyük ölçekli derin karıştırma kolonlarının oluşturulmasından önce enjeksiyon harcının reolojisini belirlemeye yönelik Marsh hunisi deneyleri yapılmıştır. Sistemde meydana gelecek tıkanmaları önlemek ve daha homojen bir DKK elde etmek açısından enjeksiyon harcının akışkan olması önemlidir. Özellikle arazi tipi derin karıştırma makinalarına kıyasla, laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin shaft çapı ve nozul çapları daha küçük olduğundan karışımda kullanılacak enjeksiyon harcının akışkanlığının sağlanması önemlidir. Çalışmalar kapsamında kullanılan laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinde daha önceden yapılan çalışmalarda

makinanın Marsh hunisinden 70-100 sn aralığında akma süresine sahip enjeksiyonların pompalanabildiği tespit edilmiştir (Noori, 2019).

Killi zeminler için ve kumlu zeminler için kullanılan tasarım tablosundan 18 adet killi zemin ve 18 adet kumlu zemin için ve optimum tasarım için 1 adet olmak üzere toplamda 37 adet Marsh hunisi deneyi yapılmıştır. Killi zemine ait Marsh hunisi deney sonuçları Çizelge 4.35.' te verilmiştir.

Çizelge 4.35. Killi zemin için Marsh hunisi deney sonuçları

Tasarım no	Tasarım parametreleri				Akma süresi (s)
	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı (%)	Su /bağlayıcı	
1	27.50	12.50	4.00	1.00	27.78
2	15.00	17.75	4.00	2.50	25.78
3	27.25	25.53	2.15	1.76	27.6
4	32.75	0.00	2.65	2.50	27.16
5	15.00	50.00	4.00	1.38	28.68
6	27.25	25.53	2.15	1.76	27.6
7	15.00	30.00	0.50	1.00	29.47
8	40.00	28.27	0.57	2.50	26.65
9	31.25	50.00	0.50	1.56	28.62
10	17.50	0.00	0.50	2.28	26.98
11	40.00	0.00	0.50	1.00	31.54
12	15.00	0.00	2.71	1.32	27.09
13	27.25	25.53	2.15	1.76	27.6
14	40.00	10.25	4.00	1.79	26.85
15	34.38	50.00	4.00	2.50	27.16
16	40.00	46.25	2.65	1.00	29.69
17	15.00	50.00	1.52	2.50	26.75
18	23.00	0.00	0.56	1.22	28.13

Çizelge 4.35. incelendiğinde akma sürelerinin hepsinin uygun olduğu görülmektedir. Dolayısıyla laboratuvardaki mevcut derin karıştırma makinası ile bu tasarım tablosundaki tüm enjeksiyon karışımları rahatlıkla enjekte edilebilecektir. Marsh hunisi deneyi YYY kullanılarak analiz edilmiştir. Analize ait tasarım denklemi Eşitlik 4.19.'da; ANOVA tablosu, R^2 , düzeltilmiş R^2 , tahmin edilen R^2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.36.'da verilmiştir.

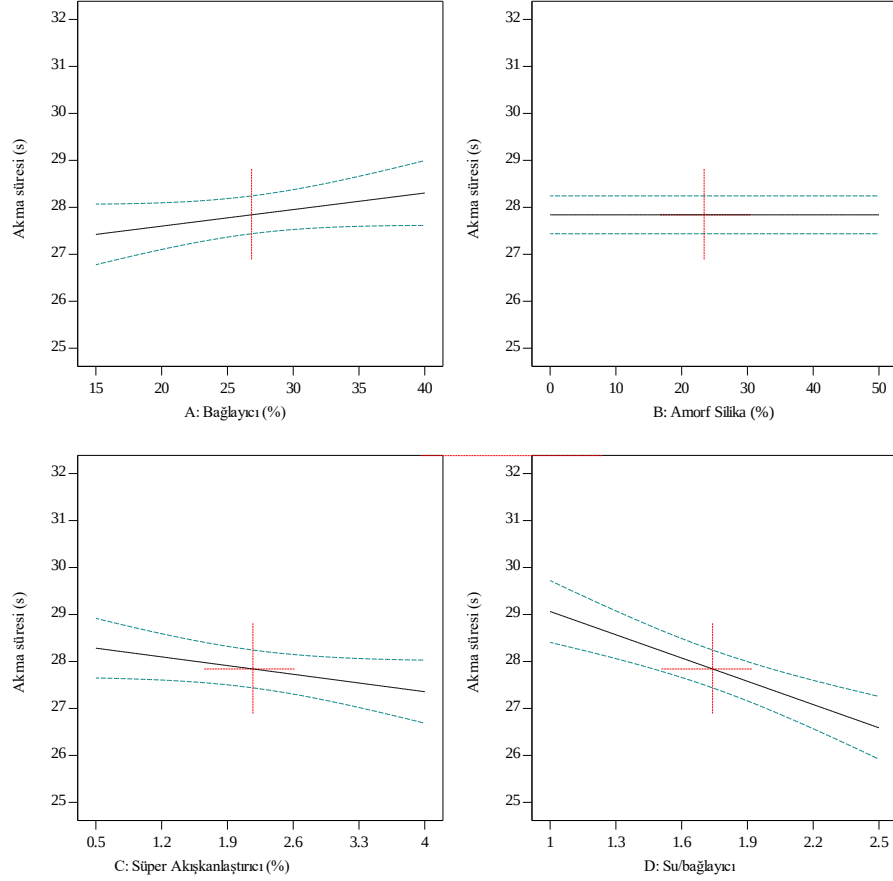
$$\text{Akma süresi} = 30.34 + (0.03 \cdot A) - (0.26 \cdot C) - (1.65 \cdot D) \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.19.'da A,C,D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranıdır. Çizelge 4.36.' da F değerinin 7.51 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri ile Tahmin Edilen R^2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değerinin 4'ten büyük olması istenmektedir. Çizelge 4.36. da hassasiyet değeri 11.41 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değerden büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Şekil 4.35.'te parametrelerin Marsh hunisi akma sürelerine etkisi verilmiştir. Buna göre bağlayıcı ve amorf silika miktarı arttıkça beklenildiği gibi daha kıvamlı bir enjeksiyon harcı oluştuğu için akma süreleri daha fazladır. Su/bağlayıcı oranı arttıkça ise enjeksiyonun huniden akma süreleri kısalmaktadır. Burada süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin akma sürelerine olan katkısı net bir şekilde görülmektedir. Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttıkça akma süreleri azalmaktadır. Bu da süper akışkanlaştırıcının enjeksiyon harcının pompadan basılabılme ve tıkanmadan akabilmesine olumlu katkısının olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.36. Killi zemine ait Marsh hunisi deneyi ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	22.52	3	35641.03	7.51	0.0004	Anlamlı
A-Bağlayıcı	1.99	1	773.91	1.99	0.0979	
C-Süper Akışk.	2.37	1	2489.03	2.37	0.0737	
D-Su/bağlayıcı	16.09	1	1.296E+05	16.09	0.0002	
R^2	0.7173					
Düzeltilmiş R^2	0.6567					
Tahmin Edilen R^2	0.4632					
Hassasiyet	11.4128					



Şekil 4.35. Parametrelerin Marsh hunisi akma sürelerine etkileri.

Kumlu zemine ait Marsh Hunisi deney sonuçları Çizelge 4.37.'de verilmiştir. Çizelge 4.37. incelendiğinde akma sürelerinin hepsinin uygun olduğu görülmektedir. Marsh hunisi deneyi YYY kullanılarak analiz edilmiştir. Analize ait tasarım denklemi Eşitlik 4.20.'de; ANOVA tablosu, R2, düzeltilmiş R2, tahmin edilen R2 ve hassasiyet değerleri ise Çizelge 4.38.'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Akma süresi} = & 50.49 + (0.09 \cdot A) - (0.009 \cdot B) + (4.04 \cdot C) - (44.48 \cdot D) - (0.00 \cdot A \cdot B) - \\ & (0.008 \cdot A \cdot C) - (0.002 \cdot B \cdot C) + (0.11 \cdot B \cdot D) - (2.39 \cdot C \cdot D) - (0.00002 \cdot A^2) - (0.00032 \cdot B^2) - \\ & (0.27 \cdot C^2) + (19.22 \cdot D^2) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.20.'de A, B, C, D terimleri sırasıyla bağlayıcı yüzdesi, amorf silika yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı yüzdesi ve su/bağlayıcı oranıdır.

Çizelge 4.37. Kumlu zemin için Marsh hunisi deney sonuçları

Tasarım no	Tasarım parametreleri				Akma süresi (s)
	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper akışkanlaştırıcı (%)	Su /bağlayıcı	
1	40.00	50.00	2.67	0.82	32.69
2	15.00	50.00	1.48	1.20	31.12
3	15.00	17.50	0.50	0.88	29.6
4	15.00	11.25	4.00	1.20	26.94
5	27.13	25.57	2.13	0.96	31.05
6	40.00	12.50	2.67	1.20	29.57
7	27.13	25.57	2.13	0.96	31.05
8	40.00	43.75	0.50	1.14	30.31
9	17.38	0.00	2.69	0.70	34.53
10	40.00	0.00	0.50	0.70	33.63
11	31.00	50.00	4.00	1.20	29.09
12	25.50	0.00	0.50	1.20	27.69
13	15.63	35.00	2.08	0.70	34.5
14	27.13	25.57	2.13	0.96	31.05
15	34.50	0.00	4.00	0.96	30.31
16	15.00	50.00	4.00	0.82	33.35
17	34.25	25.75	4.00	0.70	35.66
18	25.45	50.00	0.50	0.70	32.51

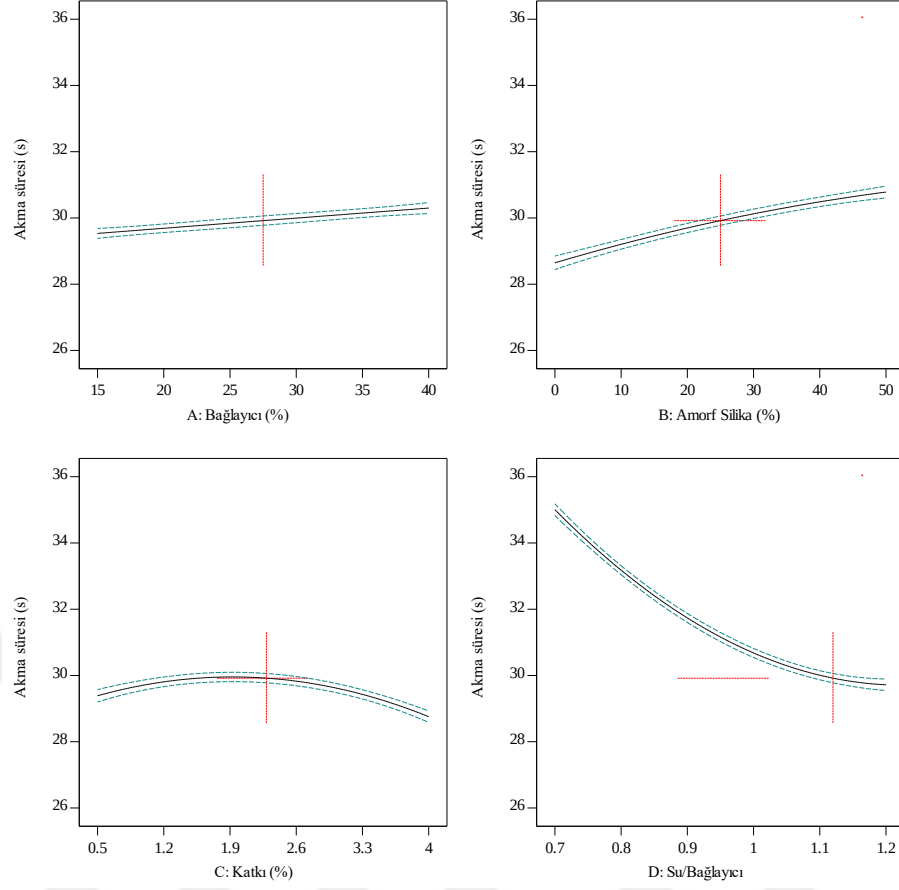
Çizelge 4.38.'de F değerinin 7.51 olması, kurulan modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R2 değeri ile Tahmin Edilen R2 değeri arasındaki fark 0.20'den küçüktür. Dolayısıyla bu, modelin anlamlı ve mantıklı olduğunu ortaya koymaktadır. Hassasiyet değeri 113.57 olarak hesaplanmıştır ki istenilen değer olan 4'ten büyüktür. Dolayısıyla kurulan bu model tasarım için uygundur denilebilir.

Çizelge 4.38. Kumlu zemine ait Marsh hunisi deneyleri ANOVA tablosu

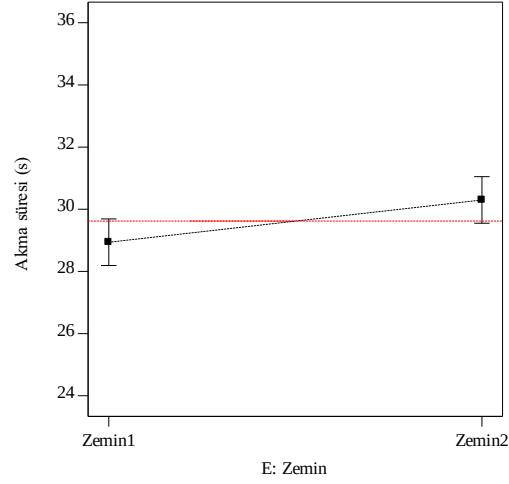
Kaynak	Kareler Toplamı	sd	Kareler Ortalaması	F değeri	p değeri	
Model	97.58	13	7.51	997.61	0.0001	Anlamlı
A-Bağlayıcı	1.44	1	1.44	192.00	0.0002	
B-Amorf Silika	3.36	1	3.36	447.11	0.0001	
C-Süper Akışk.	1.61	1	1.61	214.55	0.0001	
D-Su/bağlayıcı	75.08	1	75.08	9979.06	0.0001	
E-Gün	2.23	1	2.23	295.72	0.0001	
AB	0.1640	1	0.1640	21.80	0.0095	
AC	0.0958	1	0.0958	12.73	0.0234	
BC	3.56	1	3.56	473.12	0.0001	
BD	7.50	1	7.50	996.93	0.0001	
CD	0.0000	1	0.0000	0.0049	0.9473	
A ²	0.1118	1	0.1118	14.86	0.0182	
B ²	2.39	1	2.39	318.28	0.0001	
C ²	4.15	1	4.15	551.89	0.0001	
D ²	97.58	1	7.51	997.61	0.0001	
R ²	0.9997					
Düzeltilmiş R ²	0.9387					
Tahmin Edilen R ²	0.9622					
Hassasiyet	113.5739					

Parametrelerin akma sürelerine etkileri ise Şekil 4.36.'da verilmiştir. Kil zeminde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar kum zemin için de elde edilmiştir.

Killi zemin ile kumlu zemine ait tasarımlarda akma süreleri kıyaslandığında killi zeminde akma süreleri daha düşük elde edilmiştir (Şekil 4.37.). Ancak; kumlu zeminde su/bağlayıcı oranı 0.7-1.2 aralığında killi zeminde ise 1.00-2.50 aralığındadır. Bu nedenle kumlu zeminde akma süreleri daha fazla elde edilmiştir. Eğer aynı su/bağlayıcı oranları seçilseydi akma sürelerinin farklı olması beklenirdi. Şekil 4.37.'de Zemin1 killi zemini, Zemin2 kumlu zemini temsil etmektedir.



Şekil 4.36. Parametrelerin Marsh hunisi akma sürelerine etkileri.



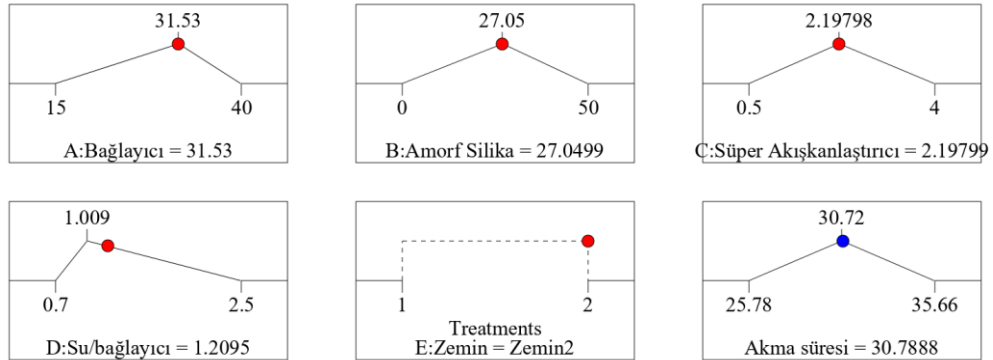
Şekil 4.37. Killi ve kumlu zeminler için Marsh Hunisi akma sürelerinin karşılaştırılması

Marsh hunisi deney sonuçları kullanılarak yapılan optimizasyonda belirlenen optimum tasarım parametreleri kullanılarak yapılan deneyde akma süresi 30.7 saniye olarak bulunmuştur. Killi ve kumlu zemin için belirlenen akma süreleri zemin türü kategorik olarak değerlendirilip analiz edilmiştir. Optimizasyonda belirlenen optimum

değerler Marsh hunisi optimizasyonunda hedef değerler olarak programa girilmiş ve optimum tasarım parametreleriyle yapılan Marsh hunisi deneyinde elde edilen akma süresine yakın değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla yapılan deney sonuçlarıyla optimum değerlerin akma süresi birbiriyle uyumlu ve mantıklıdır. Optimizasyon çalışmalarına ait çözümlemelerden 10 tanesi Çizelge 4.39.'da, optimum tasarım için parametrelerin değerleri ve optimum akma süresi Şekil 4.38.'de verilmiştir.

Çizelge 4.39. Killi-Kumlu zeminler için Marsh hunisi deney sonuçlarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışk. (%)	Su/bağlayıcı	Zemin	Akma Süresi (s)	İstenirlik yüzdesi
1	31.53	27.05	2.20	1.13	Zemin2	31.00	0.97
2	31.53	27.07	2.18	1.01	Zemin2	31.32	0.97
3	31.53	27.05	2.22	1.03	Zemin2	31.26	0.97
4	31.53	27.05	2.20	1.18	Zemin2	30.88	0.97
5	31.53	27.05	2.20	1.21	Zemin2	30.79	0.97
6	31.53	27.05	2.20	1.01	Zemin1	29.96	0.97
7	31.53	27.05	2.20	1.02	Zemin1	29.94	0.97
8	31.53	27.05	2.20	1.00	Zemin1	29.99	0.96
9	31.53	27.05	2.20	1.03	Zemin1	29.90	0.96
10	31.53	27.05	2.20	0.98	Zemin1	30.03	0.95

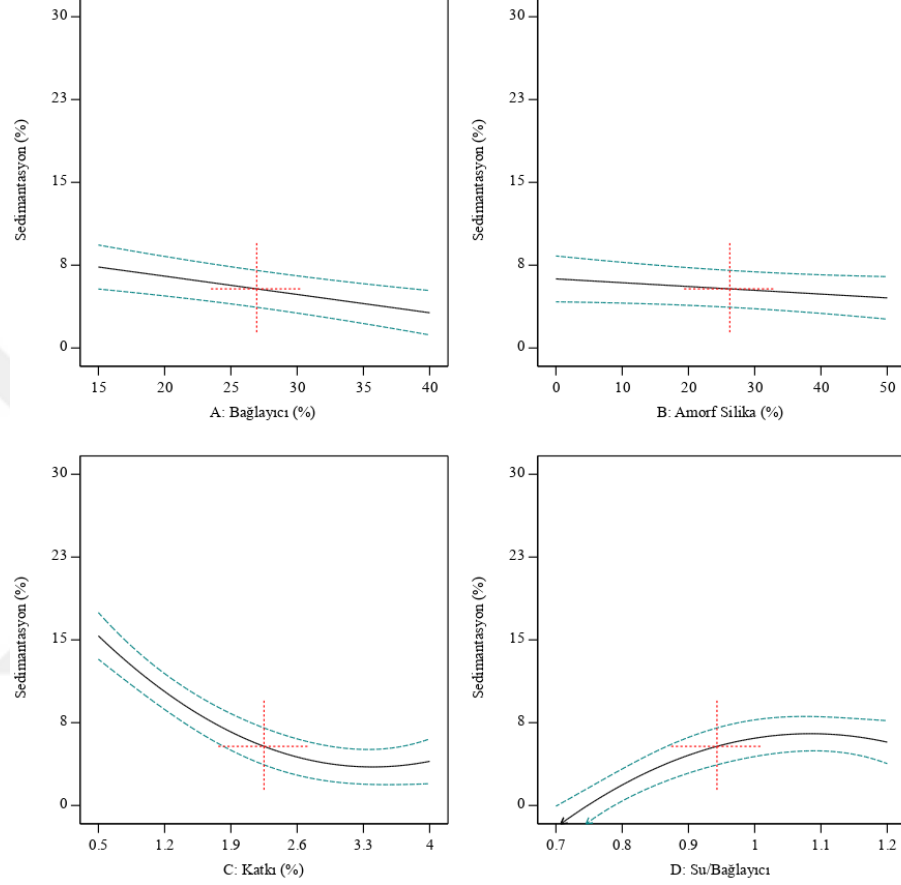


Şekil 4.38. Optimum tasarım için parametrelerin değişimi ve akma süresi

4.4.2. Sedimentasyon deneyleri (çökeltme, stabilite)

Tez kapsamında killi zemin tasarım tablosuna göre 18 adet, kumlu zemin tasarım tablosuna göre 18 adet ve optimum belirlenen parametrelere göre 1 adet olmak üzere toplamda 37 adet sedimentasyon deneyi yapılmıştır. Killi zemin tasarım tablosuna göre yapılan sedimentasyon deney sonuçları Çizelge 4.40'da, kumlu zemin tasarım tablosuna göre yapılan sedimentasyon deney sonuçları ise Çizelge 4.41.'de verilmiştir.

Uygun bir enjeksiyon harcının %5'ten fazla çökmesi istenmez ve böyle süspansiyonlar stabildir denir (Hakansson, 1992). Killi ve kumlu zemin tasarım tablolarına göre yapılan sedimantasyon deneylerinin sonucu YYY yöntemi kullanılarak birlikte analiz edilmiş ve parametrelerin sedimantasyona etkisi Şekil 4.39.'da verilmiştir.



Şekil 4.39. Killi ve kumlu zeminlerde parametrelerin sedimantasyona etkisi

İnce tane oranının artırılması, akışkanlaştırıcı madde kullanılması ve iyi bir karıştırma işlemi sedimantasyonu azaltırken stabiliteyi artırıcı etkide bulunur. Şekil 4.39. incelendiğinde bağlayıcı miktarı ve bağlayıcıdaki amorf silika yüzdesi arttığı zaman sedimantasyonda azalma meydana gelmektedir. Yine süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi de sedimantasyonun azaltılmasında ciddi bir etkiye sahiptir. Su/bağlayıcı oranı arttıkça sedimantasyon yüzdesi artmaktadır.

Çizelge 4.40. Killi zemin için sedimantasyon deney sonuçları

[illegible]

Çizelge 4.41. Kumlu zemin için sedimantasyon deney sonuçları

[illegible]

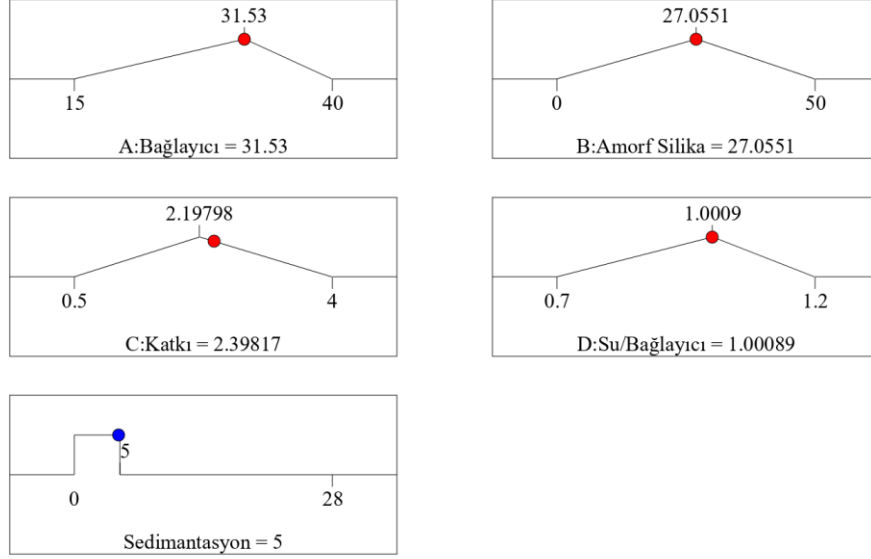
Optimizasyonda belirlenen optimum tasarım parametrelerine göre yapılan deneyde sedimantasyon miktarı %4.8 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.42.). Killi ve kumlu zemin için belirlenen sedimantasyon yüzdeleri birlikte analiz edilmiştir. Optimizasyonda belirlenen optimum parametre değerleri sedimantasyon optimizasyonunda hedef değerler olarak programa girilmiş ve optimum tasarım parametreleriyle yapılan sedimantasyon deneyinde elde edilen sedimantasyon yüzde değerlerine yakın değerler burada sonuç vermiştir. Dolayısıyla yapılan deney sonuçlarıyla optimum değerın sedimantasyon yüzde değerleri birbiriyle uyumlu ve mantıklıdır. Deney optimizasyonuna ait çözümlemelerden 10 tanesi Çizelge 4.43.'te, grafikleri ise Şekil 4.40.'da verilmiştir.

Çizelge 4.42. Optimum tasarım için yapılan sedimantasyon deneyi

Tasarım No		Bağlayıcı (%)		Amorf Silika (%)		Süper akışkanlaştırıcı (%)				Su /bağlayıcı
Optimum		31.54		27.055		2.198				1.001
Süre(dk)										Çökelme (S) (%)
0	15	30	45	60	70	80	90	100	110	
1000	989	980	975	969	961	960	954	952	952	4.8

Çizelge 4.43. Killi-Kumlu zeminlerde sedimantasyon deney sonuçlarının optimizasyonu

No	Bağlayıcı (%)	Amorf Silika (%)	Süper Akışk. (%)	Su/bağlayıcı	Zemin	Sedimantasyon (%)	İstenirlik yüzdesi
1	31.53	27.06	2.40	1.00	Zemin1	4.85	0.98
2	31.73	26.74	2.34	1.00	Zemin2	5.00	0.97
3	31.86	26.88	2.34	1.00	Zemin2	5.00	0.97
4	31.53	27.06	2.26	0.97	Zemin2	5.00	0.97
5	31.53	27.66	2.35	1.00	Zemin2	5.00	0.97
6	31.53	26.53	2.36	1.00	Zemin1	4.95	0.97
7	31.53	27.06	2.25	0.97	Zemin1	5.00	0.97
8	31.53	27.06	2.23	0.97	Zemin2	5.00	0.97
9	31.53	27.96	2.35	1.00	Zemin1	5.00	0.97
10	32.29	27.06	2.32	1.00	Zemin1	5.00	0.97



Şekil 4.40. Optimum tasarım için parametrelerin değişimi ve sedimentasyon yüzdesi

4.5. Büyük Ölçekli DKK ve Yükleme Deneyleri

Deneysel çalışmaların son aşamasında farklı tabakalanma yüksekliklerinde kumlu ve killi zeminlerden oluşan zemin ortamında oluşturulan çapı 7 cm ve boyu 60 cm olan 4 adet derin karıştırma kolonu yükleme deneylerine tabi tutulmuş ve taşıma kapasiteleri ve oturmaları belirlenmiştir. Bu derin karıştırma kolonları 100 cm boyunda, 60 cm çapında 4 büyük tank içerisinde oluşturulmuştur.

Literatürde ve çeşitli standartlarda kazık yükleme deney sonuçlarının yorumlanması ve bu sonuçlardan deney kazığının göçme yükünün tahmin edilebilmesi için birçok kriter ve yöntemle rastlamak mümkündür. Bunlar toplam oturmayı, plastik oturmayı veya oturma/yük oranlarını sınırlandıran çeşitli kriterler ile yük-oturma verilerinin dağılımını yorumlayan yöntemler olarak özetlenebilir (Dinç, 2010).

Yük-oturma verilerinin dağılımını yorumlayarak göçme yükü tahmini yapılması için geliştirilmiş yöntemler bazen birbirinden farklı, bazen de birbirine yakın yaklaşımlar sonucunda göçme yükünün elde edilmesine olanak verir. Bu yaklaşımlar çoğunlukla yük-oturma eğrisi üzerinde yapılan yoruma dayalı, yük-oturma dağılımının hiperbolik eğri oluşturmaya eğilimli olduğu kabulüne dayalı, verilerin değişik fonksiyonlara eğilimini vurgulayan veya çeşitli kriterler ile bu kabulleri birleştiren yaklaşımlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kazıklı temeller söz konusu olduğunda iki göçme mekanizmasından söz edilebilir. Bunlardan biri yapının göçmesi, diğeri zeminin göçmesidir. Zemin mekaniği

ilkelerine göre kazığın göçmesi yükte herhangi bir artış olmadığı halde oturma yapmaya devam ederek zemine gömülmesi durumudur. Yapı mühendisliğine göre göçme, kazığın belli bir oturma yaparak yapıda kabul edilebilir distorsiyonun üzerinde distorsiyona ve yapısal elemanlarda çatlakların oluşmasına neden olma durumu olarak tanımlanır. Bu tanıma göre izin verilen oturma, kazığın zeminin taşıma kapasitesinin aşıldığı andaki oturmadan çok daha küçük bir değer olabilir.

4.5.1. Terzaghi (1943) taşıma gücü teorisine göre taşıma gücü hesabı

Taşıma gücü hesaplamaları açısından kazıklı temelleri yüzeysel temellerden ayıran en önemli özellik, hesaplamalarda kazıklı temelin yan yüzeyindeki sürtünmenin temelin taşıma gücüne katkısının hesaba katılması ve önemli olmasıdır. Kazığın taşıdığı yük; tabandaki uç direnci ($Q_{uç}$) ile kazık yan yüzeylerinde zemin ile kazık arasındaki sürtünme direnci (Q_{yan}) bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu durumda tekil bir kazığın toplam taşıma gücü Eşitlik 4.21. ile hesaplanır.

$$Q_{ult} = Q_{yan} + Q_{uç} = f_s \cdot A_s + q_b \cdot A_{uç} \quad (4.21)$$

$$Q_{ult} = (K\gamma_n \frac{D_f}{2} \tan \delta)(\pi D D_f) + (\gamma_n D_f N_q + 0.3 D \gamma_n N_\gamma) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (4.22)$$

Burada;

- Q_{ult} : Kazığın nihai taşıma gücü(kN)
- Q_{yan} : Toplam çevre sürtünmesi(kN)
- $Q_{uç}$: Uç direnci(kN)
- f_s : Kazık birim çevre alanına etkiyen sürtünme gerilmesi
- A_s : Zeminle temas eden kazık çevre alanı
- q_b : Kazık ucunda oluşan gerilme (sınır taşıma gücü)
- $A_{uç}$: Zeminle temas eden kazık uç alanıdır.
- D_f : Kazık boyu
- D : Kazık çapı
- N_q, N_γ : Taşıma gücü katsayıları(Çizelge 4.44)

δ : Kazık-zemin sürtünme açısı(Çizelge 4.45'ten 1.0ϕ olarak alınmıştır Burada ϕ zeminin içsel sürtünme açısıdır, sıkı kumlarda $\phi=40^0-45^0$ arasındadır ve çalışma kapsamında 43^0 olarak belirlenmiştir (Günaydın ve ark., 2014; Karakan ve Ebre, 2020)

K : Yanal toprak basıncı katsayısı ($1-\sin \phi$)

γ_n : Birim hacim ağırlık (zemin doymun durumda olup doymun birim hacim ağırlığı (γ_{doy}) 20.11 kN/m^3 ve efektif birim hacim ağırlığı (γ') 10.3 kN/m^3 'tür.

Çizelge 4.44. Taşıma gücü katsayıları (Terzaghi, 1943).

$\phi(\text{derece})$	N_c	N_c	N_γ	$\phi(\text{derece})$	N_c	N_c	N_γ
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.27	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	3.50	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	260.00
19	16.57	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.87
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Çizelge 4.45. Zemin-kolon sürtünme açıları (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	1.0ϕ
Ahşap/Kum	$0.8\phi-0.9\phi$
Zemin İçinde Boru Bırakılan Kazıklar	$0.1\phi-0.85\phi$

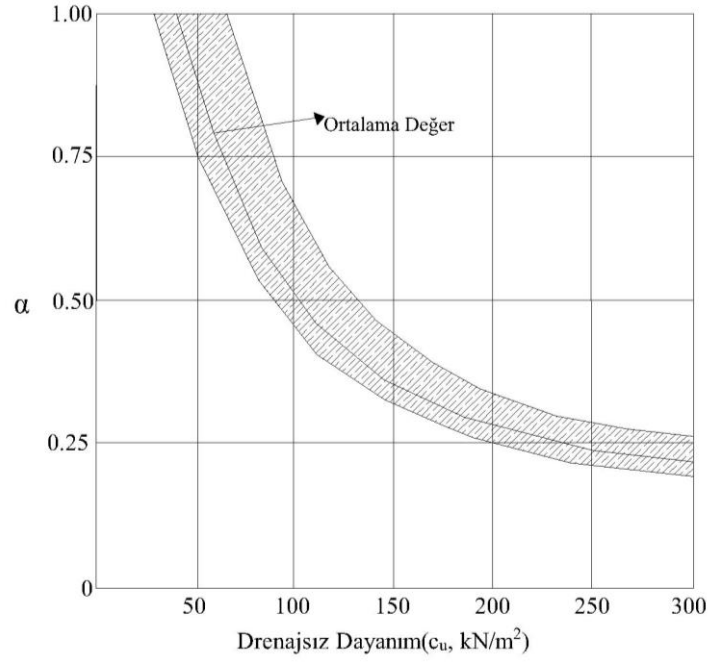
Kohezyonlu zeminlerde taşıma gücü;

$$Q_{ult} = 9cA_{uç} + \alpha cA_{yan} \quad (4.23)$$

Burada;

c : Kohezyon(kN/m^2), bilinen laboratuvar deneyleri sonucu 50 kN/m^2 olarak bulunmuştur.

α : Adezyon faktörü(Şekil 4.40'tan 0.80 olarak alınmıştır)

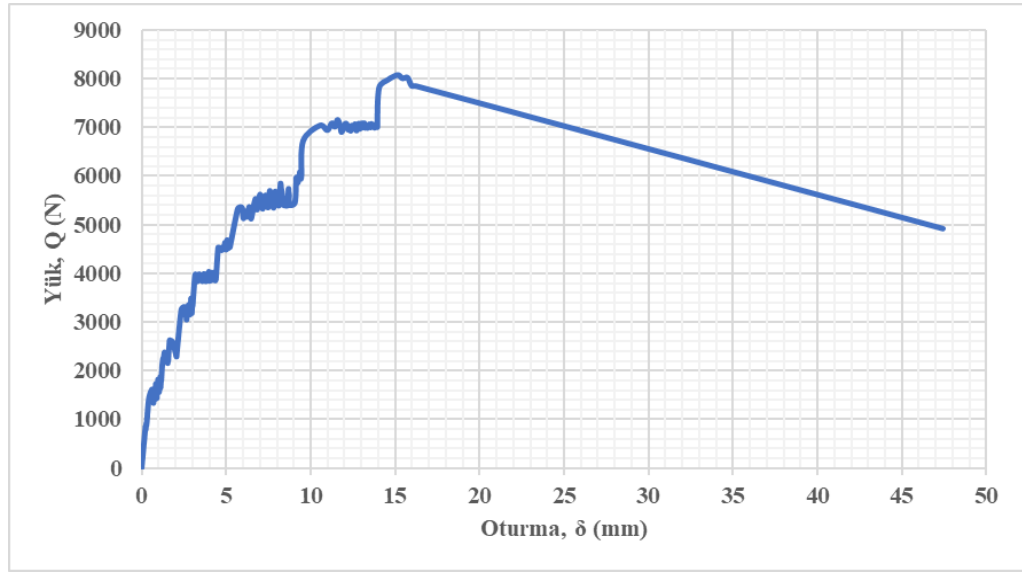


Şekil 4.41. Adezyon katsayısı değeri (Birand, 2001)

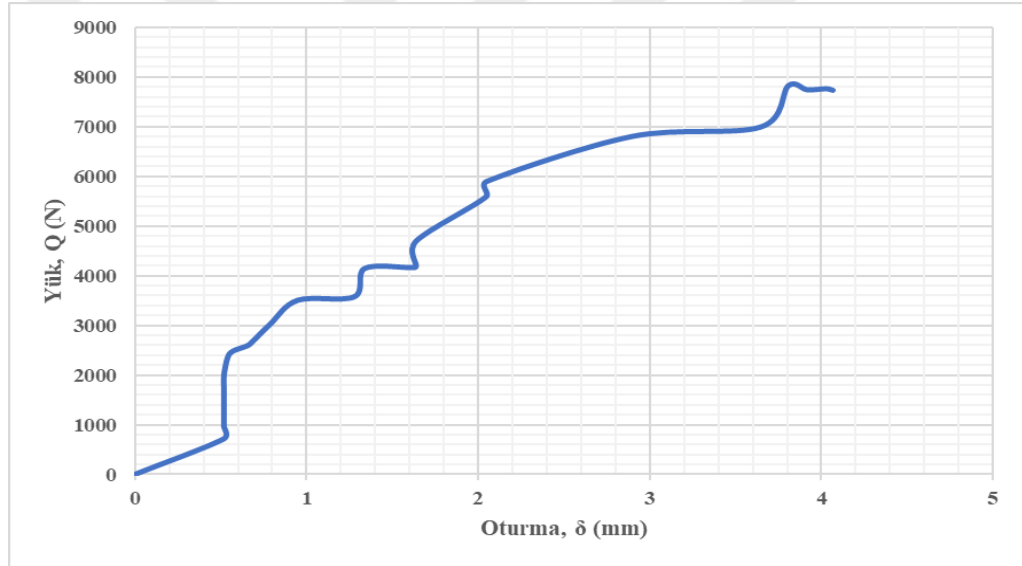
Terzaghi taşıma gücü teorsine göre kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.46. 'da, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.42-Şekil 4.45 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.46. Terzaghi taşıma gücü teorisi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

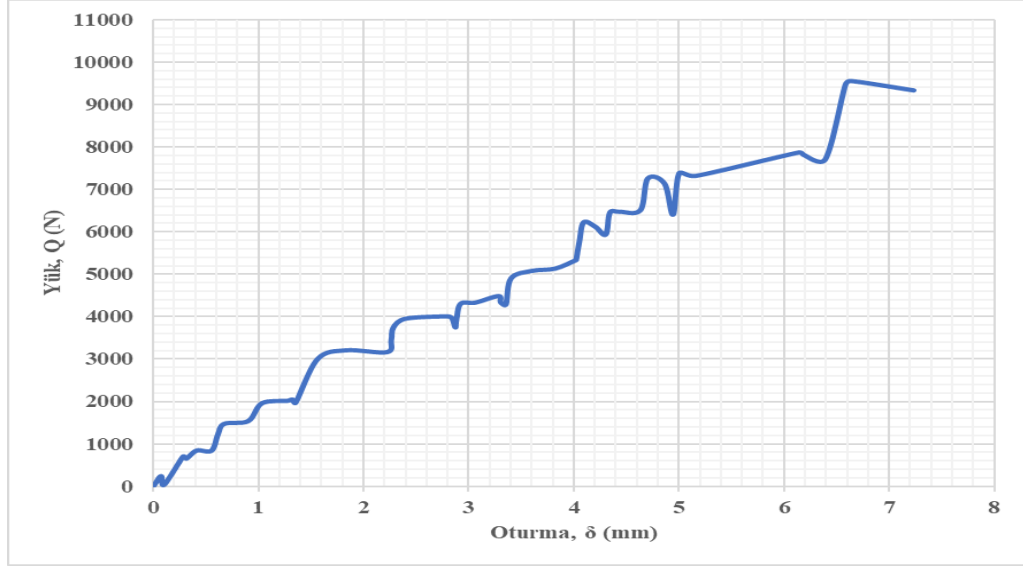
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	10228.45
2	9760.14
3	1682.35
4	6829.89



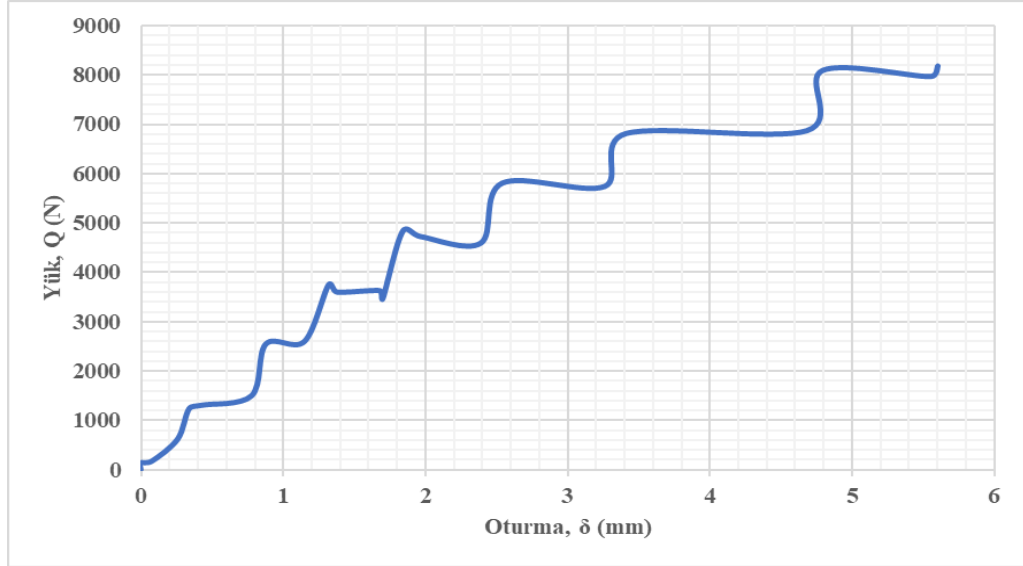
Şekil 4.42. 1 Numaralı derin karıştırma kolonuna ait yük-oturma grafiği.



