



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**POLYESTER ESASLI KOMPOZİT
KAZIKLARDA PERFORMANSIN MODEL
DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI**

Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI tarafından hazırlanan “Polyester Esaslı Kompozit Kazıklarda Performansın Model Deneylerle Araştırılması” adlı tez çalışması 25/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Zülküf KAYA

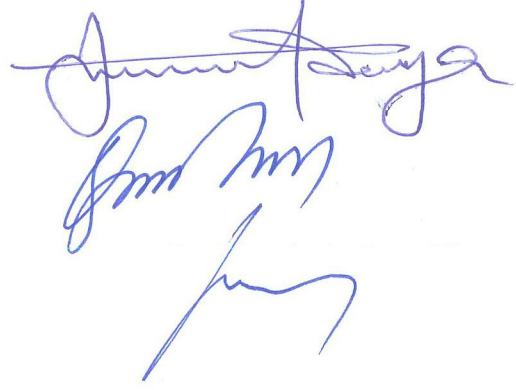
Danışman

Prof. Dr. Özcan TAN

Üye

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü V.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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


İmza
Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI
Tarih:25/11/2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLYESTER ESASLI KOMPOZİT KAZIKLARDA PERFORMANSIN MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI

Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Danışman: Prof. Dr. Özcan TAN

2019, 118 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Özcan TAN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Doç. Dr. Zülküf KAYA

Yüzeysel temel sistemleri ile taşıma gücü, oturma, stabilite ve sıvılaşma gibi kriterlerin sağlanmadığı durumlarda kazıklı temel sistemleri kullanılır. Kazıklı temellerin imalatı zor ve uygulama maliyeti yüksektir. Günümüzde; kazıklı temellerin yapı-temel-zemin etkileşimindeki davranış özellikleri ile performansını iyileştirmek ve maliyeti asgari düzeyde düşürmek için farklı kimyasal özellikteki malzemeler bir araya getirilerek kompozit kazık imalatı üzerinde çalışmalar yürütülmektedir.

Bu çalışmada; kuru kum ağırlığının %10-20-30-50 oranlarında polyester ile %0-5-10-20'si oranlarında çimento, uçucu kül ve silis dumanı farklı su muhtevalarında (%0-3-6-9) karıştırılarak numuneler ve model kazıklar üretilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında L16 tasarım tablosu kullanılmış ve sonuçlar Taguchi optimizasyon yöntemine göre SN ve Varyans analizi ile değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda; parametrelerin serbest basınç ve yarmada çekme mukavemeti üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Serbest basınç mukavemeti üzerinde en etkili parametrenin %75 ile polyester olduğu, ikinci derecede en etkili parametrenin ise %10 ile su olduğu belirlenmiştir. Basınç mukavemetinin %50 polyester, %5 çimento, %0 uçucu kül ve %20 silis dumanı oranlarında maksimum olacağı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda seçilen optimum karışım oranları kullanılarak 7 cm çapında ve 40 cm yüksekliğinde içi dolu ve içi boş polyester esaslı kompozit kazıklar üretilmiştir. Bu model kazıklar sıkı kum ile dolu deney tankı içinde yerleştirilerek kazık yükleme deneyleri yapılmıştır. Model deneylerde beton kazık davranışına yakın performans sergilediği görülmüştür. Özellikle enerji sönümlenme yeteneği ve betona göre elastik davranış gösterebilmesi bu tür polyester esaslı kazıkların yatay ve sismik yük etkilerine maruz kalınan durumlarda kullanılabilceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı temel, Kazık yükleme deneyi, Kompozit kazık, Polyester, Taguchi Yöntemi, Tekil kazık.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF PERFORMANCE WITH MODEL EXPERIMENTS FOR POLYESTER BASED COMPOSITE PİLES

Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI
Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Özcan TAN

2019,118 Pages

Jury
Prof. Dr. Özcan TAN
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Assoc. Prof. Dr. Zülküf KAYA

Pile foundation systems are used in cases where criteria such as bearing capacity, settling, stability and liquefaction are not met with surface foundation systems. Piled foundations are difficult to manufacture and have high application costs. Today; In order to improve the behavior characteristics and performance of the pile foundations in the structure-foundation-soil interaction and to minimize the costs, studies are being carried out on composite pile manufacturing by bringing together different chemical materials.

In this study; L16 design table was used for the preparation of the samples and the results were evaluated by SN and variance analysis according to Taguchi optimization method. Polyester has used as 10%, 20%, 30%, 50% of dry sand weight. Different binder admixtures (cement, fly ash and silica fume) used as 0%, 5%,10%, 20% of dry sand weight. For all mixture desings water has used in ratio of 0%, 3%, 6%, 9%. Sixteen model pile has been produced according to explained ratios.

As a result of the study; The effects of the parameters on the splitting tensile strength and unconfined compressive strength were determined. It was determined that the most effective parameter was 75% polyester on unconfined compressive strength and the second most effective parameter was water content with ratio of 10%. It was determined that the unconfined compressive strength would be maximum in 50% polyester, 5% cement, 0% fly ash and 20% silica fume ratios. As a result of the study, full section pile and hollow section polyester based composite piles with 7 cm diameter and 40 cm height were produced by using optimum mixing ratios. Pile loading tests were performed by placing these model piles in test tanks filled with dense sand. In the model experiments, it was observed that it performed close to the concrete pile behavior. In particular, its ability to absorb energy and to exhibit elastic behavior compared to concrete indicates that such polyester-based piles can be used in cases exposed to horizontal and seismic load effects.

Key Words: *Composite pile, Pile foundation, Pile loading test, Polyester, Taguchi method, Single pile.*

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Özcan TAN hocama teşekkür ederim. Bu yolda sizin kılavuzluğunuzla ilerleme fırsatı verdiğiniz için size minnetlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili Aileme ve Eşime şükranlarımı sunarım.

Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Polyester Kullanılarak Yapılan Çalışmalar:	4
2.2. Uçucu Kül ve Silis Dumanı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar:.....	9
2.3. Kazık Yükleme Deneyi Yapılan Çalışmalar:	12
2.4. Taguchi Optimizasyon Tekniği Kullanılan Çalışmalar:	13
3. ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	15
3.1. Yüzeysel Stabilizasyon	16
3.2. Derin Stabilizasyon.....	20
4. KAZIKLI TEMELLER	23
4.1. Kazıkların Kullanım Amacına Göre	24
4.1.1. Uç Kazıkları.....	24
4.1.2. Sürtünme Kazıkları	25
4.1.3. Çekme Kazıkları	26
4.1.4. Ankraj Kazıkları	26
4.1.5. Kompaksiyon Kazıkları.....	27
4.2. İmal Edildikleri Malzemeye Göre Kazıklar	27
4.2.1. Ahşap Kazıklar	27
4.2.2. Betonarme Kazıklar	28
4.2.3 Çelik Kazıklar	31
4.2.4. Kompozit Kazıklar	32
4.3. Kazıklı Temelerde Yük Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi	34
4.3.1. Statik Kazık Formülleri	34
4.3.2. Dinamik Kazık Formülleri.....	40
4.3.3. Arazi Deneyleri ve Kazık Yük Taşıma Kapasitesi	41
4.3.4. Kazık Yükleme Deneyleri ile Yük Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi	45
5. MATERYAL VE YÖNTEM	50
5.1. Materyal	50
5.1.1. Polyester Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Deney Kumu	50

5.1.2. Kazık Yükleme Deneğinde Kullanılan Deney Kumu	52
5.1.3. Doymamış Polyesterin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı ...	54
5.1.4. Uçucu Külün İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	59
5.1.5. Silis Dumanının İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı	64
5.1.6. Çimentonun İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı.....	67
5.1.7. Deney Tankı	71
5.2. Yöntem.....	72
5.2.1. Taguchi Optimizasyon Yöntemi	72
5.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti için Polyester Esaslı Numunelerin Hazırlanması	76
5.2.3. Kazık Yükleme Deneyi için Polyester Esaslı Model Kazıkların Üretilmesi.	78
5.2.4. Serbest Basınç Mukavemeti Deneği	79
5.2.5. Yarmada Çekme Deneyi	83
5.2.6. Kazık Yükleme Deneyi	86
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	89
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	98
7.1. Sonuçlar	98
7.2. Öneriler	100
KAYNAKLAR	102
EKLER	108
ÖZGEÇMİŞ.....	118

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P:	Basınç
n:	Bir deneydeki tekrar sayısı
ϵ :	Birim şekil değiştirme
C_1 :	Chin Kondner grafiğinde doğrunun eğimi
d:	Çap
e :	Çarpma sayısı
δ :	Çevre sürtünme açısı
f_{sl} :	Çevre sürtünmesinin nihai limit değeri
qyan:	Çevre yüzeyde birim alanda etkili olan sürtünme
γ_s :	Dane yoğunluğu
A:	Değişen alan
$^{\circ}C$:	Derece
C_1 :	Doğrunun eğimi
C_2 :	Doğrunun düşey eksenini kestiği değer
C_2 :	Doğrunun y eksenini kestiği nokta
c_u :	Drenajsız kayma mukavemeti
N_{60} :	Düzeltilmiş SPT değeri
ΔH :	Eksenel şekil değiştirme
MSD:	Hedef değer etrafındaki sapmanın karelerinin ortalaması
A_0 :	İlk alan
H_0 :	İlk boy
\emptyset :	İçsel sürtünme açısı
W_p :	Kazık ağırlığı
c_1 :	Kazığın başındaki takozun ve yastığın elastik kısalması
D_f :	Kazık boyu
L:	Kazık boyu
D:	Kazık çapı
A_{yan} :	Kazık çevresinde sürtünme maruz kalan yüzey alanı
c_2 :	Kazığın elastik kısalması
δ_e :	Kazığın elastik boy kısalması
Q_d :	Göçme yükü
$\bar{\delta}$:	Göçme yükünde oluşan deplasman
\bar{N} :	Kazık boyunca ortalama SPT sayısı
A:	Kazığın kesit alanı
E:	Kazık malzemesinin elastisite modülü
p:	Kazık shaftının kesit çevre uzunluğu
$Q_{sınır}$:	Kazığın taşıyabileceği maksimum yük
quç:	Kazık ucunda birim alan için uç direnci
N_{60t} :	Kazık ucu ve çevresindeki ortalama SPT okuması
$A_{uç}$:	Kazık uç kısmının kesit alanı
N:	Kazık uç seviyesinde SPT sayısı
Q:	Kazığa uygulanan yük
s:	Kazığın zemine giriş miktarı (refü)
c:	Kohezyon
b:	Kuyu faktörü
S/N:	Ortalama/Standart Sapma

K_s :	Ortalama yatay toprak basıncı katsayısı
q_c :	Ölçülen koni uç direnci
Y :	Performans karakteristiği değeri
C_1 :	Regresyon doğrusunun eğimi
C_2 :	Regresyon doğrusunun düşey ekseni kestiği değer
D_r :	Rölatif Sıklık
Q_{yan} :	Sürtünme ile oluşan taşıma kapasitesi
B :	Taban genişliği, dairesel kazıklarda çap alınır
k_c :	Taban katsayısı
K_t :	Taban katsayısı
N_c, N_q, N_γ :	Taşıma gücü faktörleri
q_u :	Taşıma Kapasitesi
N_{60} :	%60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı
W_r :	Tokmak ağırlığı
H :	Tokmağın düşü yüksekliği
e_f :	Tokmağın tesir katsayısı
$Q_{uç}$:	Uç direnci ile oluşan taşıma kapasitesi
Q :	Uygulanan yük
S^2 :	Varyans
σ_c :	Yarma Çekme Dayanımı
h :	Yükseklik
x :	Yük oturma grafiğinin başlangıcına çizilen bir teğet
α :	Zemin adezyon katsayısı
γ :	Zeminin birim hacim ağırlığı
c_u :	Zeminin drenajsız kayma direnci
σ' :	Zeminde oluşan efektif gerilme

Kısaltmalar

A:	Al ₂ O ₃
Al ₂ O ₃ :	Aluminyum Oksit
C:	CaO
CaO:	Kalsiyum Oksit
Ca(OH) ₂ :	Kalsiyum Hidroksit
CaSO ₄ :	Kalsiyum Sülfat
CBR:	Zemin Durabilitesi
CH:	Yüksek Plastiseli Kil
CL:	Kaolinit Kili
Ç.K:	Çözünmeyen Kalıntı
C ₃ A:	Trikalsiyum Aluminat
C ₄ AF:	Tetrakalsiyum Aluminoferrite
C ₂ S:	Dikalsiyum Silikat
C ₃ S:	Trikalsiyum Silikat
E:	Enerji
Fe ₂ O ₃ :	F
FRP:	Lif Katkılı Polimer
GP:	Kötü Derecelenmiş Çakıl
GPa:	Giga Paskal
H:	Hızlandırıcı
HDPE:	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
J:	Joule
K:	Kendir
K.K:	Kızdırma Kaybı
kN:	Kilo Newton
K:	K ₂ O
K ₂ O:	Potasyum Oksit
LL:	Likit Limit
M:	MgO
MgO:	Magnezyum Oksit
ML:	Düşük Plastiseli Silt
MH:	Yüksek Plastiseli Silt
MPa:	Mega Paskal
N:	Na ₂ O
Na ₂ O:	Sodyum Oksit
P:	Polyester
PI:	Plastisite İndeksi
S:	Sertleştirici
S:	SiO
S:	SO ₃
SiO ₂ :	Silisyumdioksit
SO ₃ :	Sülfat
SP:	Kötü Derecelenmiş Kum
SW:	İyi Derecelenmiş Kum
SEM:	Taramalı Elektron Mikroskobu
SRP:	Takviyeli Plastik Kazıklar
UK:	Uçucu Kül
UTS:	Ürün Teknik Sertifikası

1. GİRİŞ

Zemin, kayaların fiziksel ve kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşan doğal bir malzemedir. Zemin mekaniği ise zeminin iç ve dış kuvvetler etkisindeki davranışını incelemektedir. Zeminin doğal mineral yapısı, tabakalanma durumu, jeolojik yapısı, içindeki su miktarı ve suyun özellikleri zeminin yük altındaki davranışını etkilemektedir. Zeminin davranışını etkileyen parametreleri inceleyen ve en optimum çözüm ve tasarımları geliştiren mühendislik dalına Geoteknik Mühendisliği denilmektedir.

Yapının ilişkili olduğu zeminde; taşıma gücü, oturma, stabilite kriterlerinden herhangi birisi yeterli düzeyde değilse;

- Zemin ortamının belirli bir derinliğe kadar iyileştirilmesi
- Derin temel yapımına karar verilmesi seçeneklerinden biri uygulanır.

Günümüzde birçok zemin iyileştirme yöntemi veya derin temel türü ve tekniği uygulanabilmektedir. Kullanılacak yöntem ve derin temel türüne; yerel koşullar, maliyet, güvenilirlik ve uzun dönem performanslarına göre karar verilmektedir. Derin temellerin en çok uygulanan türü olan kazıklı temellerin tasarımı;

- Statik kazık formülleri
- Dinamik kazık formülleri
- Kazık yükleme deneyleri
- Arazi deneyleri ile yapılabilmektedir.

Kazıklı temel tasarımında esas olarak, üstyapı-radye-kazık-zemin etkileşimi dikkate alınır. Bu nedenle her yapı ve zemin ortamı için özel tasarımlar gerektiğinden geoteknik mühendisliğinin en zor uygulamalarından biridir. Kazık imalatının kalitesi; proje müellifinin ve yüklenicinin bilgi ve tecrübesi ile imalat sonrası yapılacak kalite kontrol deneylerine önemli ölçüde bağlıdır.

Kazıklı temel tasarım ve imalatında en önemli etken zemin-yapı etkileşimini gerçekçi bir şekilde ortaya koymak ve kazık maliyetidir. Kazık tasarım ve imalat yöntemleri ve imalatta kullanılacak malzemelerin geliştirilmesi konularında bilimsel çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Bu doğrultuda fiber katkılı polyester esaslı kazıkların imalatı ve uygulanması, geopolimer kazıkların geliştirilmesi konuları farklı yönleri ile araştırılmaya başlanılmıştır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, zemin iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiş ve kazıklı temel çeşitleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Kompozit kazık imalatında kullanılacak kazığın içinde olan polyester, uçucu kül, silis dumanı ve CEM I 42,5 portland çimentosu malzemeleri ile ilgili detaylı bilgiler ileriki bölümlerde verilmiştir. Bu malzemelerin karışım oranları Taguchi Optimizasyon tekniği ile belirlenmiş ve bu yöntem ile ilgili özet bilgiler yöntem bölümünde verilmiştir. Polyesterlerin zemin iyileştirmesinde kullanılabileceğine dair çeşitli bilimsel araştırmalara literatür özetinde yer verilmiştir.

Bu çalışmanın başlıca amaçları;

- Polyester esaslı kazık imalatında kullanılan malzemelerin performansının serbest basınç mukavemeti ve yarmada çekme dayanımı üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi,
- Serbest basınç mukavemetinin maksimum ve optimum olacağı malzeme karışım oranlarının belirlenmesi,
- Parametre seviyelerinin sonuç (basınç mukavemeti ve yarmada çekme dayanımı) üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi,
- Taguchi Optimizasyon tekniğinin kompozit kazık tasarımında ve karışım oranlarının tespitinde uygulanabilirliğinin gösterilmesi,
- Polyester kazıklarla ilgili literatürde oldukça az olan bilgi ve veri paylaşımına katkı sağlanması,
- Optimum malzeme oranları kullanılarak içi dolu ve içi boş model kazıkların imal edilmesi,
- Model kazıklarla yükleme deneylerinin yapılması, klasik beton kazıklarla karşılaştırma yapılması ve performans kriterlerinin incelenmesi,
- Betonarme kazıklara oranla korozyona ve çevresel faktörlere daha dayanımlı onarım ve bakım maliyeti düşük olacak yeni kompozit kazık oluşturulmasına katkı sağlanması,
- Polyester ile derin temel yapılarak iyileştirme yapılacak kumlu zeminlerde avantaj sağlanması.

Polyester esaslı kompozit kazık imalatı için hazırlanan karışımlarda belirli oranlarda polyester, uçucu kül, silis dumanı ve CEM I 42,5 portland çimentosu kullanılmıştır. İmal edilen numunelerin çapları yaklaşık 50 mm ve yükseklikleri 100 mm'dir. Farklı karışım oranlarında laboratuvar ortamında imal edilen polyester esaslı numunelere serbest basınç ve yarmada çekme deneyi yapılmıştır. L16 tasarım tablosuna göre yapılan deney sonuçlarına göre SN ve varyans analizi yapılmış ve kullanılan malzemelerin hangi oranlarda dayanımı etkilediği araştırılmıştır. Bu analizler sonucunda, tasarlanan 16 tasarımdan basınç mukavemetine göre 3 tanesi seçilerek bun karışım oranlarında 70 mm çapında ve 400 mm yüksekliğinde model kazıklar imal edilmiştir. Seçilen bir başka tasarım için ise 10 mm et kalığında 400 mm yüksekliğinde içi boş model kazık imal edilmiştir. Bu kazıklar sıkı kum dolu bir tanka yerleştirilmiş ve kazık yükleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada kazık yük taşıma kapasitesi ile enerji sönümlenme ve tekrar yüklenme kapasitesinin oldukça olumlu seviyede oldukları görülmüştür. Polyesterin kazık üretiminde kullanılabilmesi yönünde öneriler getirilmiştir. Polyesterin İnşaat Mühendisliği uygulamalarında kullanılabilirliğinin araştırıldığı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde bulunan bu çalışmalar ve kısa değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Polyester Kullanılarak Yapılan Çalışmalar:

Guades ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, fiber takviyeli polimer (FRP) malzemelerin hafif, yüksek özgül mukavemetli, yüksek dayanımlı, korozyona dirençli, kimyasal ve çevresel etkilere dayanıklı ve genellikle düşük bakım maliyetli olduğunu vurgulamışlardır. Bu fiber kompozit malzemelere çakım sırasında zarar verildiği gözlemlenmiştir. Kazıkların uç kısmında meydana gelen deformasyon Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



(a) Darbe sürüşü ile kurulum.

(b) Sürenin sonunda tüpün durumu

Şekil 2.1. Yeni güney Galler'deki Tweed Heads tahta yürüyüşünü desteklemede kullanılan çekilerek oluşturulmuş kompozit tüpler (Wagners CFT, Queensland, Avustralya izniyle)

Sonuç olarak; yüksek çarpma enerjisine (477 J veya daha fazla) maruz kalan tüplerin, en az 40 darbe tekrarından sonra çöktüğü tespit edilmiştir. Lokalize darbe hasarının FRP malzemelerinin çarpma sonrası performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olmasına rağmen, içi boş FRP kazıklarının yükleme sonrası yük taşıma kapasitesinin iyileştirilebileceği gözlenmiştir. Dayanımın tekrar kazanılmasının kazık başlığının hasar gören kısmının alınması ile başarılacağı belirtilmiştir.