Şekil 4.43. 2 Numaralı derin karıştırma kolonuna ait yük-oturma grafiği.



Şekil 4.44. 3 Numaralı derin karıştırma kolonuna ait yük-oturma grafiği.



Şekil 4.45. 4 Numaralı derin karıştırma kolonuna ait yük-oturma grafiği.

4.5.2. Brinch – Hansen %80 yöntemi (1963)

Brinch Hansen'e (1963) göre, yükün %80'indeki oturmanın 4 katı oturmaya neden olan yük değeri göçme yüküdür. Bu yöntemde göçme yükü, yük-oturma eğrisinin üzerinde yapılacak bir uygulama ile yaklaşık olarak tahmin edilebileceği gibi, tam sonuca ulaşmak için analitik çözüm de yapılabilir. Buna göre her deplasman (δ) değerinin karekökünün, bu deplasman değerine karşılık gelen yük (Q) değerine bölünmesinden elde edilen değer ile yer değiştirme değerinin grafiği çizilir. Bu grafik

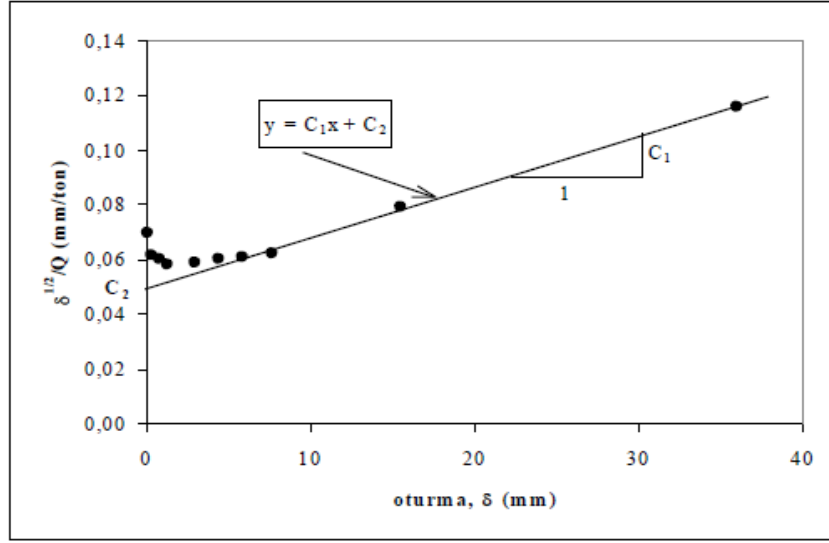
belli bir noktadan sonra doğrusal devam etmektedir (Şekil 4.46.). Göçme yükü şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{ult} = 1 / (2 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}) \quad (4.24)$$

Burada:

C_1 : doğrunun eğimi

C_2 : doğrunun y eksenini kestiği nokta olarak tanımlanmaktadır.



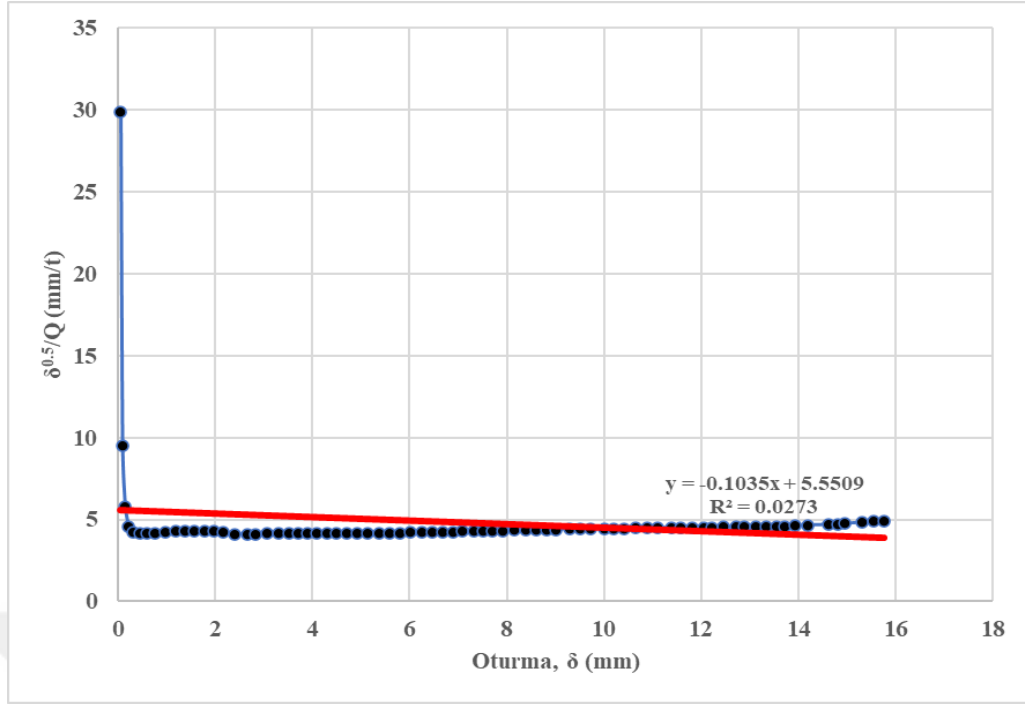
Şekil 4.46. Brinch Hansen %80 grafiği (Brinch Hansen, 1963)

Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.47. 'de, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.47-Şekil 4.50 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.47. Brinch Hansen %80 yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

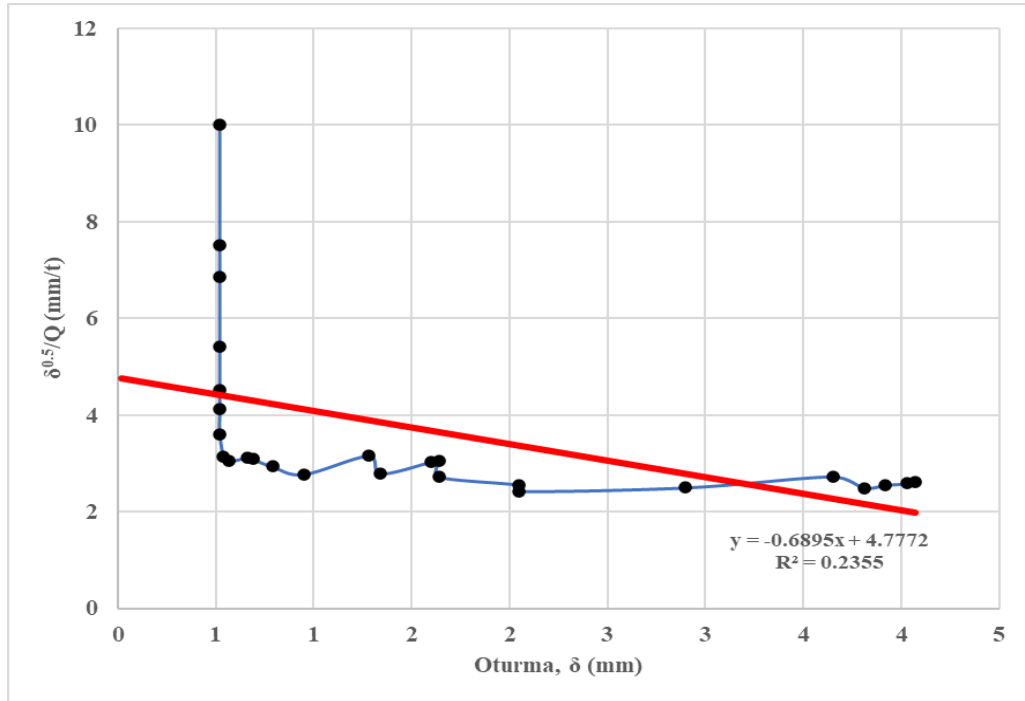
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	6596.56
2	2754.96
3	2611.48
4	3384.21

Şekil 4.47.'de 1 numaralı DKK' ya ait grafik verilmiştir. Grafiğe göre C_1 değeri 0.1035 ve C_2 değeri 5.55009 dur. Eşitlik 4.24. kullanılarak 1 numaralı DKK'nın nihai taşıma gücü 6596.56 N olarak hesaplanmıştır.



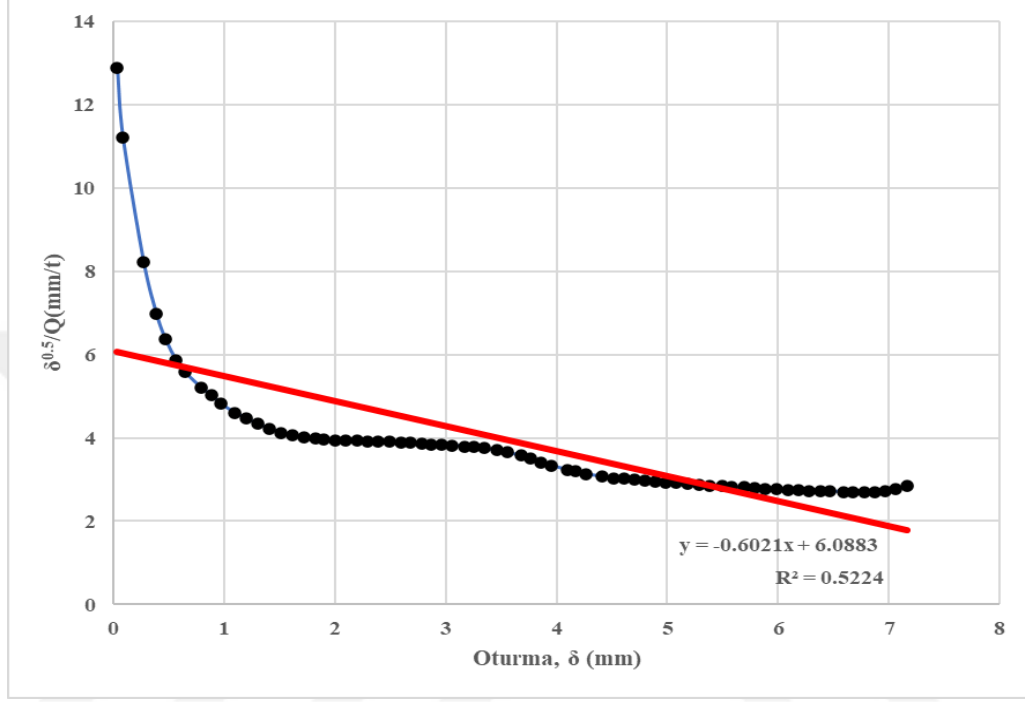
Şekil 4.47. Brinch Hansen %80 yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği

Şekil 4.48.'de 2 numaralı DKK' ya ait grafik verilmiştir. Grafiğe göre C_1 değeri 0.6895 ve C_2 değeri 4.7772 dir. Eşitlik 4.24. kullanılarak 2 numaralı DKK'nın nihai taşıma gücü 2754.96 N olarak hesaplanmıştır.

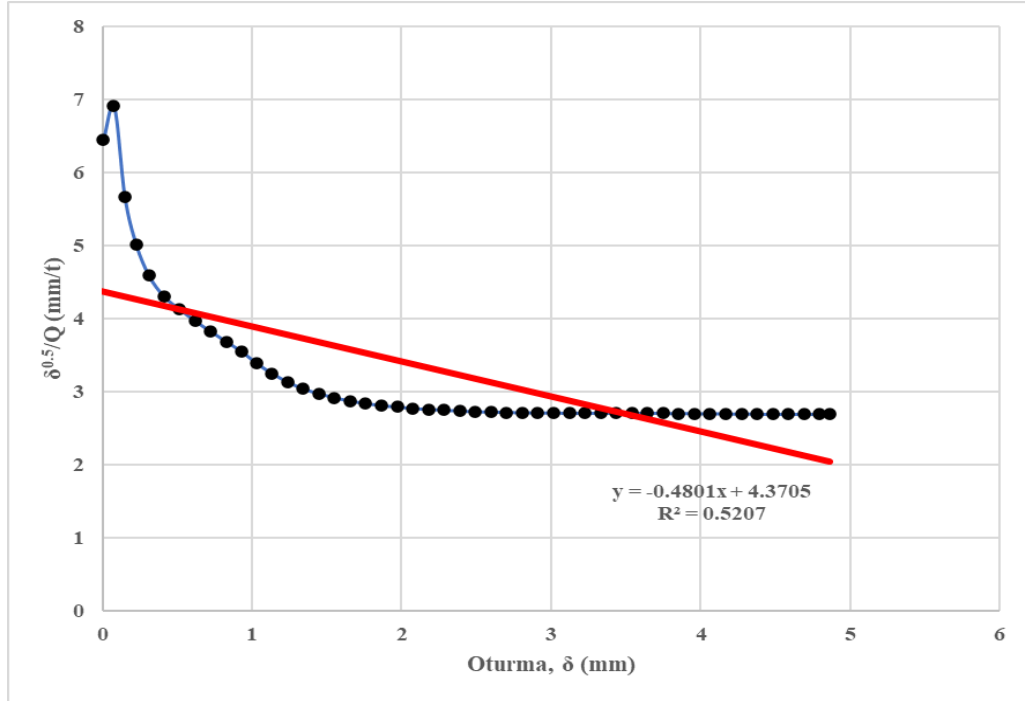


Şekil 4.48. Brinch Hansen %80 yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği

Şekil 4.49.'da 3 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 0.6021 ve C_2 değeri 6.0883' tür. Şekil 4.50.'de 4 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 0.4801 ve C_2 değeri 4.3705' tir. Eşitlik 4.24. kullanılarak 3 numaralı DKK'nın nihai taşıma gücü 2611.48 N, 4 numaralı DKK' nın ki ise 3384.21 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.49. Brinch Hansen %80 yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği



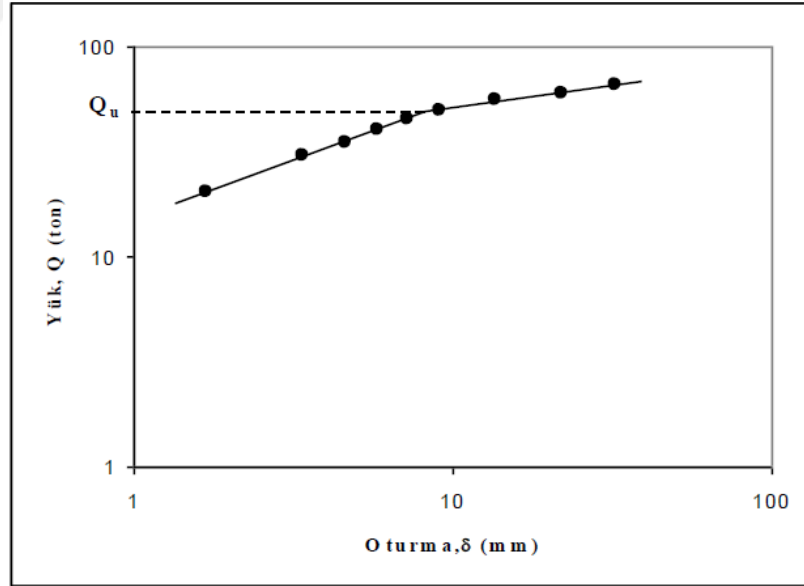
Şekil 4.50. Brinch Hansen %80 yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği

4.5.3. De Beer yöntemi (1989)

İçerisinde değişik fonksiyonlara eğilimli veriler barındıran bir veri gurubunda bu farklı eğilimleri belirlemenin en basit yolu bu veri gurubunun logaritmik ölçek ile grafiğe aktarılıp incelenmesidir. Bu sayede farklı fonksiyonlara eğilim gösteren veri gurupları grafik üzerinde fark edilebilir duruma gelir.

De Beer (1989) yönteminde yük - oturma grafiği her iki ekseninde de logaritmik ölçekte çizilir (Şekil 4.50.). Eğer deneyde göçme yükü geçilmiş ise, grafikteki noktaların farklı eğimlerdeki doğruların etrafında yer aldığı gözlenir. Bu doğruların eğiminden elde edilebilecek bir sonuç yoktur, ancak doğruların kesiştiği nokta yapılan deneyde kazığın uygulanan yüke olan reaksiyonunun değiştiği noktadır ve bu noktaya karşılık gelen yük değeri göçme yüküdür (De Beer ve Wallays, 1989).

De Beer (1989) yönteminde doğruların belirli olabilmesi için özellikle göçme noktasından sonra doğruyu temsil edebilecek sayıda nokta olması gerekir. Yöntem genellikle yavaş adımlı (SM) yükleme deneylerinin değerlendirilmesi için tavsiye edilmektedir.

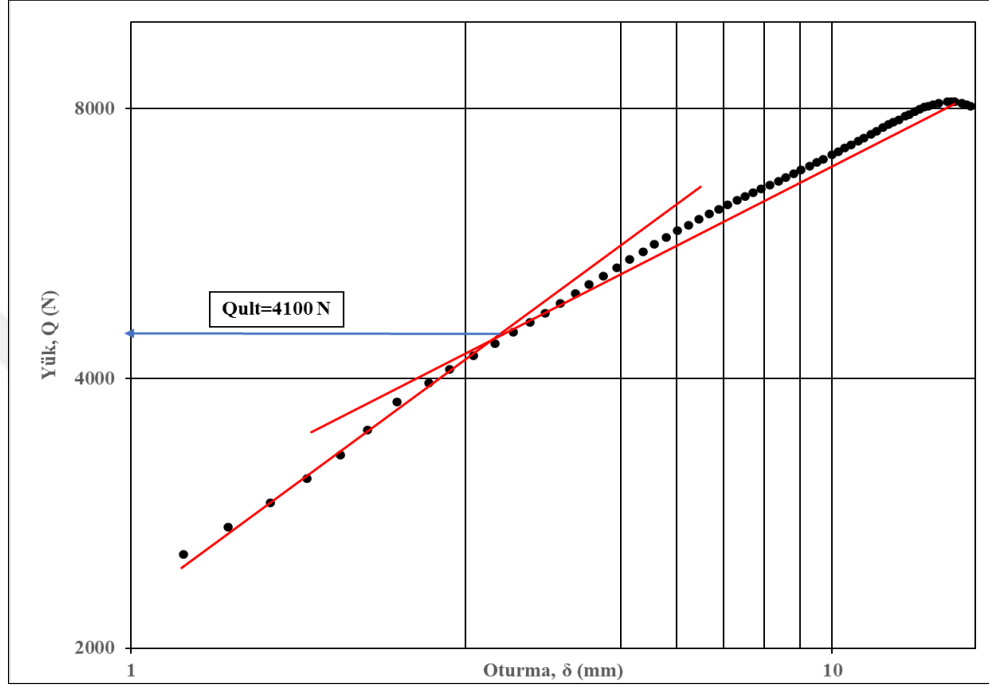


Şekil 4.51. De Beer yöntemi ile belirlenen oturma yük davranışı (De Beer, 1989)

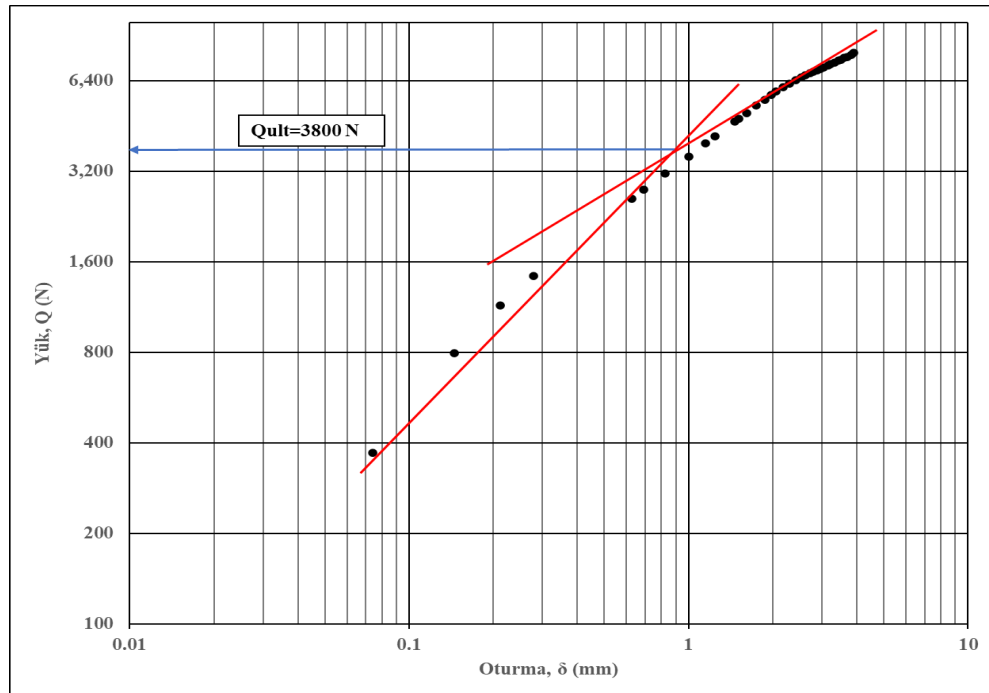
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.48. 'de yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.52-Şekil 4.55 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.48. De Beer yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

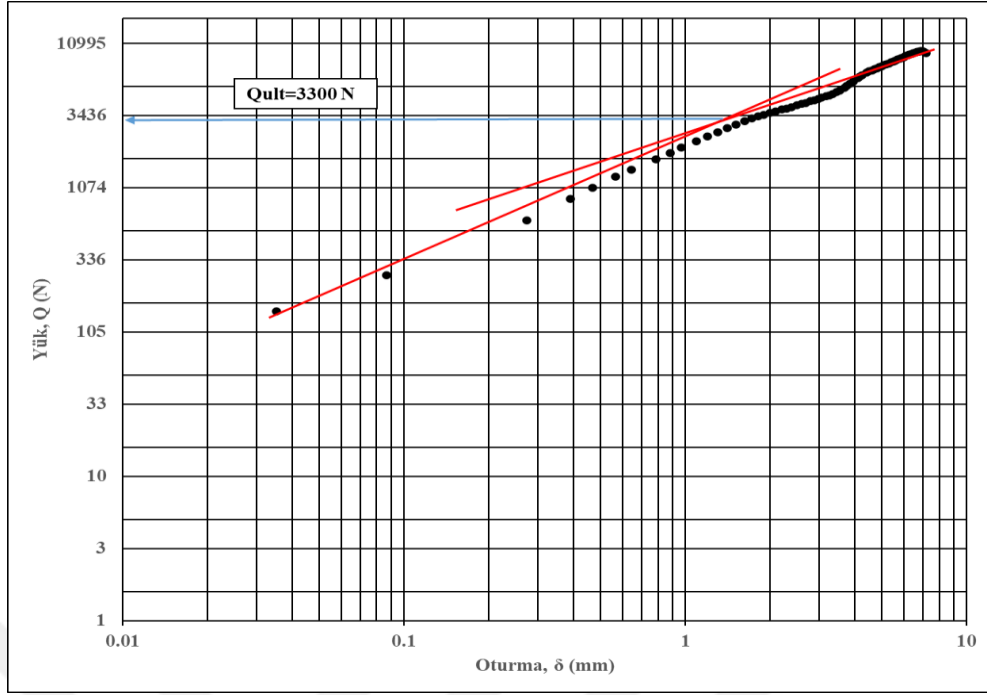
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	4100
2	3800
3	3300
4	4800



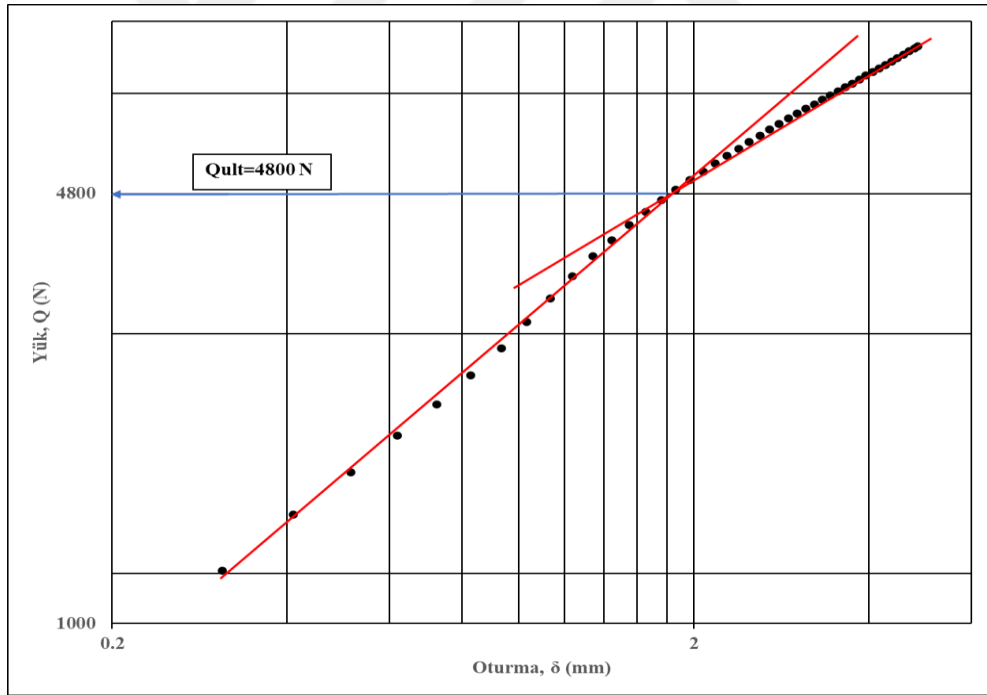
Şekil 4.52. De Beer yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.53. De Beer yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.54. De Beer yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.55. De Beer yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

4.5.4. Hirany-Kulhawy yöntemi (2002)

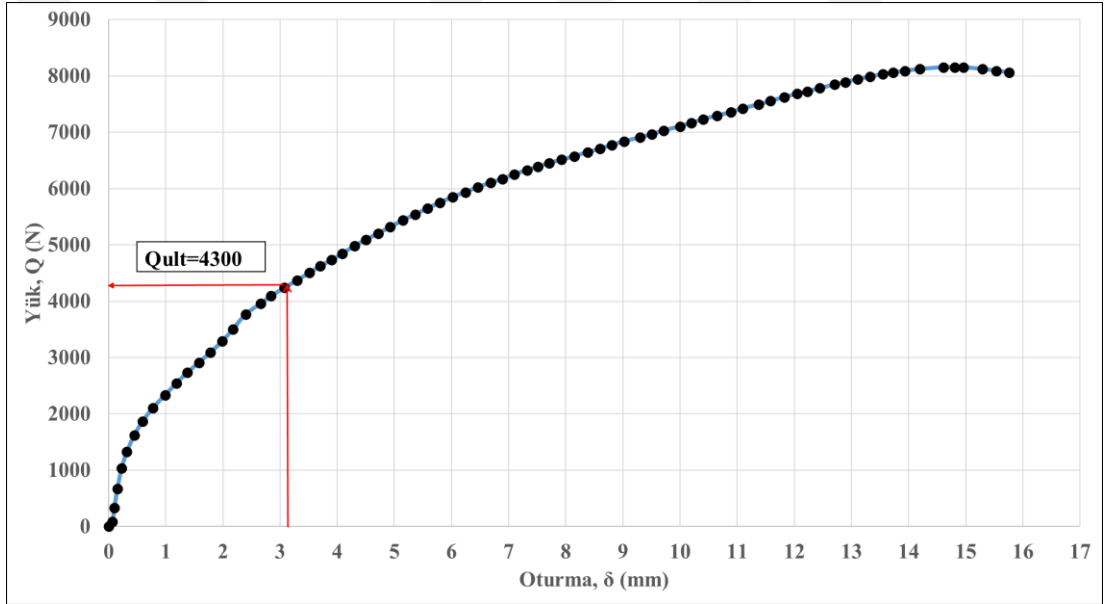
Bu çalışma kapsamında ele alınan yöntemler arasında en yenisi olan bu yöntem Hirany-Kulhawy (2002) tarafından öne sürülmüştür. Bu yöntem doğrultusunda yük

deplasman eğrisi parabolik kabul edilir. Yük – deplasman eğrisinin, kolon çapının 4 katı kadar oturma değerini kestiği nokta o kolonun taşıma gücünü vermektedir.

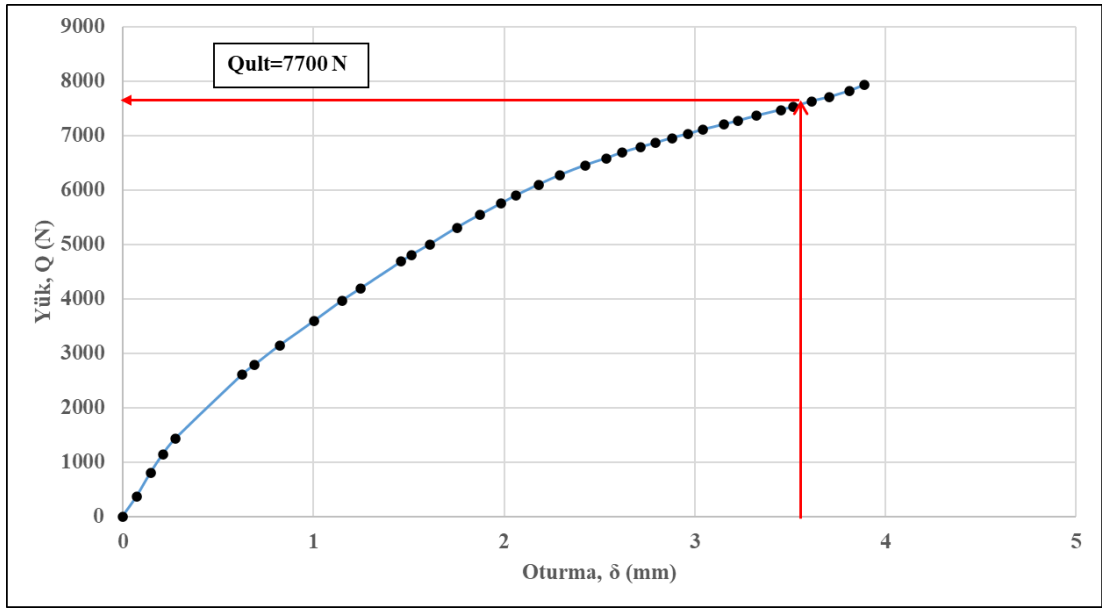
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.47. 'de, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.55-Şekil 4.58 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.49. Hirany-Kulhawy (2002) yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

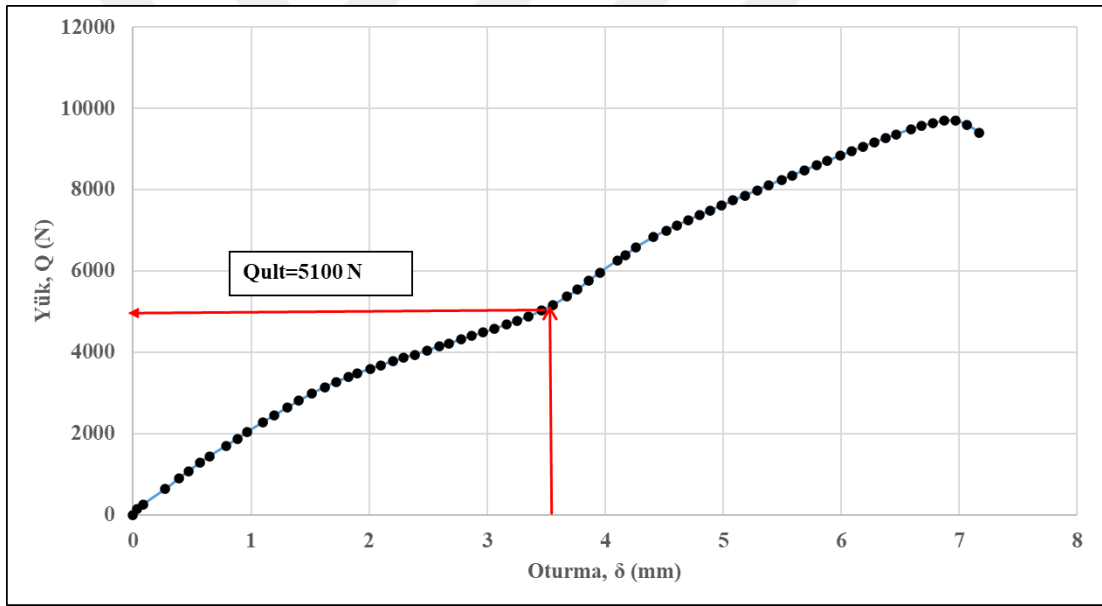
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	4300
2	7700
3	5100
4	7400



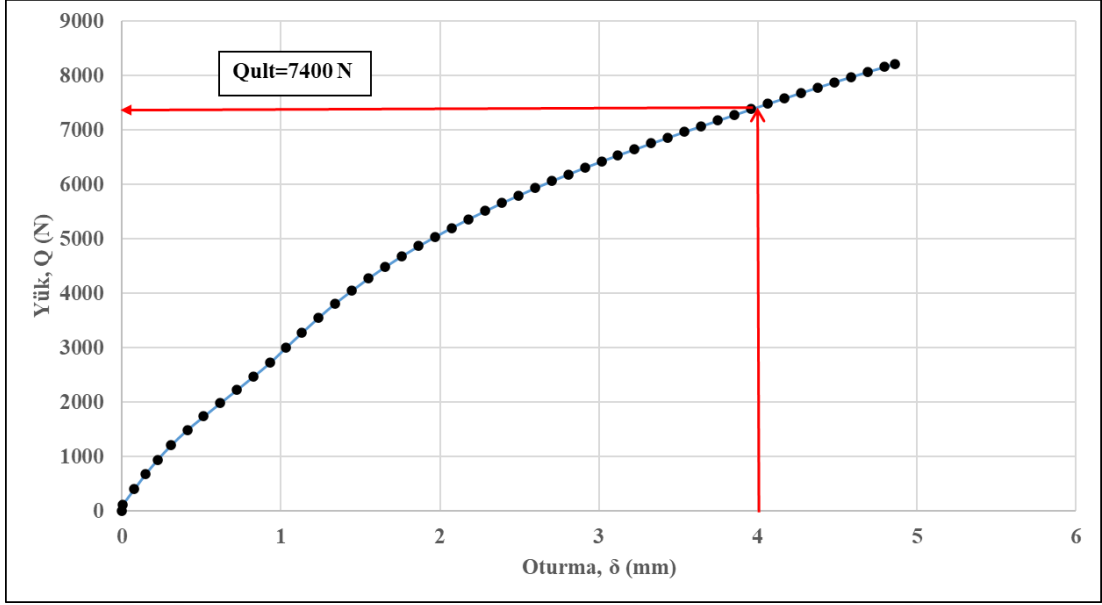
Şekil 4.56. Hirany-Kulhawy yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.57. Hirany-Kulhawy yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.58. Hirany-Kulhawy yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.59. Hirany-Kulhawy yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

4.5.5. Chin Kondner yöntemi (1970)

Bu yöntem Brinch Hansen %80 ve Decourt yöntemlerine benzerdir. Uygulanırken önce her yük değeri, bu yük değerine karşılık gelen yer değiştirme değerine bölünerek yer değiştirme / yük – yer değiştirme grafiği çizilir (Şekil 4.60). Grafikteki noktalar belli bir değerden sonra doğrusal eğilim gösterir (Chin, 1970). Bu noktaların oluşturduğu doğrunun eğiminin tersi ($1/C_1$) Chin Kondner yönteminin göçme yükünü verir:

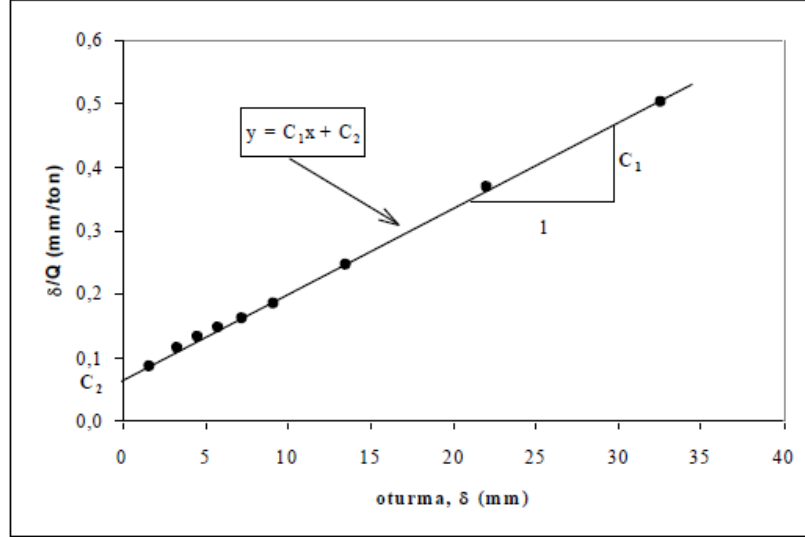
$$Q_{ult} = 1/C_1 \quad (4.25)$$

Burada;

C_1 : Chin Kondner grafiğinde doğrunun eğimi.

C_2 : doğrunun y eksenini kestiği nokta olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 4.61.' de 1 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 1.0085, Şekil 4.62.' de 2 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 0.7901, Şekil 4.63.' te 3 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 0.4195, Şekil 4.64.' te 4 numaralı DKK' ya ait grafiğe göre C_1 değeri 0.774 olarak bulunmuştur. Bu değerlerle Eşitlik 4.25. kullanılarak Çizelge 4.50 de verilen DKK' ların nihai taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır.

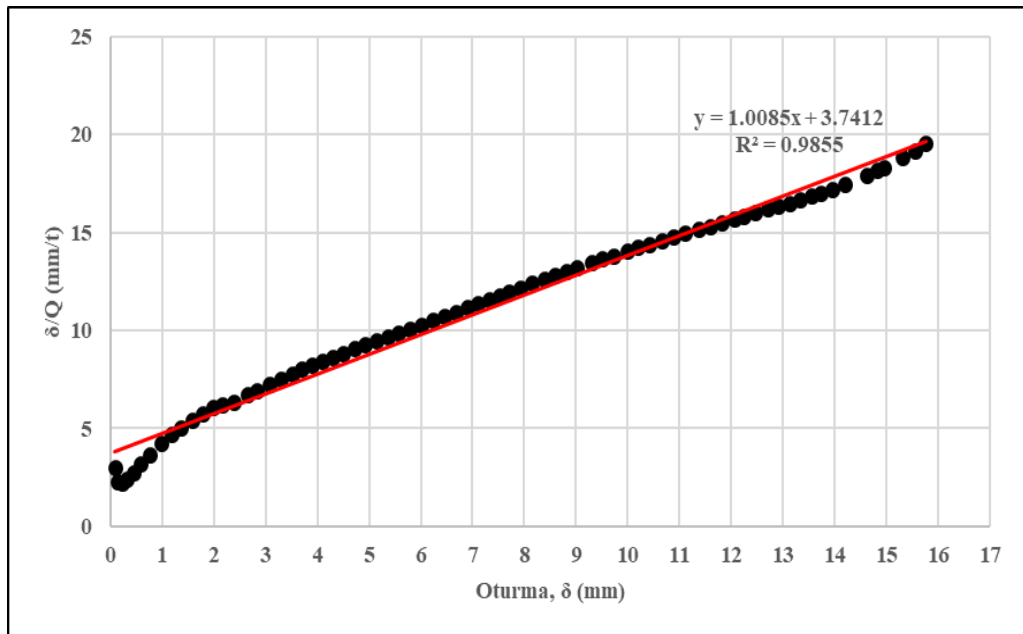


Şekil 4.60. Chin Kondner oturma/yük-oturma eğrisi (Chin, 1970)

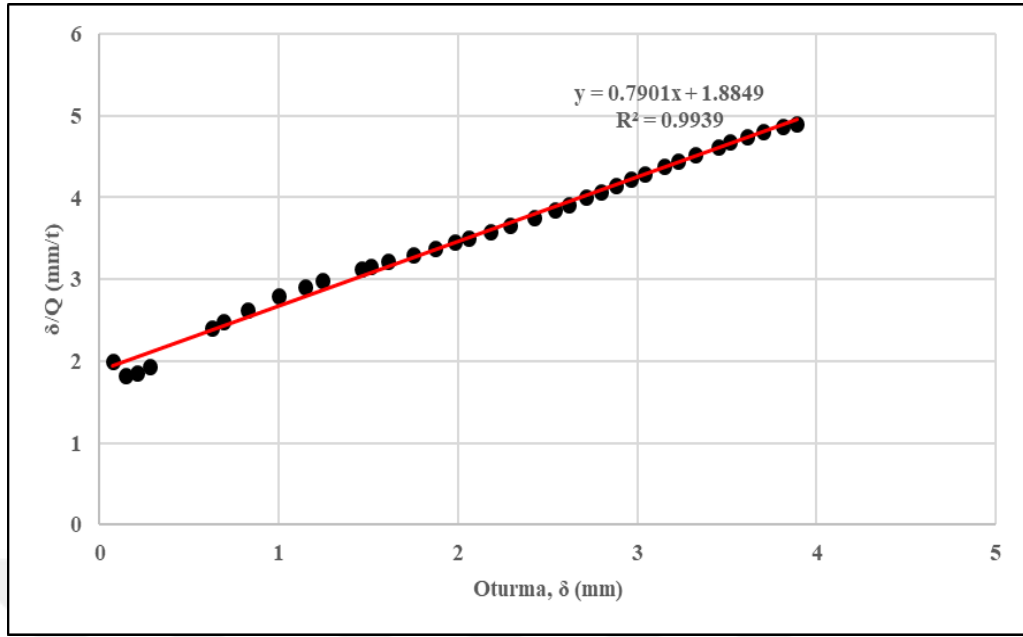
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.50.'de, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.61-Şekil 4.64 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.50. Chin Kondner yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

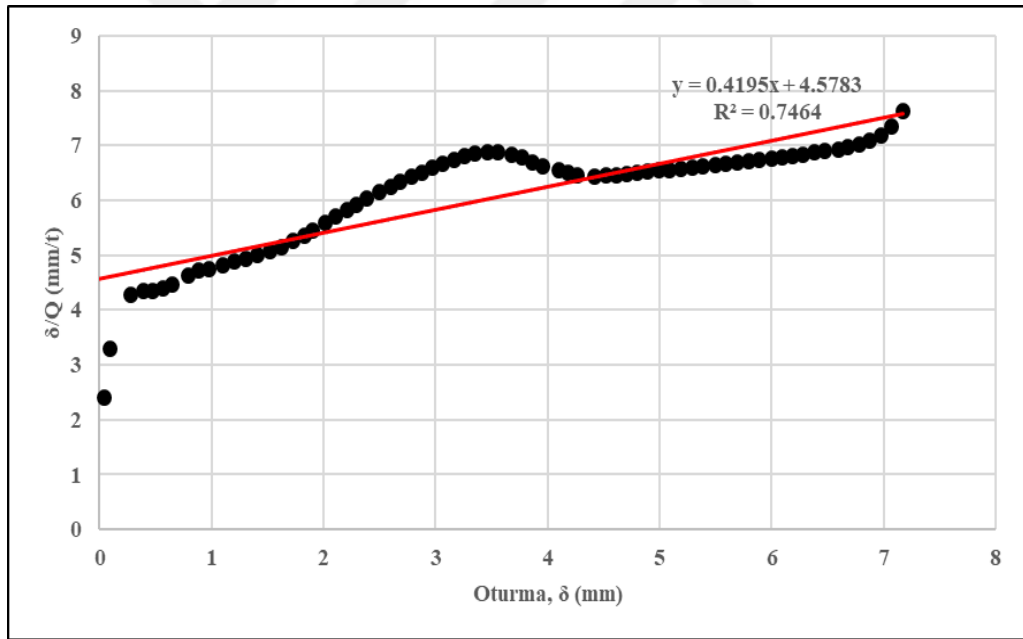
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	9915.70
2	12656.62
3	23837.90
4	12919.89



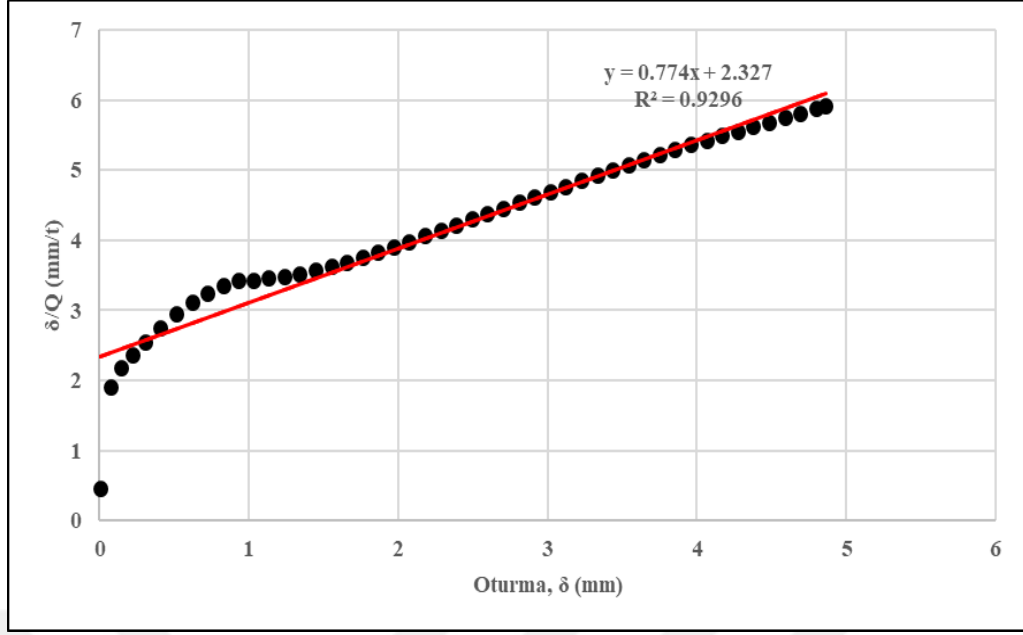
Şekil 4.61. Chin Kondner yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.62. Chin Kondner yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.63. Chin Kondner yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.64. Chin Kondner yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

4.5.6. Decourt yöntemi (1999)

Bu yöntem Brinch Hansen %80 ve Chin Kondner yöntemleri ile benzerlikler gösterir. Her yük değeri, bu yük değerine karşılık gelen yer değiştirme değerine bölünerek elde edilen değerler ile yük / yer değiştirme- yük grafiği çizilir (Şekil 4.65).

Ortaya çıkan grafikteki eğri apsise yaklaştığında doğrusal bir hal alır ve bu doğru uzatıldığında apsis ile kesişir. Doğrusal eğilim gösteren bu noktalara lineer regresyon analizi uygulanır. Bu regresyon doğrusunun apsis ile kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeri Decourt limit değeridir. Göçme yükü regresyon doğrusunun düşey eksenini kestiği değer doğrusunun eğimine bölünmesi ile elde edilebilir (Decourt, 1999).

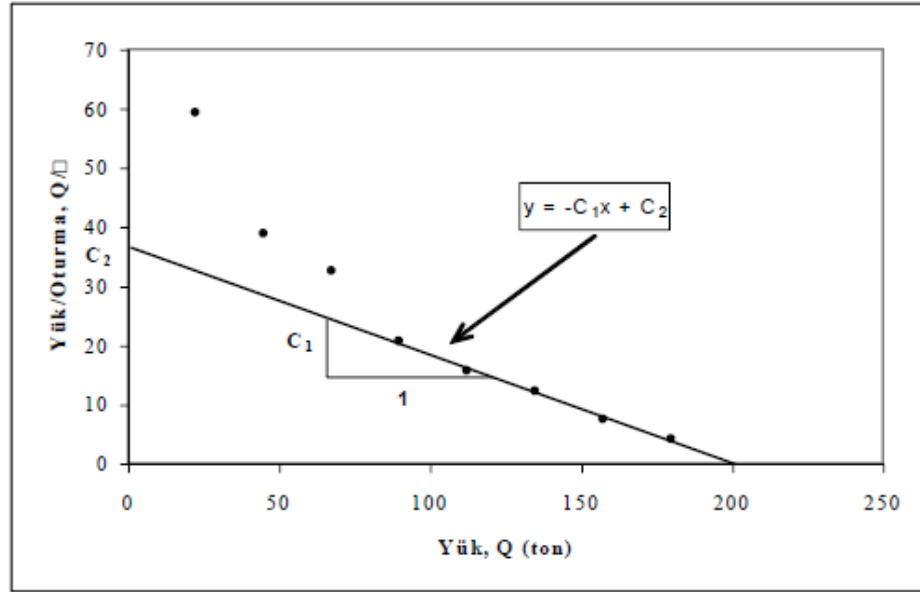
$$Q_{ult} = C_2 / C_1 \quad (4.26)$$

Burada;

C_1 : regresyon doğrusunun eğimi

C_2 : regresyon doğrusunun düşey eksenini kestiği değer

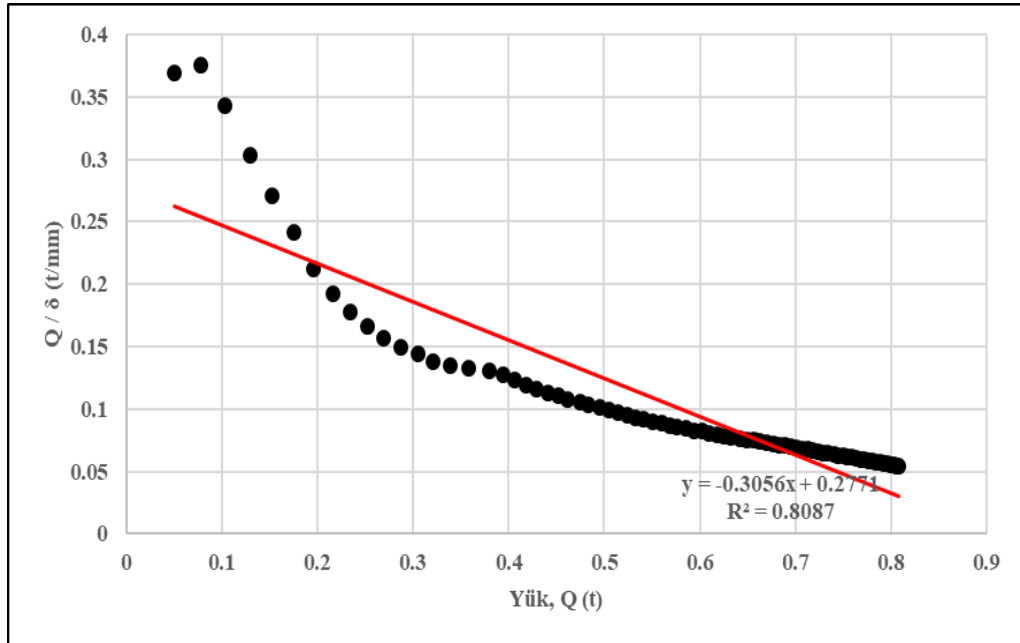
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.51.'de, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.66.-Şekil 4.69. arasında verilmiştir.



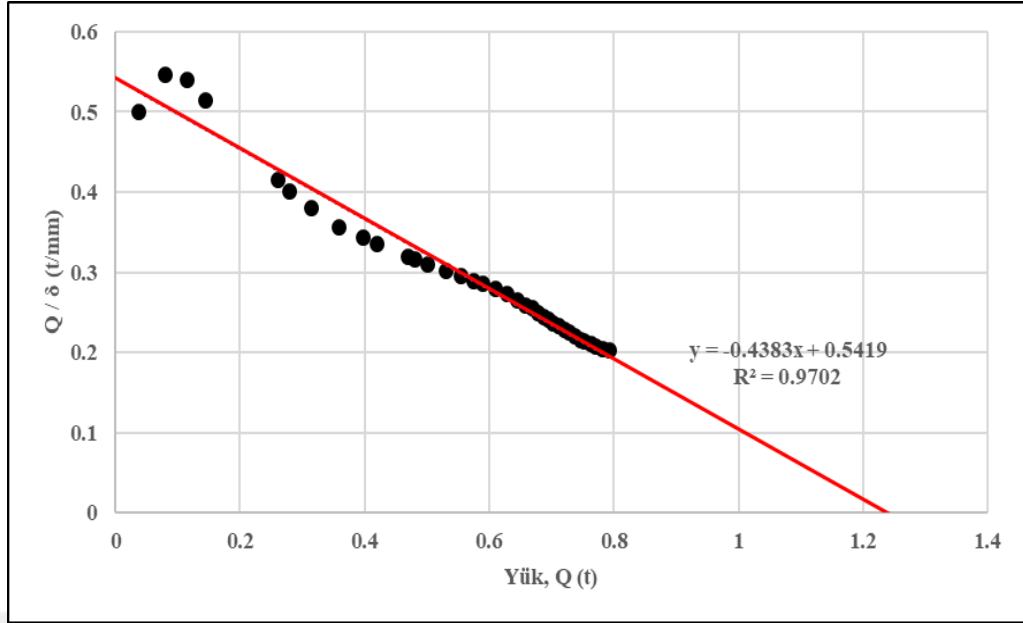
Şekil 4.65. Decourt yöntemine göre yük/yük-oturma eğrisi (Decourt, 1999)

Çizelge 4.51. Decourt yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

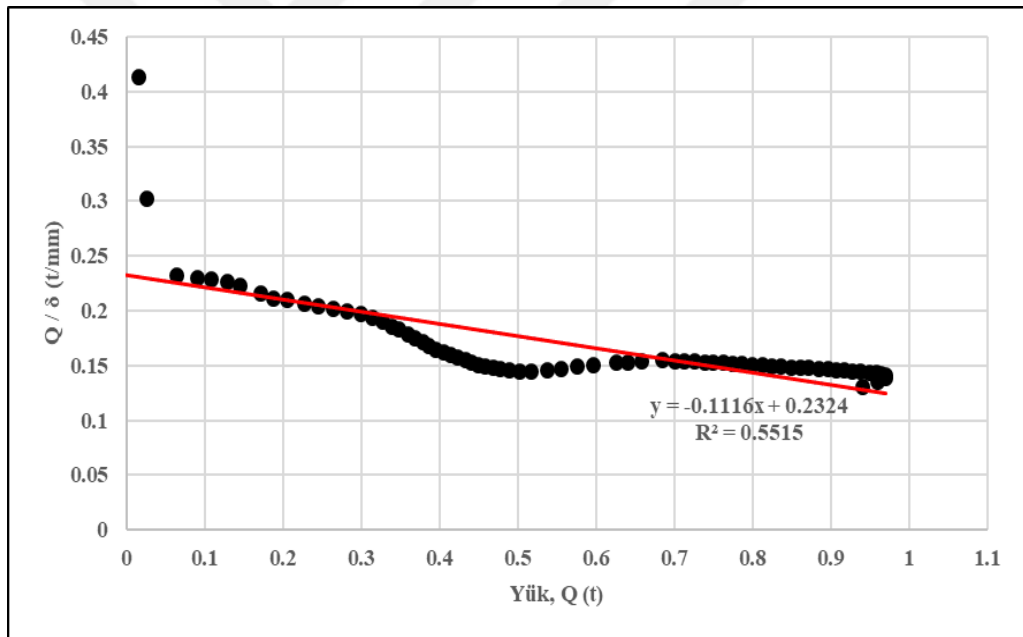
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	9067.40
2	12363.67
3	20824.37
4	9684.44



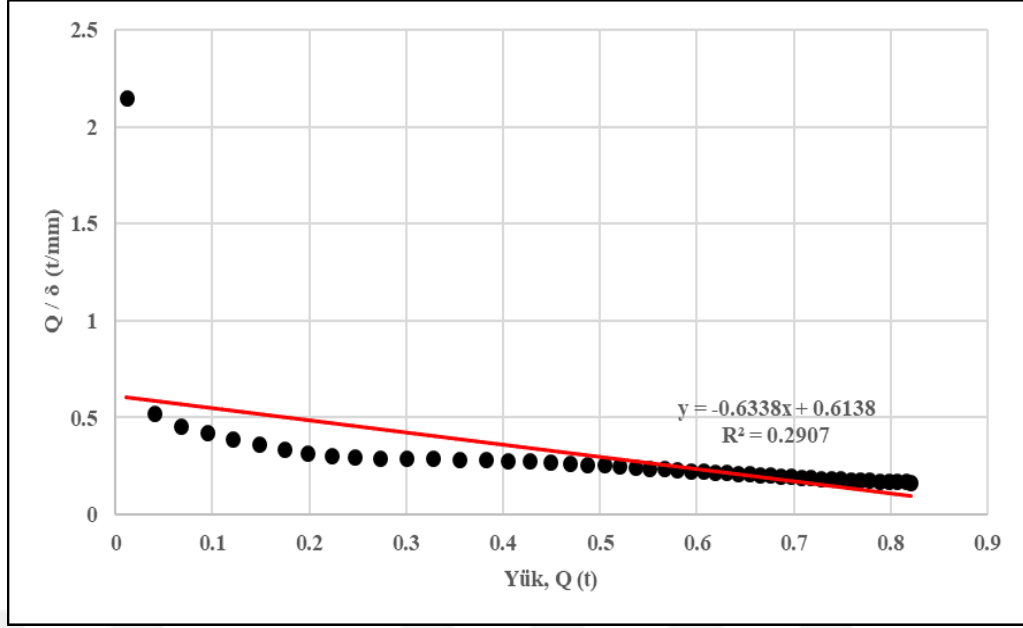
Şekil 4.66. De Court yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.67. De Court yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.68. De Court yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.69. De Court yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

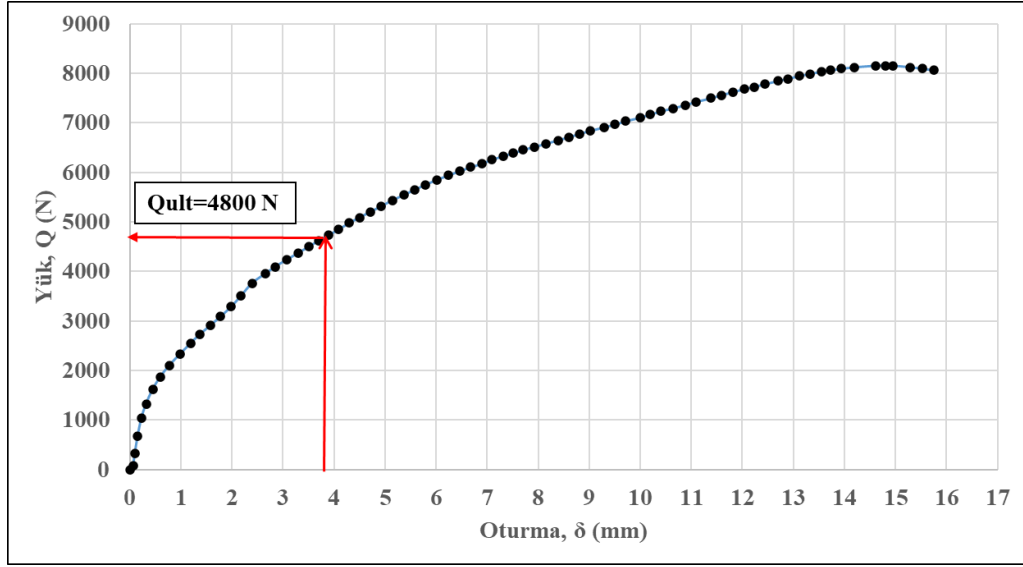
4.5.7. Eğim-teğet yöntemi

Bu yöntemde nihai yük, yük-yer değiştirme eğrisinin 3,8 mm lik başlangıç eğimine eşit bir yer değiştirmede oluşur.

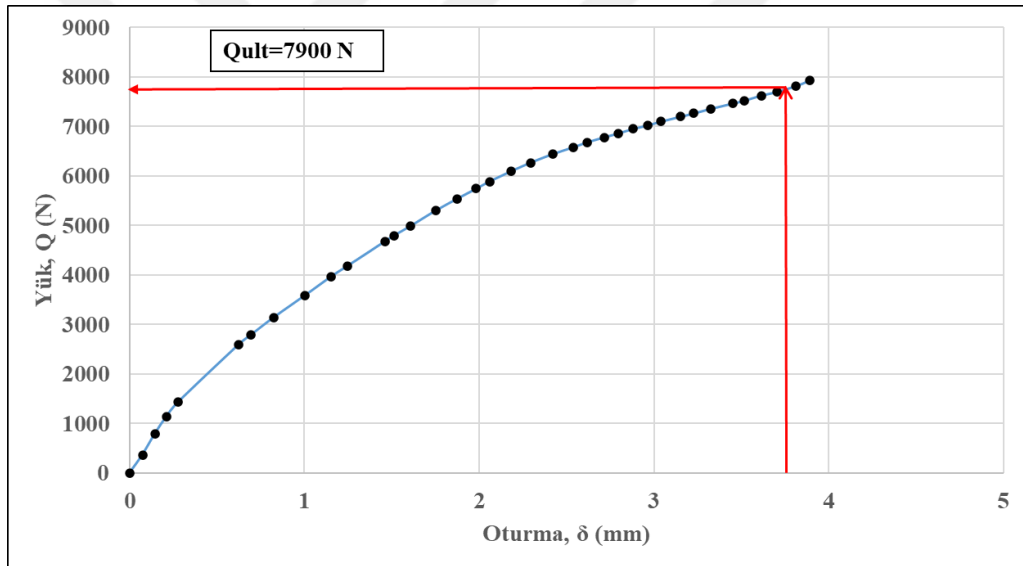
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.52. 'de, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.70.-Şekil 4.73. arasında verilmiştir.

Çizelge 4.52. Eğim teğet yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

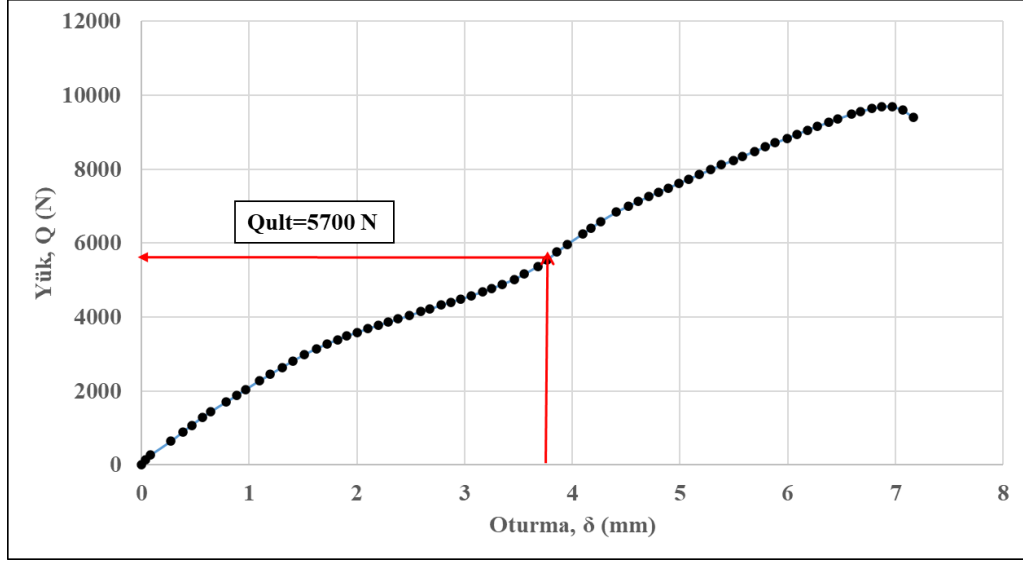
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	4800
2	7900
3	5700
4	7300



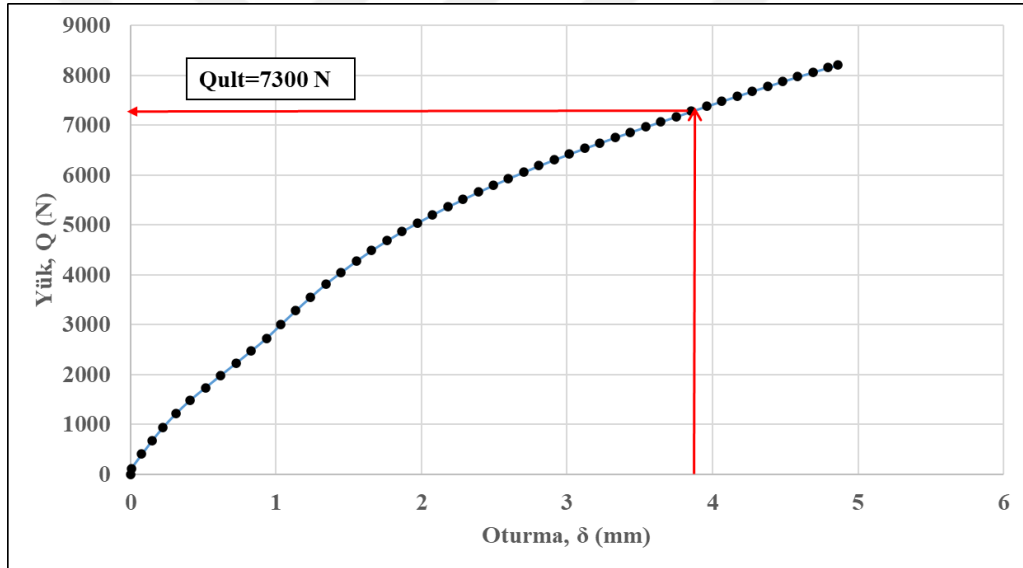
Şekil 4.70. Eğim-teğet yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.71. Eğim-teğet yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.72. Eğim-teğet yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.73. Eğim-teğet yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

4.5.8. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemi

Bu yöntemde yük-oturma grafiğindeki eğrinin elastik durumu temsil eden başlangıç ve plastik durumu temsil eden bitiş bölümlerine birer teğet çizilir. Göçme yükü bu iki doğrunun kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeridir (Mishra ve ark., 2019).

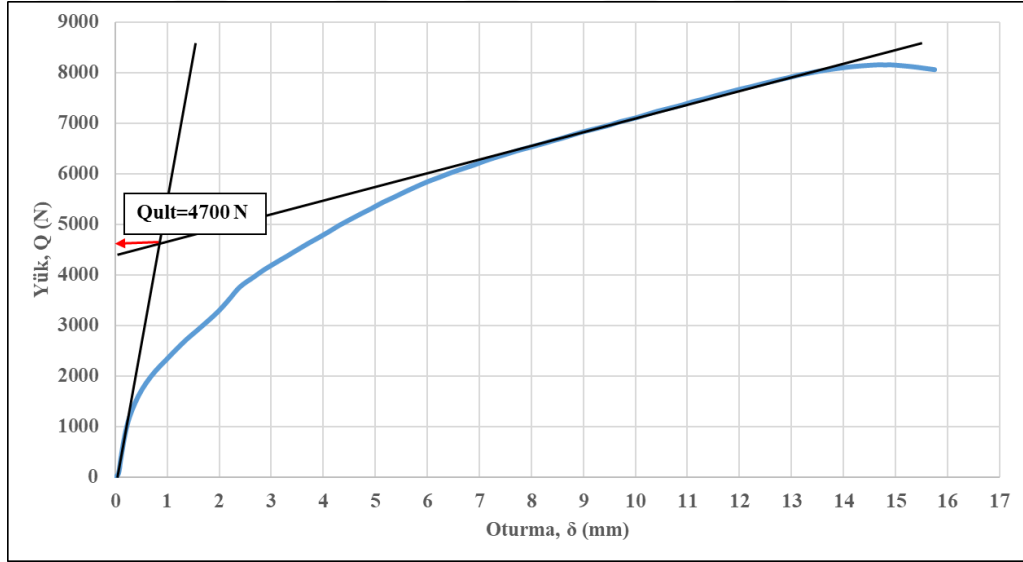
Yöntemin iyi sonuç vermesi için kazığın plastik oturma yapmış olması gereklidir. Deneyde uygulanan maksimum yük, değerlendirme sonucunu etkiler. Ayrıca

bulunacak göçme yükü teğetler çizilirken yapılacak tercihe ve grafiğin çizilmesinde kullanılacak ölçeğe göre değişiklik gösterebilir. Bunun yanında uygulaması en basit olan yöntemlerden biri bu yöntemdir.

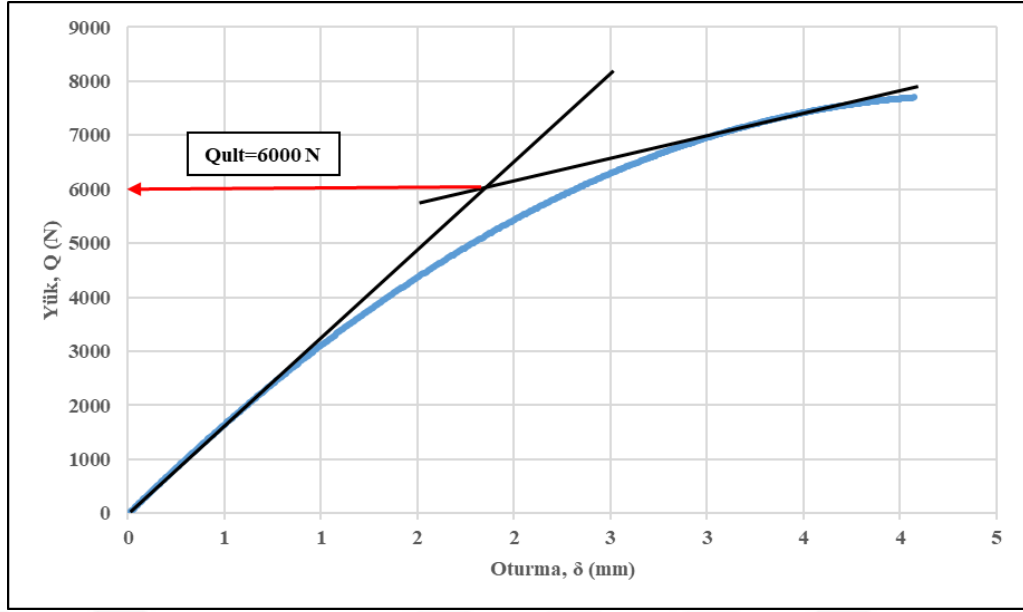
Kazıklara ait hesaplanan nihai taşıma güçleri Çizelge 4.53.'te, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.74-Şekil 4.77 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.53. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemi ile hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri

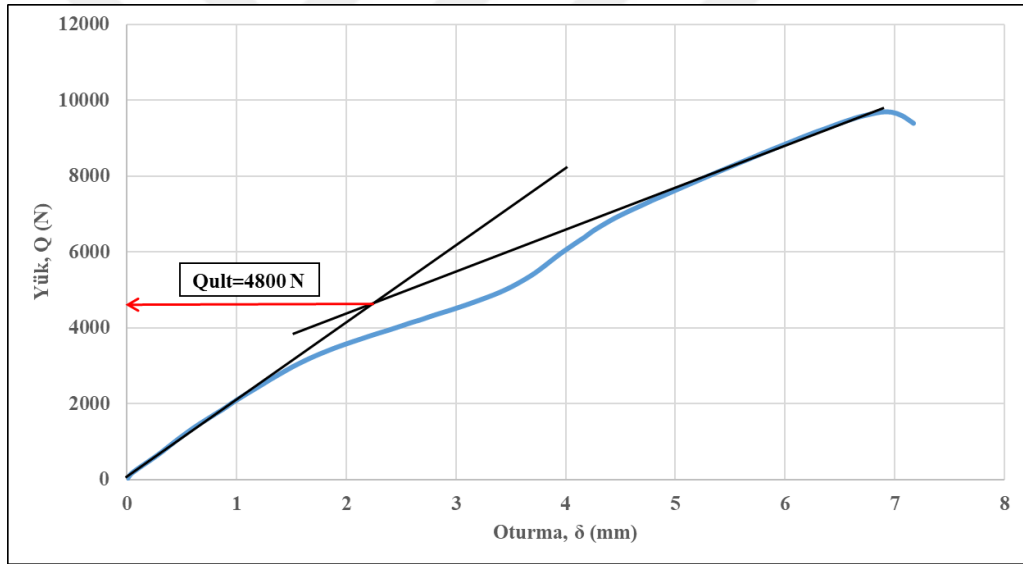
Kazık No	Q_{ult} (N)
1	4700
2	6000
3	4800
4	5400



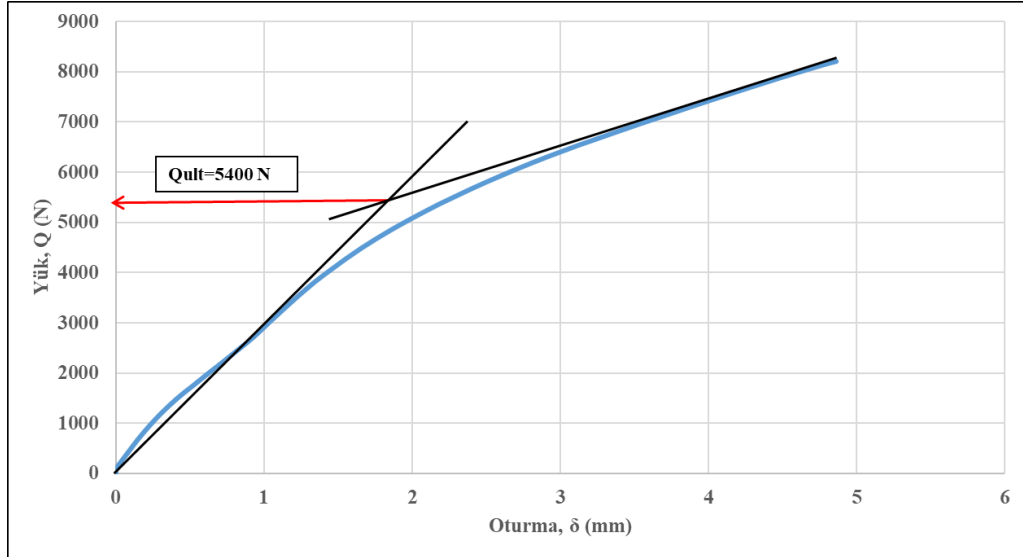
Şekil 4.74. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemine göre 1 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.75. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemine göre 2 numaralı kolonun grafiği.



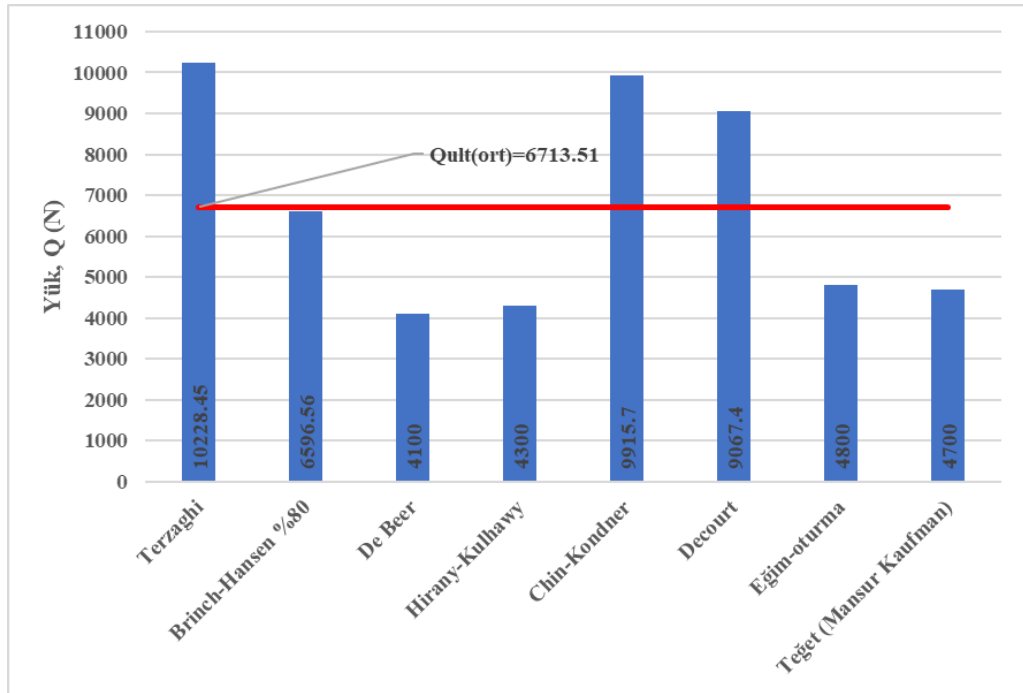
Şekil 4.76. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemine göre 3 numaralı kolonun grafiği.



Şekil 4.77. Teğet (Mansur Kaufman) yöntemine göre 4 numaralı kolonun grafiği.