Guades ve ark. (2012) yaptıkları bir diğer çalışmada, Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit kazık malzemelerinin yüksek korozyon direncine sahip olması nedeniyle onları, kazık olarak kullanmaya bir alternatif malzeme olarak araştırmıştır. Bununla birlikte, bu kazıkların sürülmesiyle oluşacak etkilerin daha dikkatli incelenmesini gerektiğini tespit etmişlerdir. Çalışmalarında, darbeli kompozit tüplerin yük tepkisinin, başlangıçta elastik bir şekilde davrandığı ve ezilme noktasına kadar sabit bir hızda yükseldiğini gözlemlemiştir. Üretilen kompozit kazıkların şeklinin dayanımı etkilediği gözlenmiştir. Kare numunelerin kırılma yükü dairelerden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Deney sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

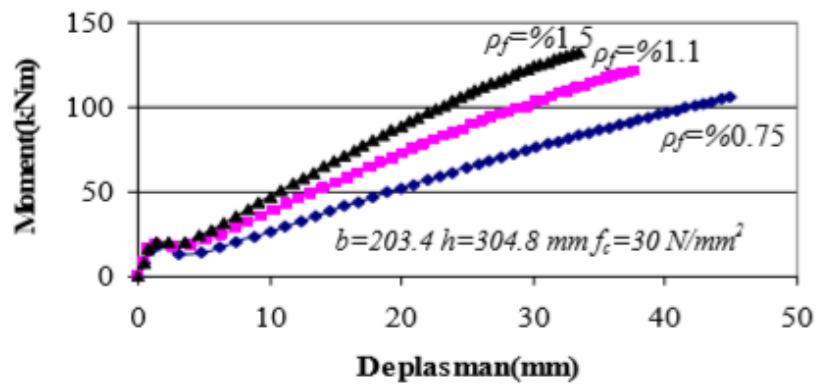
1. Hasar gören kazıklar için yük ve enerji eğrileri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.
2. Yüksek darbe enerjisinde kazıklarda meydana gelen hasar daha fazladır.
3. Etki sayısı, çökme öncesi darbe yüzeyindeki maximum yük dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamıştır; Ancak, etki çöküş sonrası daha az önem kazanmaktadır.
4. Darbe enerjinin ve çarpma sayısının etkisi, yalnızca çökme öncesi darbe yüzeyinde enerji absorpsiyonu hızında gözlenmiştir ve çöküş sonrası yüzeyde gözlenmemiştir.

Bolat (2009), çalışmasında betona polyester ve polipropilen tel takviyesi yapmıştır. Bu yeni yapının beton yol uygulamalarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Taze beton deneyinde polyester tellerin, polipropilen tellere göre ve çelik tellere göre çökme değerini daha fazla azalttığını gözlemlemiştir. Plak, kiriş eğilme ve yarmada çekme deneyleri yapmış ve sonucunda polipropilen tellerin betonla yüksek aderans sağladığını, betonun ilk çatlak yükünü arttırdığını ve çatlamayı geciktirdiğini gözlemlemiştir. Polipropilen telli betonların su emmesinin az olduğunu gözlemlemiştir böylece korozyona karşı dayanımının fazla olduğu sonucuna varmıştır. Bu çalışma ile polipropilen telli betonların ve polyester telli betonların diğer betonlara göre çok daha az kapiler su emdiği sonucuna varmıştır. En yüksek çekme gerilmesinin ise polipropilen telli betonlarda olduğu gözlemlemiştir. C30 betonlarda çelik tel kullanımının basınç dayanımlarını ~%14,5 artırdığını gözlemlemiştir.

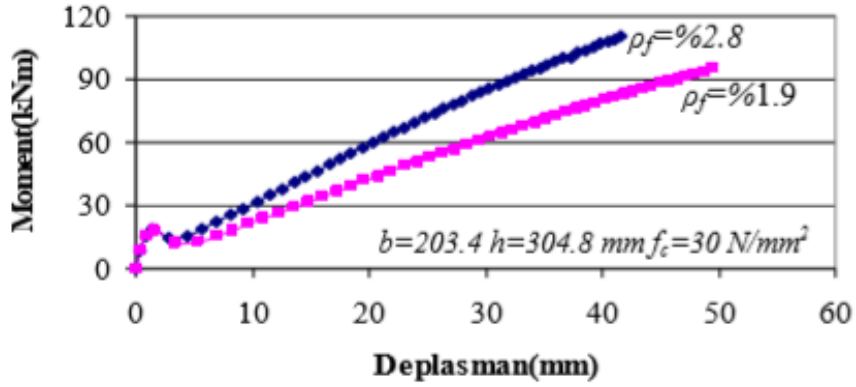
Guades ve ark. (2012) yaptıkları bir başka çalışmalarında, içi boş, içi boş-altı kapalı ve içi boş kırmataş dolgulu kazıklar değerlendirerek içi boş kazıkların daha yüksek performans gösterdiği, çakım esasında daha az kabardığı ve daha düşük maliyetli olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kazık çapı arttıkça zeminde kabarma miktarının da arttığı gözlenmiştir. Elyaf kompozitler, sert çevre koşullarında beton, çelik ve kereste gibi geleneksel materyallerin yerini alması için geçerli bir seçenek olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile içi boş, lif katkılı polimer kazıkların yumuşak killerde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Fakat arazide göstereceği dayanımı öğrenmek için daha büyük çaplarda kazıklar üretilmesi ve negatif çevre sürtünmesinde oluşacak durumların değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Polat (2014), yaptığı çalışmada betonarme yapı elemanlarını lifli polimerlerle güçlendirilmesini araştırmıştır. Ayrıca karbon fiber ile güçlendirilen kirişin taşıma kapasitesi cam fiber ile güçlendirilen kirişin taşıma kapasitesinden daha fazla olduğu görülmektedir. Kiriş taşıma kapasitesi 60,77 kN iken karbon fiber ile güçlendirildiğinde 119,7 kN ve cam fiber ile güçlendirildiğinde 83,03 kN'a yükseldiği gözlemlenmiştir.

Cullazoğlu (2014), yaptığı çalışmada FRP donatının kirişler üzerinde olumlu etkilerini gözlemlenmiştir. FRP çekme donatısının deplasmanı azalttığı ve kesme dayanımı için önerilen denklemlerin uygun sonuçlar verdiğini gözlemlenmiştir. Kolonlarda azaltma katsayısına ihtiyaç olmadığı, kirişlerde ise olası uygulama hatalarının göz önüne alınarak bazı katsayıların kullanılması gerektiği bu uygulama sonrasında yapı elemanlarının güçlendirilmesinde lifli polimerlerin kullanılabileceği sonucuna varmıştır.



(a) CFRP donatısı



(b) GFRP donatısı

Şekil 2.2. (a-b) Çekme bölgesinde bulunan FRP donatıların betonarme kirişlerin deplasmanları üzerine olan etkisi (Cullazoğlu2014)

Artuk (2016), çalışmasında polyester, uçucu kül ve kendir kullanmış; karışım türünün kazık kapasitelerine etkisini, içi boş kazık tipinin kazık kapasitelerine etkisini ve içi boş kazık çapının kazık kapasitelerine etkisini araştırmıştır. Ayrıca çalışmasında düşük plastisiteli kaolinit kili (CL), kendir ve C sınıfı uçucu kül kullanmıştır. İçi boş, içi boş – altı kapalı ve içi boş kırmataş dolgulu kazıklar imal etmiştir. Çakılan kazıklar 10 gün zemin içerisinde bekletildikten sonra kazık yükleme deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmasının sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. İçi boş üretilen kazıkların dayanımlarının çap ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.
2. İçi boş - altı kapalı üretilen kazıkların çap ile dayanımın arasında ki bağıntının $70\text{mm} > 50\text{mm} > 60\text{mm} > 35\text{mm}$ şeklinde olduğu ve en yüksek dayanımın %75 polyester, %24 uçucu kül ve %1 kendir karışımında olduğu tespit edilmiştir.
3. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların çap ile dayanımın arasında ki bağıntı $60\text{mm} > 70\text{mm} > 50\text{mm} > 35\text{mm}$ şeklinde olduğu ve en yüksek dayanımın %90 polyester, %10 uçucu kül ve %1 kendir karışımında olduğu tespit edilmiştir.

Karaca (2017) çalışmasında, içi boş kazık numunelerinde atık malzemelerin kullanılabilirliğini, karışım oranlarının kazık kapasitelerine etkisini ve içi boş kazık numunelerin çap ve boylarının kazık kapasitelerine etkisini araştırmıştır. Malzeme olarak doymamış polyester, kendir, araba lastiği ve uçucu kül kullanmıştır. 57 farklı tipte numune hazırlanıp serbest basınç deneyi yapmıştır.

Bu çalışmasının sonucunda, en yüksek serbest basınç mukavemetinin içi dolu numunelerde %100 polyester ve içi boş numunelerde %75 polyester + %25 uçucu kül karışımında olduğu tespit edilmiştir. Karışımlarda lastik oranı ve kendir arttıkça kazıkların mukavemeti azaldığı gözlenmiştir. Çalışmada 4 mm lif kullanılarak hazırlanan numuneler dayanım olarak daha yüksek değerlere ulaştığı daha rahat işlem yapıldığı tespit edilmiştir. Yapılan deneylerde %25UK ve %24UK uçucu kül (UK) oranlarındaki numunelerinin serbest basınç mukavemetinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Sönüm oranlarının lif oranı ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Kaygusuz (2018), yaptığı çalışmada FRP malzemelerden, özelliklerinden ve kompozit bileşimini oluşturan malzemelerden bahsetmiştir. Kirişlerin güçlendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada FRP uygulamanın 600°C yüksek sıcaklık hasarı sonrası betonarme kiriş gruplarının yük taşıma kapasitelerinde %4-30 arasında bir artış olduğunu gözlemlemiştir.

Dalyan (2019), yaptığı çalışmada liflerden (karbon, cam ve aramid) ve matrislerden (polyester, vinylester ve epoksiden) bahsetmiştir. Bu malzemelerden CFRP'nin beton üzerindeki dayanım artışını araştırmıştır. Kirişin alt yüzeyi ile birlikte çekme donatısını kapsayan kiriş yan yüzeylerinin CFRP malzeme ile sarılmasıyla dayanımın arttığını gözlemlemiştir. Yapılan deneylerde kirişin eğilme kapasitesinin, kontrol kirişlerine oranla %55 ila %116 arasında arttırdığını gözlemlemiştir.

2.2. Uçucu Kül ve Silis Dumanı Kullanılarak Yapılan Çalışmalar:

Halilov (2003), yaptığı çalışmada katkısız betonlarda silis dumanı oranının artmasının, eğilmede çekme dayanımını azalttığını gözlemlemiştir. Buna rağmen katkılı ve katkısız betonlarda silis dumanı oranı artıkça basınç dayanımını arttırdığını gözlemlemiştir. Silis dumanının işlenebilirliği zorlaştırdığı, aşınma dayanımını artırdığı ve donma çözünme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. En yüksek dayanımını, %10 silis dumanı ve %1,5 süper akışkanlaştırıcı kullanılan lifli betonda elde etmiştir.

Şimşek (2004), yaptığı çalışmada kütle betonlarda kullanılan çimentonun ağırlıkça %20-25'in uçucu kütle değiştirilebileceğini tespit etmiştir. İnce agrega yerine %25 uçucu kül kullanıldığı karışımlarda olumlu sonuçlar elde etmiştir.

Lkhavga (2006), yaptığı çalışmada atık olarak çevreye bırakılan uçucu küllerden peletleme ve sinterleme işlemi ile agrega üretmiştir. Bu uçucu kül agregalarını hafif beton üretiminde kullanmış ve 7x7x7 cm'lik küp numunelerinin basınç dayanımını 38.38 N/mm² değerine ulaştığını görmüştür.

Arslantürk (2007), yaptığı çalışmada 90 dakika boyunca karıştırdığı numunelerden %10 silis dumanı katkılı betonun %30 uçucu kül katkılı betona oranla daha fazla dayanım gösterdiğini tespit etmiştir. En az akışkanlaştırıcı madde ihtiyacı %30 uçucu kül katkılı betonda olduğunu gözlemlemiştir. Uzun süre karıştırma sonucu sıcaklık artışının, %10 silis dumanı katkılı veya katkısız betonda uçucu kül katkılı betona göre daha olduğunu tespit etmiştir.

Kurt (2007), yaptığı çalışmada basınç dayanımını bulmak için 15x15x15 cm'lik küp numuneler, kılcallık deneyi için 7x7x28 cm prizma numuneler ve hızlı klorür geçirimsizliği deneyi için 10x20 cm'lik (çap x yükseklik) silindir numuneler üretmiştir. 20 farklı karışım için su ve hava kürü uygulamıştır. Betonda silis dumanı kullanımının basınç dayanımını artırdığını, kılcal su emme deneyleriyle su emme değerlerini düşürdüğünü, klorür geçirimsizliğini azalttığını, korozyona karşı direnci artırdığını gözlemlemiştir. Sırasıyla hava kürü ve su kürü koşullarında yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen değerler; basınç dayanımı 54,73 ve 58,74 MPa, klorür geçirimsizliği 717 ve 286 coulomb ve kapilarite 0,01 ve 0,0059 kg/m².√sn'dir.

Gündeşli (2008), yaptığı çalışmada uçucu kül ilave edilmiş betonun, basınç dayanımının daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Çimento yerine ağırlıkça %10-20 uçucu kül kullanıldığında dayanımın normal betonlara yakın elde edildiği tespit edilmiştir. Betonda doğal puzolan, uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanımıyla sülfat direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat silis dumanı ilave edilen betonun, magnezyum sülfata karşı direncinin azaldığını gözlemlemiştir. Betona ilave edilen silis dumanın, dayanımı olumlu etkilediğini gözlemlemiştir.

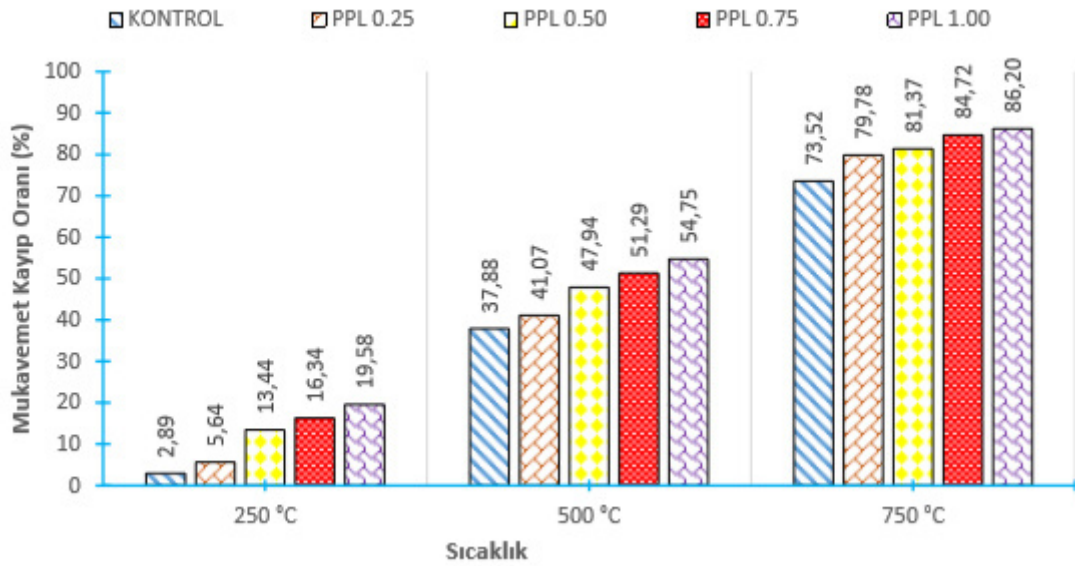
Tohumcu (2011), yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betona uçucu kül ve silis dumanı ilave etmiştir. Kullandığı uçucu kül miktarları %25, %40 ve %55'dir. En büyük yayılma çapını ve bloklanma oranını %55 UK katkılı betonda elde etmiştir. Kullandığı silis dumanı miktarları %5, %10 ve %15'dir. En büyük yayılma çapını ve bloklanma oranını %10 SD katkılı betonda elde etmiştir. Havada kürlenme yapılan betonda UK ve SD karışımı betonlar birlikte incelendiğinde en yüksek dayanım %5 SD elde edilmiştir. Suda kür yapılmış betonlarda en yüksek dayanım %15 SD elde edilmiştir. Atmosferik basınçlı buhar kürü uygulandığında en yüksek dayanım %15 SD elde edilmiştir.

Çetinkaya (2012), yaptığı çalışmada uçucu küllerin ve polipropilen lif malzemenin yüzeysel zemin iyileştirilmesini araştırmıştır. Yedi farklı karışım oranı kullanılmıştır. Uçucu kül ve kilin tek başlarına CBR değerleri %2 iken birlikte kullanıldıklarında %6 olduğunu tespit etmiştir. Uçucu kül ve kile ek olarak %1 fiber malzeme eklendiğinde CBR %12 bulunmuştur. En yüksek basınç dayanımı %50 Kil + %50 UK + %1,0 Fiber karışımında 325 kPa elde etmiştir.

Sümer (2012), yaptığı çalışmada betonda silis dumanı ve polipropilen lif kullanmıştır. Silis dumanın betondaki çok ince boşlukları doldurduğunu ve iyileştirme yaptığını gözlemlemiştir. Silis dumanlı betonlara lif ilavesinin basınç ve eğilme dayanımını arttığını belirlemiştir. %5 Silis dumanlı betonda basınç dayanımı 29,27 N/mm² elde edilmiş olup %10'a artırıldığında basınç dayanımı da 31,98 N/mm² elde edilmiştir. Silis dumanı ile birlikte sırası ile %0,1 ve %0,5 polipropilen lif kullanıldığında basınç dayanımlarının 34,09 ve 33,45 N/mm² elde edilmiştir.

Mohamed et al. (2016), yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betonda yarmada çekme ve basınç dayanımı sonuçlarını karşılaştırmıştır. Deney sonucunda en iyi basınç dayanımı sonucu, %15 uçucu kül, %15 silis dumanı ve %50 cüruf içeren karışımdan elde edilmiştir.

Adar (2018), yaptığı çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlara uçucu kül ve polipropilen lif ilavesi yapmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklarda dayanımını incelemiştir. Çalışma sonucunda; polipropilen lif miktarının artmasıyla betonun kıvamında artış olduğu, akışkanlığının azaldığı ve çekme dayanımının azda olsa arttığını tespit etmiştir. Sıcaklığın 500°C ve üzerinde çıkmasıyla dayanım kayıplarının arttığını tespit etmiştir. Dayanımda meydana gelen azalmanın, polipropilen liflerin sıcaklık artışına bağlı olarak erimesi ve beton numuneler içerisinde boşluk oluşturmasından kaynaklandığını tespit etmiştir.



Şekil 2.3. Kontrol grubuna göre sıcaklık değişimi ve lif oranına bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımlarındaki kayıp oranları (%) (Adar,2018)

Keçeci (2018), yaptığı çalışmada çimento miktarını sabit tutmuş ve çimento oranının %10'u, %15'i, %20'si ve %25'i oranlarında silis dumanı kullanarak 16 adet beton numunesi elde edilmiştir. Çalışma sonucunda; optimum silis dumanı oranını %15 olarak bulmuştur. Elde edilen basınç dayanımı 66,03 Mpa'dır.

Paşa (2018), çalışmasında yüksek dayanımlı beton elde etmek için silis dumanı ve uçucu kül kullanmıştır. Daha hafif ve ekonomik betonlar elde etmiştir. Katkıların başta dayanımı etkilemediği, ilerleyen zamanda artışa sebep olduğunu tespit etmiştir. Silis dumanının, uçucu küle oranla daha etken madde olduğunu gözlemlemiştir. En yüksek dayanımı ve donma çözünme dayanımını %10 silis dumanını katkılı betonda elde etmiştir. Her iki malzemenin de betonun aşınma dayanımını artırdığını gözlemlemiştir.

2.3. Kazık Yükleme Deneyi Yapılan Çalışmalar:

Odbay (1995), yaptığı çalışmada çeşitli kriterlere göre kazıkları sınıflandırmıştır. Bunların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajını karşılaştırmıştır. Statik analiz, dinamik analiz, amprik/yarıamprik analiz ve yükleme deneylerini üzerinde ayrıntılı durmuştur. Tek kazık ve grup kazıkların taşıma gücü-oturma büyüklüklerinin nasıl belirleneceğini anlatmıştır.

Çalışkan (2003), yaptığı çalışmada kazıklı temel çeşitlerinden ve hesap yöntemlerinden kapsamlı şekilde bahsetmiştir. SAP 2000 programı kullanarak kazıklar üzerinde analiz yapmıştır. Çalışma sonucunda kazık taşıma kapasitesinin zemin durumuna bağlı olduğunu, kazık hesabı için en pratik yöntemin statik formüller olduğunu, yatay yük ve momente maruz kalan kazıklarda hasarın zemin yüzeyine yakın kısımlarda olduğunu, kazık çapı artışının dayanımı olumlu etkilediğini tespit etmiştir.