4.5.9. Genel değerlendirme

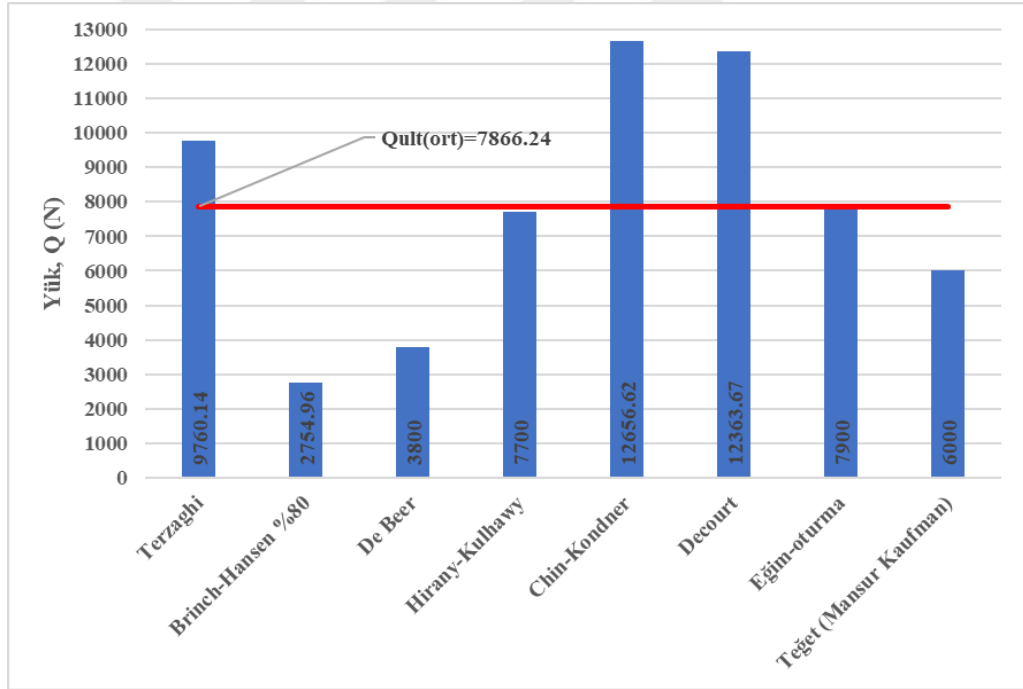
Büyük ölçekli DKK' larının yükleme deneyleri sonrası taşıma gücü değerleri 8 farklı yöntemle hesap edilmiştir. 1 numaralı DKK' ya ait hesap sonuçları Şekil 4.78.'de verilmiştir.



Şekil 4.78. 1 numaralı DKK'nın yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerleri

1 numaralı DKK 8000 N değerine kadar yüklenmiş ve bu yük altında 15 mm civarında oturma yapmıştır. Yaklaşım yöntemlerine göre yapılan taşıma gücü hesaplarının ortalaması 6713 N olarak hesaplanmıştır. Ortalama yüke en yakın değerler Brinch Hansen %80 ve Eğim-oturma yöntemlerinden elde edilmiştir. Ortalama yüke en uzak alt sınır değer De Beer yönteminden ($Q_{ult}=4100$ N) ve en uzak üst sınır değer Terzaghi yönteminden ($Q_{ult}=10228$ N) elde edilmiştir.

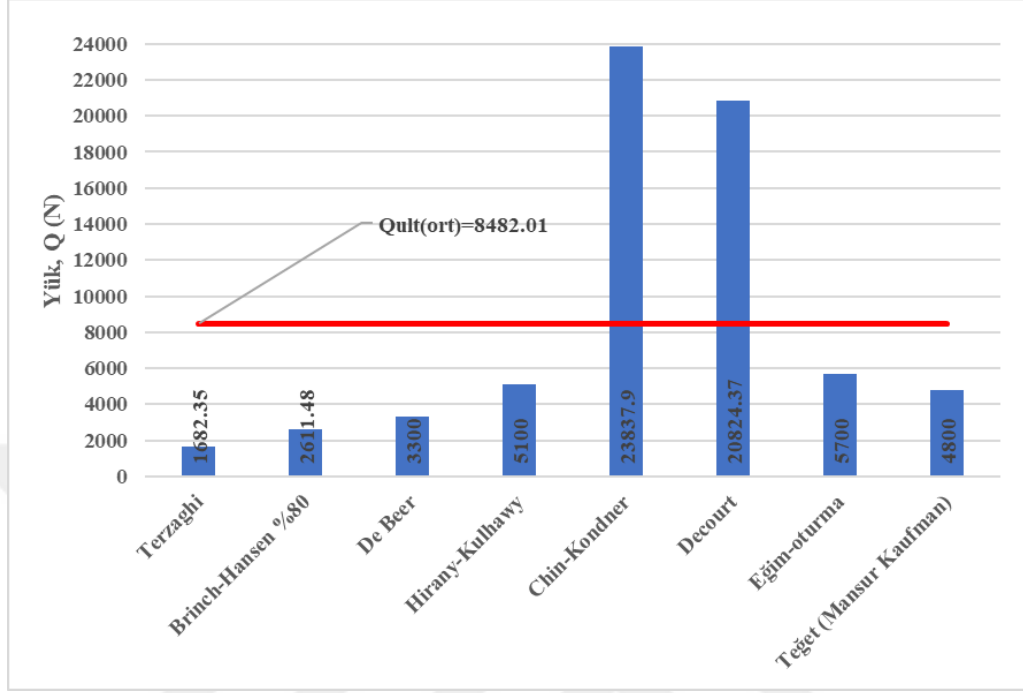
2 numaralı DKK'ya ait hesap sonuçları Şekil 4.79.'da verilmiştir. 2 numaralı DKK 8000 N değerine kadar yüklenmiş ve bu yük altında 4 mm civarında oturma yapmıştır. Yaklaşım yöntemlerine göre yapılan taşıma gücü hesaplarının ortalaması 7866 N olarak hesaplanmıştır. Ortalama yüke en yakın değerler Hirany-Kulhawy ve Eğim-oturma yöntemlerinden elde edilmiştir. Ortalama yüke en uzak alt sınır değer Brinch Hansen %80 yönteminden ($Q_{ult}=2755$ N) ve en uzak üst sınır değer Chin-Kondner yönteminden ($Q_{ult}=12656$ N) elde edilmiştir.



Şekil 4.79. 2 numaralı DKK'nın yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerleri

3 numaralı DKK'ya ait hesap sonuçları Şekil 4.80.'de verilmiştir. 3 numaralı DKK 9000 N değerine kadar yüklenmiş ve bu yük altında 7 mm civarında oturma yapmıştır. Yaklaşım yöntemlerine göre yapılan taşıma gücü hesaplarının ortalaması 8482 N olarak hesaplanmıştır. Ortalama yüke en yakın değerler Hirany-Kulhawy ve Eğim-oturma yöntemlerinden elde edilmiştir. Ortalama yüke en uzak alt sınır değer

Terzaghi yönteminden ($Q_{ult}=1682$ N) ve en uzak üst sınır değer Chin-Kondner yönteminden ($Q_{ult}=23837$ N) elde edilmiştir.

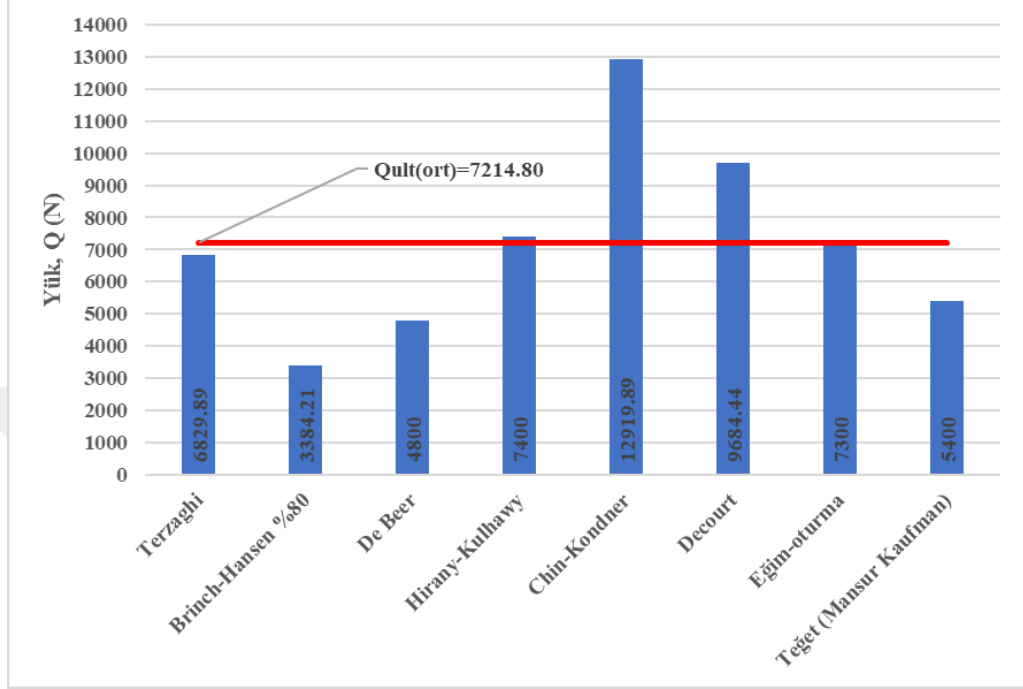


Şekil 4.80. 3 numaralı DKK'nın yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerleri

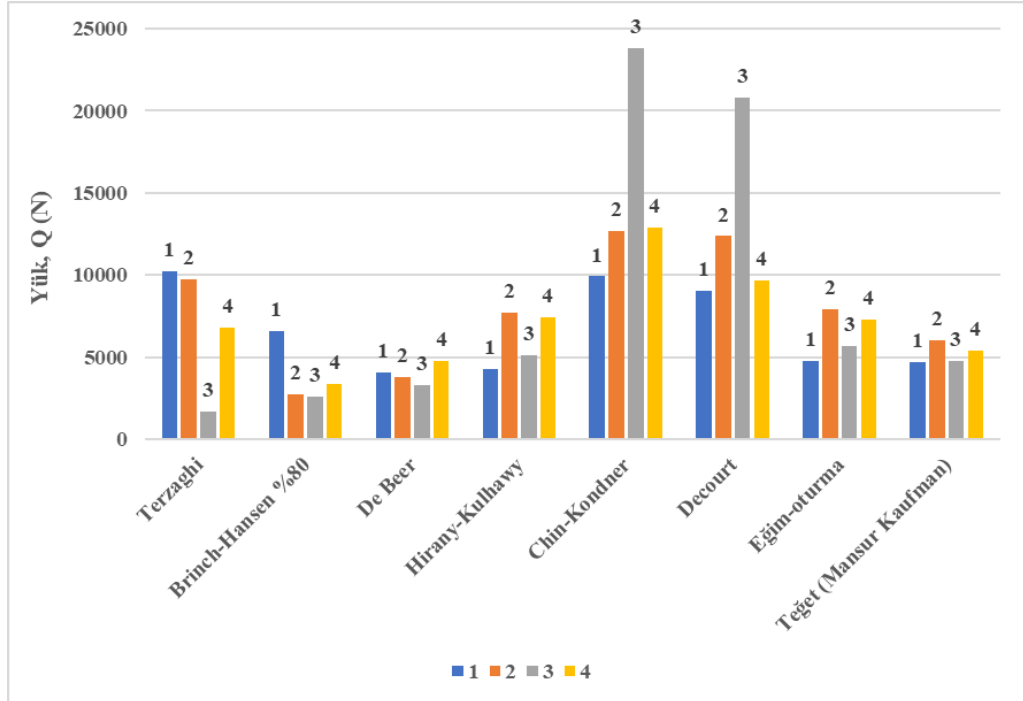
4 numaralı DKK' ya ait hesap sonuçları Şekil 4.81.'de verilmiştir. 4 numaralı DKK 9000 N değerine kadar yüklenmiş ve bu yük altında 5.6 mm civarında oturma yapmıştır. Yaklaşım yöntemlerine göre yapılan taşıma gücü hesaplarının ortalaması 7214 N olarak hesaplanmıştır. Ortalama yüke en yakın değerler Hirany-Kulhawy ve Eğim-oturma yöntemlerinden elde edilmiştir. Ortalama yüke en uzak alt sınır değer Brinch Hansen %80 yönteminden ($Q_{ult}=3384$ N) ve en uzak üst sınır değer Chin-Kondner yönteminden ($Q_{ult}=12919$ N) elde edilmiştir.

DKK' ların taşıma gücü yaklaşım yöntemlerine göre kıyaslaması Şekil 4.82.'de verilmiştir. Terzaghi' nin taşıma gücü hesabına göre diğer yöntemler kıyaslandığında Chin-Kondner ve Decourt yöntemlerinin 1 numaralı DKK dışında oldukça farklı değerler verdiği belirlenmiştir. Özellikle 3 numaralı DKK' da Terzaghi' nin taşıma gücü hesabına kıyasla göre bu iki yöntemle hesaplanan taşıma gücü değeri 13 kat fazla çıkmıştır (Çizelge 4.54.). Terzaghi' nin taşıma gücü yöntemine göre en fazla yük taşınması beklenen 1 numaralı DKK ve en az yük taşınması beklenen 3 numaralı DKK iken, yükleme deneylerinde en az yük taşıyan 1 numaralı DKK ve en fazla yük taşıyan 2

numaralı DKK olmuştur. Burada hesaplanan ve beklenenin farklı olmasının sebebi 1 numaralı DKK' nın göçmesi kazığın kırılması şeklinde olurken, diğer 3 DKK' da göçme zeminin yenilmesi şeklinde olmuştur.



Şekil 4.81. 4 numaralı DKK' nın yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerleri



Şekil 4.82. DKK' ların yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerlerinin karşılaştırması

Dolayısıyla yükleme deney sonuçlarına göre taşıma gücü açısından en fazla yük taşıyan 2 numaralı DKK iken, en fazla yük taşıyandan en az yük taşıyana doğru sırasıyla 2,4,3 ve 1 numaralı DKK' lar olmuştur. Aynı yük altına (7000 N) 1,2,3 ve 4 numaralı DKK' ların yaptıkları oturmaların sırasıyla 10 mm, 3.2 mm, 4.7 mm, 3.8 mm olduğu belirlenmiş ve taşıma gücü açısından da en fazla yük taşıyandan en az yük taşıyana doğru sırasıyla 2,4,3 ve 1 numaralı DKK' lar olduğunu doğrulamıştır. Çizelge 4.54. incelendiğinde bu tespiti en yakın hesap yaklaşım yöntemlerinin Hirany-Kulhawy ve Eğim-oturma yöntemleri olduğu söylenebilir. Yaklaşım yöntemlerine göre deneylerin tümü karşılaştırıldığında Eğim-oturma yönteminin yükleme deney sonuçlarına yakın en makul sonucu verdiği söylenebilir. Yine Çizelge 4.54. incelendiğinde Teğet (Mansur Kaufman) yönteminin de makul sonuçlar verdiği söylenebilir

Çizelge 4.54. DKK' ların yaklaşım yöntemlerine göre taşıma gücü değerleri

Yaklaşım Yöntemleri	Yöntemlere göre nihai taşıma gücü değerleri (N)	DKK No				Taşıma gücüne göre sıralama
		1	2	3	4	
Y-1	Terzaghi	10228.5	9760.1	1682.4	6829.9	1>2>4>3
Y-2	Brinch-Hansen %80	6596.6	2755.0	2611.5	3384.2	1>4>2>3
Y-3	De Beer	4100.0	3800.0	3300.0	4800.0	4>1>2>3
Y-4	Hirany-Kulhawy	4300.0	7700.0	5100.0	7400.0	2>4>3>1
Y-5	Chin-Kondner	9915.7	12656.6	23837.9	12919.9	3>4>2>1
Y-6	Decourt	9067.4	12363.7	20824.4	9684.4	3>2>4>1
Y-7	Eğim-oturma	4800.0	7900.0	5700.0	7300.0	2>4>3>1
Y-8	Teğet (Mansur Kaufman)	4700.0	6000.0	4800.0	5400.0	2>4>3>1
	Ortalama	6713.5	7866.9	8482.0	7214.8	3>2>4>1

Çizelge 4.55. Taşıma gücü yaklaşım yöntemlerinin değerlendirilmesi

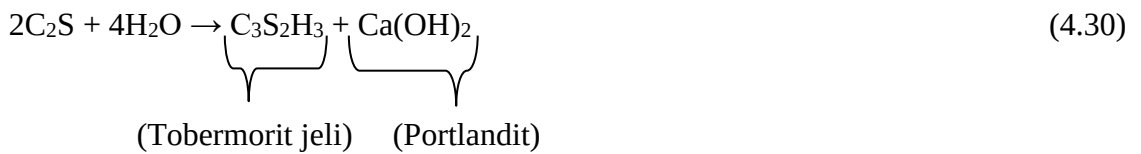
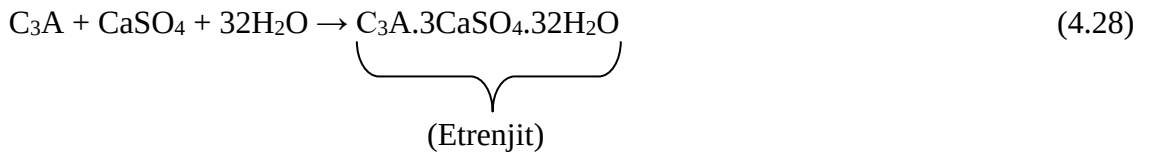
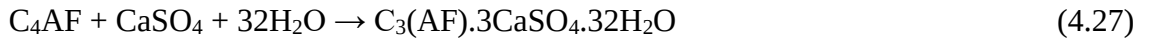
DKK No	Qult _(ort) (N)	En Yakın Yöntem	Deneilerin Tümüne En Yakın Yöntem
1	6713.51	Y-2, Y-7	Y-7
2	7866.92	Y-4, Y-7	
3	8482.01	Y-4, Y-7	
4	7214.80	Y-4, Y-7	

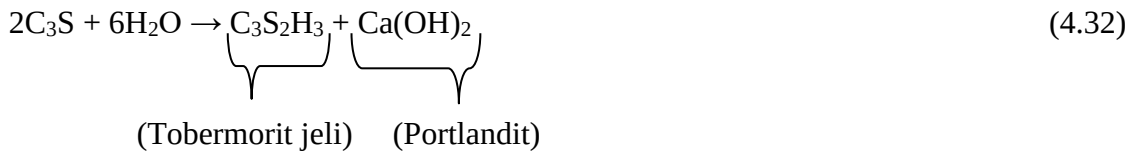
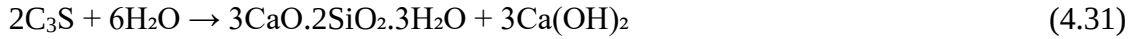
4.6. Kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler

Tez çalışması kapsamında serbest basınç mukavemeti ve geçirimsizlik deney sonuçları açısından önemli görülen ve kıyasa tabi tutulabilecek küçük ölçekli DKK' lardan alınan numunelerin kimyasal, mineralojik ve petrografik analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda killi zemin için yapılan DKK' lardan 5-11 ve 16. tasarımlar ile optimum tasarım seçilmiştir. Yine kumlu zemin için yapılan DKK' lar içinden ise 15 ve 16. tasarımlar seçilmiştir.

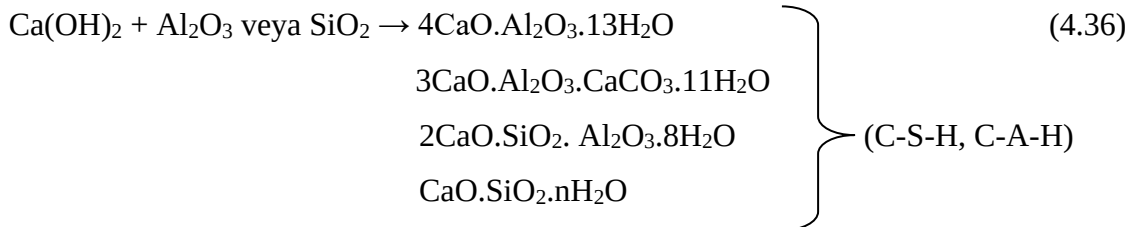
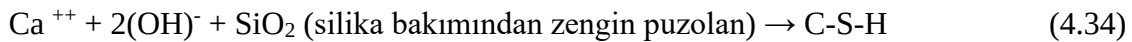
Analizlerin yorumlanabilmesi için tasarıma giren malzemelerin kimyasal yapılarını ve davranışlarını iyi irdelemek gerekmektedir. DKK' ların oluşturulmasında doğal bir puzolan olan amorf silika, çimento kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemelerle beraber zemin-bağlayıcı reaksiyonları sonucu tüm malzemelerin mikro boyuttaki görüntüsü ve mineralojik bileşimleri değişmektedir.

Portland çimentosu silikatlar grubu ve aluminatlar grubu olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Silikat grubu içerisinde belit olarak bilinen dikalsiyum silikat (C_2S , $2CaO.SiO_2$) ve alit olarak bilinen trikalsiyum silikat (C_3S , $3CaO.SiO_2$) bulunurken aluminat grubu içerisinde aluminat olarak bilinen trikalsiyum aluminat (C_3A , $3CaO.Al_2O_3$) ve ferrit olarak bilinen tetrakalsiyum aluminoferrit (C_4AF , $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) bulunur. Çimento ve su karıştırıldığında çimentoyu oluşturan maddelerin su ile yaptığı ve hidrasyon adı verilen bir takım ekzotermik kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar sonucu priz alma diye adlandırılan katılaşma süreci başlar ve nihayetinde dayanım kazanma diye adlandırılan sertleşme meydana gelir.

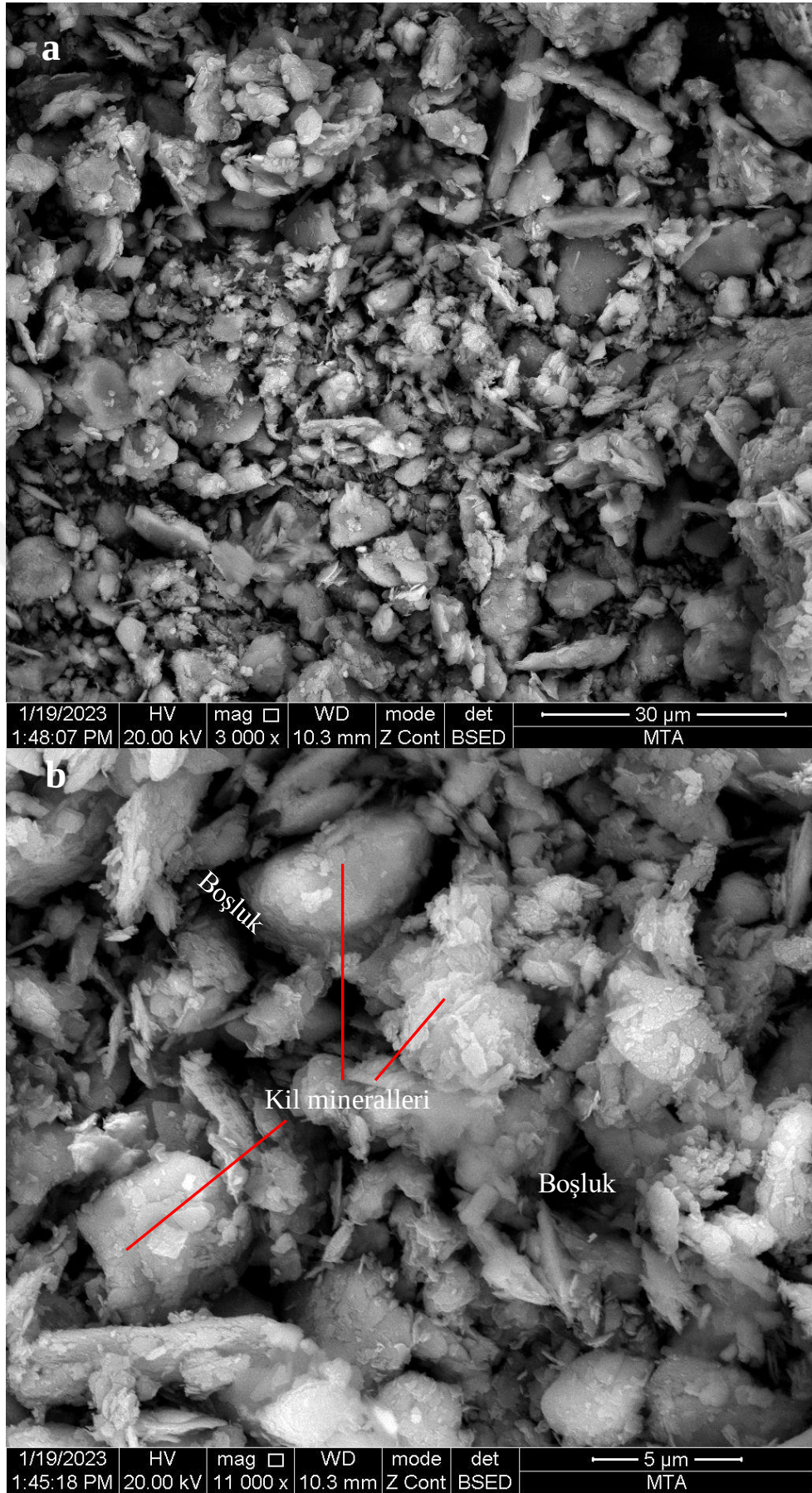




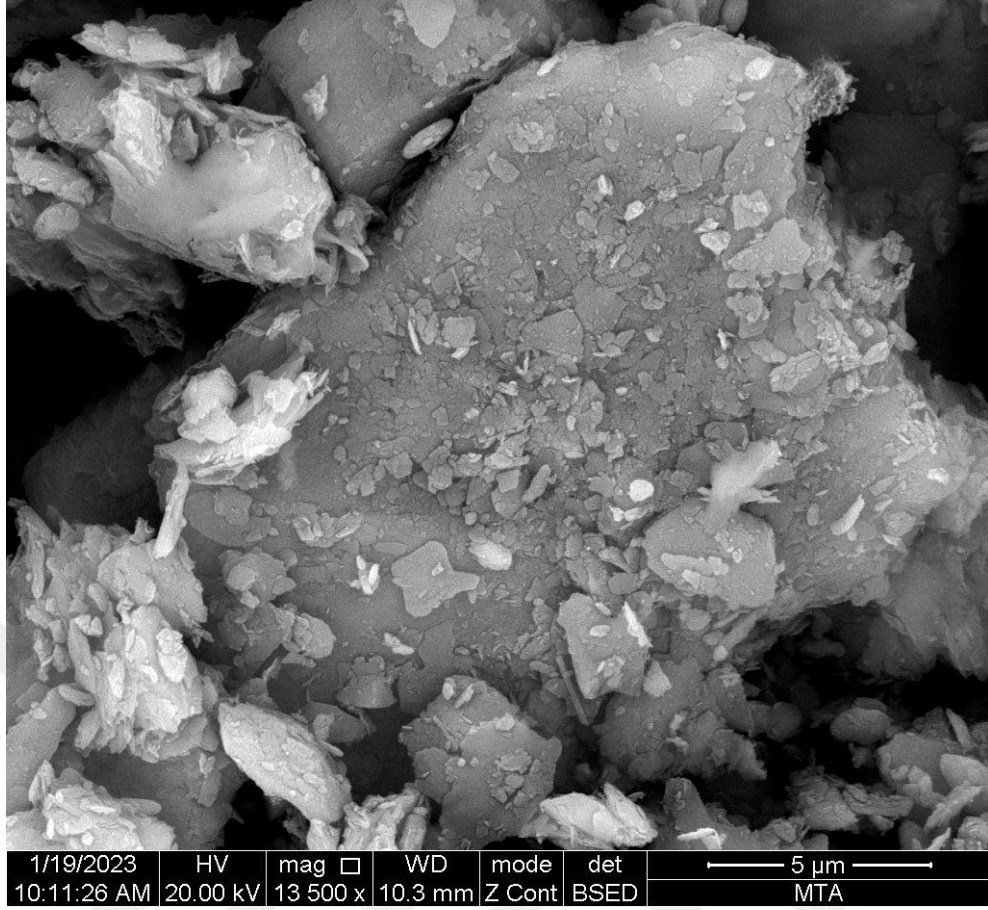
Eşitlik 4.27-4.32 arasında çimentonun su ile birleşiminde meydana gelen reaksiyonla verilmiştir. Çimento içerisindeki trikalsiyum aluminatın (C_3A) su ile reaksiyonu sonucu etrenjit adı verilen kristal ve iğnemsı yapılar oluşur (Eşitlik 4.28). Yine çimento içerisindeki dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum silikatın (C_3) suyla tepkimesi sonucu tobermorit adı verilen C-S-H jelleri (kalsiyum silikat hidrat) ve portlandit adı verilen C-H kristalleri (kalsiyum hidroksit) oluşur. C-S-H jeli çimentonun bağlayıcılık özelliğini ve dayanım kazanmasını sağlayan ürün olup hidrate olmuş ürünlerin büyük kısmını oluşturur (%60). C-S-H jeline oranla tanecik boyutu olarak oldukça büyük olan C-H ise kristal yapıda olup hidrate ürünlerin yaklaşık %20 sini oluşturur. C-H kristallerinin aderansı zayıflatıcı etkisi sebebiyle gerekenden fazla olması dayanımı azaltıcı etkiye sebep olur. Buna mukabil beton içindeki bazik yapıyı sağlayan C-H kristalleri boşluklarda birikerek geçirimsizliğe olumlu katkı sağlayabilir. Çimentonun su ile tepkimesi sonucu oluşan portlandit doğal puzolan amorf silika içerisinde bulunan yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 ile tepkimeye girerek yeni C-S-H ve C-A-H jelleri oluşturur. Bu da daha az boşluklu ve daha dayanımlı ürün ortaya koyar.



Tasarımları seçilen numunelere ve kullanılan kil ve amorf silika malzemelerin SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır. Yine aynı numuneler üzerinde XRD ve XRF analizleri de yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan düşük plastisiteli kile ait SEM görüntülerinde kil minerallerinin tabakalı yapısı görülmektedir (Şekil 4.83.- Şekil 4.84.).

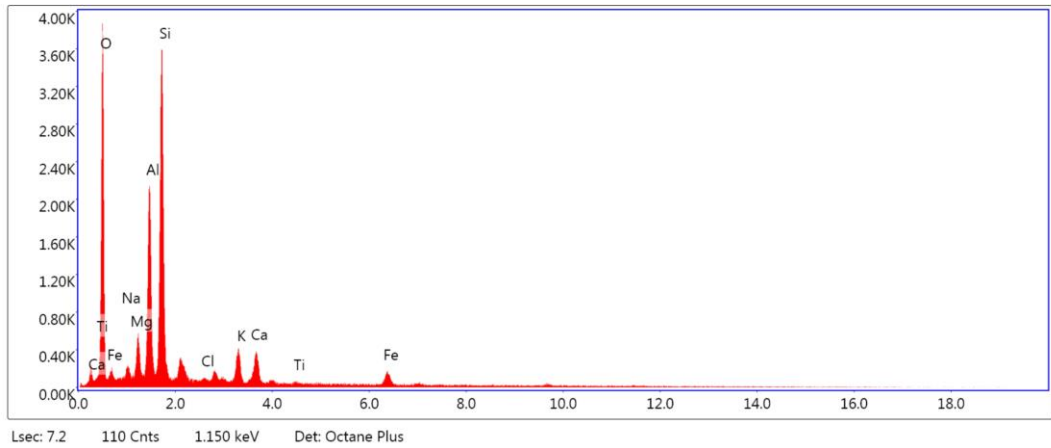


Şekil 4.83. Saf kile ait SEM görüntüleri: a)3000x, b)11000x

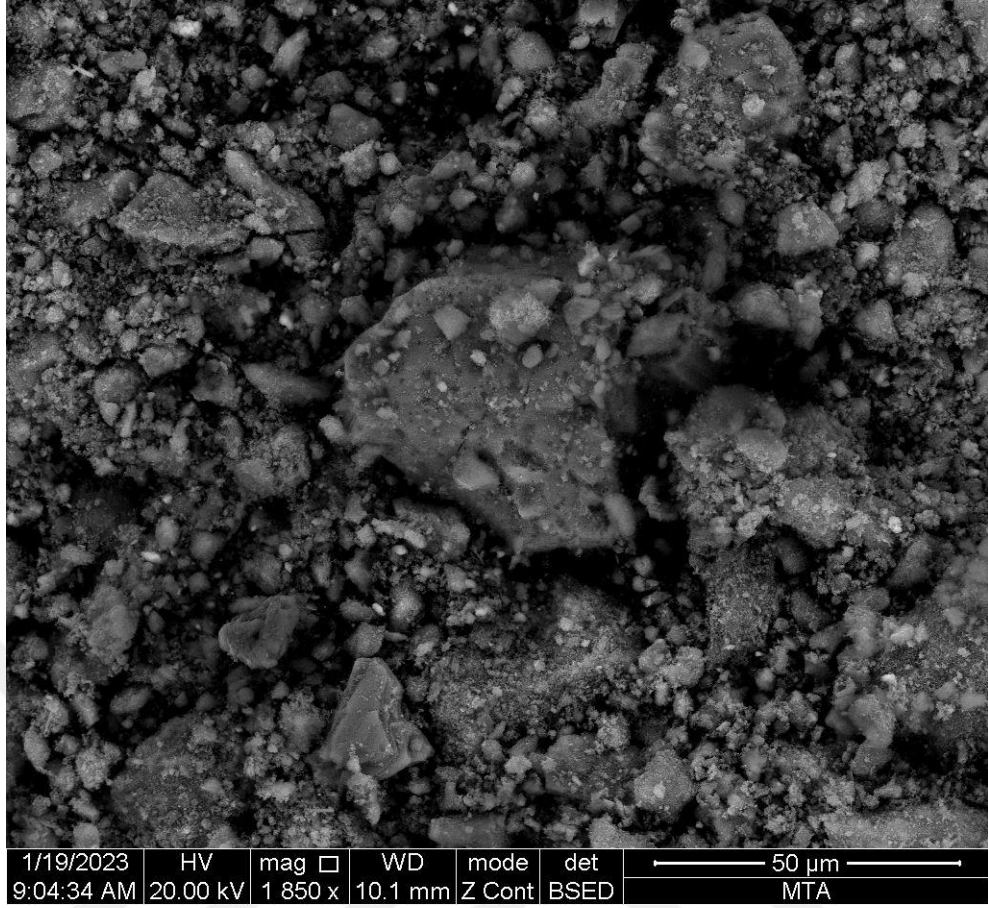


Şekil 4.84. Saf kile ait SEM görüntüsü 13500x yakınlaştırma

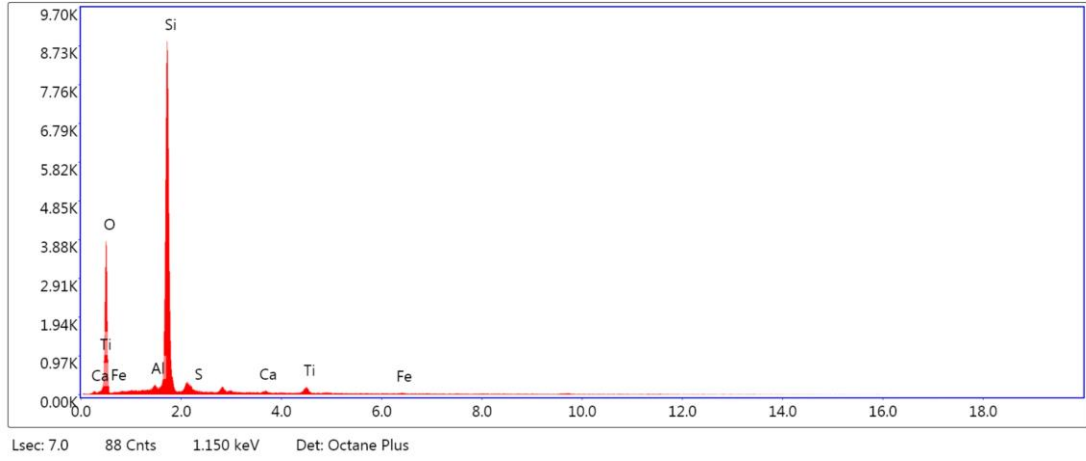
Kil zemin içerisinde bulunan ve puzzolanik reaksiyonlara katılabilecek element yüzdeleri EDS analizi ile belirlenmiştir. Buna göre oksijen (%52.02), kalsiyum (%3.26), silisyum (%20.78) ve alüminyum (%12.17) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.85 ve Çizelge 4.56). XRD analizinde ise kuvars, kalsit, mika minerali, illit, dolomit, jips, klorit minerali, plajiyoklaz ve amfibol mineralleri tespit edilmiştir (Şekil 4.85.).



Şekil 4.85. Saf kile ait SEM görüntüsü 13500x yakınlaştırma



Şekil 4.86. Amorf silikaya ait SEM görüntüsü

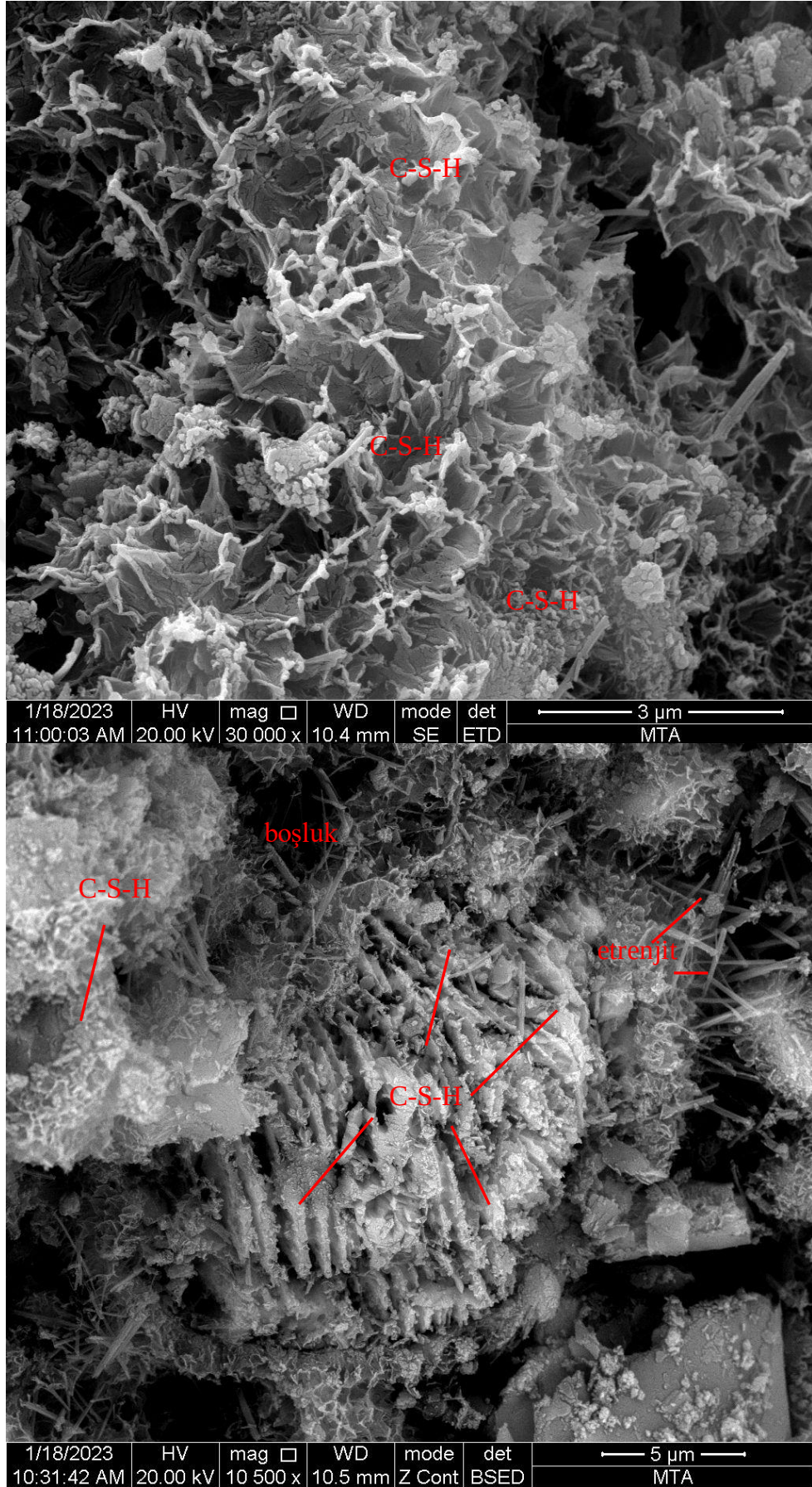


Şekil 4.87. Amorf silikaya ait EDS analizi

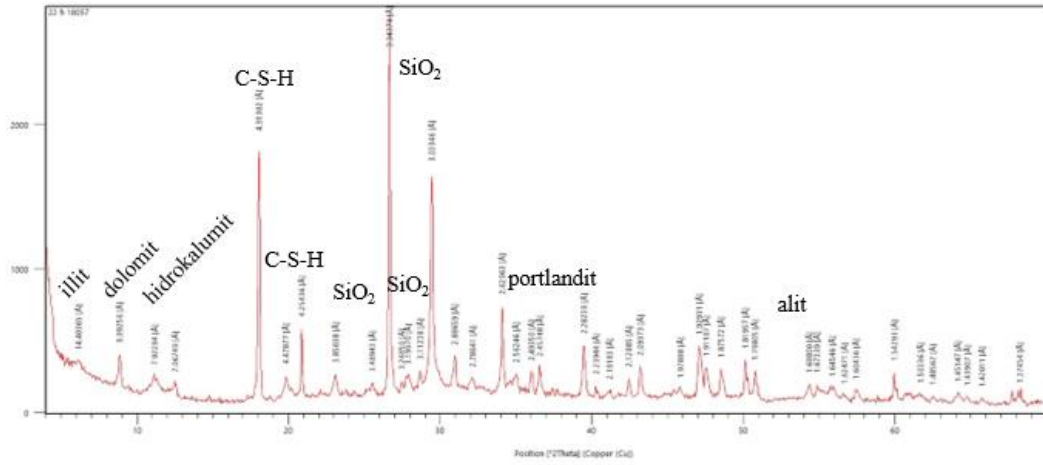
Çizelge 4.57. Amorf silikaya ait element yüzdeleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Int.	Hata %	Koranı	Z	A	F
O K	52.00	66.25	3190.34	8.44	0.1778	1.0473	0.3264	1.0000
AlK	0.98	0.74	213.11	10.09	0.0065	0.9327	0.7031	1.0101
SiK	41.83	30.35	10353.89	3.28	0.3235	0.9533	0.8098	1.0015
S K	2.10	1.33	340.39	11.91	0.0131	0.9338	0.6648	1.0034
CaK	0.50	0.25	69.45	25.67	0.0042	0.9003	0.9193	1.0181
TiK	2.09	0.89	254.10	8.91	0.0169	0.8160	0.9659	1.0257
FeK	0.51	0.18	37.13	43.54	0.0044	0.8027	0.9993	1.0715

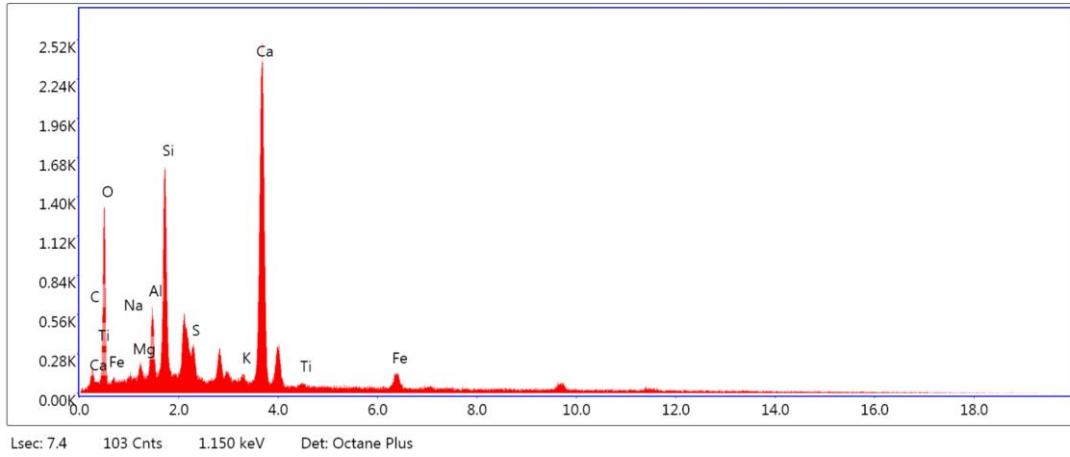
Killi zeminle yapılan küçük ölçekli DKK tasarımları içinden 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemetlerinin birbirine yakın olduğu fakat permeabilite katsayıları arasında 4 kat farkın olduğu 11. ve 16. tasarım seçilmiş ve SEM görüntüleri alınmıştır. 11. tasarıma ait imalat parametreleri; dozaj=450 kg/m³, bağlayıcı yüzdesi =%40, bağlayıcıya ikame olarak bağlayıcı içerisindeki amorf silika yüzdesi=%0, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi=%0.5, su/bağlayıcı oranı=1.0'dır. Bu tasarıma ait 28 günlük performans değerleri serbest basınç mukavemeti $q_u=6729.96$ kPa ve permeabilite katsayısı $k=58.70 \times 10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süresi sonunda ise serbest basınç mukavemeti $q_u=6829.74$ kPa ve permeabilite katsayısı $k=53.00 \times 10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 11 numaralı tasarıma ait SEM görüntüleri Şekil 4.88'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin ve yer yer etrenjit iğnelerinin olduğu görülmektedir. Dozajın yüksek olması sebebiyle C-S-H jel yoğunluğu oldukça fazla oluşmuştur. Eser miktarda oluşan etrenjitin morfolojisi olduğu yerdeki boşluk hacmine ve yapısına, su/bağlayıcı oranına, karışımındaki sülfat miktarına, ortam sıcaklık ve nem durumuna bağlıdır (Tosun, 2007). Oluşan etrenjitler çimento zemin arasındaki gerçekleşen hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşmuştur. Etrenjit oluşumunun sertleşmiş numunelere herhangi bir zararı yoktur (Demiral, 2017). Fakat üretilen DKK sülfatlı suyla temas ettiğinde sülfat iyonlarının yeni etrenjitler oluşturmaya neden olur. Bu ise kolon haminde artışlara ve dolayısıyla hacminin artarak çatlamasına sebep olur. Şekil 4.88. incelendiğinde yeterli miktarda C-SH jellerinin oluşumu dayanımı olumlu yönde etkilemiştir. C-S-H oluşum miktarı dayanım ve permeabilite özelliklerini etkilemektedir. Şekil 4.89.' da XRD kırınımı incelendiğinde de C-S-H oluşumları 18°, 20° ve 21° (2 Theta)' de tespit edilmiştir. Şekil 4.90.'da 11. Tasarıma ait EDS analizi ve Çizelge 4.58.' de bu analize ait element yüzdesi verilmiştir.



Şekil 4.88. Killi zemin 11. Tasarıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.89. Killi zemin 11. Tasarıma ait XRD analizi.



Şekil 4.90. Killi zemin 11. Tasarıma ait EDS analizi.

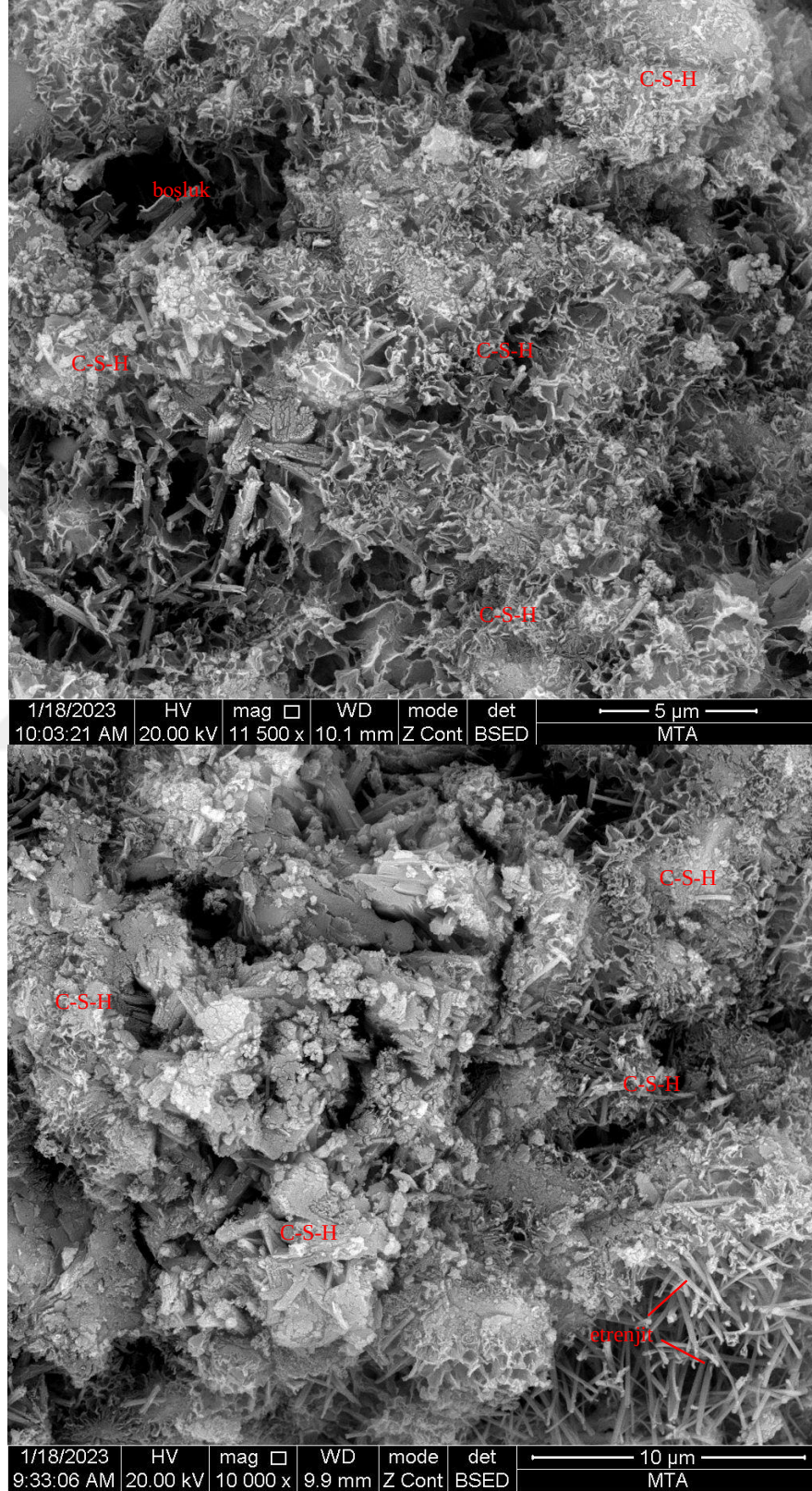
Çizelge 4.58. Killi zemin 11. tasarıma ait element yüzdeleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Int.	Hata %	Koranı	Z	A	F
C K	5.47	9.93	91.16	26.60	0.0128	1.1100	0.2101	1.0000
O K	42.10	57.34	1186.38	10.69	0.0705	1.0644	0.1575	1.0000
NaK	1.76	1.67	130.41	15.92	0.0054	0.9686	0.3162	1.0015
MgK	1.24	1.11	171.97	12.81	0.0056	0.9856	0.4602	1.0028
AlK	3.33	2.69	584.46	7.52	0.0191	0.9496	0.6009	1.0045
SiK	9.06	7.03	1850.32	5.28	0.0620	0.9708	0.7012	1.0053
S K	4.72	3.20	898.97	5.81	0.0370	0.9513	0.8150	1.0117
K K	0.73	0.40	118.84	19.54	0.0064	0.9012	0.9404	1.0425
CaK	27.78	15.11	3810.33	2.40	0.2473	0.9179	0.9629	1.0073
TiK	0.31	0.14	33.57	56.35	0.0024	0.8323	0.9104	1.0166
FeK	3.49	1.36	229.61	10.66	0.0289	0.8194	0.9784	1.0331

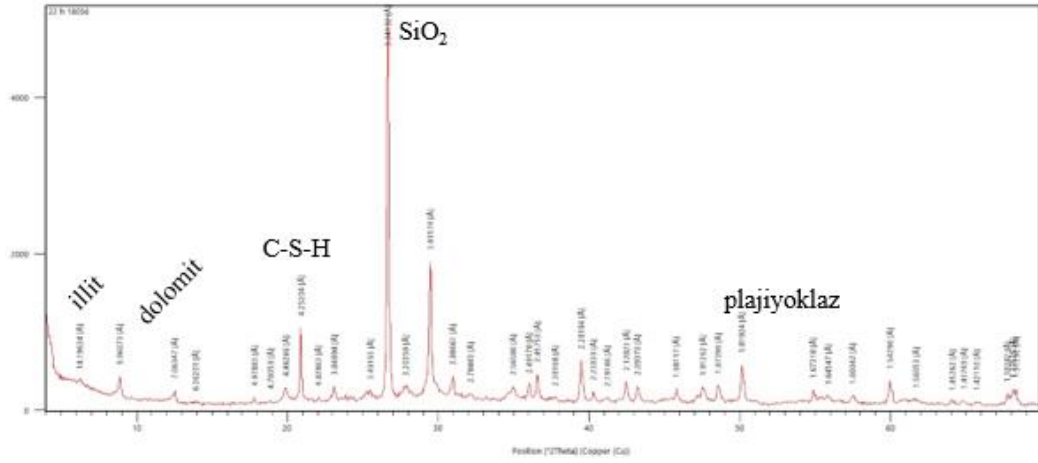
Tasarım 11 ait XRF analizlerinde C-S-H jellerinin oluşumuna esas Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO bileşiklerinin toplamı % 69.1 olarak bulunmuştur. Bu sonuç C-S-H jellerinin yoğunluğunun oldukça fazla olduğunu göstermektedir.

Killi zeminle yapılan küçük ölçekli DKK tasarımları içinden 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemeti 11. Tasarıma yakın ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemetinin en iyi olduğu tasarım 16. tasarıma ait imalat parametreleri; dozaj= 430 kg/m^3 , bağlayıcı yüzdesi =%40, bağlayıcıya ikame olarak bağlayıcı içerisindeki amorf silika yüzdesi=%46.25, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi=%2.6, su/bağlayıcı oranı=1.0'dır. Bu tasarıma ait 28 günlük performans değerleri serbest basınç mukavemeti $q_u=6626.09 \text{ kPa}$ ve permeabilite katsayısı $k=15.50 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süresi sonunda ise serbest basınç mukavemeti $q_u=7125.95 \text{ kPa}$ ve permeabilite katsayısı $k=14.56 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. 16. Tasarımda serbest basınç mukavemeti 28 günlük kür süreleri sonunda 11. Tasarıma oranla az bir miktar düşük olsa da, 16. Tasarımın dozajının 11. Tasarıma göre daha düşük olduğu ele alınırsa serbest basınç mukavemeti açısından performans değeri olarak 16. Tasarımın en iyi olduğu söylenebilir. Yine 56 günlük kür süreleri sonunda 16. Tasarımın serbest basınç mukavemet değeri 11. Tasarıma göre yüksek olmuştur. Permeabilite değerleri olarak karşılaştırıldığında ise hem 28 hem de 56 günlük kür süreleri sonunda 16. Tasarıma ait permeabilite katsayısı 11. Tasarımın permeabilite katsayısına oranla 4 kat daha küçük olmuştur. Burada amorf silikanın geçirimsizliğe etkisi oldukça iyi olmuştur. Yine 56 günlük kür süresi sonunda 16. Tasarıma ait serbest basınç mukavemetinin 11. Tasarıma ait serbest basınç mukavemet değerini geçmesi yüksek miktarda SiO_2 içermesinden dolayı uzun vadede amorf silika katkısının dayanıma da etkisinin olduğunu göstergesidir denilebilir. Bu sonuçları 16 tasarıma ait SEM, EDS ve XRF analizleri de doğrulamaktadır. 16. Tasarıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde 11. Tasarıma göre daha fazla C-S-H jelleri olduğu ve amorf silikanın katkısıyla daha az boşluklu bir yapı olduğu görülmektedir (şekil 4.91.) Şekil 4.92.'de XRD kırınımı incelendiğinde de C-S-H oluşumları 18° , 20° ve 22° (2 Theta)' de tespit edilmiştir. Şekil 4.93.'te 16. Tasarıma ait EDS analizi ve Çizelge 4.59.' da bu analize ait element yüzdesi verilmiştir. Tasarım 16 ait XRF analizlerinde C-S-H jellerinin oluşumuna esas Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO bileşiklerinin toplamı % 71.5 olarak bulunmuştur. Bu sonuç 11. Tasarımla kıyaslandığında C-S-H jellerinin yoğunluğunun daha fazla olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla 16. Tasarımın 11. Tasarıma oranla

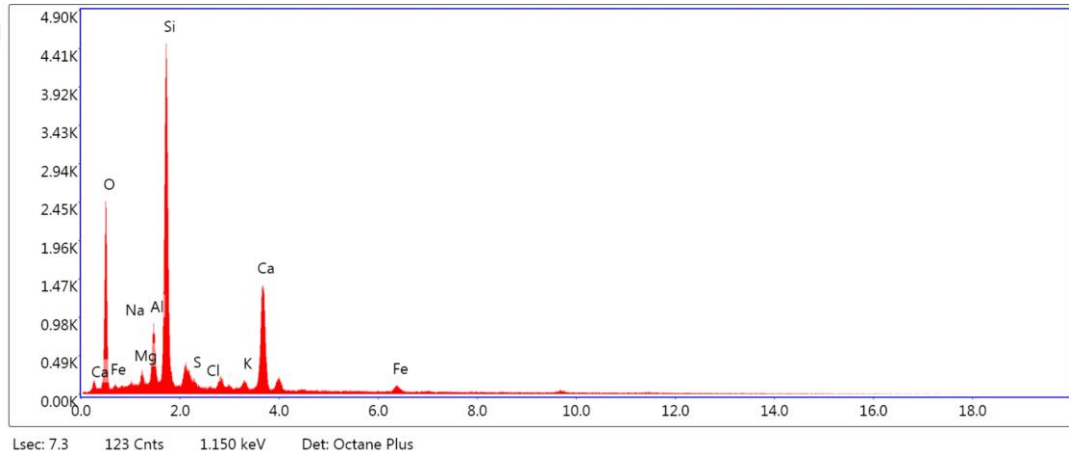
daha az boşluklu olduğu görülmekte ve bu sebeple permeabilite katsayısının da dört kat daha küçük olması bunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.91. Killi zemin 16. Tasarıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.92. Killi zemin 12. Tasarıma ait XRD analizi.



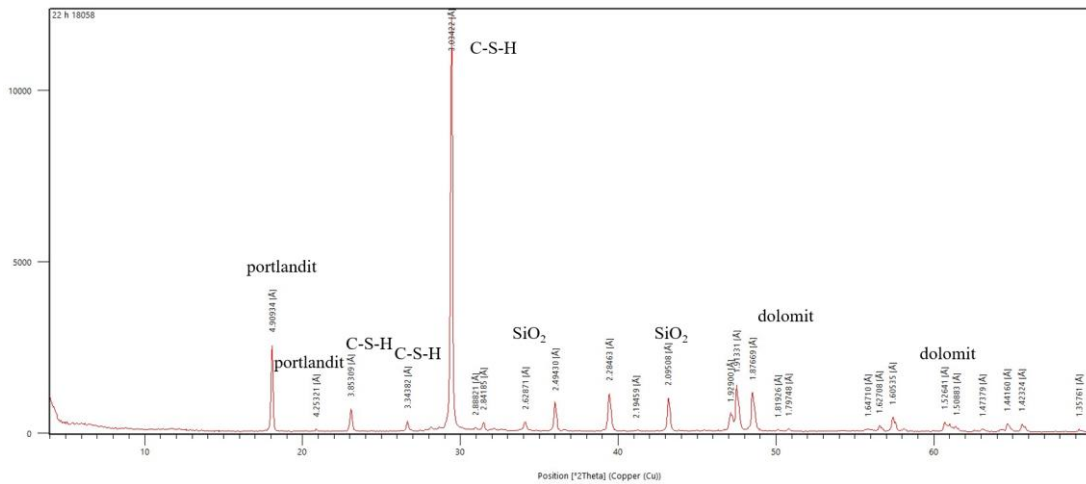
Şekil 4.93. Killi zemin 16. Tasarıma ait EDS analizi.

Çizelge 4.59. Killi zemin 11. tasarıma ait element yüzdeleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Int.	Hata %	Koranı	Z	A	F
O K	49.52	65.91	2062.30	9.63	0.1187	1.0572	0.2266	1.0000
NaK	1.18	1.10	97.44	17.67	0.0039	0.9616	0.3412	1.0020
MgK	1.15	1.01	176.90	12.38	0.0056	0.9784	0.4938	1.0037
AlK	4.36	3.44	833.43	6.83	0.0262	0.9424	0.6353	1.0059
SiK	23.20	17.59	5007.93	4.49	0.1616	0.9633	0.7203	1.0034
S K	2.44	1.62	429.02	8.26	0.0170	0.9438	0.7326	1.0085
ClK	0.03	0.02	4.98	11.31	0.0002	0.8980	0.8006	1.0139
K K	0.72	0.39	116.79	19.56	0.0061	0.8939	0.9121	1.0314
CaK	15.31	8.13	2120.22	3.11	0.1324	0.9103	0.9413	1.0091
FeK	2.09	0.80	145.22	15.75	0.0176	0.8121	0.9890	1.0467

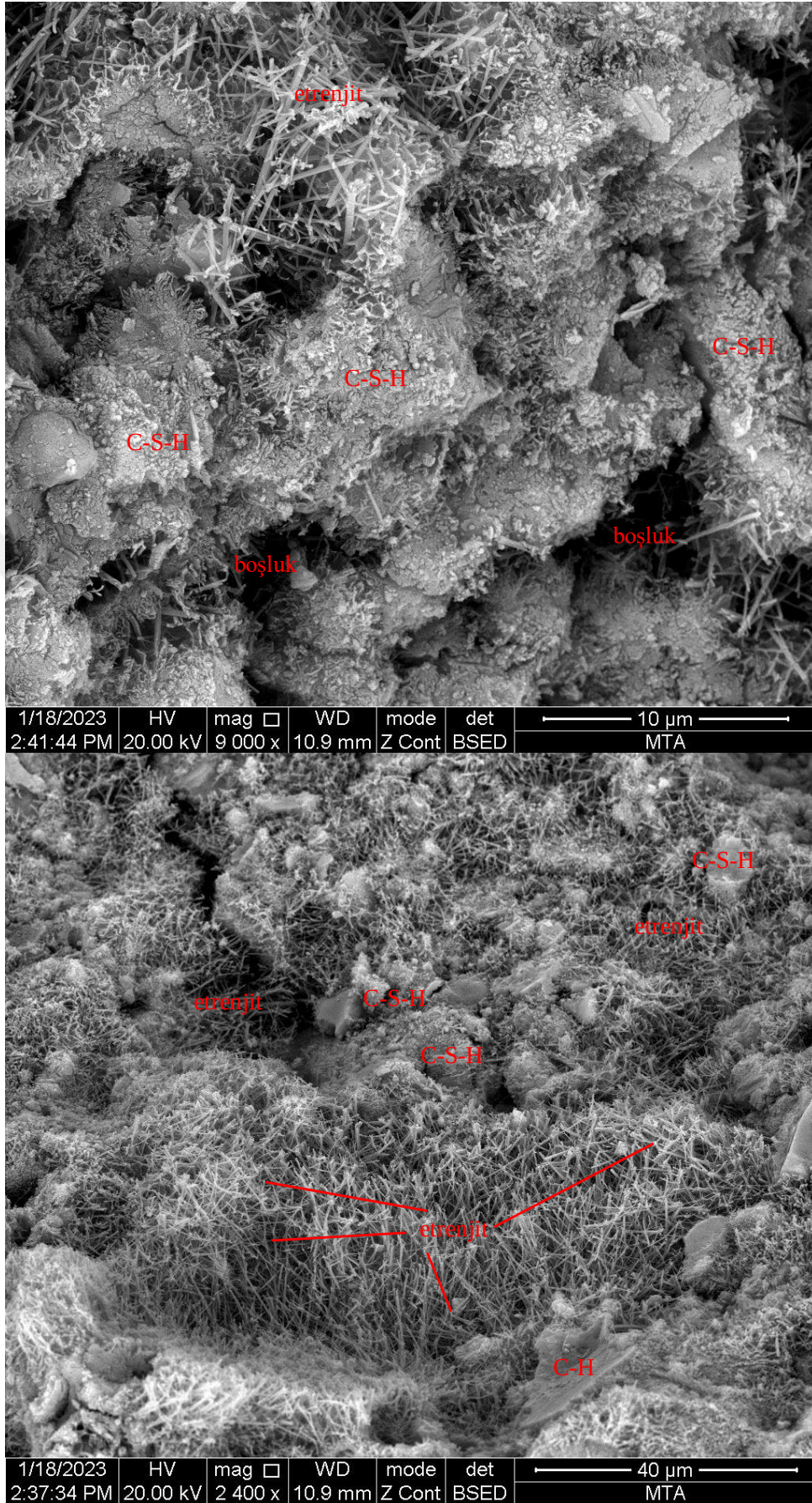
Kumlu zeminle yapılan küçük ölçekli DKK tasarımları içinden 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemetlerinin birbirine yakın olduğu fakat

permeabilite katsayıları arasında 1.4-2.2 kat farkın olduğu 15. ve 16. tasarım seçilmiş ve SEM görüntüleri alınmıştır. 15. tasarıma ait imalat parametreleri; dozaj=470 kg/m³, bağlayıcı yüzdesi =%34.5, bağlayıcıya ikame olarak bağlayıcı içerisindeki amorf silika yüzdesi=%0, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi=%4, su/bağlayıcı oranı=0.95'dir. Bu tasarıma ait 28 günlük performans değerleri serbest basınç mukavemeti $q_u=7602.65$ kPa ve permeabilite katsayısı $k=184.05 \times 10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süresi sonunda ise serbest basınç mukavemeti $q_u=7899.91$ kPa ve permeabilite katsayısı $k=22.15 \times 10^{-11}$ m/s olarak bulunmuştur. 15 numaralı tasarıma ait SEM görüntüleri Şekil 4.95'te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H jellerinin oluştuğu bununla beraber etrenjit oluşumunun da oldukça fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.94.' te kumlu zeminle yapılan DKK' ya ait XRD kırınım grafiği, Şekil 4.96.' da EDS analizi ve Çizelge 4.60.' ta element yüzdeleri verilmiştir. XRD kırınımı incelendiğinde de C-S-H oluşumları 23° ve 30° (2 Theta) arasında tespit edilmiştir.



Şekil 4.94. Kumlu zemin 15. Tasarıma ait XRD analizi.

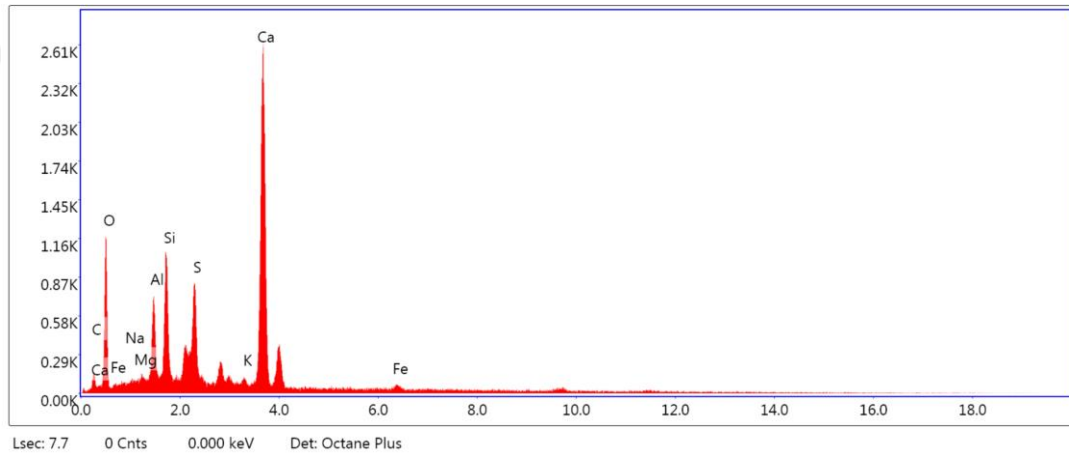
Burada element yüzdeleri incelendiğinde Si yüzdesinin (%5.88) azlığı ve etrenjit oluşumunda etkili S yüzdesinin (%7.25) yüksek oluşu etrenjit varlığından kaynaklanmaktadır. Al yüzdesinin (%4.03) ve Si (%5.88) yüzdesinin düşük olması C-S-H jeli oluşumunda yüksek miktarların yakalanamadığını göstermektedir. Yine XRF analizlerinde Al₂O₃ SiO₂ ve CaO bileşiklerinin yüzdesinin toplamı ise %59.1 C-S-H oluşumunu göstermektedir.



Şekil 4.95. Kumlu zemin 15. Tasarıma ait SEM görüntüsü.

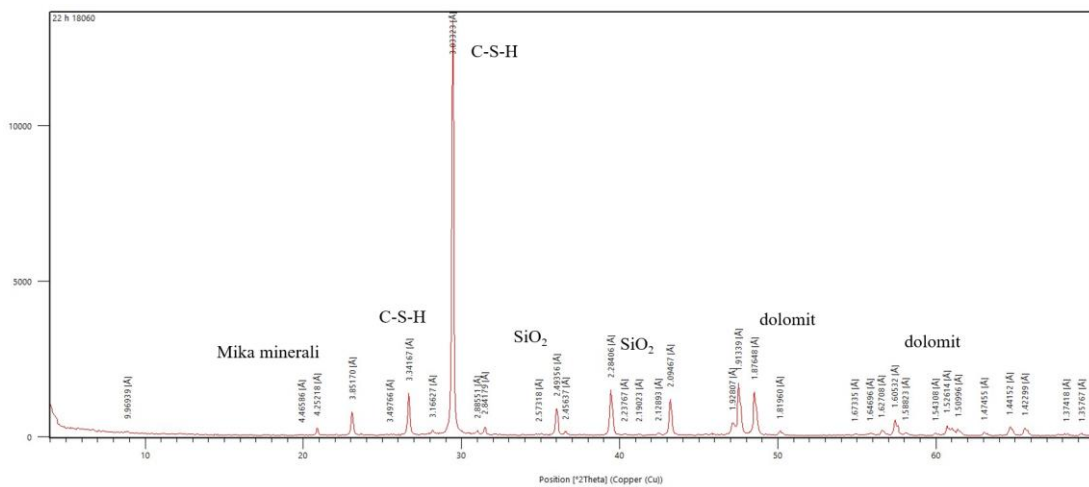
Çizelge 4.60. Kumlu zemin 15. tasarıma ait element yüzdeleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Int.	Hata %	Koranı	Z	A	F
C K	4.96	8.98	69.84	48.82	0.0117	1.1077	0.2123	1.0000
O K	43.79	59.60	954.43	10.91	0.0679	1.0622	0.1458	1.0000
NaK	0.55	0.52	34.26	33.78	0.0017	0.9666	0.3177	1.0016
MgK	0.21	0.19	24.64	67.06	0.0010	0.9836	0.4712	1.0030
AlK	4.03	3.26	610.89	7.14	0.0239	0.9476	0.6226	1.0048
SiK	5.88	4.56	1020.03	5.78	0.0409	0.9687	0.7137	1.0064
S K	7.25	4.92	1193.65	5.32	0.0589	0.9493	0.8450	1.0125
K K	0.28	0.15	37.75	45.86	0.0024	0.8993	0.9427	1.0469
CaK	32.11	17.45	3669.92	2.26	0.2857	0.9159	0.9667	1.0046
FeK	0.94	0.37	51.13	30.01	0.0077	0.8176	0.9748	1.0354

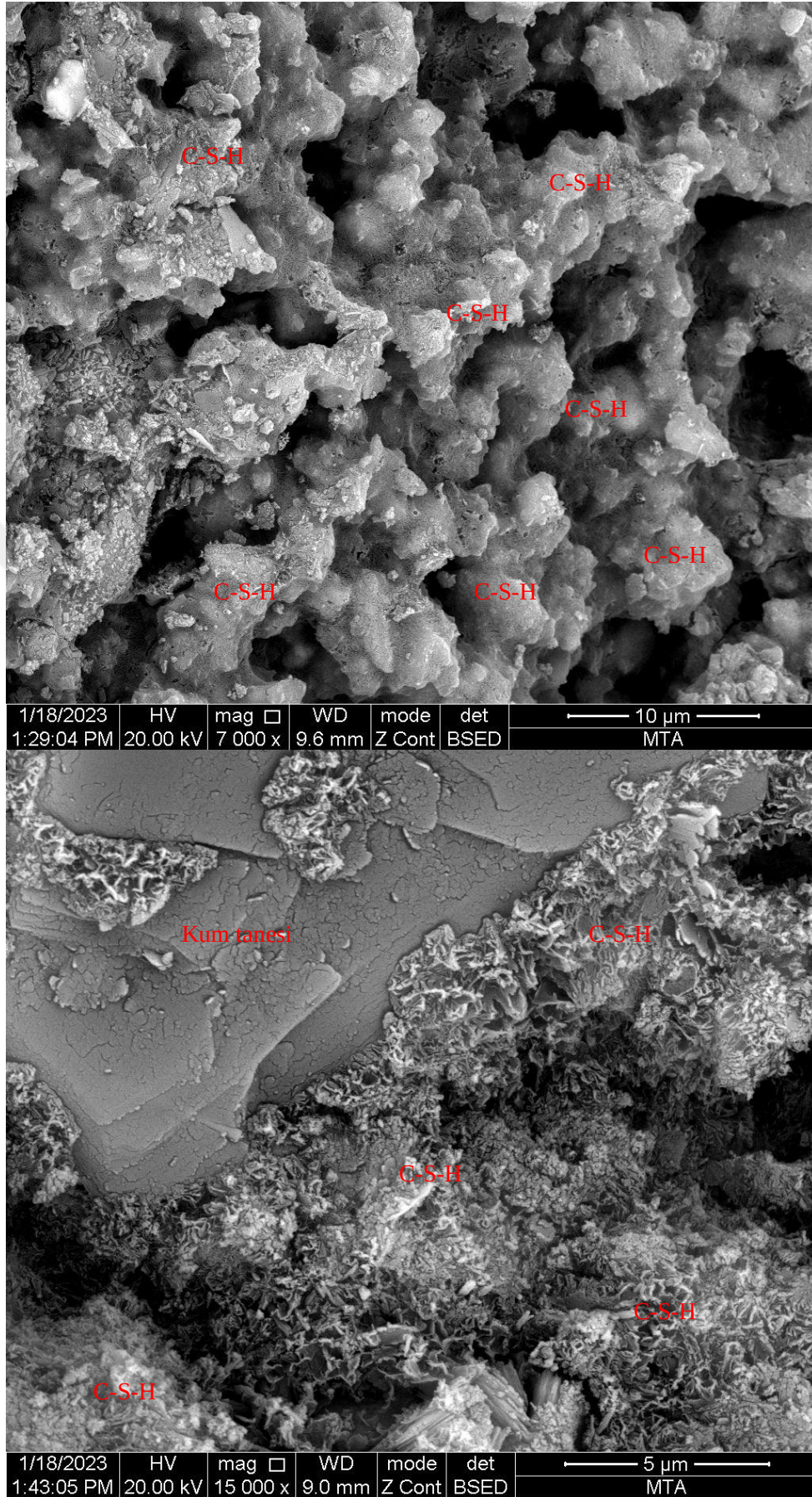
**Şekil 4.96.** Kumlu zemin 15. Tasarıma ait EDS analizi.

Kumlu zeminle yapılan küçük ölçekli DKK tasarımları içinden 28 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemeti 15. Tasarımla yaklaşık aynı ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemetinin 15. Tasarıma kıyasla daha yüksek olduğu 16. tasarıma ait imalat parametreleri; dozaj= 267 kg/m^3 , bağlayıcı yüzdesi= $\%15$, bağlayıcıya ikame olarak bağlayıcı içerisindeki amorf silika yüzdesi= $\%50$, süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi= $\%4$, su/bağlayıcı oranı= 0.8 'dir. Bu tasarıma ait 28 günlük performans değerleri serbest basınç mukavemeti $q_u=7540.94 \text{ kPa}$ ve permeabilite katsayısı $k=81.33 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süresi sonunda ise serbest basınç mukavemeti $q_u=8886.49 \text{ kPa}$ ve permeabilite katsayısı $k=15.77 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. 16. Tasarımda serbest basınç mukavemeti 28 günlük kür süreleri sonunda 15. Tasarıma oranla az bir miktar düşük olsa da, 16. Tasarımın dozajının 15. Tasarıma (dozaj= 470 kg/m^3) göre oldukça düşük olduğu ele alınırsa serbest basınç mukavemeti açısından performans değeri olarak 16. Tasarımın 15 tasarımla

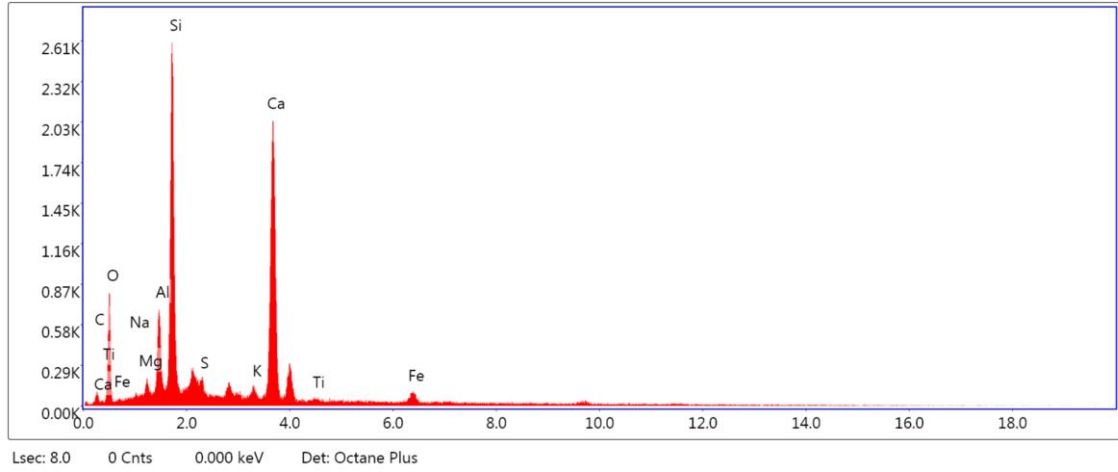
kıyaslandığında çok daha iyi olduğu söylenebilir. Yine 56 günlük kür süreleri sonunda 16. Tasarımın serbest basınç mukavemet değeri 15. Tasarıma göre yüksek olmuştur. Permeabilite değerleri olarak karşılaştırıldığında ise hem 28 hem de 56 günlük kür süreleri sonunda 16. Tasarıma ait permeabilite katsayısı 15. Tasarımın permeabilite katsayısına oranla 28 günlük kür süresi sonunda 1.4 kat ve 56 günlük kür süresi sonunda 2.2 kat daha küçük olmuştur. Burada amorf silikanın geçirimsizliğe etkisi oldukça iyi olmuştur. Yine 56 günlük kür süresi sonunda 16. Tasarıma ait serbest basınç mukavemetinin 15. Tasarıma ait serbest basınç mukavemet değerini geçmesi yüksek miktarda SiO_2 içermesinden dolayı uzun vadede amorf silika katkısının dayanıma da etkisinin olduğunu göstergesidir denilebilir. Bu sonuçları 16 tasarıma ait SEM, EDS ve XRF analizleri de doğrulamaktadır. 16. Tasarıma ait SEM görüntüleri incelendiğinde 15. Tasarıma göre daha fazla C-S-H jelleri olduğu ve daha amorf silikanın katkısıyla daha az boşluklu bir yapı olduğu görülmektedir (şekil 4.98.) Şekil 4.97.'de XRD kırınımı incelendiğinde de C-S-H oluşumları 23° ve 30° (2 Theta) arasında tespit edilmiştir. Şekil 4.99.'da 16. Tasarıma ait EDS analizi ve Çizelge 4.61.' de bu analize ait element yüzdesi verilmiştir. Tasarım 16 ait XRF analizlerinde C-S-H jellerinin oluşumuna esas Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO bileşiklerinin toplamı % 61.2 olarak bulunmuştur. Bu sonuç 15. Tasarımla kıyaslandığında C-S-H jellerinin yoğunluğunun daha fazla olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla 16. Tasarımın 15. Tasarıma oranla daha az boşluklu olduğu görülmekte ve bu sebeple permeabilite katsayısının da 1.4-2.2 kat daha küçük olması bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 4.97. Kumlu zemin 16. Tasarıma ait XRD analizi.