Demir (2018), yaptığı çalışmada kazık yükleme ve statik formüllerden bahsetmiştir. Bu iki yöntemi kıyaslamıştır. Kazık yükleme deneylerinden elde ettiği taşıma gücünün statik formüller ile hesaplanan taşıma gücünden çok daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Deneyler başta maliyetli olsa da kazık tasarımının değiştirilerek daha ekonomik hale gelmesinde avantajlıdır.

Naiboğlu (2019), yaptığı çalışmada kum ve killi zeminler içindeki kazıklara analiz yapmıştır. Sonucunda, kumlu zeminde kazık boyunun artmasının moment ve kesme kuvvetini artırdığının tespit etmiştir. Dinamik etkilerde kazık boyunun önemli olduğunu vurgulamıştır.

Ünal (2019), yaptığı çalışmada Plaxis 2D programını kullanmıştır. Uygulanacak olan zeminin deformasyon ve dayanım parametlerinin doğru olması deformasyonların doğru tahminini sağladığını gözlemlemiştir. Kazık ve zemin etkileşiminin gerçeğe yakın olmasının elastisite kavramına bağlı olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmanın tekil kazık ve kazık grubunun modellenmesi, analizi ve tasarımında pratiklik sağlayacağını ve diğer çalışmalara öncülük edeceğini vurgulamıştır.

2.4. Taguchi Optimizasyon Tekniği Kullanılan alışmalar:

Taguchi optimizasyon tekniği daha çok Endüstri Mühendisliği alanında kullanılmasına rağmen çeşitli mühendislik alanlarında kullanabilmektedir. Geoteknik Mühendisliğinde optimum tasarımları elde etmek için kullanılmaktadır.

Zaimoğlu (2003), yaptığı çalışmada silis dumanı, uçucu kül ve bentonit kullanarak enjeksiyon karışımı elde etmiştir. Bu üç parametre için Taguchi yöntemiyle L16 tasarım tablosu oluşturmuştur. Bu çalışmada enjeksiyon karışımlarının dinamik viskozite, çökelme, priz süreleri, serbest basınç dayanımları ve akma özellikleri araştırılmış deney sonuçları Taguchi yöntemi ile değerlendirmiştir. 7,14 ve 28 günlük periyotlarda 3 farklı su/katı oranında yapılan deneylerin sonuçları literatürlerle uyumlu elde etmiştir buda Taguchi yönteminin uygulanabilirliğini göstermektedir.

şanyılmaz (2006), yaptığı çalışmada deney sayısını azaltmak ve kontrol edilemeyen faktörleri en aza indirmek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. NH bıçaklı sigorta buşonlarında çatlama problemini çözmek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Ortalama ve S/N değerleri bulunmuştur. Sonuçları Tam Faktöriyel deney tasarımı ile kontrol etmiştir ve Taguchi yöntemi ile uyumlu olduğunu gözlemlemiştir. Böylece Taguchi yönteminin avantajlı olduğu sonucuna varmıştır.

Taylan (2009), yaptığı çalışmada askeri fabrikada yakılan kimyasal maddelerin günlük yakılan toplam miktarını maksimize etmeye çalışmıştır. Bu üç tip kimyasal maddenin analizleri için Taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Doğrulama deneyinde 997,63 kg elde edilmiş L₉ ortogonal dizisinde 811,71 kg edilmiştir. Böylece Taguchi analizinin tutarlı olduğunu tespit etmiştir.

Yıldırım (2011), yaptığı çalışmada bir çamaşır makinesinin kalitesinin artırılması için parametreler belirlemiştir. Bunun için Taguchi Yöntemi ve Çoklu Karar Verme Yöntemi kullanmıştır. Taguchi Yöntemi kullanılarak deney sayısı azaltılmıştır. Taguchi Yöntemi ile birlikte VIKOR, TOPSIS, GRA, MOORA, metodlarının kullanılması parametrelerin yorumlanmasını kolaylaştırmıştır. Hedeflenen değerler ve üretici firmanın kalite anlayışına uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir.

Karagöz (2014), yaptığı çalışmada deney sayısını azaltmak, zaman ve maliyetten kar etmek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Hava aracı kanat tasarımı için faktör ve seviyeler belirlenmiştir. Deneyler sonucunda en etkili parametrenin Reynolds Sayısı olduğunu tespit etmiştir.

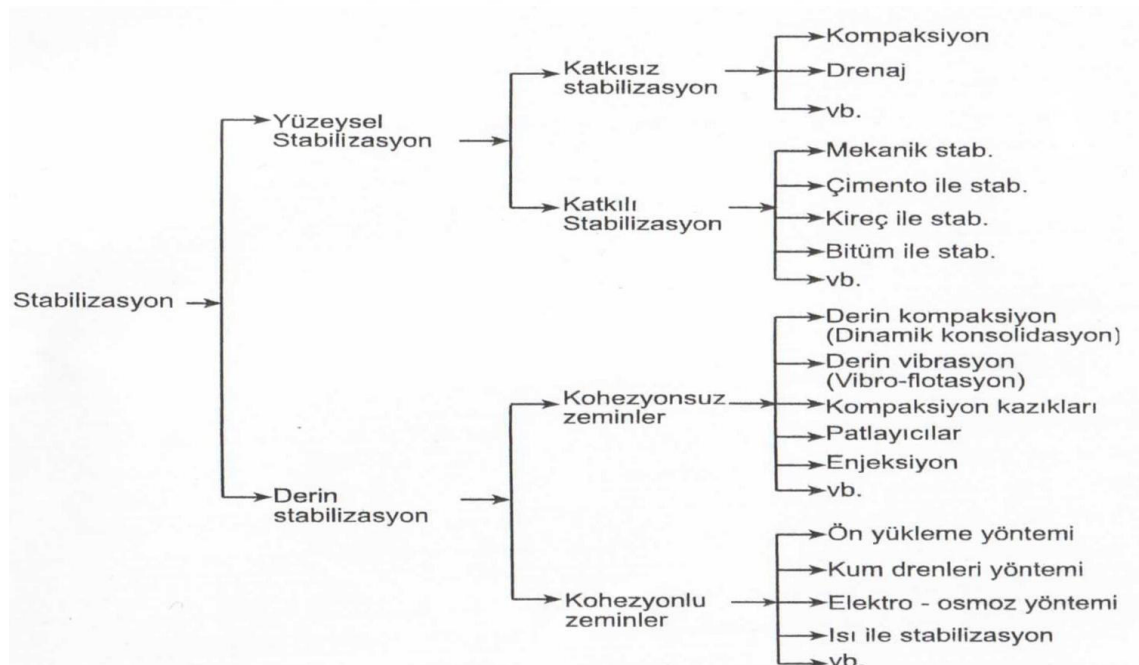
Keskin (2016), yaptığı çalışmada agrega olarak taban külü ve perlit kullanımını araştırmıştır. Perlit/tabana külü, çimento/su ve çimento oranının yapılan deneylerde etkisini araştırmak ve deney sayısını azaltmak için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Varyans analizi ile parametrelerin önem seviyesini belirlemiştir. Çalışma sonucunda; S/Ç oranı 1,25, çimento miktarı 250 kg/m³ ve perlit taban külü oranı 1,25 olduğunda yapılan deneylerde iyi performans sergilediği görülmüştür.

3. ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ VE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Temel zemininin mevcut durumdaki taşıma kapasitesinin yetersiz olması nedeniyle yüzeysel temel sistemlerinin uygulanmadığı, toplam ve farklı oturmaların meydana geldiği, stabilite problemlerinin olduğu ve deprem anında sıvılaşma veya yumuşama ile mukavemet kaybının olduğu durumlarda gösterecek zemin iyileştirilmesi yapılır. Zeminin iyileştirilmesinde temel amaçlar; boşluklu yapıdaki zeminin boşlukların mekanik araçlarla sıkıştırılarak azaltılması, zemin boşluklarının farklı karışımlarla doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması yada çeşitli malzemelerin kullanılarak zeminin güçlendirilmesidir.

Zemin iyileştirilmesinde kullanılacak yöntem; çok sayıda arazi ve laboratuvar deneyi yapılarak, zemin yapısı, yeraltı suyu durumu, iyileştirme yapılacak yüzeyin derinliğini, zeminde katkı maddesi kullanılıp kullanılmamasına göre karar verilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Uzuner, 2011) Çizelge 3.1’de verilmiştir. Zemin iyileştirme yöntemlerinin maliyetli olduğu veya istenilen kriterlerin sağlanmadığı durumlarda, zemine göre oldukça rijit olan kazıklı temel uygulamasına gidilmektedir.

Çizelge 3.1. İyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Uzuner, 2011)



3.1. Yüzeysel Stabilizasyon

İyileştirmenin zemin yüzeyinde yapılmasının yeterli olduğu, üstyapı yüklerinin çok fazla olmadığı yapılarda veya yol inşaatlarında zeminlerde aşağıda belirtilen yüzeysel stabilizasyon yöntemleri uygulanabilir.

Kompaksiyon: Zeminin tabakalar halinde serilip uygun sıkıştırma araçlarıyla sıkıştırılmasıdır. Kompaksiyon, zeminde meydana gelecek oturmaları ve su muhtevastındaki değişimden dolayı hacim değişimini azaltır. Taşıma gücünü artarken geçirimsizlik azalır.

Yapılan iyileştirme için laboratuvarında Standart ve Modifiye Proctor yöntemleri ile malzemenin kompaksiyon parametreleri belirlenir. Arazide kompaksiyon için düz, vibratörlü, keçi ayaklı veya lastik tekerlekli silindirler kullanılır. Arazide yapılan kompaksiyonun kontrolü kum silindiri, nükleer esaslı ölçümler, plaka yükleme, standart penetrasyon gibi deneylerle belirlenir. Ayrıca rölatif kompaksiyonun şartname sınırlarını sağlaması gerekir.

Drenaj: Zemindeki suyun bir kısmının veya tamamının uzaklaştırılması ile su muhtevastının azaltılarak zeminin iyileştirilmesidir. Su muhtevastı artışı kohezyonlu zeminlerin taşıma gücünü azaltır. Bu sebeple zeminin stabil olması için sahadan suyun uzaklaştırılması ve sahaya su girişinin önlenmesi gerekmektedir.

Mekanik Stabilizasyon: Taşıma kapasitesi yetersiz olan zeminin başka zeminle karıştırılması veya mevcut zeminin uzaklaştırılması ile iyileştirilmesi mekanik olarak tanımlanır. Mekanik stabilizasyonda, ince taneli (kohezyonlu) zeminlere belli oranda kaba taneli (granüler, kohezyonsuz) malzeme katılarak zemin seri tabakalar halinde serilip sıkıştırılarak iyileştirilir.

Kireç ile Stabilizasyon: Kireç, yüksek plastisiteli ve kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminlerde iyileştirme yapmak ve işlenebilirliği sağlamak için kullanılabilir uygun bir malzemedir. Bunun nedeni, kil mineralleri ve kireç arasında meydana gelen reaksiyonlardır. Kireç ile stabilizasyon şişen killere kuru ağırlığının %5-%10'u kadar katılarak yapılan zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemde zemindeki mukavemet artışı bir yıl kadar sürebilir. Zeminin serbest basınç mukavemeti kireç muhtevasıyla artış göstermektedir (Ayan, 2009).

Kireç ile kil arasındaki reaksiyon hızı oldukça yüksektir, bu sebepten iyileştirme sırasında sorun çıkarmaması bir avantajdır. Özyayın (1997)'e göre, kullanılacak her %10 kil içeriği için %1 kireç ilave etmek gerekmektedir.

Zemin iyileştirmede kullanılacak optimum kireç oranları %2 ila %10 arasında değişmekte olup zemin cinsine göre bu Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Optimum kireç oranı için kullanılabilir başlangıç değerleri (Aytekin, 2004).

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

Çimento ile Stabilizasyon: Organik zeminler hariç tüm zeminlerde kullanılmakla birlikte kumlu-siltli ve plastik olmayan zeminler için daha uygundur. Zemine kuru ağırlığının %5-%15'i kadar karıştırılır. Çimento zeminde hidrasyona uğrayarak zemin boşluklarını doldurup sertleşerek mukavemetini artırır. En yaygın kullanım alanları, temel altı iyileştirmek, otoyol ve toprak dolgu barajlardır. Trafik yüklerinin fazla olduğu havaalanları ve diğer tüm ulaşım yollarında çimento ile stabilize edilmiş temel ve alt temel tabakalarının uygulaması iyileştirme için zorunlu olabilmektedir.

Çimento ile zeminin iyileştirilmesini etkileyen başlıca parametreler:

1. Su muhtevası
2. Sıkıştırma yöntemi
3. Zeminin yoğunluğu
4. Çevre basıncı
5. Kür süresi ve koşulları olarak sıralanabilir.

Çimentonun oranı iyi ayarlanmalıdır. Uygulamada kullanılacak oran yetersiz ise uygun karışım oluşmayacağından performans yetersiz olacaktır. Fazla olması durumunda ise çatlaklar ve büzülme oluşacağından uzun dönem performansı olumsuz etkilenir. Bu tür iyileştirmede çimento, zemin taneleri arasında bağlayıcı özellik gösterir. Zeminin cinsine göre ideal karışım oranları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Zemin tiplerine göre optimum çimento oranları (Das, 2007)

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

Çimento ile stabilizasyon için en uygun zemin tipleri; iyi derecelendirilmiş granüler zeminler ve düşük plastisiteye sahip kil veya siltlerdir. Kalsiyum minerali fazla olan kil zeminler çimento ile stabilizasyon için en uygun kil türüdür. Bunun nedeni, hidrasyon sırasında kalsiyum iyonlarının reaksiyona girerek sertleşme başlatmasıdır.

Çimento ile stabilizasyonda zeminin optimum su ihtiyacı Standart Proctor deneyleri ile belirlenebilir. Kullanılacak su miktarı, hem çimentonun reaksiyonu için gerekli, hem de taneleri ıslatmak için gerekli suyun toplamına eşittir (Tulumer, 2006).

Zeminin çimento ile iyileştirilmesi zeminde düşük mukavemetli beton elde edilmesi olarak düşünülebilir. Çimento katılan zemin, sıkıştırma aracı ile sıkıştırılır ve tıpkı beton gibi hidrasyon için bir süre su ile ıslatılır. Bu iyileştirme yöntemi arazide üç farklı şekilde uygulanır. Bunlardan ilki; yerinde karıştırma yöntemi olup bu yöntemde uygun miktarda çimento yayılarak sıkıştırılır. İkinci yöntemde bir araç zemindeki kumu alıp su ve çimento ile karıştırarak tekrar zemine bırakarak araziye dolandır. Arkadan sıkıştırma aracı ile sıkıştırılır. Üçüncü yöntemde (sabit santral yöntemi) ise sahadan alınan zemin bir tesiste su ve çimento ile karıştırılır. Daha sonra tekrar araziye getirilerek serilir ve sıkıştırılır. Zeminin iyileştirme performansı; çimento yüzdesi ve kür süresine bağlıdır. Bu etmenlerin yanında iyileştirilecek zeminin kuru birim hacim ağırlığı serbest basınç mukavemetini de etkilemektedir (Tulumer, 2006).

Bitüm ile Stabilizasyon: Sıvı bitümlü malzemenin taneli zeminlere katılarak karıştırılmasıdır. Bu yöntem genellikle püskürtme yapılarak veya zemine ilave sonrası hemen sıkıştırılarak uygulanır. Taneleri kaplayan asfalt ince taneli zeminlerin sudan yumuşamasını önler. Ayrıca danelerin birbirine yapışmasını sağlayıcı etkisi sonucu su ve rüzgar erozyonuna karşı mukavemet artmaktadır. Kireç ve çimentoya göre pahalı bir malzeme olduğundan az tercih edilir. Maliyet ve kullanılan miktarı azaltmak için farklı zeminler karıştırılarak iyi bir gradasyon elde edilebilir. İyi derecelenmiş granüler zeminlerde ise %1-3 oranında asfalt katkısı kullanmak yeterlidir. İnce taneli zeminlerde %4-7 oranında asfalt katılması yeterlidir. Bu ince taneli zeminlerin, 200 nolu elekten geçen kısmının %12'den fazla olmaması ve $PI < 10$ olması gerekir. Kumlu zeminlerde %2-4 oranında asfalt katkısı yeterlidir. İnce taneli zemine kireç katılarak asfaltın zemine penetre edilmesi ve homojen karışım elde edilmesi kolaylaşır (Tulumer, 2006).

İyileştirilme yapılacak bölge soğuksa katran, sıcak bir bölge ise asfalt kullanımı uygundur. Bu karışımın en önemli parametrelerinden biriside sudur. Bitümün ile zemin arasında homojen bir karışım olması karışımdaki suyun miktarına ve zemin ıslaklığının homojenliğine bağlıdır.

Uçucu Kül ile Stabilizasyon: Uçucu kül termik santrallerden çıkan ve zemin iyileştirilmesinde kullanılan atık malzemedir. Uçucu küller kimyasal özelliklerine göre C veya F sınıfında yer alırlar. Yol altında iyileştirme için en uygun uçucu kül tipi Ferguson'un (1993) çalışmasına göre C'dir. C tipi uçucu külde kireç miktarı fazla olup linyit veya kömürün yanması ile elde edilir. Kireç ve uçucu kül birlikte iri taneli zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Uçucu külün zeminde kullanımı araştırmak için günümüze kadar birçok çalışma yapılmış ve %9'dan %46'ya kadar çeşitli oranlarda karışımlar hazırlanmış ve deneyler ile kontrolü yapılmıştır (Tulumer, 2006). Uçucu kül ilave edilen şişen killerde şişme miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar ilave edilen uçucu külün zeminin taşıma gücünü bir miktar artırdığı tespit edilmiştir. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonundan gerekli verimi alabilmek için arazide oldukça hassas çalışılmalıdır. Arazideki zeminin su muhtevası iyileştirme süresince dikkatle takip edilmelidir. Kalinski ve Hippley (2005), yaptıkları çalışmalarında iyileştirme yapılacak zeminde optimum su muhtevası değerinin %20-30 arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Uçucu kül ince yapısı ile zemin içindeki boşlukları doldurmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde kireç ve çimento ile birlikte kullanılabildiği gibi bitümle birlikte kullanıldığında dolgu malzemesi olarakta kullanılmaktadır.

Geoteksiller ile Stabilizasyon: Geosentetik donatı olarak da isimlendirilen geoteksiller oldukça ince ve esnek polimer esaslı malzemelerdir. Geoteksiller zeminin dayanımını artırarak doğrudan ve dolaylı üstünlükler sağlar. Muhtelif geri kazanımlara neden olur ve inşaat maliyetlerini azaltır (Yılmaz ve Eskişar, 2000).

Geoteksiller drenaj amaçlı da kullanılmaktadır. Çekme dayanımı yüksek olan bu malzeme dolgu inşaatında kaymayı önlemek için kullanılabilir.

Donatılı Zemin Uygulamaları: Bu yöntemde zeminin taşıma kapasitesi galvanizli çelik veya plastik jeogridler ile artırılır. Granüler zeminin çekme dayanımı çok düşük olduğu için zemine yerleştirilen şerit elemanlar ile çekme kuvvetleri karşılanır. Bu kompozit yapı güçlendirici elemanların çalıştığı yönde çekme dayanımı da sağlamaktadır (Öz, 2015). Bunun sonucunda zemin taşıma kapasitesi artmakta özellikle farklı oturmalarda önemli azalmalar görülmektedir.

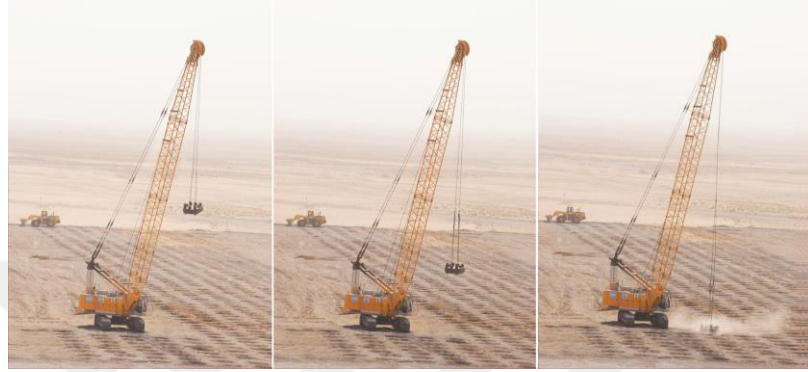
3.2. Derin Stabilizasyon

Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemlerinin yetersiz olduğu durumlarda derin iyileştirme yapılır. Yapı ağırlığının artması ve zemin koşullarının derinlerde kötüleşmesi derin iyileştirmeye duyulan ihtiyacı artırmıştır. Uygulamada sık tercih edilen derin stabilizasyon yöntemleri aşağıda özet halinde verilmiştir.

Kompaksiyon Kazıkları: Gevşek kumlu zeminlerde zeminin yoğunluğunu artırmak için çakılan kazıklardır. Bu kazıklara kum sıkıştırma kazıkları da denilmektedir. Uç kısmı kapalı kaplama borusu zemine çakılır. Kaplama borusu içerisine iri daneli dolgu malzemesi konulur ve sıkıştırılır. Daha sonra kaplama borusu yukarı çekilir.