Şekil 4.98. Kumlu zemin 16. Tasarıma ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.99. Kumlu zemin 16. Tasarıma ait EDS analizi.

Çizelge 4.61. Kumlu zemin 16. tasarıma ait element yüzdeleri

Element	Ağırlık %	Atom %	Net Int.	Hata %	Koranı	Z	A	F
C K	5.04	9.63	49.21	21.96	0.0102	1.1183	0.1803	1.0000
O K	34.82	49.96	612.15	11.21	0.0530	1.0726	0.1419	1.0000
NaK	0.27	0.27	14.73	73.88	0.0009	0.9764	0.3267	1.0018
MgK	0.71	0.67	72.02	18.10	0.0034	0.9936	0.4829	1.0033
AlK	4.51	3.83	581.55	7.30	0.0273	0.9573	0.6285	1.0052
SiK	18.18	14.86	2655.09	4.73	0.1274	0.9787	0.7126	1.0044
S K	2.65	1.90	330.71	8.57	0.0195	0.9592	0.7575	1.0111
K K	0.72	0.43	82.11	20.04	0.0063	0.9088	0.9228	1.0411
CaK	29.89	17.12	2855.08	2.63	0.2644	0.9257	0.9495	1.0063
TiK	0.23	0.11	17.09	68.03	0.0017	0.8394	0.8951	1.0148
FeK	2.98	1.23	137.83	13.25	0.0247	0.8265	0.9727	1.0324

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında tabakalı zemin ortamlarında doğal bir puzolan olan amorf silika katkılı derin karıştırma kolonlarının mukavemet ve geçirimsizlik performans ve özellikleri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında zemin olarak killi ve kumlu zemin, normal Portland çimentosu (CEM I 42.5 R), doğal bir puzolan olan amorf silika ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan zeminlerden killi zemin Konya 2. Organize Sanayi arazisinden, kumlu zemin ise Eğribayat köyü kum ocaklarından temin edilmiştir. Zeminlerin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre analizi, kompaksiyon, kıvam limitleri vb. deneyler yapılmıştır. Deney tablolarının oluşturulması ve amorf silikanın aktifliğini belirlemek amacıyla ön deney tasarımı yapılmıştır. Ön deney tasarımı amorf silika katkısının olmadığı ve sadece çimentonun kullanıldığı bir seviye, amorf silika katkısının ikame yöntemle bağlayıcı miktarındaki çimentonun azaltılıp yerine amorf silikanın artan oranlarda (%5' ten %50' ye) konulmasıyla oluşturulan 7 seviye olmak üzere toplamda 8 seviyeli bir tasarım yapılmıştır. Her tasarım seviyesinde 7 günlük kür süresi için 2 şer numune, 28 günlük kür süresi için 2 şer numune ve 56 günlük kür süresi için 1 er numune olmak üzere her seviye için 5 er numune ve toplamda 40 numune hazırlanarak küre bırakılmıştır. Belirtilen kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri yapılarak mukavemetleri belirlenmiştir. Amorf silikanın artan oranlarda çimento yerine ikame edilerek hazırlanan deney numunelerin deney sonuçları, amorf silika katkısının olmadığı kontrol numunelerine göre 7 günlük kür süresinde %24.32 lik bir mukavemet artışı, 28 günlük kür süresinde %27.19 luk bir mukavemet artışı ve 56 günlük süresinde %21 lik mukavemet artışı elde edilmiştir. Amorf silikanın özellikle %30-%40 aralığında yapılan ikamesinde serbest basınç mukavemetinde net bir artış elde edilmiştir. Ön deneyler sonucunda amorf silikanın aktif bir puzolan olduğu (camsı yapıda) ve çimentoyla reaksiyon verdiği kanıtlanmış oldu.

Elde edilen sonuçlarla beraber ve literatürde DKY ile ilgili önceden yapılan çalışmalar incelenerek bağlayıcı yüzdesi, bağlayıcının ikame yüzdesi olarak amorf silika, bağlayıcının ağırlıkça yüzdesi olarak süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, su/bağlayıcı oranı olmak üzere 4 parametrelili ve 18 seviyeli deney tasarımı yapılmıştır. YYY ile oluşturulan bu tasarım tablolarına göre killi ve kumlu zemin türlerinin her bir

seviyesi için serbest basınç deneyi ve permeabilite deneyleri yapmak üzere, 28 ve 56 günlük kür süreleri için 3'er numune ve toplamda 432 küçük ölçekli DKK (216 serbest basınç deneyi, 216 permeabilite deneyi) deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin sonuçları Design Expert programı ile analiz edilmiştir.

Kil zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları incelendiğinde en düşüğü 807 kPa (2. Tasarım) ve en yükseği 6729 kPa (11. Tasarım) olarak bulunmuştur. Kil zeminler için 56 günlük serbest basınç mukavemeti deney sonuçları incelendiğinde en düşüğü 886 kPa (15. Tasarım) ve en yükseği 7125 kPa (16. Tasarım) olarak bulunmuştur.

Özellikle su/bağlayıcı oranının 1.7'den büyük ve dozajın 150 kg/m^3 - 250 kg/m^3 arasında olduğu tasarımlarda dayanımlar diğer tasarımlara kıyasla düşük çıkmıştır. Su/bağlayıcı oranının 1.0-1.7 aralığında ve dozajın 250 kg/m^3 - 450 kg/m^3 arasında olduğu tasarımlarda ise serbest basınç dayanımları diğer tasarımlarla kıyaslandığında yüksek çıkmıştır.

28 günlük serbest basınç mukavemetinin en yüksek çıktığı 11. (6729 kPa) ve 16.(6626 kPa) tasarımlar kıyaslandığında;

- Her iki tasarımın da su/bağlayıcı oranları eşittir (su/bağlayıcı=1).
- Bağlayıcının %40 olduğu, amorf silika katkısının olmadığı ve bağlayıcı

olarak sadece çimentonun kullanıldığı 11. Tasarımın dayanımı her ne kadar en yüksek çıksa da; aynı bağlayıcı yüzdesi ve aynı su/bağlayıcı oranına sahip 16. tasarımla kıyaslandığında, dozaj olarak daha az olan ve bağlayıcı miktarının yarısına yakını (bağlayıcının %46.25' i) amorf silika olan 16. Tasarımın (tasarım 16 dozaj: 430 kg/m^3 ve tasarım 11 dozaj: 450 kg/m^3) serbest basınç dayanımının 11. Tasarıma oranla yüksek olduğu görülmüştür. Serbest basınç mukavemeti açısından 56 günlük kür sürelerinde 11. ve 16. tasarımlar karşılaştırıldığında 16. Tasarımın serbest basınç mukavemeti 7125 kPa olurken 11. Tasarımın serbest basınç mukavemeti 6829 kPa olarak bulunmuştur. Burada amorf silikanın ikame yöntemle kullanıldığında bile serbest basınç mukavemetine katkısı görülmektedir.

Kum zeminler için 28 günlük serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde en düşüğü 2857 kPa (11. Tasarım) ve en yükseği 20611 kPa (10. Tasarım) olarak bulunmuştur.

Su/bağlayıcı oranının 0.7, bağlayıcı yüzdesinin %40 olduğu ve amorf silika katkısının olmadığı 10. tasarımlarda serbest basınç mukavemeti en yüksek çıksa da, bu tasarımda bağlayıcı dozajı en yüksektir (591 kg/m^3). Dolayısıyla bu tasarıma ait serbest

basınç mukavemetinin en yüksek çıkması normaldir. Amorf silika katkısının olduğu ve dozajın daha düşük olduğu, bağlayıcı yüzdesinin daha düşük olduğu 1, 13, 17 ve 18. Tasarımlarda ise dozaj daha düşük olmasına rağmen serbest basınç mukavemetleri oldukça yüksek çıkmıştır. Özellikle bağlayıcı yüzdesinin %15, amorf silika ikamesinin %35 ve s/b oranının 0.7 olduğu 13. Tasarımda 28 günlük kür süresi için serbest basınç mukavemeti 9252 kPa ve 56 günlük kür süresi için serbest basınç mukavemeti 9319 kPa çıkarken, bağlayıcı yüzdesinin %25, amorf silika ikamesinin %50 ve s/b oranının 0.7 olduğu 18. Tasarımda 28 günlük kür süresi için serbest basınç mukavemeti 10399 kPa ve 56 günlük kür süresi için serbest basınç mukavemeti 12207 kPa olarak çıkmıştır. Bu sonuçlarla beraber ön deneylerde olduğu gibi çimento eksilterek amorf silika katkısının (ikame yöntem) kumlu zeminde yapılan deneylerde dayanıma oldukça katkısının olduğunu göstermektedir.

Kum zeminler için yapılan serbest basınç mukavemet deneylerinde görülen önemli bir hususun da su/bağlayıcı oranı arttığı zaman dayanımın kil zemine oranla daha hızlı düştüğünü göstermesidir. Bu ise daha boşluklu yapıda olan kum zeminlerde su/bağlayıcının oranının artmasıyla kuma göre çok küçük taneli yapıda olan bağlayıcının kum zemin boşluklarından aktığını göstermektedir.

Hem killi hem de kumlu zeminlerde serbest basınç mukavemetleri üzerinde su/bağlayıcı oranının etkili bir parametre olduğu görülmüştür.

Killi zeminlerde permeabilite katsayıları incelendiğinde 28 günlük kür süreleri sonunda permeabilite katsayısı(k) en düşüğü 4.32×10^{-11} m/s ile 5. tasarım ve en yükseği 385.31×10^{-11} m/s ile 4. tasarım olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süreleri sonunda permeabilite katsayısı(k) en düşüğü 3.65×10^{-11} m/s ile 5. tasarım ve en yükseği 385.31×10^{-11} m/s ile 2. tasarım olarak bulunmuştur. Permeabilite katsayısının en düşük olduğu 5. tasarımın dozajının 188 kg/m^3 , bağlayıcı yüzdesinin %15 ve bağlayıcıya ikame amorf silika yüzdesinin %50 olduğu göz önüne alınırsa amorf silikanın killi zeminlerde oldukça baskın olduğu görülür. Yine ANOVA analizlerinde de amorf silikanın su/ bağlayıcı oranından sonra en önemli parametre olduğu tespit edilmiştir.

Kumlu zeminlerde permeabilite katsayıları incelendiğinde 28 günlük kür süreleri sonunda permeabilite katsayısı(k) en düşüğü 28.96×10^{-11} m/s ile 18. tasarım ve en yükseği 519.56×10^{-11} m/s ile 12. tasarım olarak bulunmuştur. 56 günlük kür süreleri sonunda permeabilite katsayısı(k) en düşüğü 15.77×10^{-11} m/s ile 16. tasarım ve en yükseği 435.59×10^{-11} m/s ile 12. tasarım olarak bulunmuştur. Kumlu zeminde permeabilite katsayılarının en düşük bulunduğu 11., 16. ve 18. Tasarımlar

incelendiğinde amorf silikanın ikame olarak katkı yüzdesi %50 dir. Dolayısıyla kumlu zeminlerde yapılan küçük ölçekli DKK' ların geçirimsizlik katsayılarını azaltmada da amorf silik katkısının oldukça baskın olduğu görülmektedir. Yapılan ANOVA analizlerinde amorf silikanın en baskın parametre olduğu da bu sonucu doğrulamaktadır.

Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için killi zeminde 28 günlük kür süresinde serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %81 ve 56 günlük kür süresi için %79 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için kumlu zeminde 28 günlük kür süresinde serbest basınç deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %89 ve 56 günlük kür süresi için %86 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için killi zeminde 28 günlük kür süresinde permeabilite deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %83 ve 56 günlük kür süresi için %78 doğruluk değerine ulaşılmıştır. Küçük ölçekli DKK'larda optimum tasarım için kumlu zeminde 28 günlük kür süresinde permeabilite deneylerinden elde edilen sonuç ve tahmin edilen sonuçlar arasında %77 ve 56 günlük kür süresi için %93 doğruluk değerine ulaşılmıştır.

4 farklı tabakalanma yükseklerinde optimum tasarım parametreleriyle üretilen büyük ölçekli DKK'ların yükleme deney sonuçlarıyla DKK'ların nihai taşıma güçleri 8 farklı yöntem kullanılarak hesap edilmiştir. Terzaghi taşıma gücü teorisine göre nihai taşıma gücü en yüksek olan DKK 1 numaralı DKK iken, nihai taşıma gücü en düşük DKK 3 numaralı DKK çıkmıştır. Deneylerin tümünde nihai taşıma gücü olarak en yakın yöntemler Hirany-Kulhawy, eğim-oturma ve Mansur-Kaufman yöntemleri olmuştur Bu yöntemlere göre nihai taşıma gücü en yüksek olan 2 numaralı DKK olurken, en düşük nihai taşıma gücü 1 numaralı DKK olmuştur. 2-3 ve 4 numaralı kolonlarda nihai taşıma gücüne erişim zeminin göçmesiyle olurken, taşıma gücü açısından en yüksek olması beklenen 1 numaralı kolonda nihai taşıma gücüne erişim DKK'nın kırılmasıyla oluşmuştur. Bu sebeple taşıma gücü en düşük 1 numaralı DKK olarak bulunmuştur.

Yapılan SEM, EDS, XRD ve XRF analizleri sonucu zemin-çimento arasındaki birincil hidratasyon ürünlerine (C-S-H, CH) ek olarak amorf silikanın yüksek miktarda ikame olarak kullanıldığı tasarımlarda yeni hidratasyon ürünleri (C-S-H, C-A-H jelleri) ortaya çıkmakta ve DKK performansını artırmaktadır.

Killi zeminlerde çimento dozajının %35-%40 aralığında, amorf silikanın ikame olarak %25-%35 aralığında ve su/çimento oranının 1-1.5 aralığında seçilmesiyle, yine

kumlu zeminlerde ise diğer parametrelerin killi zeminlerdeki ile benzer, su/çimento oranının 0.9-1.0 aralığında seçilmesiyle hem serbest basınç mukavemeti hem de permeabilite açısından, az boşluklu dayanımı daha yüksek ve daha geçirimsiz DKK'ları elde edilmektedir.

5.2 Öneriler

Tez çalışmasında kullanılan doğal bir puzolan amorf silikanın kullanımı dayanım açısından özellikle killi zeminlerde mukavemet artışına sebep olmuştur. Kumlu zeminlerde belirli seviyelerde mukavemet artışı olmakla beraber, genel olarak değerlendirildiğinde killi zeminlerle kıyaslandığında bu artış oran olarak daha az olmuştur. Amorf silika katkısının mukavemette artışa sebep olmayacağı bir durumun olması halinde bile, amorf silikanın üretim maliyetinin olmaması puzolanik katkı olarak kullanılabilirliğini öne çıkarmaktadır. Çimentonun üretim maliyetlerinin fazla olması, çevreye ve doğaya verdiği zararlar (CO_2 , SO_3 gibi zehirli gaz salınımı) düşünüldüğünde, amorf silikanın doğadan alındığı gibi sadece öğütülerek kullanılabilmesi hem doğa hem de maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ülkemizde sadece Isparta yöresinde ekonomiye kazandırılmayı bekleyen 7 milyon ton civarında amorf silika maden yataklarının olduğu düşünülürse ülke ekonomisine yapacağı katkı da yadsınamaz bir gerçektir.

Bunun yanında amorf silikanın farklı zemin iyileştirme yöntemleriyle ve farklı parametrelerle, farklı koşullarda araştırılarak etkinliğinin denenmesi önerilmektedir. Çalışma kapsamı genişledikçe ve farklılaştıkça amorf silikanın zemin iyileştirme yöntemlerinde bir etkinlik faktörü tanımlaması yapılabileceği böylelikle ülkemizde bulunan bu madenin daha etkin ve verimli kullanılabileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan büyük ölçekli DKK deneyleri için zemin modellemelerinin farklı zemin türleri için de çalışılmasında fayda vardır. Yine zemin tabaka kalınlıklarının da zemin türlerine göre çalışılması uygun olacaktır. Büyük ölçekli DKK' lar için yapılan deneylerin sahada pilot bir çalışma ile kontrol edilmesi faydalı olacaktır. Yine amorf silika katkısının sadece ikame değil ilave yöntemlerle de çalışılarak değerlendirilmesi bu madenin kullanım etkinliği açısından çeşitlilik sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abbey, S. and Ngambi, S., 2015, Understanding the performance of deep mixed column improved soils-a review, *International Journal of Civil Engineering & Technology* 6 (3), 97-117.
- Ahnberg, H. (2006), Strength of stabilized soils: a laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder.” Doctoral Thesis, *Lund University*, Lund, Sweden, 1-2.
- Anlar, H.G., Bacanlı, M. ve Başaran, N., 2019, Silikanın kullanım alanları ve silika maruziyetine bağlı olası toksik etkiler, *Hacettepe University Journal of the Faculty of Pharmacy*, 39 (1), 17-29.
- Arslan, F. (2020), Tabakalı zemin ortamında imal edilen zeolit katkılı derin karıştırma kolonu davranışlarının model deneylerle araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Axelsson, K., Johansson, S. E., and Andersson, R., 2002, Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolan Reactions. *Swedish Deep Stabilization Research Centre Report 3, Linköping*, 17-20.
- ASCE, 1968, Specialty conference on placement and improvement of soil to support structures, Reston, VA: *American Society of Civil Engineers, Soil Mechanics and Foundations Division*.
- ASCE, 1978, Soil improvement-history capabilities and outlook, J.K. Mitchell, *American Society of Civil Engineers*, New York, 182.
- ASTM C136/C136M-19, 2019, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C128-15, 2015, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C150/C150M-17, 2017, Standard specification for portland cement, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C494/C494M-17, 2020, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C942-15, 2021, Standard Test Method for Compressive Strength of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C511-13, 2013, Standard specification for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

- ASTM C939/C939M, 2022, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C939/C939M-16A, 2016, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM C940-16, 2022, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4320/D4320M-09, Standard Practice for Laboratory Preparation of Chemically Grouted Soil Specimens for Obtaining Engineering Parameters, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6913/D6913M-17, 2017, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1140-17, 2017, Standard test methods for determining the amount of material finer than 75- μm (No. 200) sieve in soils by washing, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7928-17, 2017, Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318-17e1, 2017, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487-11, 2011, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2216-19, 2019, Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12e2, 2021, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166/D2166M-16, 2016, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4320/D4320M-09, 2018, Standard Practice for Laboratory Preparation of Chemically Grouted Soil Specimens for Obtaining Engineering Parameters (Withdrawn 2018), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

- ASTM D4219-02, 2010, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Index of Chemical-Grouted Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5084-16a, 2016, Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6910/D6910M-19, 2019, Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Construction Slurries, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6910/D6910M-09, 2019, Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries (Withdrawn 2018), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Ateşer, H.O. (2010), Amorf silika seramiklerin andaluzit katkısıyla sinterlenme ve mekanik özelliklerinin incelenmesi'', Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-13.
- Babasaki, R., Saito, S., and Suzuki, Y., 1984, *Temperature Characteristics of Cement Improved Soil and Temperature Analysis of Ground Improved using Deep Cement Mixing Method*, Symposium on Strength and Deformation of Composite Ground, JSSMFE, 33-40.
- Babasaki, R. M., Terashi, T., Suzuki, A., Maekaea, M., Kawamura, E., and Fukazawa, E., 1996, *JGS TC Report: Factors influencing the strength of improved soil In Proceedings of the 2nd Int. Conference on Ground Improvement Geosystems – IS Tokyo '96*, Tokyo, 913-918.
- Beall, H. G., 1994, Silica physical behaviour geochemistry and materials applications, industrial applications of silica, 29, Peter J. Heaney, Charles T. Prewitt and Gerald V. Gibbs, *De Gruyter*, USA, 469-505.
- Berechman, J., 2003, Transportation—economic aspects of Roman highway development: The case of Via Appia, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(5), 453–478.
- Bergado, D. T. and Lorenzo, G. A., 2005, Economical mixing method for cement deep mixing, *Geo-Frontiers Congress*, Austin, 1-10.
- Bhadriraju, V., Puppala, A. J., Madhyannapu, R. S. and Williammee, R., 2007, 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*, Vol. 31, No. 3, 225-238.
- Birand, A., 2001, Kazıklı Temeller, *Teknik Yayınevi*, Ankara, 74-75.
- Bonnet, J. and Gaillard, J., 2007, Silicate ceramics, ceramic materials processes, properties and applications, *Boch Philippe*, Niepce J, 102.

- Bouassida, M. and Porbaha, A., 2004a, Ultimate bearing capacity of soft clays reinforced by a group of columns - application to a deep mixing technique, *Soils and Foundations*, 44 (3), 91-101.
- Bouassida, M. and Porbaha, A., 2004b, Bearing capacity of foundations resting on soft ground improved by soil cement columns, *International Conference on Geotechnical Engineering*, Sharjah-UAE, 173– 180.
- Box, G. E. P. and Wilson, K.B., 1951, On the experimental attainment of optimum conditions (with discussion), *Journal of the Royal Statistical Society Series B* 13(1), 1–45.
- Brinch Hansen, J., 1963, Discussion, Hyperbolic Stress-Strain Response of Cohesive Soils, *Journal of Soil Mechanics, Foundation Division ASCE*, 89 (4), 241-242.
- Broms, B. and Boman, P., 1979, Lime columns - a new foundation method, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 105, 539-556.
- Bruce, D. A. and Bruce, M. E. C., 2003, The Practitioner's guide to deep mixing, *Grouting and Grout Treatment Geotechnical Special Publication*, 1, 480-481.
- Bruce, D. A., 2000a, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, Report No. FHWA-RD-99-138, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.
- Bruce, D. A., 2000b, Supplemental reference appendices for an introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, *Volume II: Appendices*, Report No. FHWA-RD-99-144, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.
- Bruce, D.A., 2001, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications, Volume III: Verification and Properties of Treated Soil, Report No. FHWA-RD-99-167, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.
- BS 1377:2, 1990, Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests, *British Standards Institution*, UK.
- Bunavan, A. R., Rashid, A. S. and Said, K. N. M., 2017, The Deep Mixing Method: Bearing Capacity Studies. *Geotech Geol Eng*, 1271-1298.
- Bushra, I. and Robinson, R. G., 2013, Effect of fly ash on cement admixture for a low plasticity marine soil, *Advances in Civil Engineering Materials*, 2(1), 608-621.
- Cement Deep Mixing Method Association, 1999, Cement Deep Mixing Method (CDM), Design and Construction Manual (in Japanese).
- Chen, X. L., Liu, Y.H. and Zhang, S. D., 1996, Design methods of the cement soil retaining wall, *Grouting and Deep Mixing, Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 475-480.

- Chew, S.H., Yim, H.M.A., Koh, J.W., Chua, K.E. and Gng, Z.X., 2020, QA/QC plan and evaluation of field strength and permeability value for deep cement mixing, *International Journal of GEOMATE*, 19 (74), 52-58.
- Chin-Hsiao, C. and Hong-Yang, L., 2002, Optimal composition of zircon–fused silica ceramic cores for casting superalloys, *J. Am. Ceram. Soc.*, 85 (4), 773–779.
- Chin, F.K., 1970, Estimation of Pile Not Carried to Failure, *Proceedings 2nd Souteast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, 81-90.
- Choi, S.G., Park, S.S., Wu, S. And Chu, J., 2017, Methods for calcium carbonate content measurement of biocemented soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (11), 1-2.
- Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., and Menge, P., 2009, Construction processes—State of the art report, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 3006–3135.
- Das, B.M., Sivakugan. N., 2019, Principles of foundation engineering, 9E, *Cengage Learning, Inc.*, Boston-USA, 199-201.
- Davila, L. P., Risbud, S. H. and Shackelford, J. F., 2008, Ceramic and glass materials structure, properties and processing, *Springer*, Newyork, 71-87.
- Davraz, M. (2004), Isparta keçiborlu yöresi doğal amorf silika oluşumlarının geleneksel ve hafif beton endüstrilerinde kullanılabilirliğinin araştırılması”, Doktora tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Davraz, M. ve Gündüz, L., 2003, Isparta Yöresi Amorf Silika Kayacının Katkı Maddesi Olarak Beton Dayanımına Etkisi, *III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, 35-42.
- Davraz, M. and Gündüz, L., 2005, Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 1251-1261.
- De Beer, E.E. and Wallays, M., 1989, Franki Piles with Overexpanded Bases, *La Technique des Travaux*, 333, 48.
- Decký, M., Drusa, M., Pepucha, L. and Zgútová, K., 2013, Earth structures of transport construction, *Harlow: Essex, Pearson*, 180.
- Decourt, L., 1999, Behaviour of foundations under working load conditions, *Proc. of the 11th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Dolguassu, Brasil, 453-488.
- Demiral, T. Ö., 2017, Sülfatlı su içerikli kum zeminlerde portland çimentosu ve sülfata dayanıklı çimento kullanılarak oluşturulan jet-grout kolonlarının taşıma gücüne sülfatın etkisi, *Yüksek lisans tezi*, Selçuk Üniversitesi.

- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y. and Zhang, D., 2015, Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution, *Engineering Geology*, 193, 146–152.
- Dinç, H. (2010), Osteberg hücresi ile kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, İTÜ, İstanbul.
- Dry Jet Mixing Association, 2010, Dry Jet Mixing (DJM) Method Technical Manual (in Japanese).
- Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., Collin, J.G., and Berg, R.B., 2006, Ground Improvement Methods Volume II, Report No. FHWA-NHI-06-020, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.
- Enami, A., Yoshida, M., Hibino, S., Takahashi, M., and Akitani, K., 1985, In situ measurement of temperature in soil cement columns and influence of curing temperature on unconfined compressive strength of soil cement, *20th Annual Meeting, JSSMFE*,” Japanese, 1737-1740.
- Eren, İ. (2004), Patateslerin osmotik dehidrasyonunun “response surface” metodu kullanılarak optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- EuroSoilStab, 2002, Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils—Design Guide: Soft Soil Stabilization, CT97-0351, Project No. BE 96-3177, *IHS BRE Press*, Watford, UK.
- Etiholding, 1998-2000, Keçiborlu diatomit lokal alanı yıllık işletme faaliyet raporları, Isparta.
- Fang, Z. and Yin, J. H., 2007, Responses of excess porewater pressure in soft marine clay around a soil-cement column, *Int. J. Geomech.*, 7(3), 167-175.
- FHWA (Federal Highway Administration), 2013, Federal Highway Administration Design Manual: Deep mixing for embankment and foundation support. *Report No. FHWA-HRT-13-046*, *Federal Highway Administration*, Washington, DC.
- FHWA (Federal Highway Administration), 2001, An introduction to the deep mixing method as used in geotechnical applications: Verification and properties of treated soil, *Prepared by Geosystems, L.P., Document No. FHWA-RD-99-167*, October, 455 p.
- Fidan, B. ve Olgun, M., 2022, Killi zeminlerin stabilizasyonunda amorf silika pozzolanın kullanımı, *IV. International Turkic World Congress on Science and Engineering*, Niğde, 444-451.
- Gaafer, M., Bassioni, H., and Mostafa, T., 2015, Soil Improvement Techniques. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(12), 217–222.

- Gebreselassie, B. and Kempfert, H. G., 2006, Excavations and Foundations in Soft Soils, *Springer*, Netherlands, 489-493.
- Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C., 2015, Modification of triaxial apparatus for permeability measurement of unsaturated soils, *Soils and Foundations*, 55(1),63-73.
- 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.
- Güneş, Ö. (2017), Isparta-keçiborlu amorf silis yataklarının tarım teknolojileri alanında kullanım özelliklerinin belirlenmesi'', Yüksek lisans tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 30.
- Hakansson, U., Hassler, L., Stille, H., 1992, Rheological properties of microfine cement grouts, *Tunneling and Underground Space Technology*, 7(4): 453- 458.
- Halkola, H., 1999, Keynote lecture: Quality control for dry mix methods, *Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm, 285-294.
- Han, J., 2015, Principles and Practices of Ground Improvement, *John Wiley & Sons, Inc*, Hoboken New Jersey, 4-11.
- Hausmann, M.R., 1990, Engineering principal of ground modification. *McGraw-Hill Publishing Company*, Singapore, 631.
- Holm, G., Bredenberg, H. and Broms, B., 1981, Lime columns as foundations for light structures, *Proceedings, 10th ICSMFE*, Stockholm, 687-693.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagara, T. S., 2003, Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4): 439-444.
- Hosoya, Y., Nasu, T., Hibi, Y., Ogino, T., Kohata, Y., and Makihara, Y,1996, JGS TC Report: An evaluation of the strength of soils improved by DMM, *Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing*, Tokyo, 919-924.
- Işık I., 1984. Diyatomit, *A.Ü. Müh – Mim. Fak. Maden Müh. Böl.*, Eskişehir, 81-98.
- Jacobson, J. R., Filz, G. M., and Mitchell, J. K., 2003, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *Virginia Transportation Research Council*, Charlottesville, VA.
- JGS 0821–2000, Practice for Marking and Curing Stabilized Soil Specimens without Compaction (in Japanese), Japanese Geotechnical Society Standard.

- Kamon, M., 1996, Effects of Grouting and DMM on Big Construction Projects in Japan and the 1995 Hyogoken - Nambu Earthquake, *Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 807-824.
- Karakan, E. ve Ebre, Z., 2020, Kuru Kumlarda Dane Çapı Dağılımının İçsel Sürtünme Açısına Etkisinin Kesme Kutusu Deneyleri ile Belirlenmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), Iğdır.
- Kaya, Z. (2016), Derin karıştırma kolonlarının ölçülen ve hesaplanan kapasitelerinin tam ölçekli yükleme deneyleri ile incelenmesi'', Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-20.
- Kılıç, H.O. (2013), Derin karıştırma yöntemi tasarım ve uygulaması'', Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Kirsch, K., and Bell, A., 2019, Ground improvement, CRC Press, NW, 395.
- Kitazume, M. and Terashi, M., 2013, The Deep Mixing Method, *Taylor & Francis Group CRC Press/Balkema*, Netherlands, 190.
- Kitazume, M. and Terashi, M., 2012, The Deep Mixing Method, *CRC Press Tokyo*.
- Kitazume, M. and Terashi, M., 2002, The Deep Mixing Method: Principle, Design and Constructions, *CDIT (Coastal Development Institute of Technology) A. A. Balkema Publishers*, Tokyo, 8-11.
- Koç, B. ve Kaymak-Ertekin, F., 2009, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları, *Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü*, İzmir, 2.
- Larsson, S., 2005, State of Practice Report– Execution, monitoring and quality control, *Royal Institute of Technology, Stockholm- Sweden*, 741.
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T., 2004, Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1042–1050.
- Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T., 2006, Fundamental characteristics of cementadmixed clay in deep mixing, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 161–174. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:2(161).
- Lyons, J. S. (1990), Micromechanical studies of crack growth in a ceramic matrix composite'', Doktora Tezi, *School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology*, Georgia.
- Marzano, I.P., Osman, A. A-M., Grisolia M. and Al-Tabbaa, A., 2009, Mechanical performance of different stabilised soils for application in stratified ground, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2276-2279.

- Masike, N. (2019), Silis dumanı ilaveli derin karıştırma kolonlarının üç eksenli basınç dayanımı ve konsolidasyon özelliklerinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- MasterRheobuild 1000, Yüksek Oranda Su Azaltıcı Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı Teknik Bilgi Föyü, Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., İstanbul.
- Matsuo, T., Nisibayashi, K. and Hosoya, Y., 1996, Studies on soil improvement adjusted at low compressive strength in Deep Mixing Method, *Proceedings of ISTokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 807-824.
- Mete Z. (1982), Kimi Batı Anadolu diatomit yataklarının özelliklerinin incelenmesi ve kullanım alanlarının araştırılması'', Doçentlik Tezi, *E.Ü. Kimya Fak. Kimya Müh. Böl*, İzmir, 84- 90.
- Mishra,A., Sawant, V. A. and Deshmukh, V. B., 2019, Prediction of pile capacity of socketed piles using different approaches, *Geotech. Geol. Eng.*, 37 (6), 5219–5230.
- Mishra, S. and Siddiqui, N.A., 2014, Review On Environmental and Health Impacts Of Cement Manufacturing Emissions, *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences*, 2, 26-31.
- Mitchell, J.K., 1981, Soil improvement State of the art report, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 4, 509–565.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T. S., 2002, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations Japanese Geotechnical Society*, 41(5), 33-45.
- Miyoshi, A. and Hirayama, K., 1996, Test of solidified columns using a combined system of mechanical churning and jetting. *Proc. of the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 743–748.
- Moseley, M.P. and Kirsch, K., 2004, Ground improvement, *Taylor and Francis*, London.
- Murray, E.J., 2002, Procedure for the Determination of the Permeability of Clayey Soils in a Triaxial Cell Using the Accelerated Permeability Test, *Murray Rix Limited R&D Technical Report P1-398/TR/2*, Bristol, 3-7.
- 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.

- Nonveiller, E., 1989, Grouting Theory and Practice, *Elsevier Science Publisher*, Netherlands, 35-68.
- Noori, M. A. (2019), Katkı içerikli derin karıştırma kolonları performans, özelliklerinin model deneylerle araştırılması'', Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Okumara, T., 1996, Deep Mixing Method of Japan, *Proceedings of IS-Tokyo '96, The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 879-888.
- Özdikicierler, E., Eren, İ., Göksungur, M.Y. ve Yemişçioğlu, F., 2016, Optimizasyon ve Modelleme Süreçlerinde Cevap Yüzey Metodu Yaklaşımı, *Türkiye 12. Gıda Kongresi*, Edirne.
- Özgüner, A. M., Fişekçi, A., Kılıç, D., Özgönül, E., Ölmez, M., Akıncı, A. ve Taş, N., 1989, Keçiörlü kükürt yataklarının jeolojisi, *MTA Derleme Rapor No.2502*, 85-87.
- Paker. S., 2010, Isparta ili maden ve enerji kaynakları, MTA Ankara, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Isparta_Madenler.pdf [Ziyaret Tarihi: 22 Kasım 2022].
- Pathivada, S. P. (2005), Effects of water-cement ratio on deep mixing treated expansive clay characteristics'', Master thesis, The University Of Texas at Arlington, Arlington, 17-19.
- Pekmezci, B.Y. ve Uyan, M., 2001, Uçucu küllerde etkinlik faktörü kavramı, *Hazır Beton Dergisi*, 65-67.
- Porbaha, A., 1998, State of the art in deep mixing technology: part I. Basic concepts and overview, *Ground Improvement*, 2, 81-92.
- Porbaha, A., Shibuya, S. and Kishida, T., 2000, State of the art in deep mixing technology: Part III: geomaterial characterization, *Ground Improvement*, 3, 91-110.
- Puppala, A., 2003, Evaluation of in situ method for quality assessment of deep mixing, Final Report, project NDM 101a, National deep mixing program.
- Ramadhan, M. R. and Putra, H., 2021, Evaluation of carbonate precipitation methods for improving the strength of peat soil, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, Indonesia, 622-012032.
- Rathmayer, H., 1996, Deep Mixing Methods for Soft Subsoil Improvement in the Nordic Countries, *Proceedings the 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Grouting and Deep Mixing*, Tokyo, 869-877.
- Sarıöz, K. (1985). Keçiörlü kükürt yataklarının oluşumu ve yörenin jeolojisi'', Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi*, Eskişehir, 91.

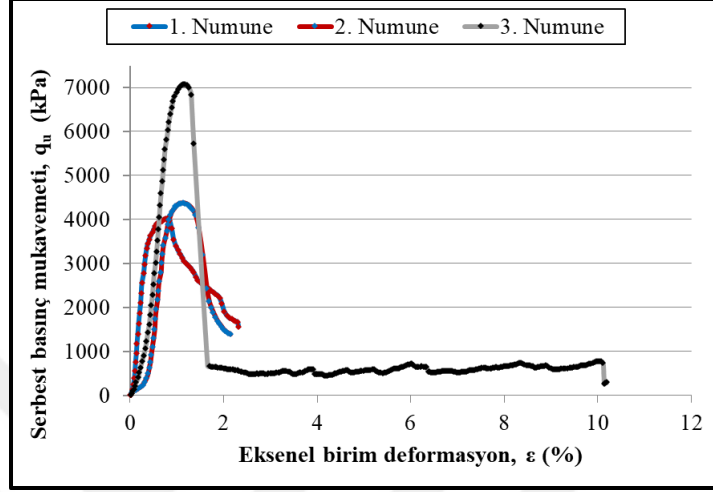
- Seiler, H.G, Sigel, H. and Sigel, A., 1988, Handbook on toxicity of inorganic compounds, *Marcel Dekker*, New York, United States.
- Schaefer, V.R. and Berg, R.R., 2012, Geotechnical Solutions for Soil Improvement, Rapid Embankment Construction, and Stabilization of the Pavement Working Platform. *Final Phase 2 Summary Report by SHRP II R02 team, submitted to the U.S. Strategic Highway Research Program (SHRP) II, (USA)*.
- Schaefer, V.R., Berg, R.R., Collin, J.G., Christopher, B.R., DiMaggio, J.A., Filz, G.M., Bruce, D.A., Ayala, D. and Berg, R.R., 2016, Geotechnical engineering circular no. 13 ground modification methods-reference manual volume II (No. FHWA-NHI-16-028), *National Highway Institute, (USA)*.
- Schaefer, V.R., Mitchell, J.K., Berg, R.R., Filz, G.M. and Douglas, S.C., 2012, Ground improvement in the 21st century: a comprehensive web-based information system, *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from GeoCongress*, 272–293.
- Sharp, J. H., Gartner, E. M. and Macphee, D. E., 2010, Novel cement systems (sustainability), *Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium*, Adv. Cem. Res., 22, 195–202.
- Sherwood, P. T., 1995, Soil Stabilization with Cement and Lime, *HMSO Publications Center*, London, U.K., 14-22.
- Skempton, A. W., 1953, Soil mechanics in relation to geology, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 29, 33-62.
- Skempton, A. W., 1948, A possible relationship between true cohesion and the mineralogy of clays. *Proc. 2nd Int. Conf. S.M.*, Vol. 7, p. 45.
- Shroff, A., V. and Shah, D., L., 1993, Grouting technology in tunneling and dam construction, *Balkema, Brookfield*, 13-71; 230-300.
- Szelag, M., 2018, Influence of specimen's shape and size on the thermal cracks' geometry of cement paste, *Construction and Building Materials*, 189, 1155-1172.
- Tan, T. S., Goh, T. L. and Yong, K. Y., 2002, Properties of Singapore marine clays improved by cement mixing, *Geotechnical Testing Journal*, 25 (4), 422-433.
- Terashi, M. and Kitazume, M., 2011, QA/QC for deep-mixed ground: current practice and future research needs, *Ground Improvement*, 164(G13), 161-177.
- Terzaghi, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, *Wiley-New York*, 135-141.
- Topolnicki, M., 2004, In Situ Soil Mixing, Ground Improvement, 3rd Ed., *CRC Press*, New York, NY.
- Tosun, K., 2007, Farklı çimento tiplerinin gecikmiş etrenjit oluşumu üzerindeki etkileri, *Doktora tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi.

- TS EN 14679, 2006, Özel jeoteknik uygulamalar-derin karıştırma, *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*
- TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, *TSE, Ankara.*
- TS EN 197-1, 2012, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 934-2, 2011, Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları- Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.*
- TS EN 13055, 2016, Hafif agregalar, *Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.*
- Türkyılmaz, H. (2011), Kurşun iyonlarının kesikli adsorpsiyon prosesi ile gideriminin cevap yüzey yöntemiyle optimizasyonu”, Yüksek lisans tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.*
- Uzuner, B. A., 2013, Temel Mühendisliğine Giriş, *Derya Kitabevi, Trabzon, 343.*
- Vemović, Ž., Zelić, B. K. and Kvasnička P., 2003, Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla - usporedba konvencionalnih i novih metoda, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 15, 95-102.
- Wahidy, M. (2019), Derin Karıştırma Kolonlarının Performansı Üzerinde Farklı Özellikteki Çimentoların Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 12-16.*
- Warner, J., Practical Handbook of Grouting Soil Rock and Structures, John Wiley&Sons., New Jersey, 1-178, 207-295.
- Warren, B.E., Krutter, H. and Morningstar, O., 1936, Fourier analysis of X-ray patterns of vitreous SiO₂ and B₂O₃, *J. Am. Chem Soc.* 19, 202–206.
- Wasti, Y. and Bezirci, M.H., 1986, Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test, *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 241- 246.
- Weill, H., Jones, R. and Parkes, W., 1994, Silicosis and related diseases, Occupational lung disorders. *Butterworth-Heinemann Ltd, London, England.*
- Yalçınıyigit, G. (2019), Yüksek fırın cüruf katkılı derin karıştırma kolonu davranışlarının deneysel olarak araştırılması”, Yüksek lisans tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.*
- Ye, S.L., Han, J. and Ye, G.B., 1994, Ground Improvement and Underpinning Technologies, *China Building Industry Press, Beijing.*

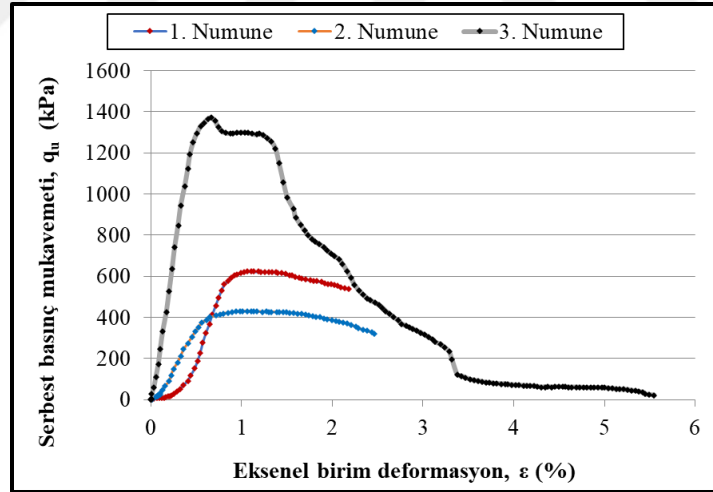
- Yenginar, Y. (2020), Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması'', Doktora tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Yıldız, A., 2012, Doğal nanomateryal: Diyatomit, *SDUGEO e-dergisi*, 3-1, 14-20.
- Yıldız, A. (1997), Seydiler (Afyon) diyatomit cevherinin jeolojisi ve izolasyon tuğlası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması'', Yüksek lisans tezi, *AKÜ Fen Bil. Ens*, Afyonkarahisar, 128.
- Yi, Y., Liu, S., Zhang, D., Zhu, Z., 2009, Experimental Study On T-Shaped Soil-Cement Deep Mixing Column Composite Foundation, *GeoHunan International Conference*, Hunan, 197, 1- 7.
- Zachariasen, W.H., 1932, The atomic arrangement in glass, *J. Am. Chem. Soc*, 54, 3841–3851.
- https://www.model-co.com/en/applications/grouting-applications/wet_soil_mixing, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2022].
- <https://www.liebherr.com/en/can/products/construction-machines/deep-foundation/methods/soil-improvement/wet-soil-mixing/wet-soil-mixing.html>, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2022].
- <https://www.kellerme.com/>, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2022].
- <https://www.bauer.de/bma/>, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2022].

EKLER

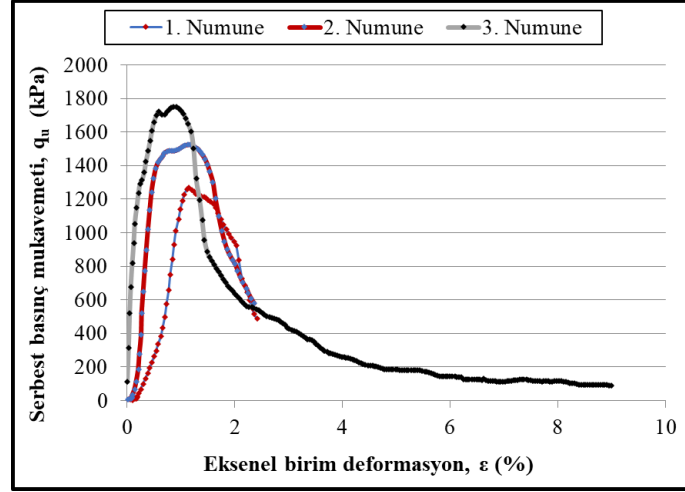
EK-1 Killi zeminle küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucu elde edilen 28 ve 56 günlük kür süreleri için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon (q_u - ε) grafikleri



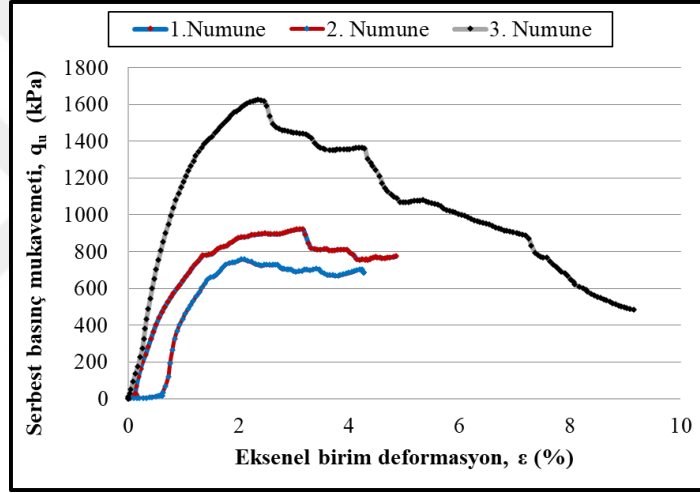
Şekil Ek 1.1. Killi zemin 28 günlük kür süresi 1. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



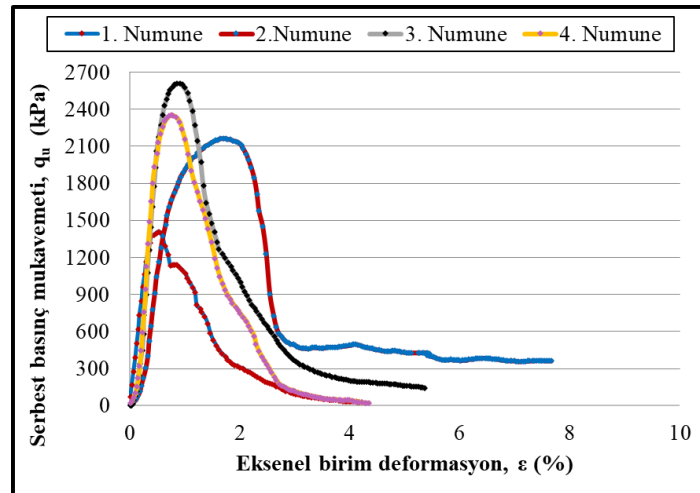
Şekil Ek 1.2. Killi zemin 28 günlük kür süresi 2. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



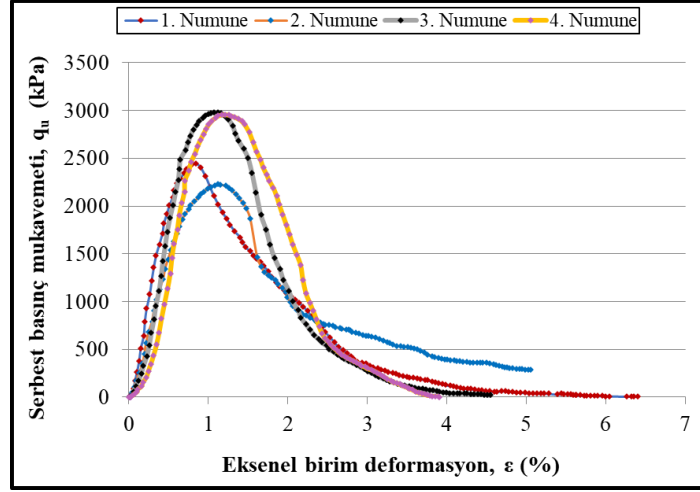
Şekil Ek 1.3. Killi zemin 28 günlük kür süresi 3. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



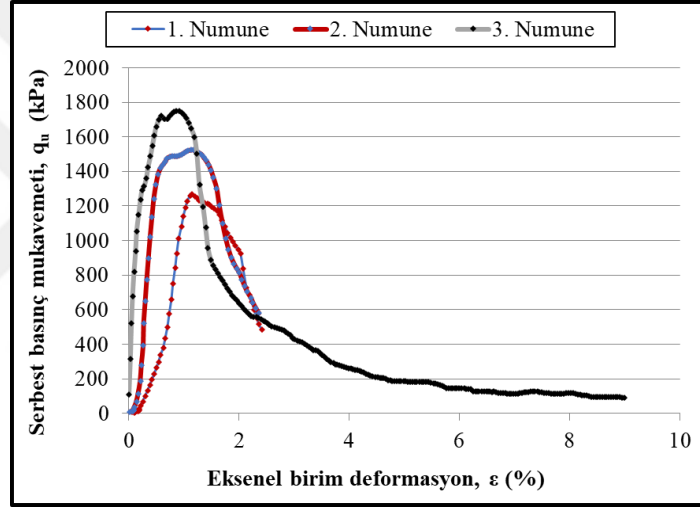
Şekil Ek 1.4. Killi zemin 28 günlük kür süresi 4. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



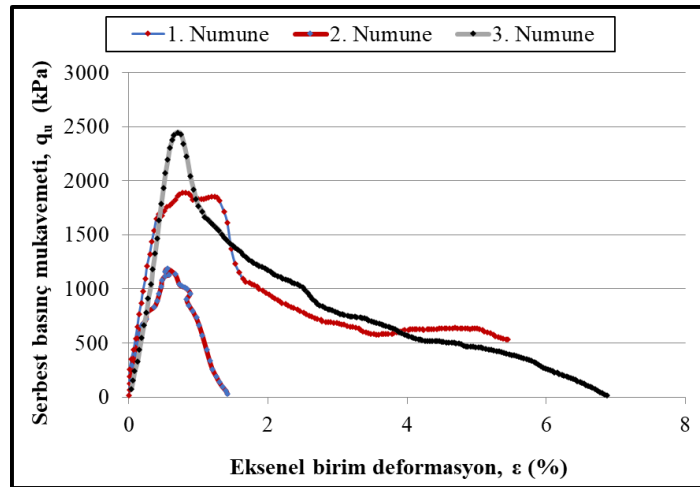
Şekil Ek 1.5. Killi zemin 28 günlük kür süresi 5. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



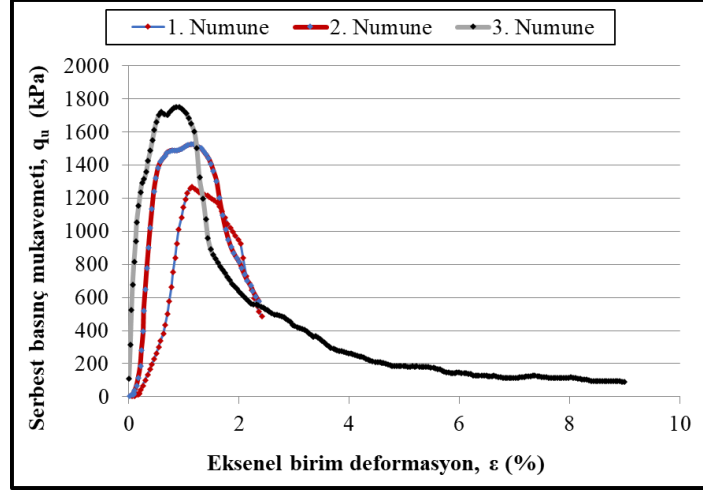
Şekil Ek 1.6. Killi zemin 28 günlük kür süresi 7. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



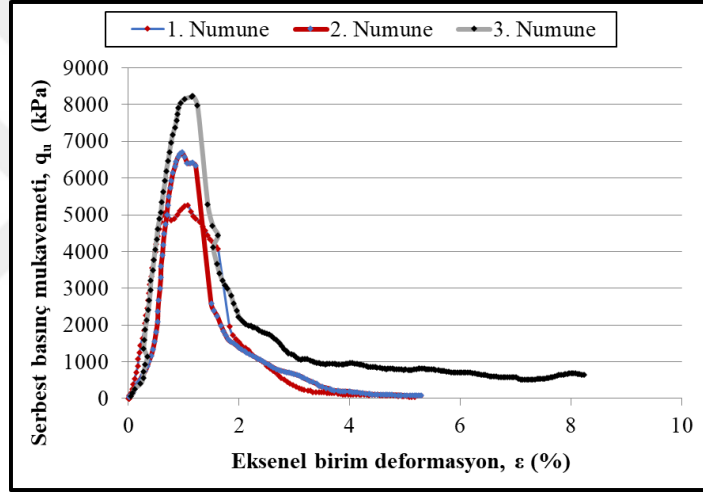
Şekil Ek 1.7. Killi zemin 28 günlük kür süresi 8. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



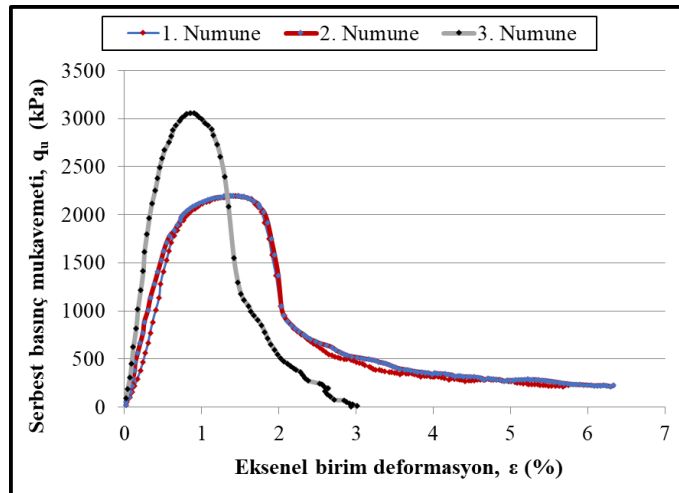
Şekil Ek 1.8. Killi zemin 28 günlük kür süresi 9. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



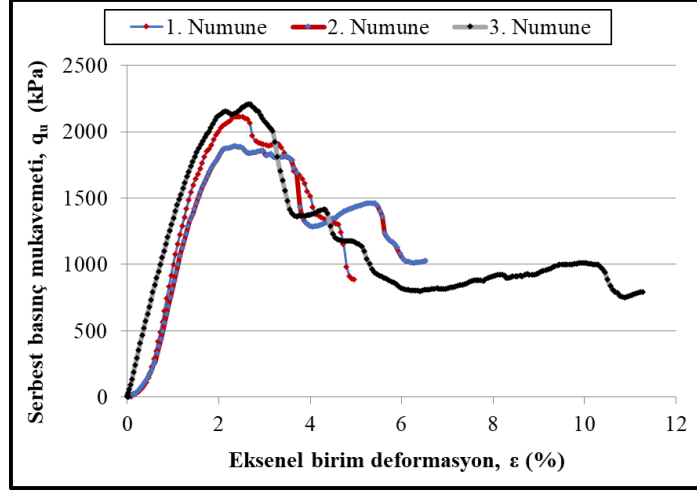
Şekil Ek 1.9. Killi zemin 28 günlük kür süresi 10. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



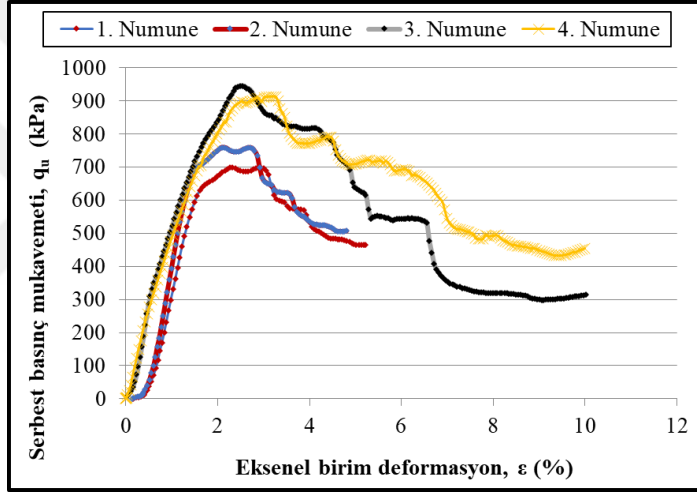
Şekil Ek 1.10. Killi zemin 28 günlük kür süresi 11. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



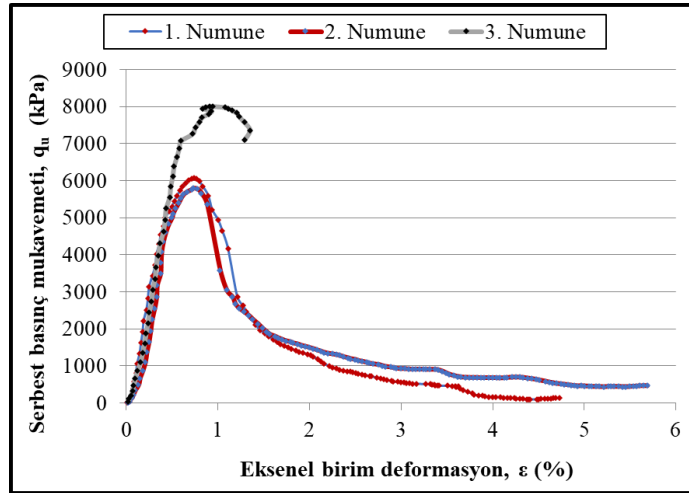
Şekil Ek 1.11. Killi zemin 28 günlük kür süresi 12. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



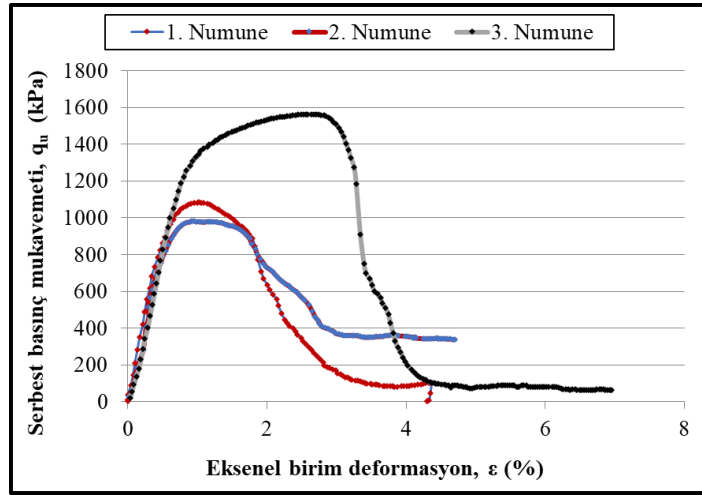
Şekil Ek 1.12. Killi zemin 28 günlük kür süresi 14. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



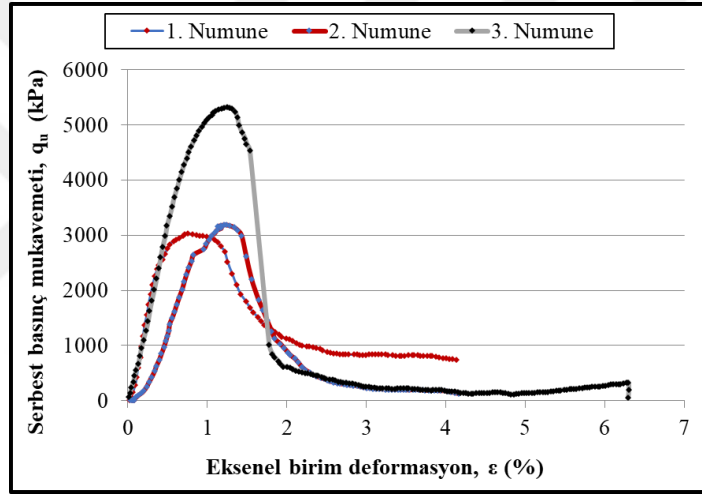
Şekil Ek 1.13. Killi zemin 28 günlük kür süresi 15. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



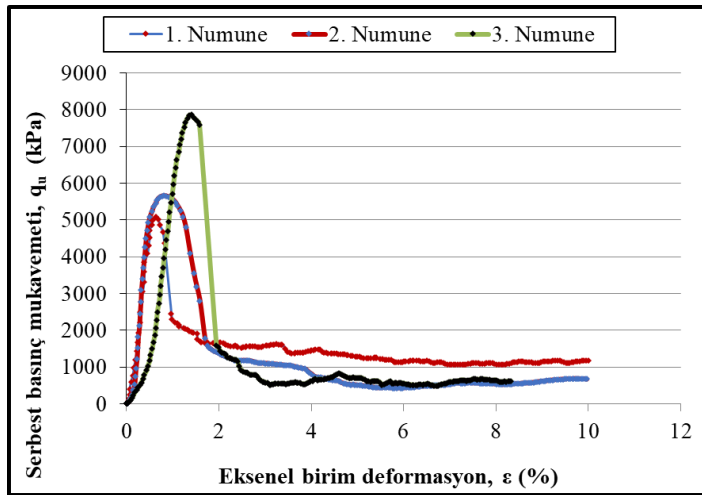
Şekil Ek 1.14. Killi zemin 28 günlük kür süresi 16. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



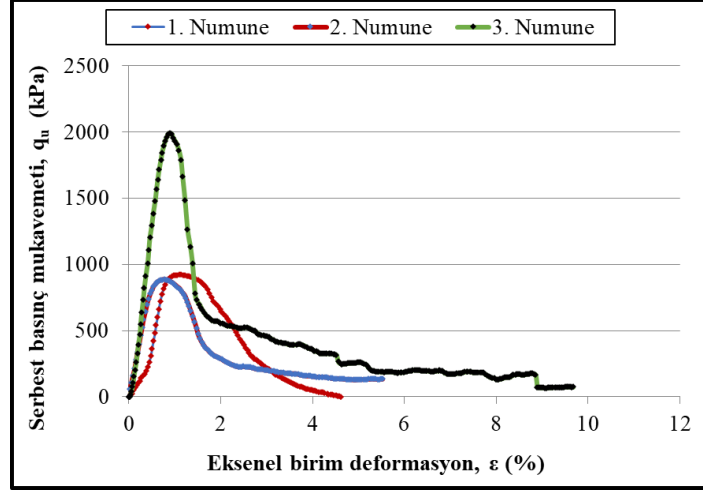
Şekil Ek 1.15. Killi zemin 28 günlük kür süresi 17. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



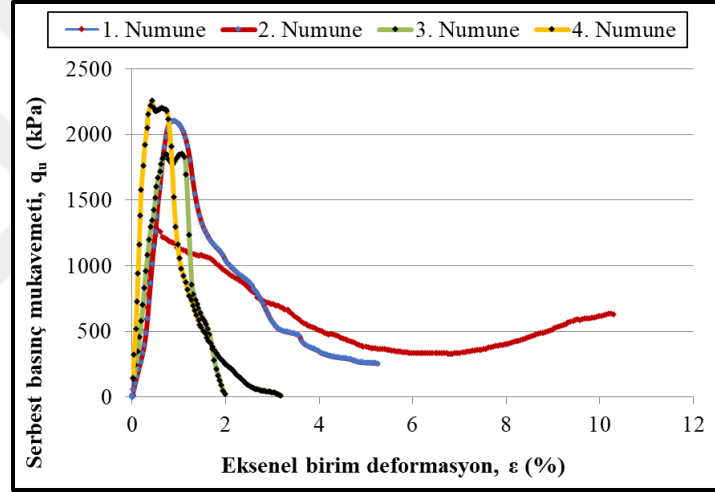
Şekil Ek 1.16. Killi zemin 28 günlük kür süresi 18. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



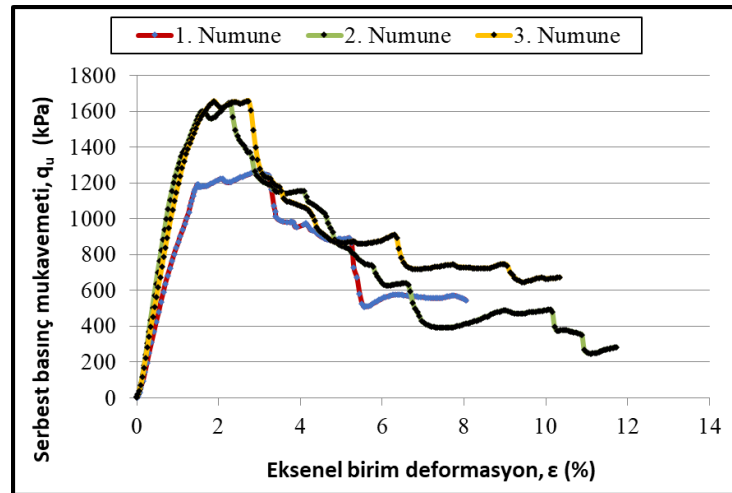
Şekil Ek 1.17. Killi zemin 56 günlük kür süresi 1. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



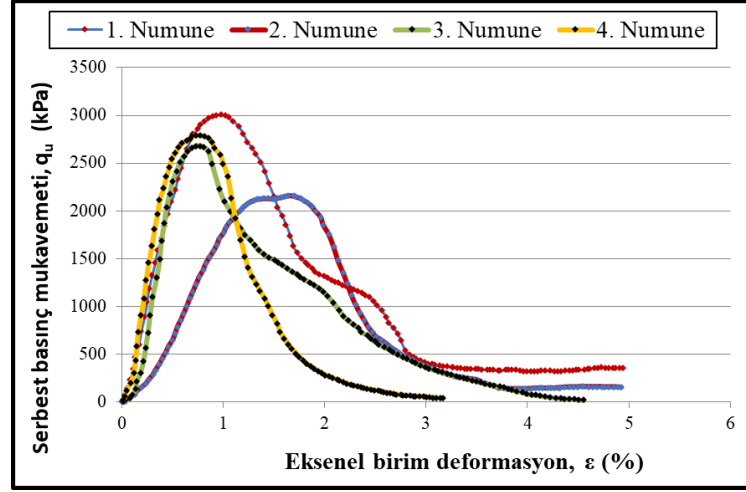
Şekil Ek 1.18. Killi zemin 56 günlük kür süresi 2. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



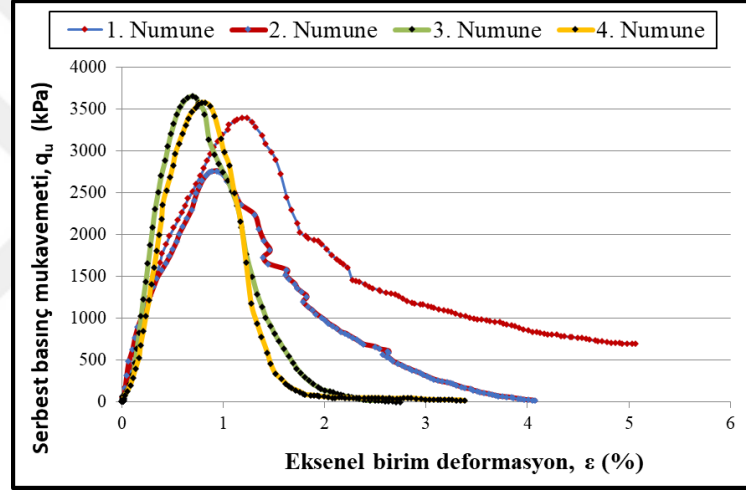
Şekil Ek 1.19. Killi zemin 56 günlük kür süresi 3. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



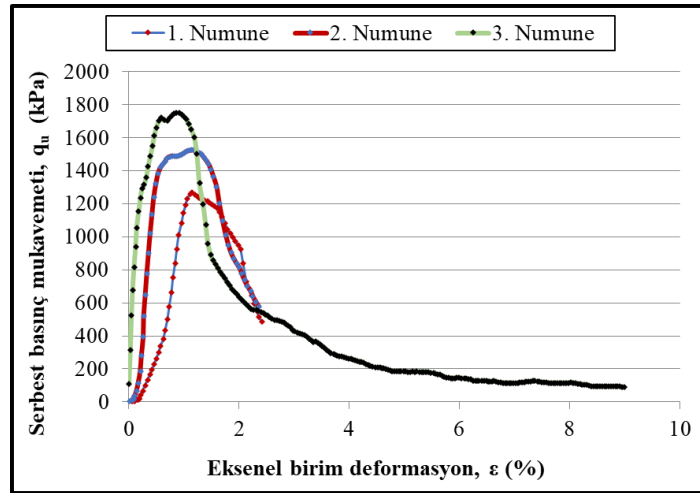
Şekil Ek 1.20. Killi zemin 56 günlük kür süresi 4. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



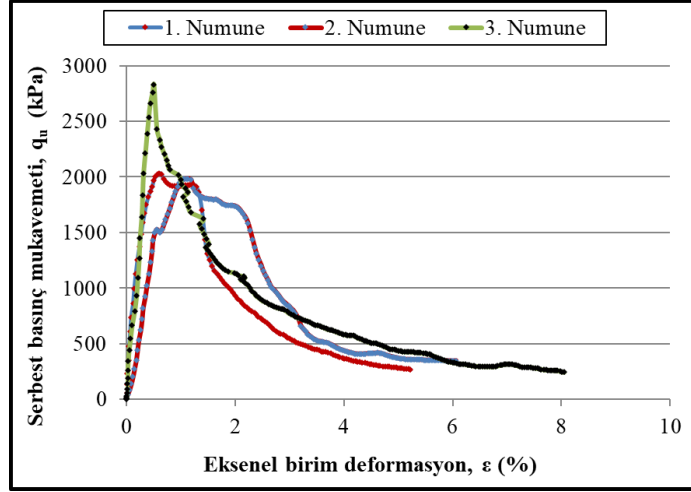
Şekil Ek 1.21. Killi zemin 56 günlük kür süresi 5. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



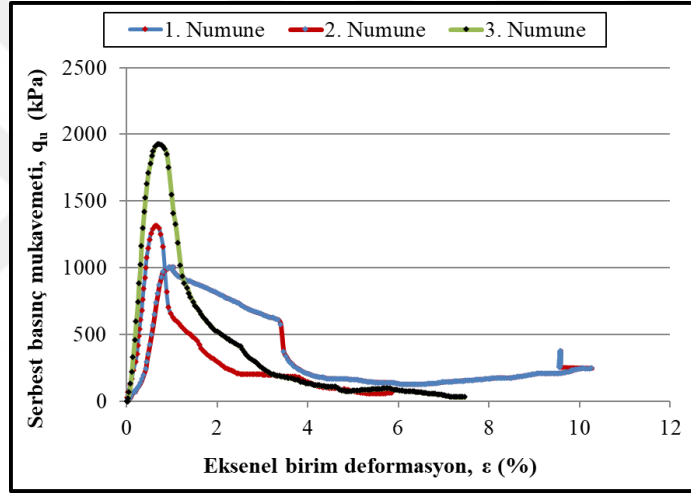
Şekil Ek 1.22. Killi zemin 56 günlük kür süresi 7. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



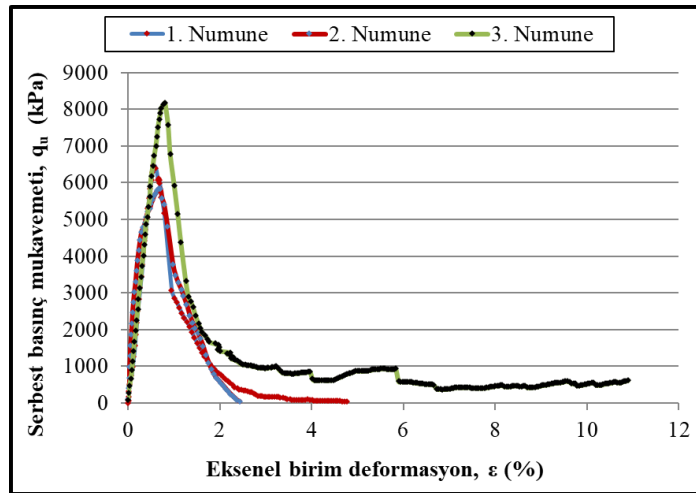
Şekil Ek 1.23. Killi zemin 56 günlük kür süresi 8. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



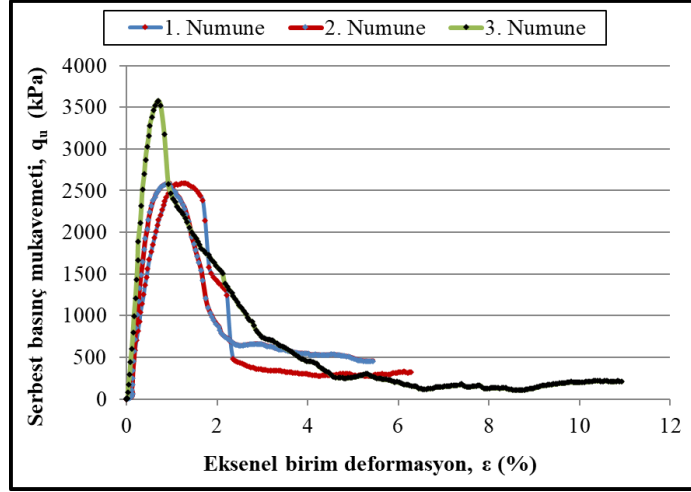
Şekil Ek 1.24. Killi zemin 56 günlük kür süresi 9. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



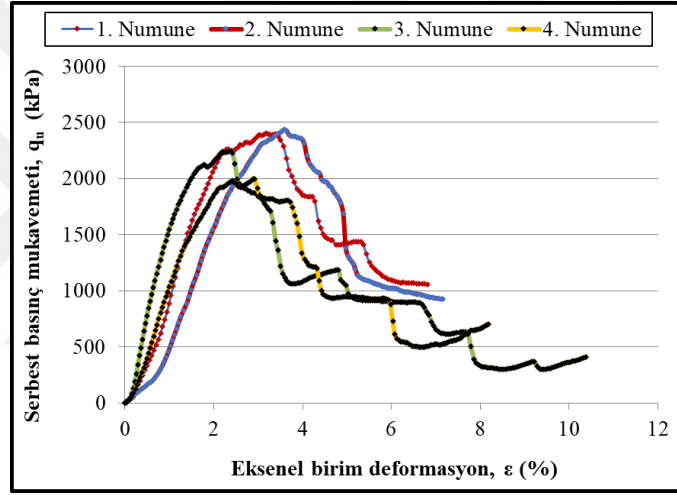
Şekil Ek 1.25. Killi zemin 56 günlük kür süresi 10. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



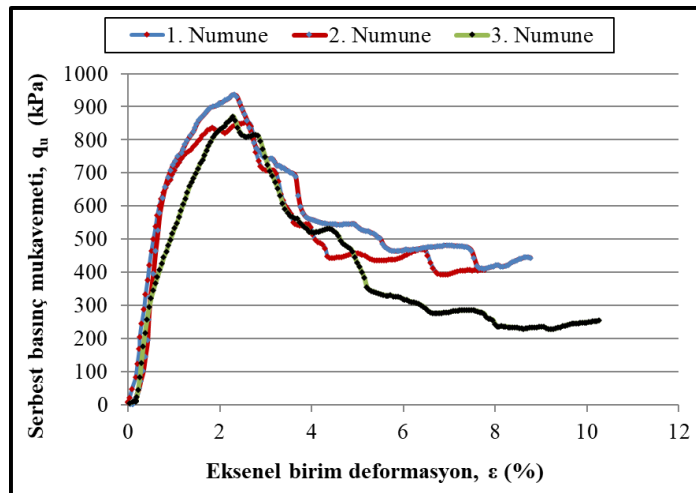
Şekil Ek 1.26. Killi zemin 56 günlük kür süresi 11. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



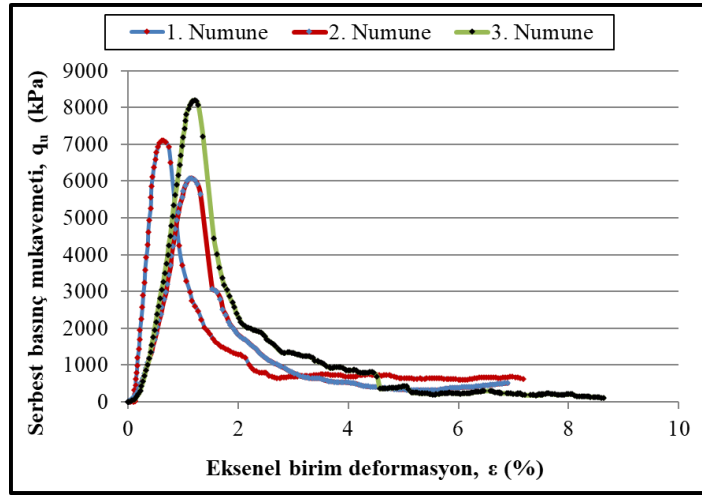
Şekil Ek 1.27. Killi zemin 56 günlük kür süresi 12. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