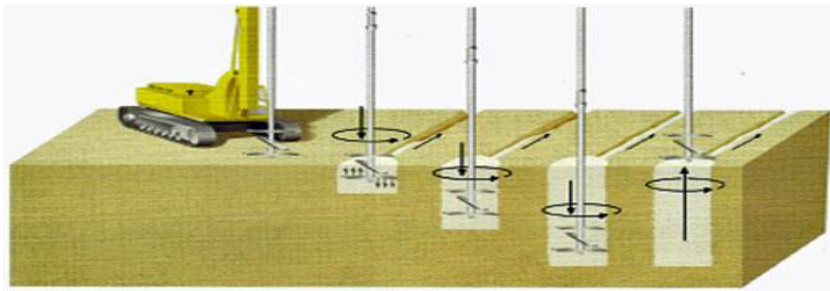
Bu yöntemde hem borunun çakılmasıyla, hem de dinamik etki yardımıyla kazık hacmi kadar zemin kadar sıkıştırılmış olur. İmal edilen kazıkların aralarındaki uzaklık genellikle 1,0-1.5m arasında değişmektedir. Kompaksiyon kazıkları suya doymuş zeminlerde kullanıma elverişlidir ve vibroflot yöntemine daha uygundur.

Dinamik Konsolidasyon: Zemin ortamına bir kütlenin düşürülmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Taneli ve gevşek zeminler, ağırlığı 50-400 kN arasında değişen 5-40 m yükseklikten düşürülen tokmakla Şekil 3.1’de gösterildiği gibi sıkıştırılır. Zemin yüzeyine çarpan tokmağı oluşturduğu şok dalgaları derinde sıkıştırma yapar. Düşme yüksekliği ve tokmak ağırlığı değiştirilerek derin kompaksiyon ile 20 m’ye varan iyileştirmeler sağlanabilir.



Şekil 3.1. Derin kompaksiyon

Derin Vibrasyon (Vibro- Flotasyon) Yöntemi: Bu yöntemde 1.5-2.5 m uzunlukta, 0.3-0.5 m çapında vibroflot kullanılır. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi vibroflot su jeti ve titreşimle zemine indirilerek kuyu açılır. Açılan bu kuyunun içi kum ve çakıl ile doldurulduktan sonra vibratörle sıkıştırılır. Gevşek kum tabakalarında ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu kohezyonsuz zeminlerde kullanıma uygundur. Yumuşak killi zeminlerde de derin vibrasyon uygulamasına yapılır buna taş kolon denilir (Uzuner, 2013). Bu yöntem ile granüler zeminlerde boşluk oranlarının ve sıkıştırılabilirlikleri azalır. İçsel sürtünme açıları, taşıma gücü ve sıvılaşmaya karşı olan dirençleri artar (Sondermann ve Wehr, 2004).



Şekil 3.2. Derin vibrasyon

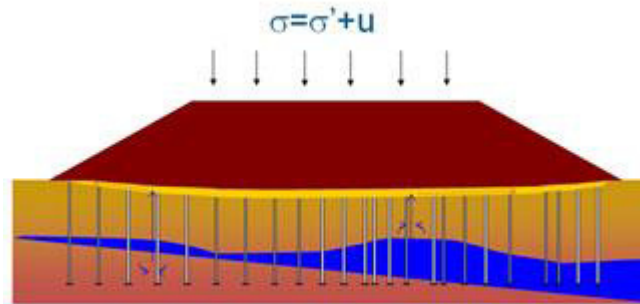
Patlayıcılarla Stabilizasyon: Zemin tabakalarının yaklaşık 1/2 ile 3/4 derinliğine yerleştirilen patlayıcıların etkisiyle gevşek zemini iyileştirmesi yapılır. Zemin patlatma etkisi ile yer değiştirir ve sıkışmaya uygun bir yapıya dönüşür. Patlayıcı madde olarak genellikle amonyum nitrat, TNT ve değişik katkı maddelerinden oluşan bir karışım kullanılır (Küçükali, 2008). Bu metodun kolay uygulanabilirliği olması ve diğerlerine nazaran ucuz olması avantajlarından. Bu yöntem su altındaki zemin tabakalarında da uygulanabilir.

Enjeksiyon Yöntemi: Enjeksiyon yöntemi taneli zeminlerin kayma mukavemetini arttırmak, oturmaları azaltmak ve permeabilitesini azaltmak amacıyla zemine enjeksiyon sıvısı gönderilmesidir. Sıvı sertleşerek zeminin taşıma kapasitesini artırır. Enjeksiyon sıvısı olarak çimento şerbeti veya çeşitli kimyasallar kullanılabilir.

Enjeksiyon çeşitleri:

- Emdirme (permeasyon) enjeksiyonu
- Kaya enjeksiyonu
- Çatlatma enjeksiyonu
- Kompaksiyon enjeksiyonu
- Jet Enjeksiyonu ve kompansiyon enjeksiyonudur.

Ön Yükleme Yöntemi ve Düşey Drenler: Ön yükleme su içeren killi zeminlerin ani oturmasını önlemek amacıyla yapı ve sürşarj yüküne eşdeğer kum çakıl dolgunun kademeli olarak zemine oturtulmasıdır. Dolgu malzemesinin bir kısmı yüklemenin etkisi ile zemin içine batar ve orda kalır. Yapı bu kum ve çakıl tabakası üzerine inşa edilir. Düşey drenler ile zemin iyileştirme; drenlerle toplanan suyun bir drenaj yoluyla sahadan uzaklaştırılmasıdır. Düşey kum drenleri ile bu konsolidasyon hızlandırılır. Düşey drenler kum drenler ve bant drenler olarak ikiye ayrılır. Ön yükleme ve kum drenleri Şekil 3.3'te şematik olarak yerilmiştir.



Şekil 3.3. Ön yükleme ve kum drenleri

Elektro-Osmoz Yöntemi: İnce taneli zeminlerde kullanılan bir yöntemdir. Zemine karşılıklı olarak – kutup ve + kutup işlevi gören metal çubuklar yerleştirilir, bunlar arasında bir batarya vb. ile doğru akım oluşturulur. Pompa ile kuyuda biriken su boşaltılır (Uzuner, 2013). Bu yöntem ile zemin ortamındaki su akışı hızlandırılmakta ve kısa sürede su seviyesi düşürülmektedir.

Isıtma/Dondurma Yöntemleri ile Stabilizasyon: Zemine ısıtma ya da soğutma işlemi uygulanarak zeminin iyileştirilmesidir. Rusların geliştirdiği yöntemde sondaj delikleri açılır sonra sondaj kuyusunda basınç altında benzin veya gaz sıvı yakıtı yakılır. Killer sıcaklıktan dolayı kimyasal tepkimeye girer ve daha yüksek dayanımlı malzemeye dönüşür (Uzuner, 2013). Zemin dondurma işleminde ise zemin içine borular sokulur ve içinde soğuk taşıyıcı akışkan dolaştırılarak zemin suyu dondurulur. Soğutma maddesi olarak genellikle amonyak ve karbondioksit, soğuk taşıyıcı akışkan olarak da magnezyum klor ve kalsiyum klor kullanılır.

4. KAZIKLI TEMELLER

Zemine aktarılan yüklerinin fazla olması, zeminin yeterli taşıma gücüne sahip olması yüzeysel temel sistemlerinin uygun olmadığı durumlarda kazıklı temel sistemleri kullanılmaktadır. Kazıklı temeller, üst yapıdan gelen yükleri sağlam zemine aktarırlar ve çevre sürtünmesi ile geçtiği zemine aktarırlar. Kazıklı temeller şevlerin sağlamlaştırılmasında ve yanal yüklerin karşılanmasında da yaygın kullanılır.

Kazıkların tercih edilme sebepleri; yapı altındaki temel zemininin gevşek yada yumuşak olması, zeminin tabakalanmasının farklılık göstermesi, eğimli tabaklanma olması, zemine fazla yük aktarılması ve farklı oturmaların oluşması olarak sıralanabilir.

Kullanım amaçlarına göre; uç kazığı, sürtünme kazığı, çekme kazığı ve sıkıştırma kazığı olarak sınıflandırılır.

Kazıklar imal edildikleri malzeme cinsine göre; ahşap kazıklar, betonarme kazıklar, çelik kazıklar ve kompozit kazıklar olarak sınıflandırılır. Geçmişte kullanılan ilk kazıklı temel çeşidi ahşap kazıktır.

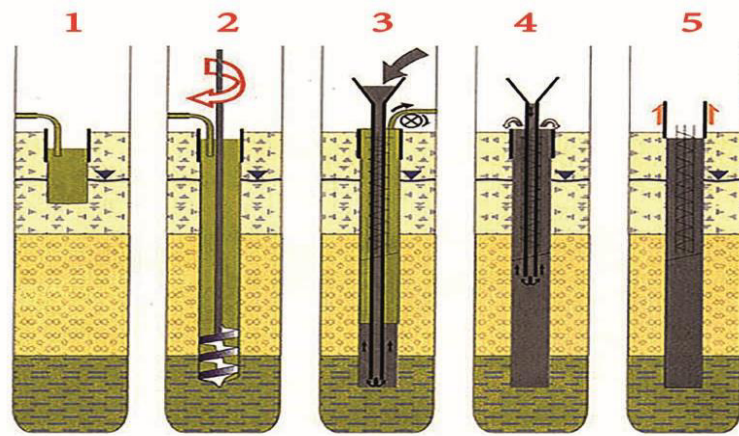
Kazık tasarımında göz önünde bulundurulması gerekenler; zemin profili ve özellikleri, zeminin tabakalanma durumu, yer altı suyu, kazık tipi, kazık yerleşimi, grup etkisi, negatif çevre sürtünmesi, üst yapı özellikleri, sıvılaşma, oturma ve eksenel ve yanal yükler.

4.1. Kazıkların Kullanım Amacına Göre

Kazıklar kullanım amaçlarına göre uç kazığı, sürtünme kazığı, çekme kazığı, ankraj kazığı ve kompaksiyon kazıkları olarak sınıflandırılırlar. Zemin tipi ve kazığın karşılaması gereken yüke göre kazık tipi seçilir. Bu sınıflandırmaya göre kazıkların taşıma gücü hesabı değişmektedir. Bu çalışmada tekil kazıklar uç kazık gibi tasarlanmış ve yükleme esnasında oluşan uç ve çevre sürtünme direnci hesaplanmıştır.

4.1.1. Uç Kazıkları

Zayıf zeminin Şekil 4.1’de gösterildiği gibi geçilerek yapı yüklerini derindeki sağlam tabakaya ileten kazıklardır. Bu tür kazıklarda çevre sürtünmesi oluşmaz. Uç direnci hesaplanarak taşıma kapasitesi bulunur. Bu kazıklarda pozitif çevre sürtünmesi de dikkate alınmaz. Ancak negatif çevre sürtünmesi önem taşır. Negatif çevre sürtünmesi zeminin kazıktan daha fazla oturduğu durumlarda meydana gelir.



Şekil 4.1. Uç kazığı ve imalatı

Kazığın taşıyabileceği toplam yük aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$Q_{uç} = q_{uç} \cdot A_{uç} \quad (4.1)$$

Uç direnci kazığın basınç mukavemetine veya kazığın ucundaki zemin/kaya ortamının dayanımına göre belirlenir. Zemin/kaya ortamının uç direncini ve çevre sürtünmesini belirlemek için zemin türüne ve kazık özelliğine statik kazık formülleri, dinamik kazık formülleri, kazık yükleme deneyleri ve arazi deneylerine dayalı çeşitli yöntem ve yaklaşımlar geliştirilmiştir.

4.1.2. Sürtünme Kazıkları

Yapıdan gelen yükleri kazık ve zemin arasında oluşan sürtünme kuvvetleri ile karşılayan kazıklardır. Kazık, zemine göre daha hızlı deplasman yaptığından kazık ve zemin arasında aderans meydana gelir. Zemin yüke Şekil 4.2’de gösterildiği gibi ters yönde direnç uygular. Bu kazıklarda dış yüzey pürüzsüzlüğü önemlidir. Killi zeminlerde kullanımı yaygındır. Sürtünme kazıklarının uzunluğu zemin kayma direnci ve uygulanan yüke bağlıdır.

Zemin türlerine göre çevre sürtünmesi Tezaghi Tarafından aşağıdaki gibi bulunmuştur (Çalışkan, 2003);

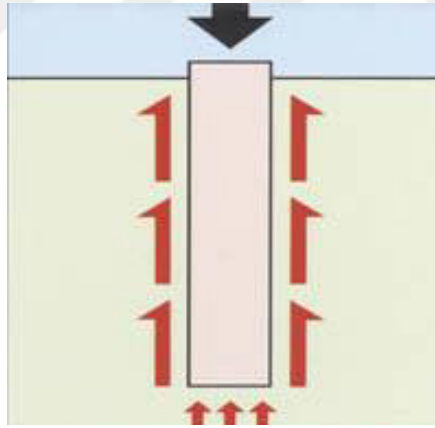
Yumuşak kil-silt: 10-20 kN/m²

Gevşek kum: 25 kN/m²

Kumlu silt: 20-50 kN/m²

Katı kil: 40-100 kN/m²

Sıkı kum: 100 kN/m²



Şekil 4.2. Sürtünme kazığı

Genel olarak çevre sürtünmesi ile karşılanacak toplam yanal yük aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$Q_{yan} = f_s \cdot A_{yan} \quad (4.2)$$

Çevre sürtünmesi değeri için zeminin kohezyonlu ve kohezyonsuz olması durumları için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

4.1.3. Çekme Kazıkları

Suyun kaldırma kuvvetine veya üst yapıya gelen yanal kuvvetlerden oluşan momente karşı koyan kazıklardır. Çekme kazıklar yüksek yapılara gelen rüzgar yükünü, deprem yükünü, sondaj platformlarına gelen yükleri ve yer altı su seviyesinin altında kalan büyük yapılara gelen kaldırma kuvvetini karşılamak için kullanılır. Kazık çekme deneyleri ile kazık tasarımları yapılmaktadır.

4.1.4. Ankraj Kazıkları

Yanal kuvvetlere karşı dayanım sağlamak için üretilen kazıklardır. Ankrajlar kuşak kirişleriyle veya betonarme perdeyle birbirlerine ve kazıklara Şekil 4.3'te ki gibi bağlanırlar.

Bu kazıklar palplanş perdelerinde kullanılır. Ankraj kazıkların imal edileceği yerde ilk olarak boşluk açılır daha sonra hesaplanan miktarda ankraj çubukları yerleştirilir. Daha sonra bu boşluk basınçlı çimento enjeksiyonu ile doldurulur. Bu tür kazıkların taşıma kapasitesi çekme gerilmelerine ve ortamın sürtünme direncine bağlıdır.



Şekil 4.3. Ankraj kazığı

4.1.5. Kompaksiyon Kazıkları

Önceden imal edilen kazıkların zemine çakılması ile yapılan iyileştirme yöntemidir. Bir nevi zemin stabilizasyonu yöntemidir. Kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması için kullanılır. Çakma kazıklar, zemine şahmerdan yardımı ile çakılarak, preslenerek veya ekseni etrafında çevrilip döndürülerek yerleştirilir.

Kompaksiyon kazıklarının ebat ve adedinin belirlenmesinde mevcut zeminin sıklık durumu, elde edilmek istenen sıklık ve derinlik etkindir. Genellikle kısa olarak imal edilirler uygun tekniklerle eklenerek birleştirilirler. Kumlu zeminlerde kullanıma uygundur. Bu tür kazıkların tasarımında dinamik kazık formülleri kullanılabilir.

4.2. İmal Edildikleri Malzemeye Göre Kazıklar

Kazıklar imal edildikleri malzemeye göre ahşap, çelik, betonarme, yerinde dökme betonarme ve kompozit kazıklar olarak sınıflandırılırlar.

4.2.1. Ahşap Kazıklar

Kazık imalatında ahşap kullanımı çok eski bir yöntemdir. Ahşap kazıkların çakılırken kırılma ve zarar görmesini önlemek amacıyla kazık başında ve ucunda çelik profil kullanılır. Ahşap kazıklar dış etkilere karşı dayanımı yetersiz olup; çürüme, böcek tahribatı, mekanik aşınma ve yangın gibi durumlarda kolayca zarar görebilir. Ahşap kazıkların ucu Şekil 4.4'te görüldüğü gibi sivridir. Burada amaç çakma işlemini kolaylaştırmaktır. Taşıma gücü düşük bir malzeme olmasına rağmen hafif oluşu, taşınma kolaylığı ve boyunun kolayca ayarlanabilmesi açısından tercih edilirler. Ahşap kazıkların taşıma gücü malzemenin taşıma gücü ile sınırlıdır. Kazık kesit alanı ile ahşabın basınç dayanımı çarpılarak kazık taşıma gücü bulunur. Zemin parametlerine göre de bulunması durumunda küçük olan tercih edilir.



Şekil 4.4. Ahşap kazıklar

Ahşap kazık olarak en sık kullanılan ağaç türleri çam, köknar, sedir ve meşedir. Bu ağaçlardan dayanımı en yüksek olan meşedir. İmal edilen kerestelerin sert, düzgün ve darbeye dayanıklı olması gerekir. Su içerisinde kullanılan ahşap kazıklarda suyun çekilmesi kazığın ömrünü azaltır. Ahşap boyuna göre çapları hesaplanır. Yapılacak olan kazık 6 m'den kısa ise; $D= 25 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olur. Yapılacak olan kazık 6 m'den uzun ise; $D= (20+1) \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olur. Genel olarak kazık çapının 15 cm'den küçük 40 cm'den büyük olması istenmez (Çalışkan, 2003).

4.2.2. Betonarme Kazıklar

Standartlara göre üretilen betonarme kazıklar en dayanıklı inşaat malzemesidir. Bu kazıkların dayanımını bulunduğu zeminde sülfat bulunması olumsuz etkilemektedir. Betonda oluşacak sülfat etkisini önlemek için kazığa bitüm veya katran sürülebilir. Sülfat etkisini azaltmak için betonda düşük su/çimento oranı kullanılır, pas payı artırılır ve sivri köşeler kullanılır. Şekil 4.5'te çakma betonarme kazıklar gösterilmektedir. Betonarme kazıkların kesitleri kare, dairesel ve sekizgen olabilir.



Şekil 4.5. Betonarme kazıklar

Çakma Betonarme (Ön Dökümlü) Kazıklar: Betonarme çakma kazıklar büyük yüklerin yumuşak ve gevşek zeminlere taşınmasında kullanılır. Taşıma kapasitesini çapı, boyu, imal ve çakım yöntemi etkilemektedir. Yerinde imal edilir veya hazır olarak getirilir. Çakma kazıklar donatılı ve donatısız olarak imal edilebilir. Çakma kazıkların betonu kesintisiz olarak dökülmelidir ve döküldükten sonra 10 gün süre ile ıslatılmalı, kür süresini tamamlamış olmalıdır (Toğrol & Tan, 2009). Bu kazıklar üretildikleri yerden imal edilecekleri yere taşınırken dikkatli olunmalıdır. Taşıma sırasında oluşacak eğilme hasarı için öngerme yapılır.

Yerinde Dökme Betonarme Kazıklar: Yerinde dökme kazıklar, kaplama borulu veya kaplama borusu kullanılmadan açılan sondaj deliğinde imal edilebilirler. Yerinde dökme betonarme kazıklar çakma ve sondaj kazığı olarak imal edilebilirler. Bu kazıklar çakma kazıklar gibi zeminde sıkışmaya sebep olmazlar. Betonarme kazıkların boylarına göre olması gereken minimum çapları Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Yerinde dökme betonarme kazıkların en küçük çapları

Kazık boyu L(m)	En küçük kazık çapı D (mm)
$L \leq 10$	300
$10 < L \leq 15$	350
$15 < L \leq 20$	400
$20 < L \leq 30$	500

Yerinde dökme betonarme çakma kazıklar; kaplama borusuz kazıklar, kaplama borusu yerinde bırakılan kazıklar ve kaplama borusu çıkarılan kazıklar olarak üçe ayrılırlar.

Kaplama borusu kullanılması yumuşak ve gevşek zeminlerde dökülen betonun yayılmasını engeller ve homojen yapı elde edilir. Kaplama beton ve içindeki donatının dış etkenlere karşı korunmasını da sağlar. Zeminde korozyon vb. olumsuz etkilerin olmayacağı durumlarda beton prizini almadan koruyucu kılıf çıkarılır ve böylece başka kazık imalatlarında tekrar kullanılabilir. Bu kazıklarda segregasyon olması, donatı kafesinin yerinde olmaması, kazık kesitinin derinliğe göre değişiklik göstermesi ve kazık ucunun oturduğu zeminde örselenme meydana gelmesi dayanımı olumsuz etkiler. Bu kazıklarda kullanılan pas payı en az 30 mm olmalıdır. Zararlı suların olduğu yerde bu 50 mm olur (Çalışkan, 2003).