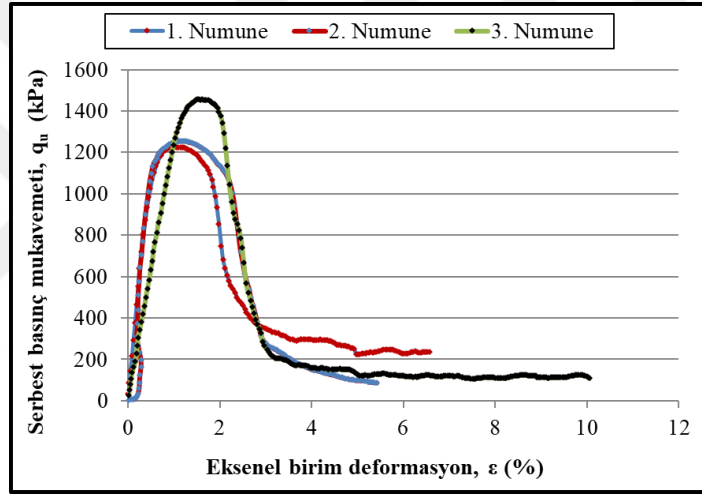
Şekil Ek 1.28. Killi zemin 56 günlük kür süresi 14. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



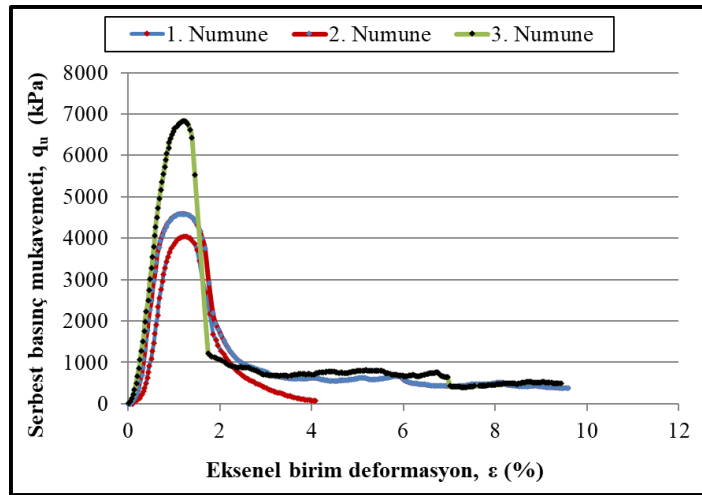
Şekil Ek 1.29. Killi zemin 56 günlük kür süresi 15. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 1.30. Killi zemin 56 günlük kür süresi 16. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği

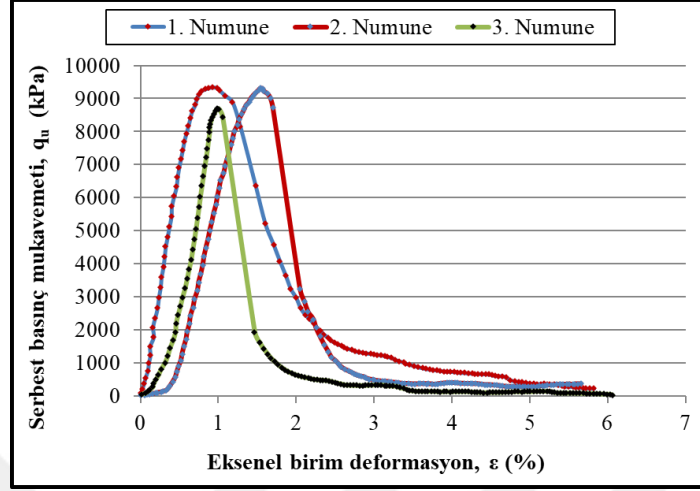


Şekil Ek 1.31. Killi zemin 56 günlük kür süresi 17. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği

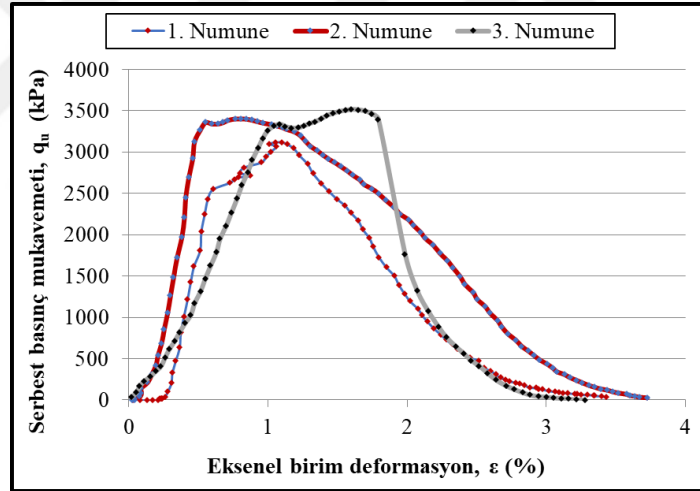


Şekil Ek 1.32. Killi zemin 56 günlük kür süresi 18. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği

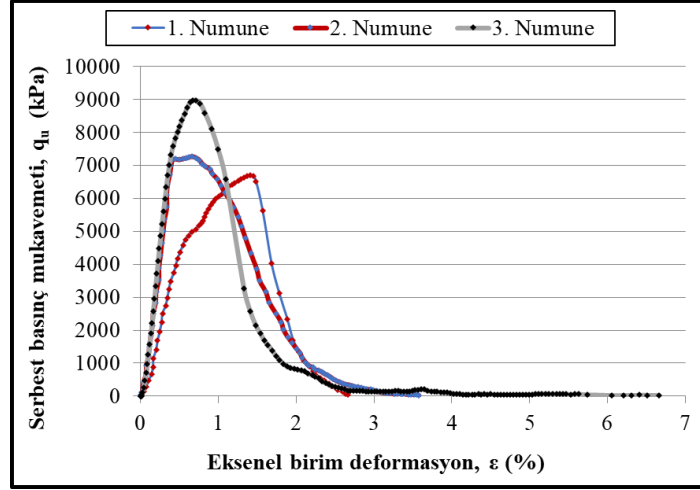
EK-2 Kumlu zeminle küçük ölçekli DKK numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucu elde edilen 28 ve 56 günlük kür süreleri için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon (q_u - ε) grafikleri



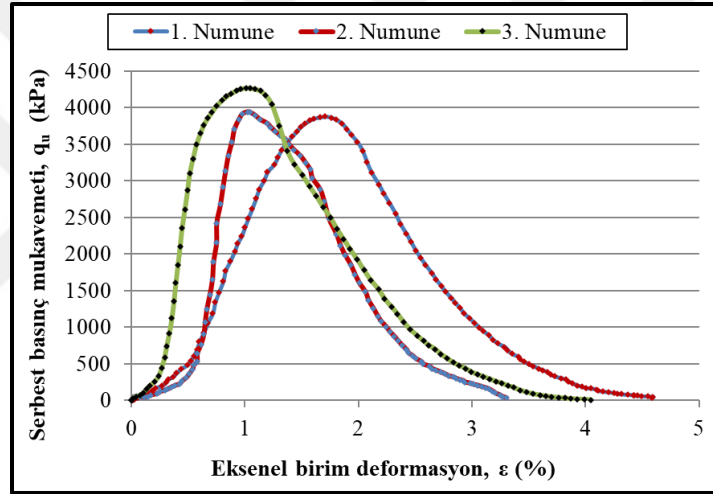
Şekil Ek 2.1. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 1. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



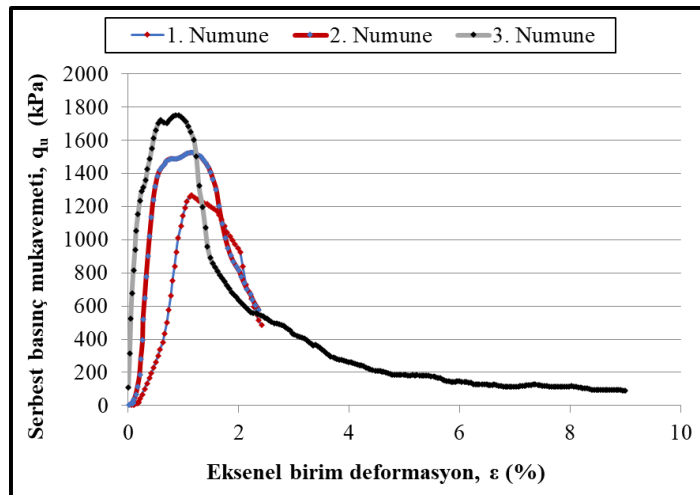
Şekil Ek 2.2. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 2. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



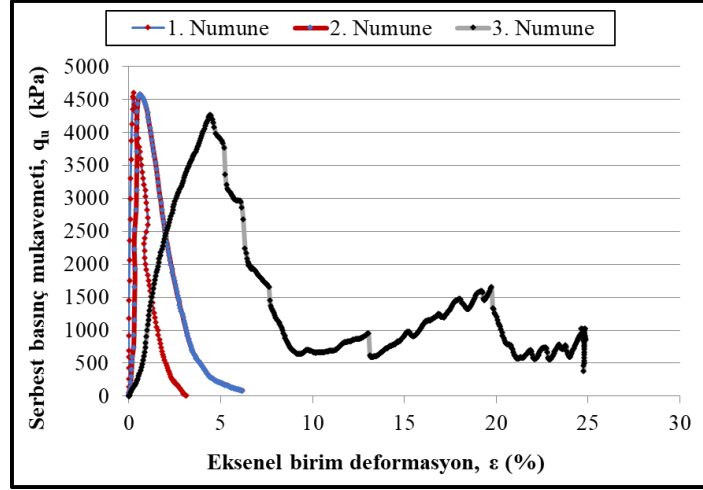
Şekil Ek 2.3. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 3. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



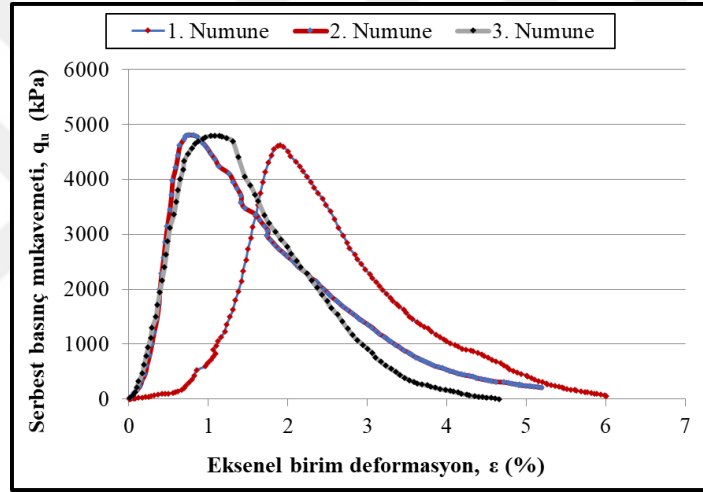
Şekil Ek 2.4. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 4. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



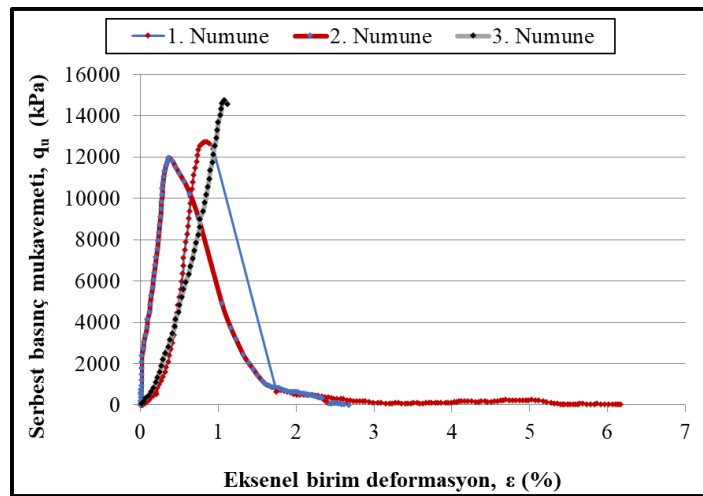
Şekil Ek 2.5. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 5. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



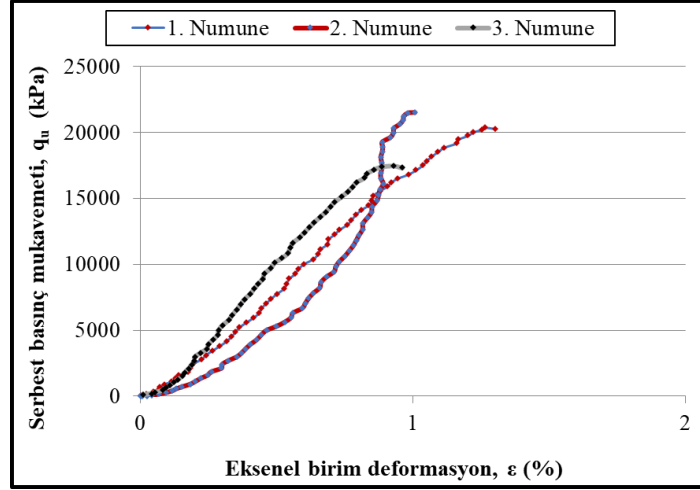
Şekil Ek 2.6. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 6. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



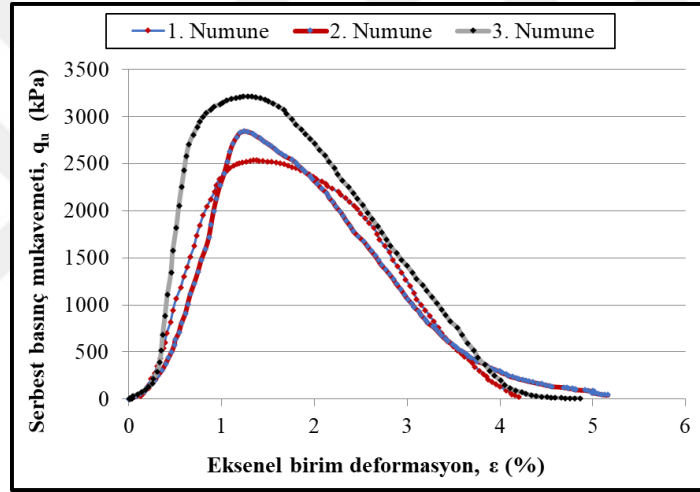
Şekil Ek 2.7. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 8. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



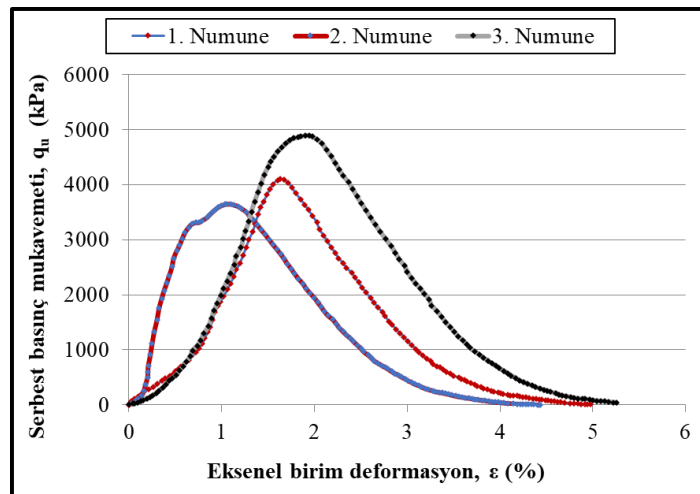
Şekil Ek 2.8. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 9. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



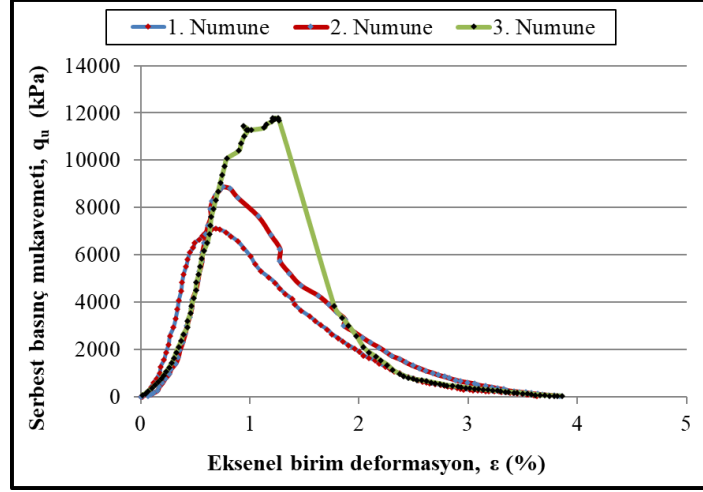
Şekil Ek 2.9. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 10. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



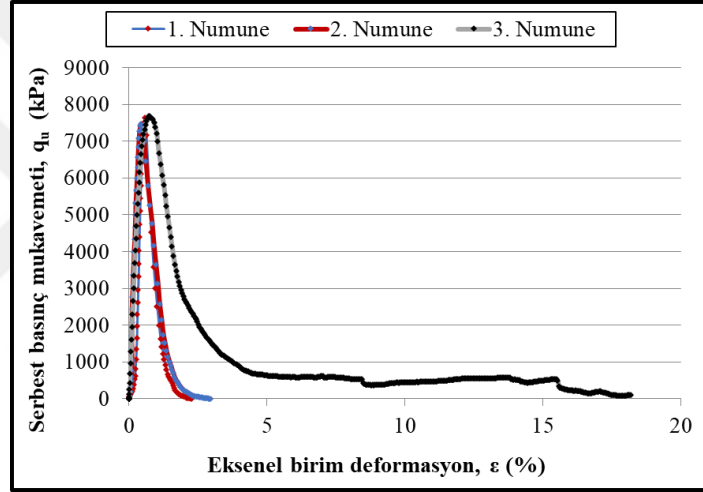
Şekil Ek 2.10. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 11. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



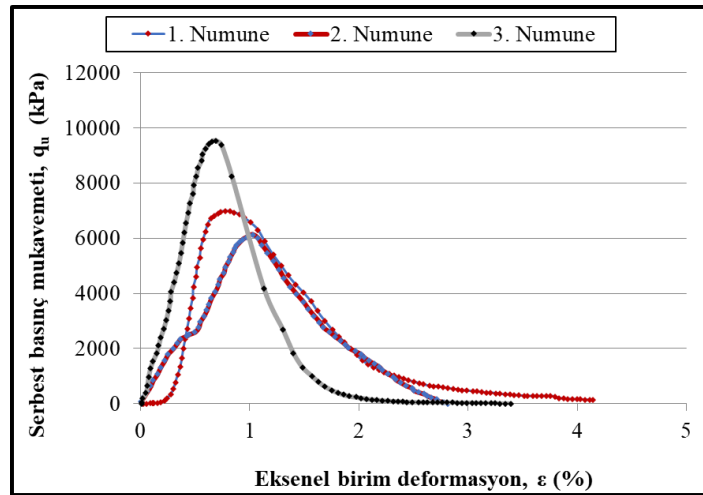
Şekil Ek 2.11. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 12. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



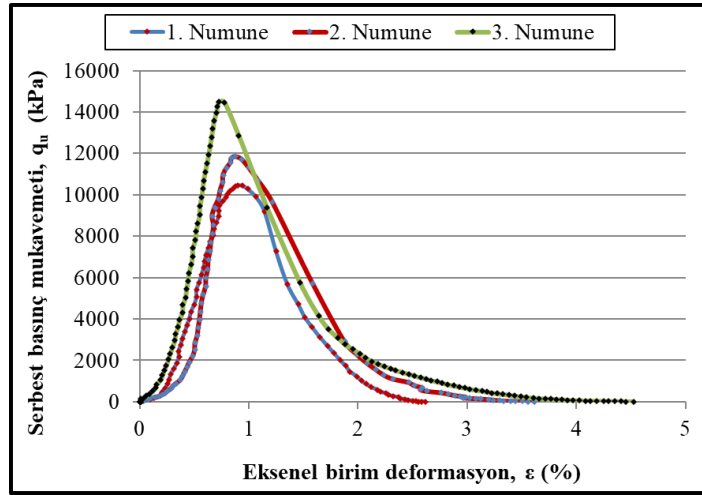
Şekil Ek 2.12. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 13. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



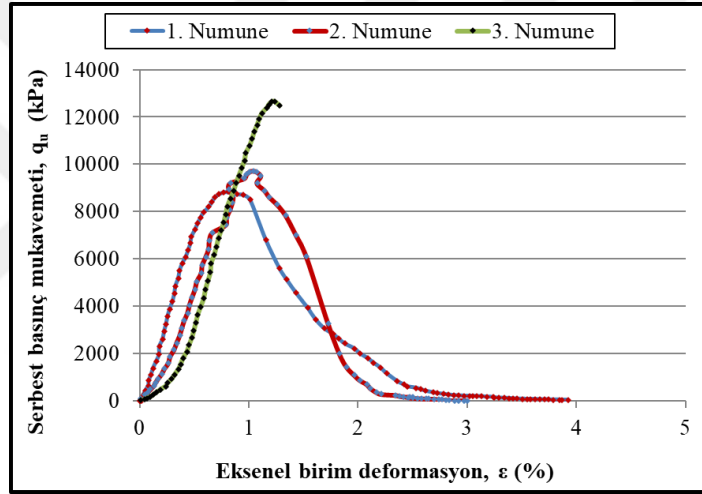
Şekil Ek 2.13. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 15. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



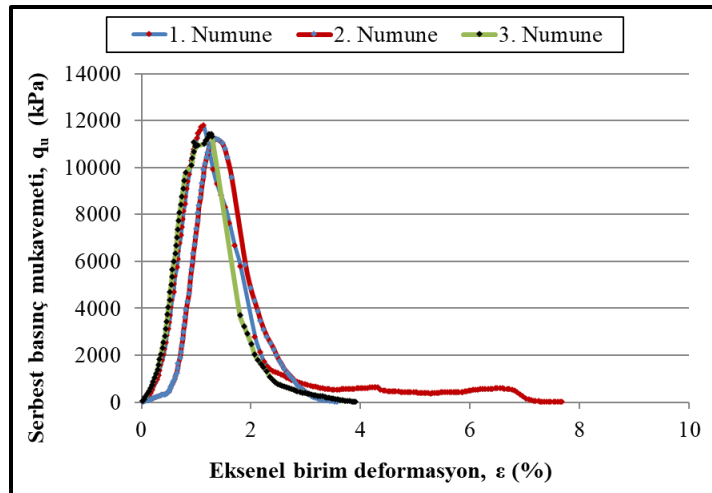
Şekil Ek 2.14. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 16. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



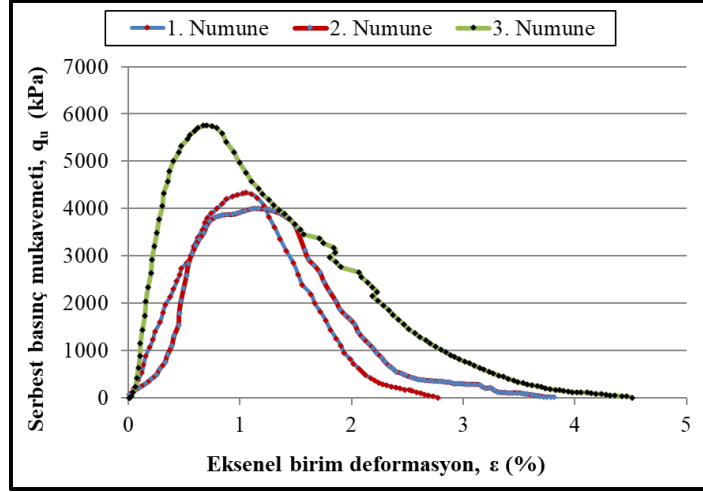
Şekil Ek 2.15. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 17. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



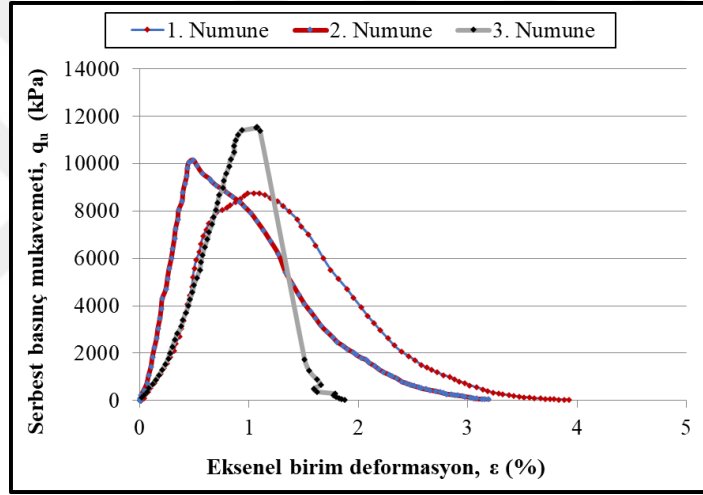
Şekil Ek 2.16. Kumlu zemin 28 günlük kür süresi 18. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



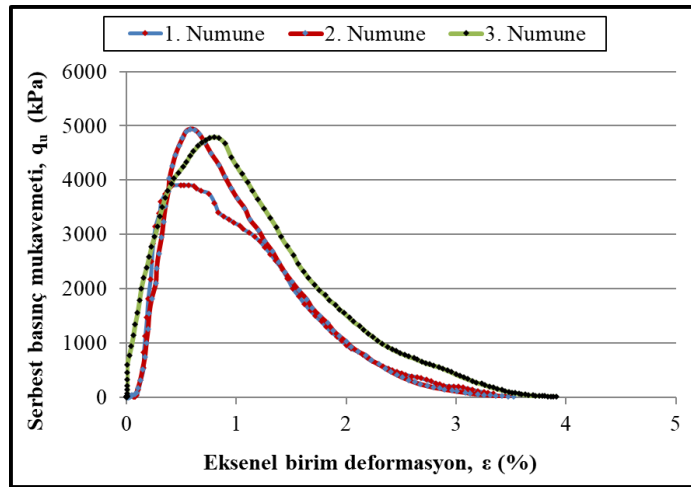
Şekil Ek 2.17. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 1. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



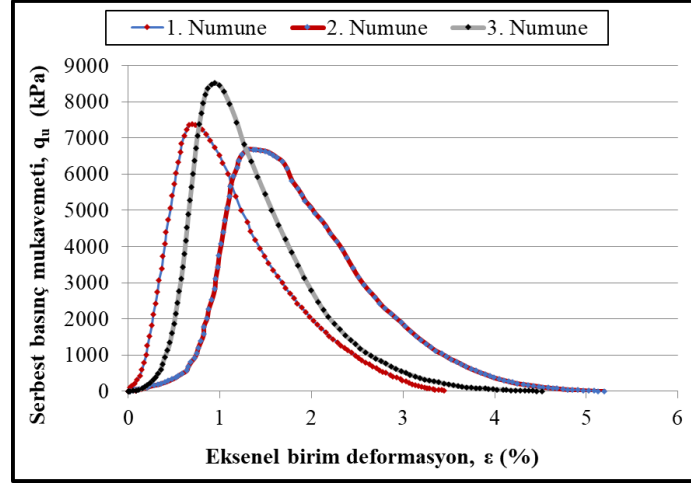
Şekil Ek 2.18. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 2. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



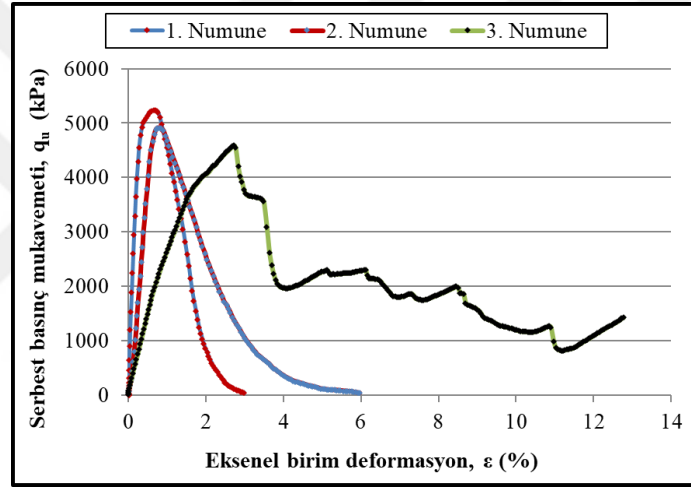
Şekil Ek 2.19. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 3. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



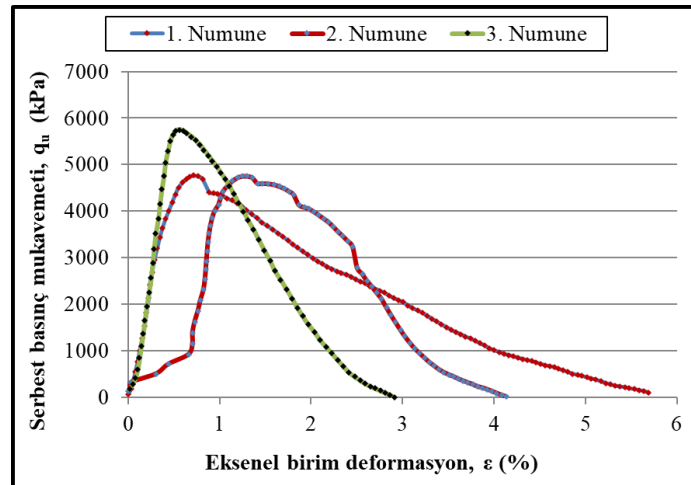
Şekil Ek 2.20. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 4. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



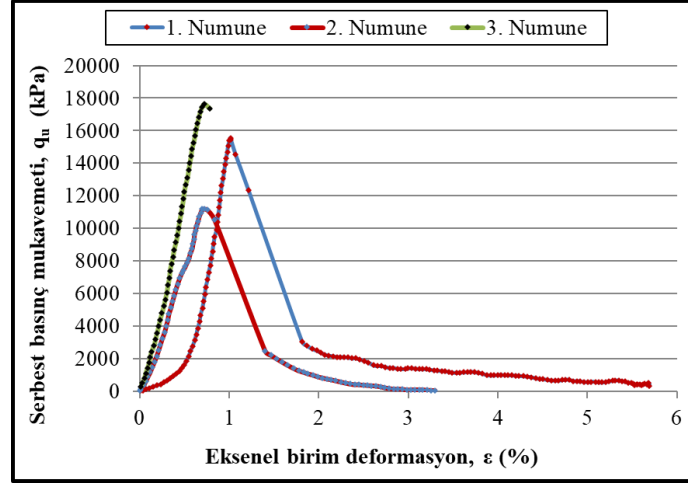
Şekil Ek 2.21. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 5. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



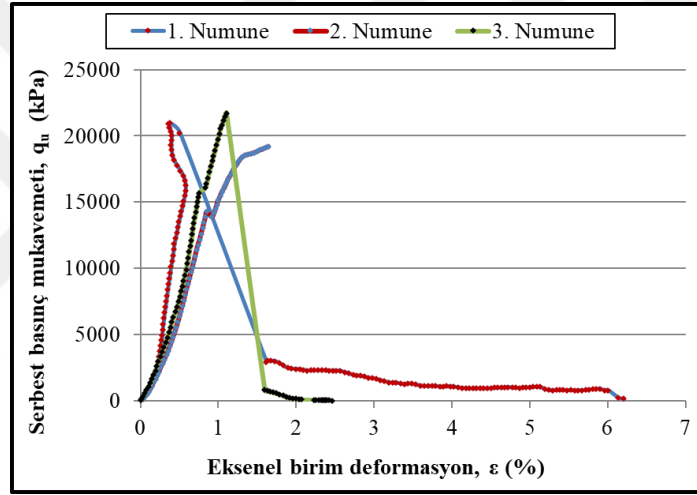
Şekil Ek 2.22. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 6. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



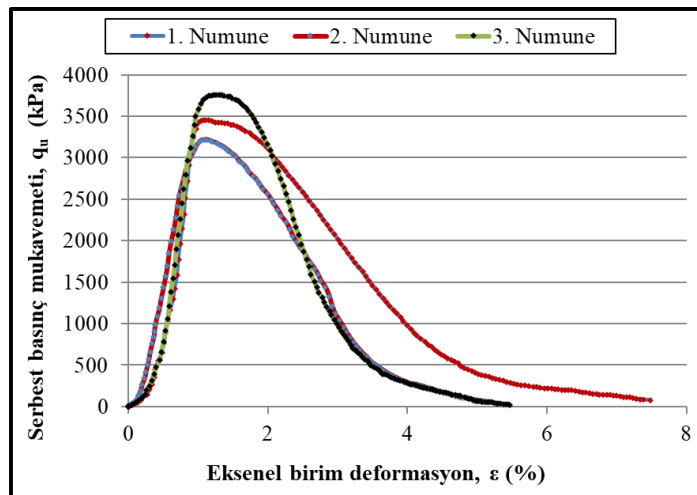
Şekil Ek 2.23. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 8. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



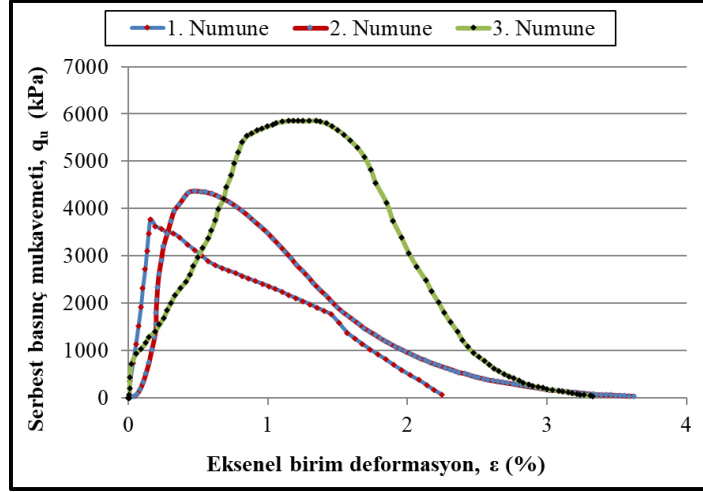
Şekil Ek 2.24. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 9. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



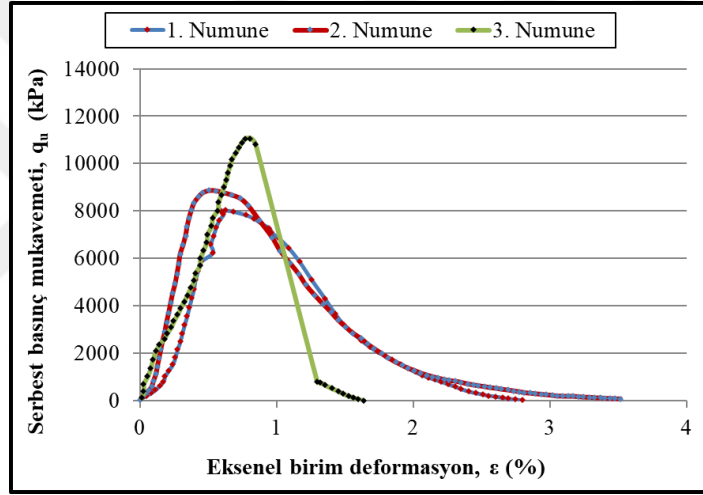
Şekil Ek 2.25. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 10. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



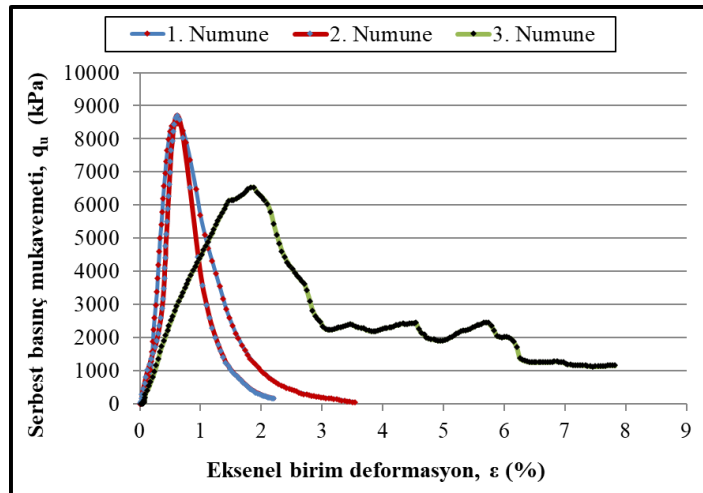
Şekil Ek 2.26. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 11. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



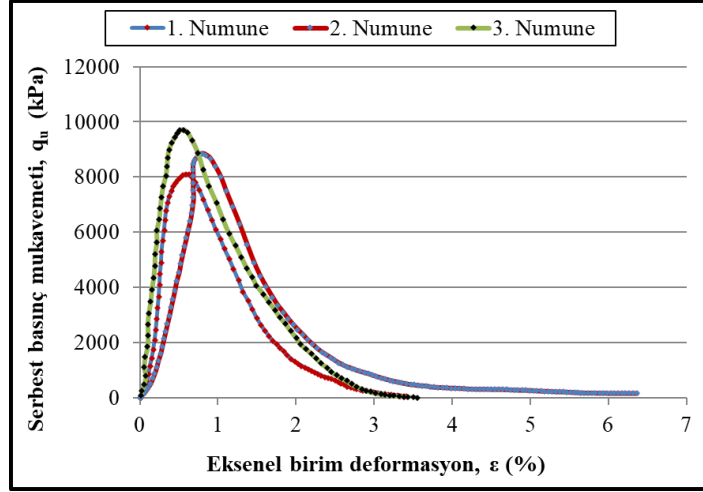
Şekil Ek 2.27. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 12. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



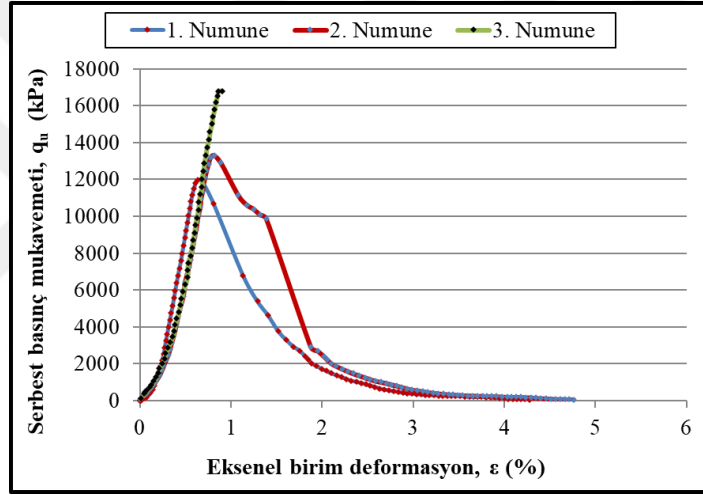
Şekil Ek 2.28. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 13. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



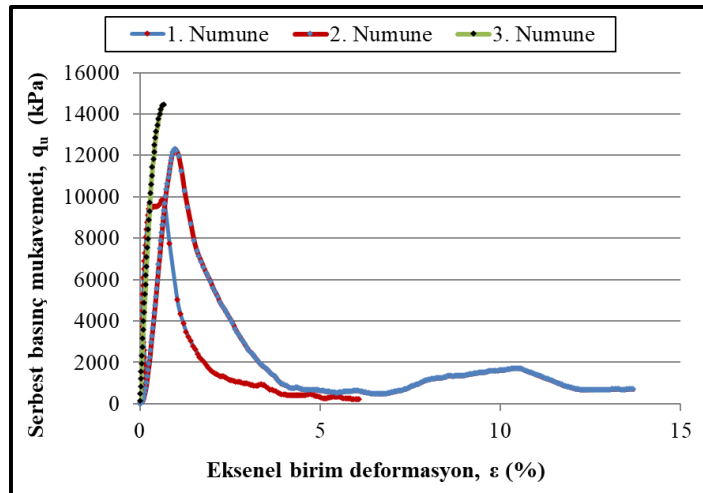
Şekil Ek 2.29. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 15. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 2.30. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 16. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 2.31. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 17. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği



Şekil Ek 2.32. Kumlu zemin 56 günlük kür süresi 18. tasarım için serbest basınç mukavemeti-eksenel birim deformasyon grafiği