Yerinde dökme çakma betonarme kazıklar ile sondaj (fore) kazıklarının karşılaştırması:

- Sondaj kazıklarında çakma kazılarında ki darbe sarsıntısı oluşmaz
- Sondaj (fore) kazık için açılan çukurdan numune almak mümkündür, böylece zemin profili oluşturulur
- Sondaj kazıkların imal edilmesi için yüksekliğe ihtiyaç yoktur. Çakma kazıklar ise belirli bir yükseklikten ağırlık düşürülmesi ile imal edilir
- Sondaj kazıklarında derinlere daha kolay inilebilir
- Sondaj kazıkları daha kısa sürede oluşturulur
- Çakma kazıkların yük taşıma kapasitesi, fore kazıklara göre çok yüksektir (Toğrol & Tan, 2009)

4.2.3 Çelik Kazıklar

Çelik kazıklar, boru, kutu, H ve I kesitli olarak üretilirler. Kutu ve boru çelik kazıklar ucu kapalı yada açık imal edilir ve büyük yükleri taşırlar. Çelik kazıkların korozyona uğrama riski örselenmemiş zeminlerde azdır, örselenmiş veya dolgu zeminlerde fazladır (Toğrol & Tan, 2009). Çelik kazıklar Şekil 4.6'da gösterildiği gibi daha çok dairesel olarak üretilirler.



Şekil 4.6. Çelik kazıklar

Çelik kazıkların boyları perçin, bulon veya kaynak yapılarak uzatılabilir. Çelik kazıklar yeraltı suyundan dolayı korozyona maruz kalırlar. Dolayısıyla çakıllı-kumlu zeminlerde çelik kazıklar için daha uygundur. Korozyondan korumak için çelik kazık beton veya bitümlü malzemelerle kaplanabilir. Sert zeminlerde ve yumuşak kaya zeminlerde kazık çakımı zor olacağından ve uç kısmı hasar göreceğinden ucuna çarıklar takılır.

Bu kazıklar oksijenden dolayı çürümeye maruz kalabilirler, sert ve katı killerde oksijen az bulunması bu zeminlerde kullanılması açısından avantajdır. Çelik kazıkların kullanıldığı zeminin pH değeri 7'den büyük olmalıdır. Korozyondan korumak için et kalınlığı büyük seçilir, epoksi vb. malzemeler ile kaplama yapılır, antipas içeren kimyasallar sürülür ve çelik kazık beton bir kılıf içine konulabilir.

4.2.4. Kompozit Kazıklar

Kompozit bir ürün elde etmede asıl amaç farklı malzemelerin olumlu yönlerinin bir araya getirilmesi veya eksik olan özelliğin tamamlanarak çok daha iyinin elde edilmesidir. Kompozit ürün imalatı ile; daha hafif, daha dayanımlı, daha estetik ve kimyasal etkilere daha dirençli malzeme elde etmek hedeflenir. Kompozit elemanlar inşaatta güçlendirme ve onarımda sıklıkla kullanılırlar. İnşaat Mühendisliğinde kullanılan en eski malzemelere, kerpiç evler örnek olarak verilebilir. Killi çamura saman ve sarmaşık dalları gibi malzemeler katılarak dayanımı artırılmıştır. Birden fazla malzemenin bir araya gelmesi ile elde edilen veya çok parçalı ayrı malzemelerden yapılmış kazıklara kompozit kazıklar denilir. Bu çalışmada kullanılacak olan polyester esaslı kompozit kazıklar; lifli kompozitler sınıfına girmektedir.

Mevcut kazık boyunun yeterli olmadığı durumlarda da kazık boyunu uzatmak için farklı malzemelerden üretilen kazıklar birbirine bağlantı yapılarak kompozit elde edilebilir. Çelik(alt)-beton(üst) veya ahşap(alt)-beton(üst) olacak şekilde kazıklar oluşturulabilir. Birleşim bölgelerinin özel olarak korunması gerekir. Bu kısımlarda ek gerilmeler meydana geleceğinden özel durumlar haricinde kullanımları önerilen bir kazık uygulama çeşidi değildir.

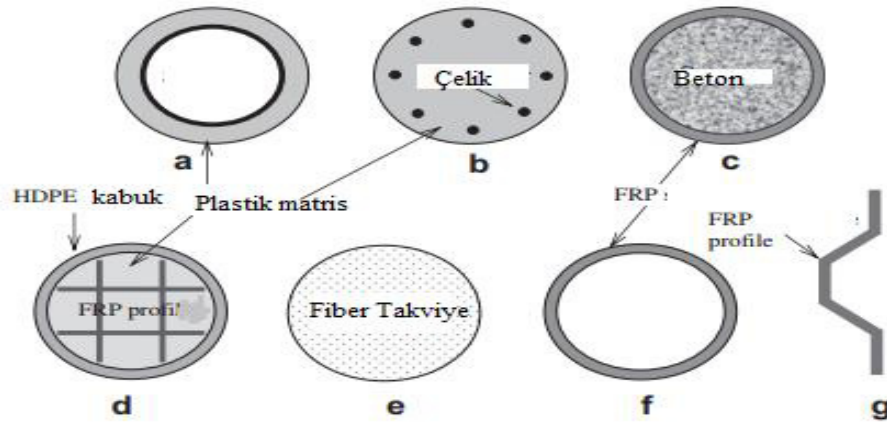
Çelik ve betondan oluşan kompozit kazıklar genellikle betonun taşıma gücünün yetersiz olduğu durumlarda kullanılır. Şekil 4.7’de çelikle güçlendirilmiş beton kazık verilmiştir. Ahşap ve betonun birlikte kullanıldığı kazıklarda su içinde kalan kısım ahşap üst kısmı beton olarak imal edilir.



Şekil 4.6. Kompozit kazık

Zeminde bulunan kimyasal maddeler ile su ve mineraller; çelik, ahşap, beton veya betonarme kazıkların bozulmasına, korozyona uğramasına, oksitlenmesine neden olmaktadır. Çelik kazıklar korozyona uğrar. Bir kısmı su içinde olmasıyla ahşap kazılar çürüyebilir. Betonarme kazıklarında içinde bulunan donatılarda da korozyon meydana gelebilir. Bu hasarlar kazıkların taşıma kapasitesini ve uzun dönem performansını olumsuz etkiler. Kazıkları korumak için kullanılan ve bilinçsiz kullanılan kimyasallar ise çevreye zarar verebilmektedir. Kazık imalatı yapılan binaların çevresindeki bitkilerin zarar görmemesi için standart kazıkların korunma yöntemleri veya yeni üretilen kompozit kazıkların çevre dostu olması gerekmektedir. Bu olumsuz etkilerden kurtulmak için farklı ve çevre dostu malzemeler kullanılarak üretilmiş yeni kazık alternatifleri üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

Kompozit kazıklar ilk olarak Birleşik Devletlerde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 7 çeşit kompozit kazık Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Tip kompozit kazıklar. (a) çelik boru çekirdeği kazıklar (b) yapısal olarak takviye edilmiş plastik kazıklar (c) betonarme dolgulu FRP kazıkları (d) cam elyaf dökme kazıklar (e) fiberglas takviyeli plastik kazıklar (f) boş FRP kazıklar (g) FRP kazıklar (Guades, 2012)

Yücesoy (2007), yaptığı çalışmada dışı hafif betondan içi normal betondan kompozit perde duvarlar oluşturmuştur. Tek tabakalı normal betondan üretilen perdeler göre daha sağlam olduğu sonucuna varmıştır. Depreme dayanıklı perde oluşturmak için yaptığı kompozit yapının uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Şermet (2018), yaptığı çalışmada kompozit yapı elemanları oluşturmuş ve farklı testlere tabi tutmuştur. Beton elemanlara çelik profil gömmüş ve bu yeni yapılarda burkulma meydana gelmediğini, yangın dayanımının yüksek olduğunu, sünekliğin ve dayanımının yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Kompozit kazık üretmede ki bir diğer amaç ise maliyeti düşürmektir. Geleneksel kazıkların üretim ve bakım maliyeti yüksektir. Farklı malzemeleri bir araya getirerek daha yüksek dayanımlı daha ekonomik malzeme arayışına girilmiştir. Kompozit kazıklar çok yeni olması sebebiyle literatürde yeterli kaynak mevcut değildir. Kompozit kazık çalışmalarının birçoğu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Arazi davranışları, performansı ve toplam yükün ne kadarını uç direnciyle, ne kadarını yüzey sürtünmesiyle taşıyabileceği konularında belirsizlikler bulunmaktadır. Kompozit kazık üretiminde bir diğer önemli hedef ise depolanması veya uzaklaştırılması sorun olan atık malzemelerin kazık imalatında kullanılmasıdır.

Kompozit kazıkların Geoteknik Mühendisliği'ne yeni bir bakış getireceği düşünülmektedir.

4.3. Kazıklı Temelerde Yük Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi

Kazıklı temelerin taşıma kapasiteleri; statik kazık formülleri, dinamik kazık formülleri, kazık yükleme deneyleri ve arazi deneyleri ile belirlenebilmektedir.

4.3.1. Statik Kazık Formülleri

Kazıklar oturdukları zeminde uç direnci oluştururlar. Bunun yanı sıra zeminle arasında oluşan sürtünme ile sürtünme direnci oluştururlar. Bu iki direncin toplamı kazık yük taşıma kapasitesini belirler. Kazık taşıma kapasitesi formülü aşağıda ki gibidir.

$$Q_{\text{sınır}} = Q_{\text{yan}} + Q_{\text{uç}} \quad (4.3)$$

$Q_{\text{sınır}}$: Kazığın taşıyabileceği maksimum yük

Q_{yan} : Sürtünme ile oluşan taşıma kapasitesi

$Q_{\text{uç}}$: Uç direnci ile oluşan taşıma kapasitesi

Kazık Uç Direncinin Hesaplanması

Uç kazıklarının uçları çok sıkı kum ve çakıl zeminlere gömülüdür. Kazık uç direnci Terzaghi tarafından geliştirilen statik yöntemle bulunur.

$$Q_{u\check{c}} = q_{u\check{c}} \cdot A_{u\check{c}} = A_{u\check{c}} \cdot [1,3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) + 0,3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma] \quad (4.4)$$

$q_{u\check{c}}$: Kazık ucunda birim alan için uç direnci (kN/m^2),

$A_{u\check{c}}$: Kazık uç kısmının kesit alanı,

B : Taban genişliği, dairesel kazıklarda çap alınır $B = D$ (m),

D_f : Kazık boyu,

N_c, N_q, N_γ : Taşıma gücü faktörleri (yüzeysel temeller için verilen değerler kullanılabilir),

c : Kohezyon,

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı.

N_q katsayısının denklemlerde $N_q - 1$ olarak alınmasının sebebi kazık yerleşimi için çıkarılan veya yer değiştiren zeminin taşıma kapasitesini azaltmasıdır.

Kohezyonsuz zeminlerde, kazık uç taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{u\check{c}} = q_{u\check{c}} \cdot A_{u\check{c}} = A_{u\check{c}} \cdot \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) \quad (4.5)$$

Kumlu zeminlerde, kohezyon sıfır alınırsa kazık uç taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{u\check{c}} = q_{u\check{c}} \cdot A_{u\check{c}} = A_{u\check{c}} \cdot [\gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) + 0,3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma] \quad (4.6)$$

Kohezyonlu zeminlerde, kazık uç taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{u\check{c}} = q_{u\check{c}} \cdot A_{u\check{c}} = A_{u\check{c}} \cdot [1,3 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1)] \quad (4.7)$$

Suya doymun killi zeminlerde kayma mukavemeti parametreleri kullanılır. İçsel sürtünme açısı sıfırdır.

Bu durumda $\phi = 0$ için $c = c_u$ olur.

$\phi = 0$ için $N_c = 9.0$ (Derin temeller için uygundur)

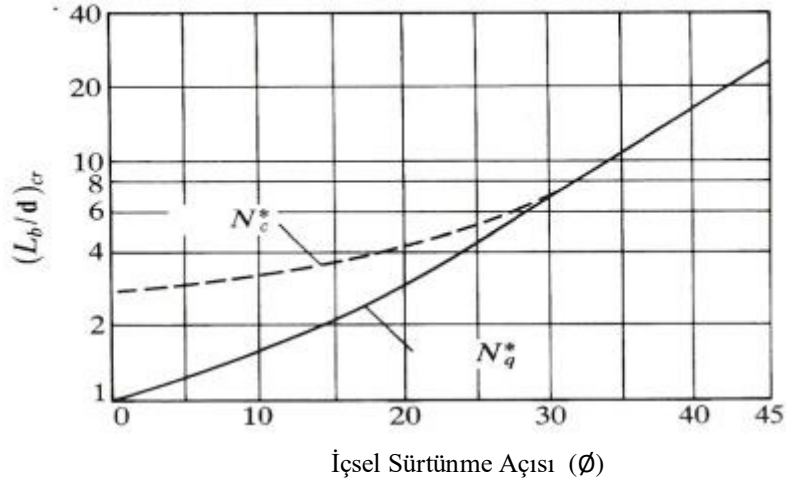
$\phi = 0$ için N_q terimi de ihmal edilebilir.

$$Q_{uç} = q_{uç} \cdot A_{uç} = A_{uç} N_c \cdot c_u = 9 \cdot c_u \cdot A_{uç} \quad (4.8)$$

Granüler-kohezyonlu bir zeminde toplam uç direnci aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{uç} = A_{uç} \cdot [c \cdot N_c^* + \sigma_v' \cdot (N_q^*)] \quad (4.9)$$

Kazık uç direnci derinlikle artmaktadır. Ancak kritik derinlikten (L_b) sonra değişmemektedir. Bu derinlik kazık çapı cinsinden (d) 'Kritik Gömülme Oranı (L_b/d_{cr})' ile ifade edilir. Bu oran Şekil 4.8'de görüldüğü içsel sürtünme açısının bir fonksiyonudur.



Şekil 4.8. L_b/d_{cr} Oranının içsel sürtünme açısına göre değişimi (Mayerhof, 1979)

Sürtünme Direncinin Hesaplanması

Çevre sürtünmesi kazık yüzey alanı ile birim alanda oluşan çevre sürtünmesinin çarpılmasıyla bulunur.

$$Q_{yan} = q_{yan} \cdot A_{yan} = p \cdot D_f \cdot q_{yan} \quad (4.10)$$

Q_{yan} (kN): Çevre sürtünmesi ile taşınan toplam yük,

A_{yan} (m²): Kazık çevresinde sürtünme maruz kalan yüzey alanı,

q_{yan} (kN/m²): Çevre yüzeyde birim alanda etkili olan sürtünme,

p (m): Kazık shaftının kesit çevre uzunluğu (Dairesel kazıklarda $p = \pi \cdot D$),

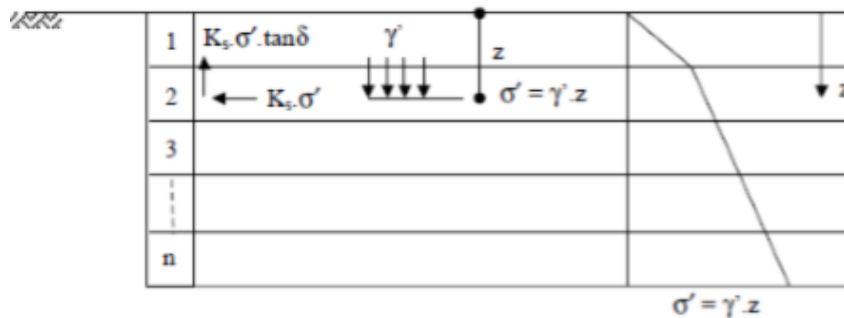
D_f (m): Temel derinliği, kazık boyu

Kohezyonsuz zeminde kazık boyunun tam alınması fazla taşıma kapasitesi vereceği için azaltmalar yapılır. Kum sıkılık derecesine göre katsayıları değişmektedir ve kazık çap ile çarpılmaktadır. Efektif gerilme bu boya kadar artarken bu boydan sonra sabit kabul edilir. Kum sıkılığına göre değişecek kritik kazık boyu Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kum sıkılığı kritik kazık boyu ilişkisi

Kum sıkılık derecesi	Kazık Boyu L"
Gevşek	10D
Orta	15D
Sıkı	20D

Kohezyonsuz zeminlerde $c=0$ olduğu için, taşıma kapasitesi farklı hesaplanır. Kohezyonsuz zeminlerde sürtünme direnci Şekil 4.9 ‘da gösterildiği gibi efektif gerilme şeklinde hesaplanır.



Şekil 4.9. Efektif gerilme prensibine göre çevre sürtünmesi hesabı (Çinicioğlu, 2005)

Sürtünme direnci aşağıdaki formülizasyon ile hesaplanır.

$$Q_{yan}=q_{yan}.A_{yan}= K.\sigma'.\tan\delta.A_{yan} \quad (4.11)$$

$$q_{yan}=K.\sigma'.\tan\delta \quad (4.12)$$

$$A_{yan}=\pi.D.D_f \quad (4.13)$$

$\sigma' = \gamma'.z$: Zeminde oluşan efektif gerilme

K: Ortalama yatay toprak basıncı katsayısı (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4)

δ : Çevre sürtünme açısı (kazık malzemesi ve zemin arasında) (Çizelge 4.5)

Çizelge 4.3. Kazık türüne göre K katsayısı

Kazık Tipi	K
Fore kazıklar	$\approx K_0=1-\sin\phi$
Az deplasman yapan çakma kazıklar	$\approx K_0$ ile $1.4K_0$
Yüksek deplasman yapan çakma kazıklar	$\approx K_0$ ile $1.8K_0$

Çizelge 4.4. Sükûnetteki yatay toprak basıncı katsayısına göre K katsayısı

Kazık Tipi	K/K ₀
Yüksek deplasman yapan çakma kazıklar	1-2
Az deplasman yapan çakma kazıklar	0.75-1.75
Fore kazıklar	0.71-1
Su jeti ile çakılan kazık	0.5-0.7

Çizelge 4.5. Kazık-zemin arasındaki sürtünme değerleri

Kazık-zemin temas durumu	Kazık/zemin sürtünme açısı, δ
Pürüzsüz veya kaplanmış çelik-kum	0.5 ϕ – 0.7 ϕ
Kaba (ondüleli) çelik-kum	0.7 ϕ – 0.9 ϕ
Önceden dökülmüş beton-kum	0.8 ϕ – 1.0 ϕ
Yerinde dökülmüş beton-kum	1.0 ϕ
Ahşap-kum	0.8 ϕ – 0.9 ϕ
Zemin içinde boru bırakılan kazıklar	0.7 ϕ – 0.85 ϕ

Drenajsız şartlardaki kazık sürtünme mukavemeti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_{yan}=A_{yan}.q_{yan}=c_a.(\pi.D.D_f) \quad (4.14)$$

Zemin yan yüzeyinde oluşan mukavemet, temsil eden c_a kayma mukavemeti zemin ve kazık cinsine göre değişmektedir kabul gören değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Kazık türüne göre tipik c_a değerleri

c_u (kN/m ²)	c_a (kN/m ²)	
Serbest Basınç Mukavemeti	Ahşap veya beton	Çelik
0-72	0-34	0-34
72-144	34-48	34-48
144-288	48-62	48-57
288	62	57

Çizelge 4.7. Zemin türüne göre tipik c_a değeri

Zemin cinsi	c_a (kN/m ²)
Silt ve yumuşak kil	7-30
Çok sert kil	50-200
Gevşek kum	12-36
Yoğun kum	33-67
Sıkı çakıl	50-100

Kohenzyonlu zeminlerde çevre sürtünme direnci aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_{yan} = A_{yan} \cdot q_{yan} = A_{yan} \cdot \alpha \cdot c_u \quad (4.15)$$

α : Zemin adezyon katsayısı (Çizelge 4.8)

c_u : Zeminin drenajsız kayma direnci

Adezyon katsayısı tablodan alınabildiği gibi aşağıdaki eşitlikten de hesaplanır:

$$\alpha = 1 - 0,00615 \cdot (c_u - 25) \quad 25 > c_u > 90 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.16)$$

Çizelge 4.8. Zemin türüne göre tipik c_a değeri

c_u (kN/m ²)	α
90	0.60
100	0.58
150	0.42
200	0.35

4.3.2. Dinamik Kazık Formülleri

Çakma kazıkların taşıma gücü dinamik kazık formülleri kullanılarak belirlenir. Kazığın çakılması esnasında uygulanan enerji, oturma ve enerji kayıplarını dikkate alan birçok yöntem geliştirilmiştir.

Danimarka formülü;

$$Q_d = \frac{W_r x H}{s + 0,5.c_2} \quad (4.17)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{2xW_T x H x L}{A x E}} \quad (4.18)$$

Sanders formülü;

$$Q_d = \frac{W_r x h}{s} \quad (4.19)$$

Engineering News formülü;

$$Q_d = \frac{W_r x h}{s + C} \quad (\text{tek tesirli şahmerdan}) \quad (4.20)$$

$$Q_d = \frac{E_n}{s + C} \quad (\text{çift tesirli şahmerdan}) \quad (4.21)$$

Brix formülü;

$$Q_d = \frac{W_r x h x W_p}{s(W_r + W_p)^2} \quad (4.22)$$

Dutch formülü;

$$Q_d = \frac{W_r^2 x h}{s(W_r + W_p)} \quad (4.23)$$

Hiley formülü;

$$Q_d = \frac{W_r + e^2 x W_p}{W_r + W_p} \times \frac{W_r x h x e_f}{s + \frac{1}{2} (c_1 + c_2 + c_3)} \quad (4.24)$$

Yukarıdaki formüllerle kazık tasarımında 3-8 arasında değişken güvenlik sayıları seçilmektedir. Formüllerde kullanılan bazı temel semboller;

W_p : Kazık ağırlığı,

W_r : Tokmak ağırlığı,

H: Tokmanın düşü yüksekliği,

s: Kazığın zemine giriş miktarı (refü),

E: Kazık malzemesinin elastisite modülü,

A: Kazığın kesit alanı,

L: Kazık boyu,

c_1 : Kazığın başındaki takozun ve yastığının elastik kısalması,

c_2 : Kazığın elastik kısalması,

c_3 : Zeminin elastik kısalması,

e_r : Tokmanın tesir katsayısı (0.65-1.00) ve e : Çarpma sayısı

4.3.3. Arazi Deneyle ve Kazık Yük Taşıma Kapasitesi

Koni penetrasyon ve standart penetrasyon deneylerine dayalı olarak geliştirilmiş bağıntılarla kazık yük taşıma kapasitelerini belirleme yaygın olarak kullanılmaktadır.

Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)

Bu deneyde taşıma gücü, uç direnci ve oluşan sürtünme gücü arasında ki korelasyon ile bulunur. Melt tarafından yapılan çalışmalar sonucunda aşağıda ki gibi hesaplanır:

$$f_s = (q_c/b) \leq f_{sl} \quad (4.25)$$

$$f_t = k_c \cdot q_c \quad (4.26)$$

q_c : Ölçülen koni uç direnci,

b: Kuyu faktörü,

f_{sl} : Çevre sürtünmesinin nihai limit değeri,

k_c : Taban katsayısı

f_t : Taban taşıma gücü

f_s : Kuyu sürtünmesi

Formülde kullanılan kuyu faktörü, çevre sürtünme limit değeri ve taban katsayısı Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu parametlerin değerleri zemin cinsine ve kazık türüne göre değişmektedir.

Çizelge 4.9. CPT'de kullanılan nihai çevre sürtünmesi korelasyonu (Melt, 1993)

Kazık tipi	Kil ve Silt			Kum ve Çakıl			Kireç taşı			
	Yumuşak	Katı	Sert	Gevşek	Orta	Sıkı	Yumuşak	Ayrışmış		
Delme kazık										
B	-	-	75	-	200	200	200	125	80	
f_{s1} , kPa	15	40	80	40	80	-	-	120	40	120
Kılıflı delme										
B	-	100	100	-	100	250	250	300	125	100
f_{s1} , kPa	15		60	40	80	-	40	120	40	80
Ucu kapalı çelik çakma kazık										
B	-	120		150	-	300	300	300		
f_{s1} , kPa	15	40		80	-	-	120	-		
Beton çakma kazık										
B	-	75		-	150	150	150			
f_{s1} , kPa	15	80		80	-	-	120			

Çizelge 4.10. CPT taban katsayısı değerleri (Melt, 1993)

	Zemin tipi	Q_c (Mpa)	k_c	
			Zeminde yer değiştirme yapmayan kazıklar	Zeminde yer değiştirme yapan kazıklar
Kil, Silt	Yumuşak	<3		
	Katı	3-6	0,4	0,55
	Sert	>6		
Kum, Çakıl	Gevşek	<5		
	Orta	8-15	0,15	0,5
	Sıkı	>20		
Kireçtaşı	Yumuşak	<5	0,2	0,3
	Ayrışmış	>5	0,3	0,45

Kanada Geoteknik Birliği'nin çalışmalarından (1985), SPT sonuçlarına göre uç ve sürtünme direnci aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır:

$$Q_{top} = m \cdot N \cdot A_{uç} + n \cdot \bar{N} \cdot D \cdot A_{yan} \quad (4.27)$$

m: Çakma kazıklar için 400, fore kazıklar için 200

n: Çakma kazıklar için 2, fore kazıklar için 1

N: Kazık uç seviyesindeki SPT sayısı

\bar{N} : Kazık boyunca ortalama SPT sayısı

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Bu deneyde taşıma gücü esasında sürtünme direnci baz alınır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıda ki formüller bulunmuştur.

$$f_s = \alpha(2,8xN_{60} + 10) \quad (4.28)$$

$$f_t = K_t (N_{60})_t \quad (4.29)$$

N_{60} : Düzeltilmiş SPT değeri

α : 1.0 (Killi zeminde)

α : 0.5 ~ 0.6 (Ayrık daneli zeminlerde)

$(N_{60})_t$: Kazık ucu ve çevresindeki ortalama SPT okuması

K_t : Taban katsayısı

f_t : Birim uç direnci

Taban katsayısı zemim türüne ve kazığın zeminde yer değiştirme meydana getirip getirmemesine göre değişmektedir, kat sayı değerleri Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. SPT (K_t) değerleri

Zemin tipi	Zeminde yer değiştirme yapmayan kazıklar	Zeminde yer değiştirme yapan kazıklar
Kum	325	165
Kumlu-Silt	205	115
Killi-Silt	165	100
Kil	100	80

Mayerhof 'a (1976) göre kazıklarda SPT sonuçlarına göre uç ve sürtünme direnci aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır (kN/m^2):

Kumlar ve çakıllar için, $L/D \geq 10$ ise uç direnci;

$$Q_{uç} = 40 \cdot N_{1,60} \cdot \frac{L}{D} \leq 400 \cdot N_{1,60} \quad (4.30)$$

Pastik olmayan siltler için, $L/D \geq 10$ ise uç direnci;

$$Q_{uç} = 40 \cdot N_{1,60} \cdot \frac{L}{D} \leq 300 \cdot N_{1,60} \quad (4.31)$$

Kohezyonsuz zeminlerde büyük deplasman yapan kazıklarda, $L/D \geq 7,5$ ise sürtünme direnci;

$$Q_{yan} = 2N_{60} \quad (4.32)$$

Kohezyonlu zeminlerde büyük deplasman yapan kazıklarda, $L/D \geq 7,5$ ise sürtünme direnci;

$$Q_{yan} = N_{60} \quad (4.33)$$

L: Kazık boyu

D: Kazık çapı

$N_{1,60}$: Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına ve efektif jeolojik basıncı 100 kPa olarak düzeltilmiş vuruş sayısı

N_{60} : Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı

Briaud ve ark. (1985) SPT sonuçlarına göre net uç direnci ve sürtünme direnci aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır (kPa):

$$Q_{uç} = 1970 (N_{60})^{0,36} \quad (4.34)$$

$$Q_{yan} = 22,4 (N_{60})^{0,29} \quad (4.35)$$

4.3.4. Kazık Yükleme Deneyleri ile Yük Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi

Kazıkların taşıma gücünü belirlemek için plaka yükleme deneyine benzer düzenekle kazık yükleme deneyleri yapılır. Kazık yükleme deneyleri üç farklı şekilde yapılır. Bunlar kademeli yükleme, kademeli çabuk ve sabit hızda yükleme deneyleridir. Kademeli yükleme deneylerinde taşıma gücünün yanı sıra oturma miktarları da hesaplanır. Kazık belirli bir yükle yüklenir daha sonra boşaltılır. Kazık yükleme deneyi üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Kazığın taşıma kapasitesini belirlemek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; Terzaghi yöntemi, Boston şartnameleri, kazık çapının %10'u kuralı, Brinch Hansen yöntemi, yük-oturma eğrisi yarıçapı yöntemi, De Beer yöntemi, Mazurkiewiez yöntemi ve Fuller ve Hoy yöntemidir. Kazık yükleme deneyleri statik ve dinamik yöntemler olarak iki başlıkta incelenir. Statik yöntemle en sık kullanılan yöntemdir. Kazık üzerine kurulan hidrolik krikolar ile yükleme gerçekleştirilir. Kazık yükleme deney sonuçları yük-oturma şeklindedir. Kazık yükleme, kademeli yavaş yükleme deneyi (ML), sabit penetrasyon oranlı yükleme deneyi (CRP), çevirmeli yükleme deneyi (CL) ve hızlı kademeli yükleme deneyi olarak dört farklı şekilde yapılır. ML deneyinde, kazık proje yükünün %200'ü kadar yük sekiz eşit kademede yüklendikten sonra 4 eşit kademede boşaltılır. Yapılan yüklemelerde oturma artış oranı 0,25 mm/saat olana kadar beklenir. CRP deneyinde, kazık 0,5 mm/dakika oranında oturtulur, bu oturmaya karşılık gelen yükler okunur. Oturma 50-75mm olana kadar devam eder. CL deneyinde, ML deneyine benzer şekilde maksimum yüke ulaşıncaya kadar devam edilir. Hızlı kademeli yükleme deneyinde, hesaplanan yükün %300'ü kadar yüklenir. Servis yükünün %15'i kadar toplam 20 adet yük kademesi 15 dakika beklenerek uygulanır (Mert, 2012).

Kazıkların taşıma gücü laboratuvar deneyleri ve arazi incelemeleri sonucunda ampirik veya yarı ampirik yöntemler ile tespit edilir. Kazık imalatı öncesinde kazık yükleme deneyleri ile kontrol edilmesi uygun olmaktadır. Granüler zeminde imal edilen çakma kazıklarda kazık yükleme deneyi yapılmadan önce 3 gün kadar beklemek uygun olacaktır. Silt, kil ve zayıf kayalar zeminlerde 2 veya 4 hafta beklenmelidir. Yerinde dökme beton kazıklarda kazığın belirli bir dayanıma ulaşması için en az 7 gün beklenmelidir. Kazık yükleme deneyi sırasında aşırı oturma olması veya kazığın yükü taşınamaması durumunda tasarım değiştirilmelidir. Kazık yükleme deneyleri yapılmasında amaç kazığın taşıyacağı maksimum yükü bulmak, kazıkta oluşacak oturmaları tespit etmek ve kazık imalatına onay vermek.

%10 Yöntemi

Bu yöntemde kazığın elastik oturması hesaplanır. Kazık çapının %10'u kadar deplasman hesaplanır. Bu deplasmana karşılık gelen yük göçme yükü olarak belirlenir.

Davisson Yöntemi

Davisson 1970 yılında oturmaya karşılık gelen göç yükünü hesaplamıştır. Elde ettiği grafik Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu yöntem çakma kazıklar için uygundur. Yavaş kademeli yükleme deneyinde de bu yöntemin kullanılması uygundur. Yöntemin avantajı, kazığın fiziksel özelliklerine bağlı olmasıdır. Dezavantajı ise, imalat iyi yapılmazsa homojen olmayan kazık imalatında oldukça hatalı sonuç verebilmesidir.

Bu yöntem ile kazıkta elastik oturma aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır.

$$\delta = QL/AE \quad (4.36)$$

$$x = 3,81 + D/120 \quad (4.37)$$

δ : Kazığın elastik boy kısalması (mm),

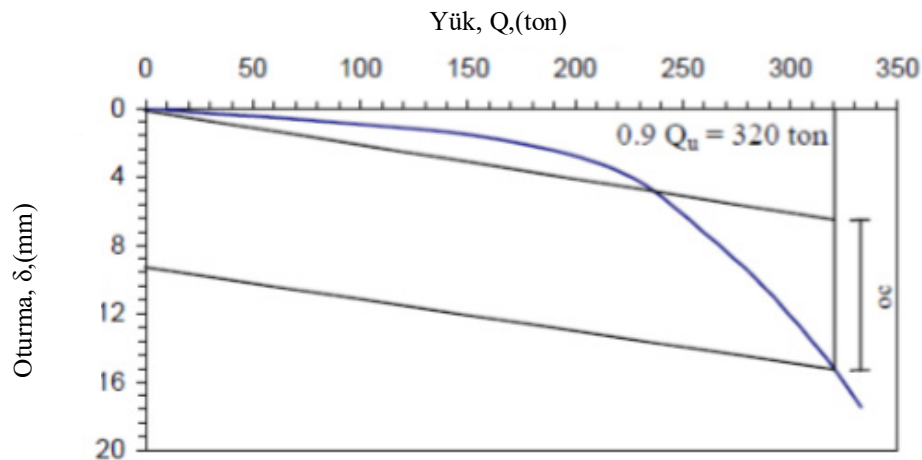
Q: Kazığa uygulanan yük,

L: Kazık boyu,

A: Kazık kesit alanı,

E: Kazığın elastisite modülü.

x: Yük oturma grafiğinin başlangıcına çizilen bir teğet



Şekil 4.10. Davisson yöntemi

Brinch Hansen'in %80 Yöntemi

Bu yöntemde göçme yükü hem formülizasyon ile hem de grafikten bulunur. Grafik Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu yöntemde hesaplanan yükün %80'i uygulandığında meydana gelen oturmanın 4 katı oturmaya neden olan yük göçme yükü olarak alınır.

$$Q_d = \frac{1}{2\sqrt{C_1 \cdot C_2}} \quad (4.38)$$

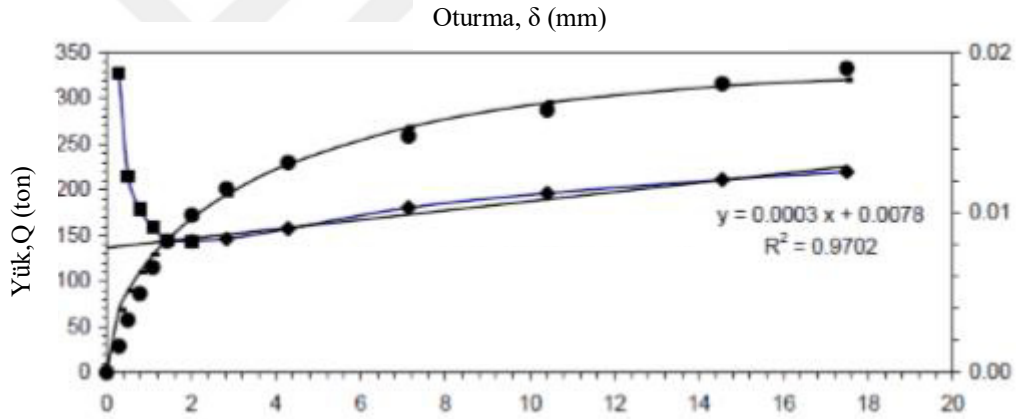
$$\delta = \frac{C_1}{C_2} \quad (4.39)$$

Q_d : Göçme yükü,

δ : Göçme yükünde oluşan deplasman,

C_1 : Doğrunun eğimi,

C_2 : Doğrunun y eksenini kestiği nokta.



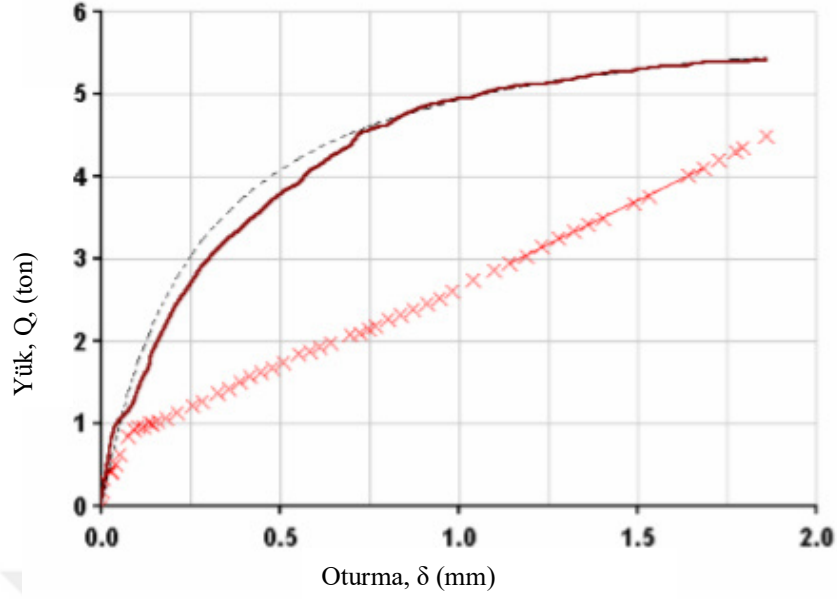
Şekil 4.11. Brinch Hansen %80 grafiği

Chin Kondner Yöntemi

Chin Kondner 1970 yılında bulduğu yöntemde, kazığın oturma/yük – oturma grafiği çizilir. Şekil 4.12'de çizilmiş örnek grafik verilmiştir. Grafik doğrusal eğim oluştuğunda eğimin tersi alınarak taşıyabileceği maximum yük bulunur.

$$Q_d = \frac{1}{C_1} \quad (4.40)$$

$$Q = \frac{\delta}{\delta \cdot C_1 + C_2} \quad (4.41)$$



Şekil 4.12. Chin Kondner Grafiği

C₁: Chin Kondner grafiğinde doğrunun eğimi.

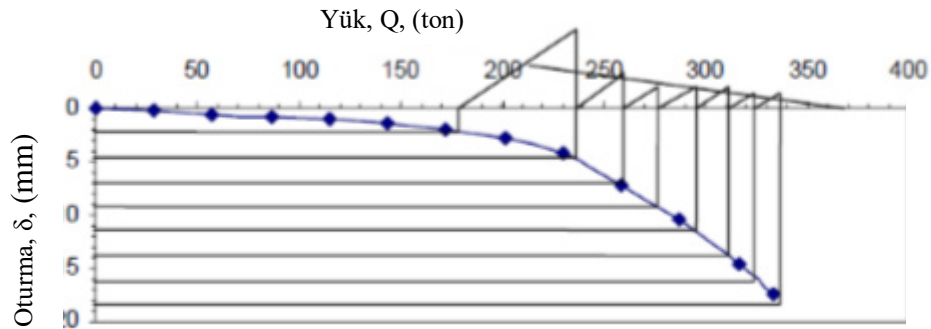
C₂: Doğrunun düşey ekseni kestiği değer.

Q_d: Göçme yükü,

Q: Uygulanan yük,

Mazurkiewicz Yöntemi

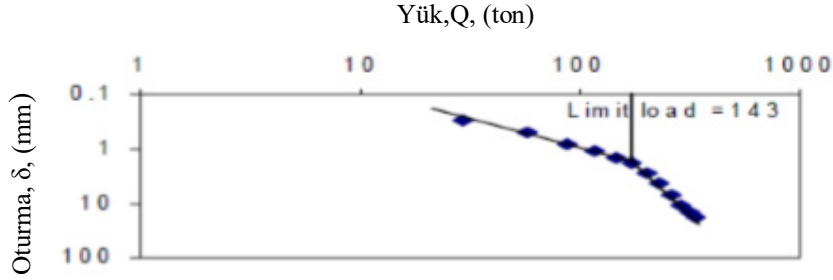
1972’de bulunan bu yöntemde yük-oturma grafiğinin oturma eksenini eşit aralıklara bölünür. Bu noktalardan paralel çizilir. Paralellerin eğride kestiği noktadan dikme çıkarılır. Bu noktalar üzerinden tekrar bir doğru oluşturulur. Oluşan doğrunun yük ekseninde kestiği nokta Şekil 4.13 ‘te gösterildiği gibi maximum yükü verir.



Şekil 4.13. Mazurkiewicz yöntemi

De Beer yöntemi

Bu yöntemde yük-oturma grafiği logaritmik olarak oluşturulur. Göçe yükünün geçildiği durumlarda iki düz doğru oluşur. Eksende bu iki düz doğrunun kesiştiği nokta Şekil 4.14'de gösterildiği gibi göçme yükü olarak tanımlanır.



Şekil 4.14. De Beer yöntemi

Decourt yöntemi

1999'da bulunan bu yöntemde yük – oturma/yük grafiği çizilir. Oluşan eğri absise yaklaştığında doğrusal bir hal alır. Daha sonra uzatıldığında absis ile kesişir. Doğrusal eğilim gösteren bu noktalara lineer regresyon analizi uygulanır. Bu regresyon doğrusunun absis ile kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeri Decourt limit değeridir.

Göçme yükü:

$$Q_d = \frac{C_1}{C_2} \quad (4.42)$$

İdeal eğrinin denklemi:

$$Q = \frac{C_2 \cdot \delta}{1 - \delta \cdot C_1} \quad (4.43)$$

Q_d : Göçme yükü,

Q : Uygulanan yük,

δ : Oturma,

C_1 : Regresyon doğrusunun eğimi,

C_2 : Regresyon doğrusunun düşey eksenini kestiği değer.

Dinamik yükleme deneyleri ise çakma kazıklarda genellikle tercih edilir. Çakma kazıklarda en sık kullanılan dinamik yükleme yöntemi kazık şahmerdanıdır. Dinamik yükleme deneylerinde kazık taşıma kapasitesi, yüksek gerilim etkisi sırasında meydana gelen dinamik yük ve hareketi (ivme, hız ve yer değiştirme) analiz edilerek bulunur. Bu yöntemde en fazla yük ilk etapta baş kısımda oluşur daha sonra orta kısma ve uca iletilir. Dinamik yükleme için geliştirilen yöntemleri Case yöntemi ve CAPWAP sinyal eşleştirme yöntemidir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin genel ve yerel özellikleri ile kullanılan özellikleri aşağıdaki sıra ile açıklanmıştır.

5.1.1. Polyester Numunelerin Hazırlanmasında Kullanılan Deney Kumu

Çalışma kapsamında kullanılan kum Konya'nın Eğribayat köyünde bulunan kum ocaklarından temin edilmiştir. Karışım kumu öncelikle 10 nolu (2 mm çap) elekten geçirilmiştir daha sonra elek altında kalan kum 200 nolu (0,075 mm çap) elek yardımı ile yıkamalı analiz yapılarak elenmiştir (Şekil 5.1). Yıkanan kumlar etüvde 100 °C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur.



Şekil 5.1. Yıkamalı kum analizi

Karışım kumunun bazı geoteknik özellikleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenmiştir. Bu amaçla için Standart Proctor kalıbı ve cam silindir ile maksimum ve minimum boşluk oranı, piknometre ile özgül ağırlığı, elek analizi ile granülometri deneyleri yapılmıştır. Cam silindir, piknometre ve elek analizi deneyleri için TS 1900-1’de belirtilen standartlar esas alınmıştır. Standart Proctor için ASTM D üç farklı metot belirlemiştir. Bu metotlar Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu çalışmada Standart Proctor metot A kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. ASTM D 698’e göre Standart Proctor metotları (Yılmaz, 2013)

	Kullanım Şartı	Kullanılan Malzeme	Kalıp Boyutları		Tabaka	Vuruş Sayısı	Tokmak (kg)
			Çap mm	Yükseklik mm			
Metot A	4,75 mm elek üzerinde kalan malzeme %20 den daha az ise	4,75 mm lik elekten geçen malzeme kullanılacak	105	115,5	üç	25	2,5
Metot B	4,75 mm elek üzerinde kalan malzeme %20 den daha fazla ve 9,5 mm elek üzerinde kalan malzeme %20 ve daha az ise	9,5 mm lik elekten geçen malzeme kullanılacak	105	115,5	üç	25	2,5
Metot C	9,5 mm elek üzerinde kalan malzeme %20 den daha fazla ve %30 ve daha az malzeme 20 mm elek üzerinde kalıyor ise	20 mm lik elekten geçen malzeme kullanılacak	152,4	115,5	üç	56	2,5

Deney kumuna ait numunelerine ait belirlenen bazı geoteknik özellikler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Çalışmada kullanılan karışım kumunun özellikleri

Kumun Özellikleri	Değer
Dane birim hacim ağırlığı	26,8 kN/m ³
Minimum kuru birim hacim ağırlığı	15,8 kN/m ³
Maximum kuru birim hacim ağırlığı	17,7 kN/m ³

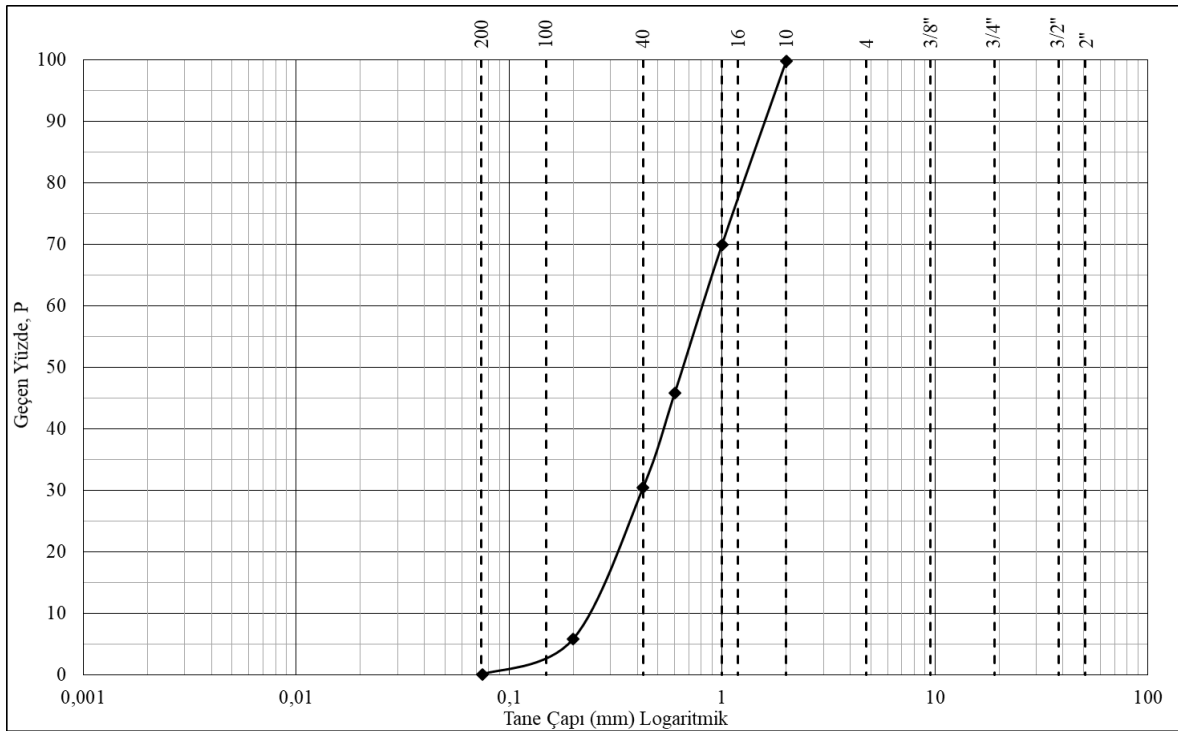
Kumda yapılan elek analiz sonucunda çizilen granülometri eğrisi Şekil 5.2’de verilmiştir. Çizilen eğriden deney kumu için;

Efektif çap, $D_{10} = 0,25$

Ortalama çap, $D_{50} = 0,65$

$$\text{Üniformluluk sayısı, } u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,8}{0,25} = 3,2$$

$$\text{Derecelenme sayısı, } Cr = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0,41)^2}{0,8 \times 0,25} = 84,05$$



Şekil 5.2. Numunelerde kullanılan kumun granülometri eğrisi

5.1.2. Kazık Yükleme Deneylerinde Kullanılan Deney Kumu

İçi dolu ve içi boş olarak imal edilen model kazıkların yüklenmesi için deney tankına $D_r = \%90$ sıklıkta yerleştirilen deney kumu Konya'nın Eğribayat köyünde bulunan kum ocaklarından temin edilmiştir.

Kazık yükleme tankında kullanılan deney kumuna ait numunelerine ait belirlenen bazı geoteknik özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney tankında kumunun özellikleri

Kumun Özellikleri	Değer
Dane birim hacim ağırlığı	27 kN/m ³
Minimum kuru birim hacim ağırlığı	14,7 kN/m ³
Maximum kuru birim hacim ağırlığı	18,5 kN/m ³

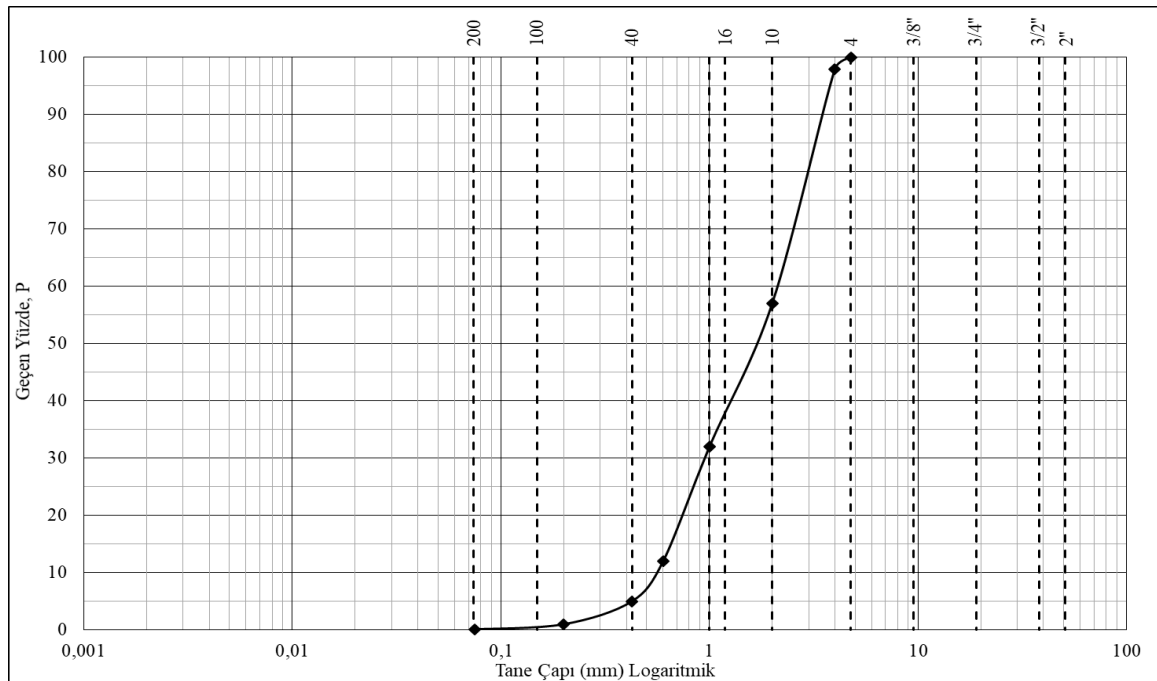
Kumda yapılan elek analiz sonucunda çizilen granülometri eğrisi Şekil 5.3'te verilmiştir. Zemin sınıfı (USCS) SP olarak belirlenmiştir. Çizilen eğriden deney kumu için;

Efektif çap, $D_{10} = 0,4$

Ortalama çap, $D_{50} = 1,8$

$$\text{Üniformluk sayısı, } u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2,1}{0,4} = 5,25$$

$$\text{Derecelenme sayısı, } Cr = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{(0,95)^2}{2,1 \times 0,4} = 1,07$$

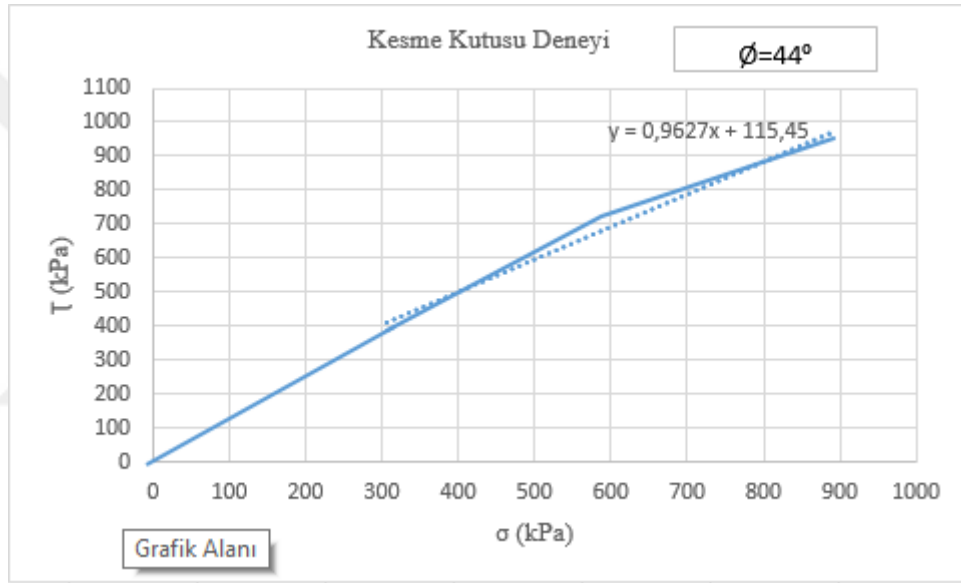


Şekil 5.3. Numunelerde kullanılan kumun granülometri eğrisi

Deney tankına $D_r=0,90$ rölative sıklıkta yerleştirilen kumun içsel sürtünme açısını belirlemek için kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla daire kesitli kesme kutusu hücresine deney kumu $D_r=0,90$ olacak şekilde sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Deneyler üç farklı düşey gerilme (300 kPa, 600 kPa ve 900 kPa) altında tekrarlanarak kayma gerilmeleri belirlenmiş ve en uygun kırılma zarfı (doğrusu) çizilmiştir (Şekil 5.4). Çizilen doğrudan tank içindeki deney kumunun;

İçsel sürtünme açısı $\phi=44^\circ$

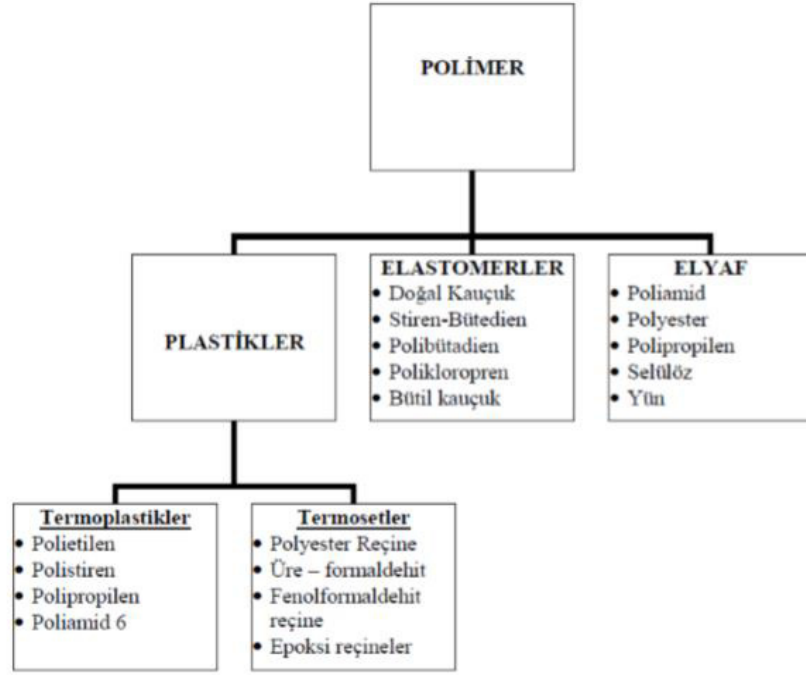
Kohezyon $c \approx 0$ olarak belirlenmiştir. Deneylerde TS 1900-2'de belirtilen esaslar dikkate alınmıştır.



Şekil 5.4. Kesme kutusu kırılma zarfı

5.1.3. Doymamış Polyesterin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Polimerler, monomer denilen küçük moleküllerin bir araya gelmesiyle oluşan doğal veya yapay bir maddedir. Polimerlerin sınıflandırılması Şekil 5.5'te verilmiştir. Termosetler, ısıtıldıklarında kimyasal özellikleri değişen plastiklerdir. Termosetler; polyester reçineleri, epoksi reçineleri, fenolik ve amino reçineleridir. Polyester, denizcilik ve inşaat alanında sıklıkla kullanılan termoset reçinedir. Polyester reçine, genellikle doymamış dikarboksilik asit ve glikolün kondensasyonu sonucu elde edilir (Doğanay ve Ulcay, 2007).



Şekil 5.5. Polimer kavramları ve özellikleri (Uysal, 2014)

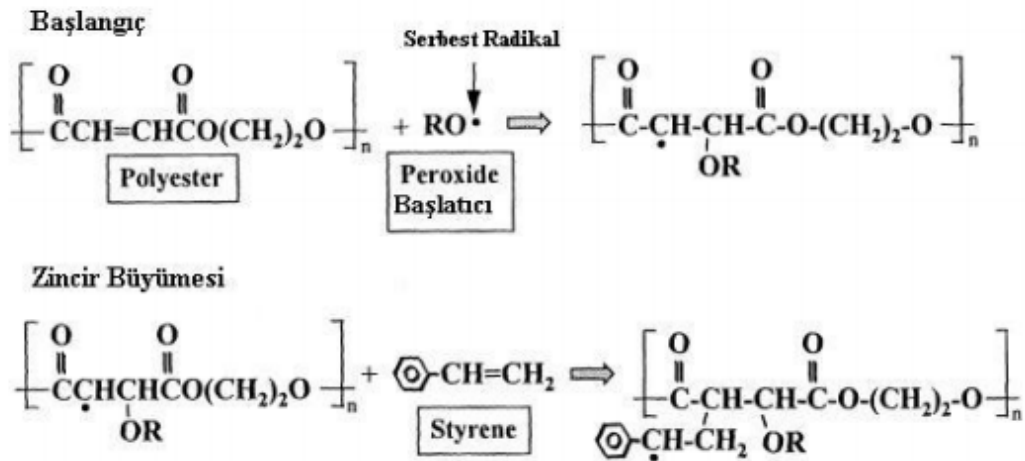
Polyesterler doymuş ve doymamış olarak iki gruba ayrılırlar. Doymamış polyester reçineleri polimerik malzemedir. Glikoller ile iki veya daha fazla fonksiyonlu asitlerin reaksiyonu sonucu oluşurlar. Yapısal özellikleri (karbon = karbon) çift bağ (C=C) içerdiğinden dolayı, sertleştiklerinde bir ağ yapısı oluştururlar. Böylece tekrar işlenmesi sağlam bir malzemeye dönüşürler. Ham haldeki polyester reçinesi oda sıcaklığında katı, camsı ve çok kırılğan olduğu için kullanıma uygun değildir. Polyester reçinesi stiren monomer içerisinde çözelti haline geldiğinde sıvı formunu alır. Tekrar sertleşmesi istendiğinde bir peroksit (sertleştirici) ilave edilir reaksiyona girerek sertleşebilir (Bagherinia, 2013).

Doymamış polyesterler, polihidrik asitler ve poliglikolin reaksiyonu sonucu elde edilirler. Polihidrik asitler; asit anhidrit veya melaik anhidritler arasında yer almaktadır. Poliglikollar ise; etilen glikol, dietilen glikol, trietilen ve polietilen glikol olarak kullanılmaktadır (Bagherinia, 2013).

Doymamış polyester reçineler ısıtıldığında yumuşarlar ve akışkan şurup kıvamını alırlar. Soğutulduğunda ise tekrar sertleşebilen termoplastik yapı gösterirler ve düşük erime noktasına sahip katı halde bulunurlar.

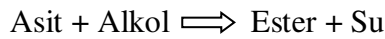
Polimerize edilen polyesterler daha kullanışlıdır. Bunun için stiren, vinilasetat ve dialilfitalat gibi monomerlere çapraz bağ oluşturacak şekilde bağlamak gerekir. Stirenin fazla kullanıldığında termoplastik yapı bir polyester oluşur.

Doymamış polyesterdeki karbon molekülleri kimyasal olarak dengesizlerdir ve bağ kurabileceği bir element arayışındadır. Bu karbon moleküllerinin birbirine bağlanma reaksiyonuna polimerizasyon adı verilir. Moleküllerin “Cross Link” adı verilen yapı oluşturması ile üç boyutlu bir matriks oluşur ve reçine sıvı halden katı hale dönüşür, bu Cross Link yapısı Şekil 5.6’da verilmiştir. Polyesterler ısı etkisiyle veya kimyasal katkı maddeleri ile bir araya gelerek sertleşirler. Isı ile meydana sertleşme sıcak sertleşme, kimyasal maddelerle meydana gelen sertleşme soğuk sertleşmedir.



Şekil 5.6. Doymamış polyesterin Cross Link oluşturması (Özen, 2019)

Polyesterin yüksek mukavemet/ağırlık oranı vardır. Polyesterler ticari kullanımda en başarılı yapay elyafıdır. Polyesterler genellikle aşağıdaki reaksiyona göre üretilirler:



Polyesterler 250 °C' ye kadar rahatlıkla kullanabilen malzemeye dönüşürler. Polyesterin sertleşmesi sırasında monomerlerin büzülmesiyle % 4 ila % 8 arasında büzülme meydana gelir. Bu büzülme polyesterlerin dezavantajıdır. Gerçekleşen büzülmeden dolayı düzgün bir yüzey elde etmek zordur (Özkara, 2009)

Polyester reçine çapraz bağlandıktan sonra kimyasal olarak dayanıklı sert bir yapıya dönüşür. Polyestere önce reçine ile diğer katılacaklar katılmalı iyice karıştırılmalıdır, sonra katalizör katılmalıdır. Karıştırma işlemi çok iyi yapılmalıdır. İşlem düzgün ve hızlı olmalıdır çünkü reçineye karışan hava bile son ürünün kalitesini etkileyebilir. Katılan hızlandırıcı ve katalizörün oranı da oluşacak yapının özelliklerinde etkilidir. Çok fazla katalizör katılması çok hızlı jelleşmeye neden olur, çok az katılması durumunda ise çapraz bağlanma yeterli olmaz (Bagherinia, 2013).

Günümüzde en sık kullanılan liflerle donatılmış kompozitlerden birisi cam lifleriyle donatılı polyester kompozitlerdir. Bu malzemeler 1950’li yılların ortalarında endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde çatı levhaları, küçük tekneler ve sıvı depoları yapımında kullanılmaktadır. İlk yerli otomobilimiz Anadol’un kaporta kısmı bu malzemelerden üretilmiştir. Cam lifleriyle donatılı polyester malzemelere ülkemizde “Cam Takviyeli Plastik (CTP)” adı verilir. Polyester ise CTP malzemelerin üretiminde en çok kullanılanıdır. Bunun yanında termoset ve termoplastik reçinelerde kullanılmaktadır.

FRP yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit malzemedir. Kullanılan lifler yükün büyük bir kısmını karşılamaktadır. Lif olarak en çok cam, karbon ve aramid kullanılır. Matris olarak ise en çok epoksi, polyester ve vinylester kullanılır (Cullazoğlu, 2014).

Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; ortoftalik ve isoftalik. Ortoftalik ekonomiklik yönünden avantajlı ve isoftalik polyester ise suya dayanıklıdır (Solmaz ve Gür, 2007).

Polyesterler; dayanımı fazladır, uzun ömürlüdür, su emişleri düşüktür, kimyasallara karşı dayanımları yüksektir, gerilmeye ve aşınmaya dayanımları yüksektir, yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler. Bu özellikleri polyesteri avantajlı bir malzeme yapmaktadır. Polyesterden özel kumaşlar, perde, yatak örtüsü, uyku tulumu, halı, yastık vs. gibi ev eşyaları üretilmektedir. Polyesterler geri dönüşümlü pet şişeleri de üretilmektedir. Ayrıca polyesterlerden yelken, yüksek mukavemetli halatlar, disket gövdesi, iplik, güç kemeri, hortum gibi ürünlerde üretilmektedir.¹

Polyesterler; düşük viskoziteli, ekonomik, kolay imal edilebilir ve çevresel dayanımları yüksektir. Dezavantajları ise; sistem gevrekleşmeye eğilimlidir, zayıf elyaf/matris bağı mukavemetine sahiptirler ve çok seyreltik alkalilere bile zayıf kimyasal direnç gösterirler (Eker, 2008).

Bu çalışmada kum ağırlığının belirli oranlarında döküm tipi doymamış polyester (TP 100) kullanılmıştır. Doymamış polyesterin sertleşmesinde; hızlandırıcı (H) olarak Kobalt Naftanat, sertleştirici (S) olarak da Metil Etil Keton Peroksit kullanılmıştır. Doymamış polyesterin temel reçine özellikleri Çizelge 5.4’te, sıvı haldeki özellikleri Çizelge 5.5’te ve mekanik özellikleri Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Polyester şeffaf renkte olup, akışkan bir malzemedir. Kullanılan polyestere kimyasal yan etkileri bulunması sebebiyle firma kataloğunda yer alan kullanım kılavuzuna uygun hareket edilmiştir. Cildi tahriş etmemesi için deney numunelerinin hazırlanması ve üretilmesinde eldiven kullanılmıştır.

Deneyler için numunelerin hazırlanmasında kuru kum ağırlığının %10, 20, 30 ve 50'si oranlarında doymamış polyester kullanılmıştır. Polyester miktarının %1,5'i oranında hızlandırıcı ile Hızlandırıcı/Sertleştirici oranı H/S=3 olacak şekilde sertleştirici kullanılmıştır.

Taguchi L16 tasarım tablosuna göre 16 farklı durum için kullanılan polyester oranları Yöntem bölümünde verilen Çizelge 5.19'da görülmektedir.

Çizelge 5.4. Polyesterin temel reçine özellikleri (Turkuaz Polyester, UTS)

Reçine Özellikleri	
Asit	Ortoftalik
Glikol	Standart Glikol
Kobalt	İçermiyor
Reaktivite	Düşük

Çizelge 5.5. Sıvı haldeki özellikleri (Turkuaz Polyester, UTS)

Test	Metod	Standart Değer
Renk	ISO 2211	Şeffaf
Yoğunluk	ISO 1675	1,17 ± 0,01 gr/cm ³
Asit Değeri	ISO 2114	<24 mg KOH/gr
Vizkozite	ISO 2555	350-500 cp
Jel Süresi	ISO 2535	4'00-6'00
Pik Derecesi	ISO 2535	160°-170°C
Monomer Oranı	SO 3251	%31-%36
Raf Ömrü	-	4 Ay

Çizelge 5.6. Saf reçine mekanik özellikleri (Turkuaz Polyester, UTS)

Test	Metod	Standart
Çekme Dayanımı	ISO 527	± %10 65 MPa
Kopmadaki Uzama	ISO 527	± %10 0,03
Çekme Modülü	ISO 527	± %10 3000 Mpa
Eğilme Dayanımı	ISO 178	± %10 120 Mpa
Eğilme Modülü	ISO 178	± %10 2800 Mpa
Barcol Sertliği	ASTM D2583	± %10 40
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı	ISO 75	± %10 60°

5.1.4. Uçucu Külün İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Uçucu kül, taş kömürü veya linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanmasıyla oluşan bir atık malzemedir. Yanması sonucu baca gazları ile dışarı çıkan uçucu kül, mekanik ve elektrostatik filtrelerle tutulur. Böylece havaya karışması önlenir. Uçucu küllerin tane boyutu termik santraldeki kül toplama yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı kadar uçucu kül elde edilir.

Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm önem kazanmıştır. Uçucu kül ve benzeri ham maddelerin kullanımına ilişkin araştırma çalışmaları giderek artmıştır. Ülkemizde Avrupa Birliği uyum sürecinden dolayı ve Çevre Ajansına olan üyeliğimiz nedeniyle geri dönüşüm stratejilerini uygulamak ve hayata geçirmek zorluğu doğmuştur. Türkiye, geri dönüşüm stratejisi olarak termik santrallerden enerji üretimini arttırmayı hedeflemiştir. Katı fosil yakıtların (linyit gibi) yakıldığı bu santrallerde dönüşüm malzemesi olarak örtü ve uçucu kül çıkmaktadır. Geri dönüşümde bu malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Buna rağmen ülkemizde teknolojik ve ekonomik değeri olan uçucu külün değerlendirilmesi yeterli seviyede değildir (Aruntaş, 2006).

Uçucu küller açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar farklı renk ve tonlarda olabilirler. Üstelik çok ince taneli malzemedirler ve hafiftir. Yumuşaktır. Uçucu küllerin belirlenmiş standart özellikleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Uçucu külün inceliği Blaine ve Wager yüzey deneyleri ile belirlenir. Uçucu külün ince olması ve karbon miktarının az olması puzolanik aktivitesini artırır (Karahan, 2006).

İçindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça rengi koyulaşır. Külün içeriğindeki kireç ve SO₃ miktarına bağlı olarak sınıflandırılır. Bunlar;

- Silikoalüminatlardan meydana gelen ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu küllere silikoalüminoz uçucu küller
- Linyit kömüründe elde edilen ve diğerlerine oranla yüksek miktarlarda SO₃ ve CaO içeren uçucu küllere sülfokalsik uçucu küller
- Linyit kömüründen elde edilen, kireç ve silika oranı yüksek uçucu küllere de silikokalsik uçucu küller adı verilir (Çelik, 2004).

Çizelge 5.7. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Lkhagva, 2006)

Çap (µm)	Şekil	Renk	Özgül ağırlık	İncelik
1-200	Yuvarlak	Gri	2,2-2,7	Çimento İnceliğinde

Uçucu külün şekli ise yüzey geriliminden dolayı küreseldir. Uçucu kül içindeki CaO miktarı %10'un altında olduğunda düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olduğunda yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu kül olarak adlandırılır. Uçucu küller ASTM C 618 no'lu standardına göre kimyasal içeriklerine göre C ve F sınıfı olarak gruplanır. F tipi uçucu küllerde %10'dan az CaO, C tipi uçucu küllerdeki %10'dan fazla CaO bulunmaktadır. Uçucu küllerin bazıları birden fazla sınıfın özelliklerini taşıırken bazıları da hiçbir gruba dahil olmayıp kendine has özellik taşıyan durumda olabilmektedir.

Uçucu küllerin içinde SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO bulunmaktadır. Uçucu külün içinde MgO, SO₃ alkali oksitler de minor bileşen olarak mevcuttur. Uçucu küldeki temel oksitlerden; SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 ve CaO, %1-40 oranlarında bulunmaktadır (Çetinkaya, 2012). Bu bileşenlerin oranları uçucu külün cinsini belirlemektedir Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. ASTM C618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması (Üte, 2008)

Sınıf	Tarif
F	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ≥ %70, antrasit ve bitümlü kömürün yakılmasından elde edilmiş, puzolanik özelliğe sahip
C	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ ≥ %50, linyit veya bitümlü olmayan kömürün yakılmasından elde edilmiş, puzolanik özelliğin yanı sıra kendiliğinden bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip

Ülkemizde uçucu kül TS EN 197-1 (2002)'e göre sınıflandırılır. Uçucu küller silissi V ve kalkersi W gruplarına ayrılırlar. V sınıfı uçucu küllerin ana bileşenleri silisyum dioksit (SiO₂) ve alüminyum oksittir (Al₂O₃). Bunların yanı sıra azda olsa demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenler mevcuttur. Reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan azdır ve reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küllerin ana bileşenleri reaktif kireç (CaO), reaktif SiO₂ ve Al₂O₃'tir. Bunların yanı sıra azda olsa demir oksit (Fe₂O₃) ve diğer bileşenler bulunmaktadır. V sınıfı küllerin tersine reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazladır (Karahan, 2006).

1940'lı yıllarda ilk olarak baraj inşaatlarında kullanılmaya başlamıştır. Daha sonra kullanımı dünyada hızla yayılmıştır. Uçucu kül; çimento, beton, agrega, kerpiç, tuğla, gaz beton ve yalıtım malzemesi gibi temel inşaat malzemeleri üretiminde, baraj ile yol yapımında ve geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Uçucu kül ve kireç ilave edilmiş zeminlerde mukavemet artmaktadır. Kireç miktarına bağlı olarak yaklaşık

%50 oranında mukavemet artışı gözlenmiştir. Son yıllarda Geoteknik Mühendisliğinde uçucu külün kullanım alanlarının araştırılmaktadır. Kullanılan uçucu küllerden olumlu sonuçlar elde edilmiş ve uygulama alanlarını artmıştır. Özellikle yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda alternatif bir yöntem olarak uçucu kül kullanımı ile başarılı sonuçlar elde edilmeye başlamıştır (Şenol ve ark., 2003).

Uçucu küller çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu külden, özel işlemlerle dayanıklı hafif agrega elde edilmektedir. Uçucu küllerin genel kullanım alanları; beton ve asfalt yollar, zemin stabilizasyonu, kireç-kumtaşı blokları, katı atıkların stabilizasyonu, endüstriyel seramik boyalarının üretimi vb. Uçucu küllerin çeşitli alanda kullanımı ile hem ekonomik avantaj sağlanır hem çevre korunur

Dermatas ve Meng (2003), yaptıkları çalışmada ağır metalle kirlenmiş zeminleri iyileştirmişlerdir. Yaptıkları zemin stabilizasyonunda C sınıfı uçucu kül kullanmışlardır. Böylece hem zemin iyileştirmesi yapmış hem de çevreye olumlu katkıda bulunmuşlardır.

Çimento içinde kullanıma uygun olan uçucu küller çok ince yapıdadır, Al_2O_3 ve SiO_2 açısından zengindir. Ayrıca alkali içeriğinin düşük olması ve yanmamış karbon içeriğinin % 3'den az olması gerekmektedir. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$, küldenki SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikleriyle puzolanik tepkimeye girerler sonucunda fazladan (C-A-H ve C-S-H) oluşur. Bu tepkime alkali ve klor ortamlarına karşı dayanıklılığı artırır. Çünkü uçucu küller C-H ile birleşerek oluşturdukları C-S-H jelleriyle geçirimsizliği azaltır (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin betonda üç farklı kullanımı vardır. İlk yöntem çimento kullanımını azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması. İkinci yöntem ince agrega kullanım miktarının azaltılarak yerine uçucu kül kullanılması. Üçüncü yöntem ise bu ikisinin yerine uçucu kül kullanılması. Uçucu kül taze betonda kolay işlenebilmeyi sağlar. Sertleşmiş betonda ise sülfatlara karşı dayanıklılığı artırır ve su geçirimsizliğini azaltır. Betona ilave edilen uçucu kül ilk günlerde dayanım kazanma hızını azaltır ve priz süresini geciktirir. Daha fazla kür süresine ihtiyaç duyar (Sofyanlı, 2015).

Uçucu kül katkılı betonlarda su ihtiyacı azalır. Bunun nedeni uçucu külün ince tanelerinin içsel sürtünmeyi artırması. Bu ince taneler işlenebilirliği kolaylaştırır. Tanelerin küresel şekli agregalardaki sürtünmeyi azalttığı için betonun pompalanması kolaylaşır. Uçucu külün priz süresine etkisi ise hem kullanıldığı miktara hem de özelliklerine göre değişmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan çimentonun özellikleri de etkilidir. Genel olarak değerlendirildiğinde priz süresini geciktirdiği sonucuna varılır.

Uçucu kül katkısının betonda yavaş ısı oluşturması, iç gerilme ve rötreyi azaltması baraj yapılarında kullanıma avantaj sağlamıştır. Aynı zamanda geçirgenliği azalttığı için sülfata karşı dayanımı artırmaktadır (Karahana, 2006).

Uçucu kül kullanılan betonlarda akışkanlaştırıcı miktarında azalma görülür. Akışkan ve kolay işlenebilir betonlar üretilmiş olur. Ayrıca uçucu kül portland çimentoya göre daha ucuz bir malzeme olduğu için daha ekonomik betonlar üretilir. Uçucu kül, çimentonun hidrasyon ısısını düşürerek betonun çatlama riskini azaltır. Aynı zamanda betonun reolojik özelliklerini iyileştirir (Arslantürk, 2007).

Puzolanik özellik gösteren (silisli ve alüminli) uçucu küllerin çimento ve betonda kullanımı olumlu sonuçlar verir. Bu uçucu küller ince ve küresel tanelidir. Betonda işlenebilirliği artırır ve hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu ile kireçle reaksiyona girer böylece ilave bağlayıcı jel oluşturur. Linyit kömürünün yakılması ile elde edilen uçucu küllerde kireç oranı yüksektir ve bağlayıcılık özelliği gösterirler. Karbon oranı yüksek olan uçucu küllerin (Antrasit veya iyi yakılmayan kömürler elde edilen) çimento ve betonda kullanımı kaliteyi olumsuz etkiler. Su ihtiyacını artırır.

Ülkemizde 11 adet termik santral bulunmaktadır. Bunlar; Çatalağzı, Soma, Kangal, Tunçbilek, Orhaneli, Afşin-Elbistan, Seyitömer, Çayırhan, Kemerköy, Yatağan ve Yeniköy santralleridir. Bu santrallerden alınan uçucu küllerin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir (Çizelge 5.9, Çizelge 5.10).

Çizelge 5.9. Uçucu kül numunelerinin özgül ağırlık ve incelik sonuçları (Türker ve ark., 2009)

Nunume	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	90 µm Elek Bakiyesi (%)	45 µm Elek Bakiyesi (%)
Afşin Elbistan-1	2,93	12,3	32
Afşin Elbistan-2	2,78	10,4	27,5
Tunçbilek -3	2,34	6,7	26
Tunçbilek 4-5	2,18	3,6	22,4
Çatalağzı	2	21,4	38,7
Yeniköy-1	2,86	1,1	0,8
Yeniköy-2	2,81	0,7	0,8
Orhaneli	2,18	2,6	7
Yatağan	2,12	24,7	50,1
Kemerköy	2,83	26,4	47,8
Soma 1-2	2,41	33,7	52,6
Soma 3-4	2,28	4	12,4
Soma 5-6	2,2	3	11,5
Kangal-1	2,5	46,4	74,4
Kangal-2	2,47	54	78,6
Kangal-3	2,1	5,7	48,9
Seyitömer	2,13	3,2	47
Çayırhan	2,36	6,7	24,5

Çizelge 5.10. Uçucu kül numunelerinin puzolanik aktivite sonuçları (Türker ve ark., 2009)

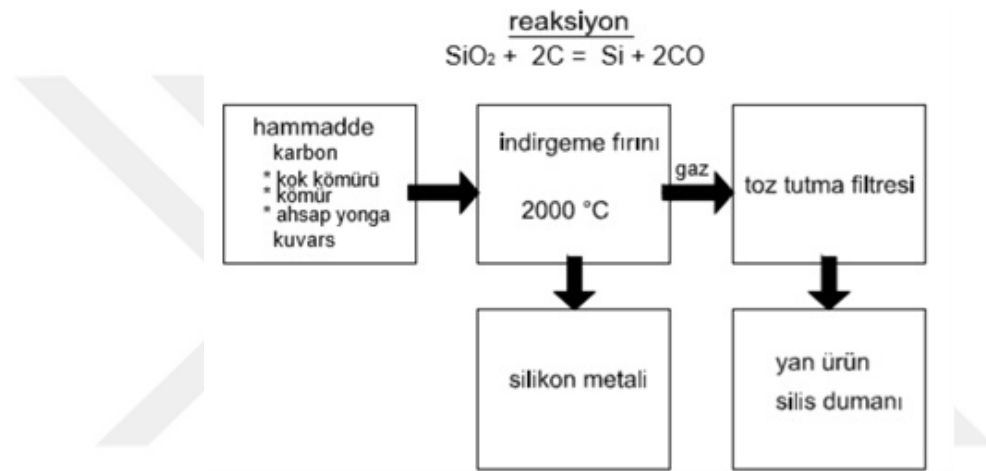
Nunume	7 Günlük Aktivite (%)			28 Günlük Aktivite (%)			90 Günlük Aktivite (%)		
	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı	Orj.	200 µm Altı	90 µm Altı
Afşin Elbistan-1	63	68	68	67	70	69	70	73	76
Afşin Elbistan-2	47	48	50	62	67	70	79	86	88
Tunçbilek -3	66	82	84	72	86	89	80	100	105
Tunçbilek 4-5	82	89	90	87	99	102	103	114	117
Çatalağzı	70	70	75	73	75	80	81	86	93
Yeniköy-1	63	72	72	65	73	77	74	79	85
Yeniköy-2	58	62	65	62	67	67	68	69	72
Orhaneli	96	95	98	108	110	110	126	126	127
Yatağan	66	71	74	69	77	80	77	87	86
Kemerköy	46	50	53	52	64	67	72	80	82
Soma 1-2	52	75	79	54	78	81	59	86	90
Soma 3-4	58	69	71	60	74	74	69	79	77
Soma 5-6	87	88	88	100	105	110	108	114	113
Kangal-1	68	75	76	77	86	90	89	92	97
Kangal-2	60	72	75	64	74	80	68	84	88
Kangal-3	73	70	72	77	77	78	82	85	86
Seyitömer	83	87	98	91	98	108	100	103	116
Çayırhan	61	75	83	72	86	91	-	-	-
	7 Günlük Basınç Dayanımı			28 Günlük Basınç			90 Günlük Basınç		
Referans PÇ 42,5	(N/mm ²)			Dayanımı (N/mm ²)			Dayanımı (N/mm ²)		
	35			46,4			54,4		

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, Kütahya ilinden Bursa Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Deneyler için L16 tasarım tablosuna uygun numunelerin hazırlanması kuru kum ağırlığının %0, 5, 10 ve 20'si oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. 16 farklı durum için hazırlanan numunelerde kullanılan uçucu kül oranları Çizelge 5.19'da verilmiştir. Seyitömer Termik Santrali'ne ait uçucu külün reaktif kireç miktarı %2,49'dur. TS EN 197-1e göre V sınıfıdır. Uçucu külün SiO₂+Al₂O₃+ Fe₂O₃ miktarı %88,71'dir. CaO miktarı %10'dan azdır ASTM C 618'e göre F sınıfıdır. Bu uçucu kül TS EN 450-1 2013'e uygun olup, betonda kullanım için uçucu kül incelik kategorisi N'dir. Kategori N %23 incelik değerine sahiptir. Kızdırma kaybı Kategori A'dır (Kütlece, en fazla % 5,0). Tanecik yoğunluğu 2050 kg/m³'tür.

5.1.5. Silis Dumanının İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Silis dumanı silisyum ve ferrosilisyum üretiminde, elektrik ark fırınlarında yaklaşık 200 °C sıcaklıkta, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli puzolanik bir malzemedir (ACI Committe, 1987).

Silis dumanı Şekil 5.7’de gösterildiği gibi hammadde karbonun 200 °C sıcaklıkta, yansması sonucu açığa çıkan silisyum ve demir silisyum alaşımlarının eritilmesiyle oluşan yan üründür. Bu küçük partiküller toz tutma filtresine takılır ve buradan alınarak geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılır.



Şekil 5.7. Silis dumanı üretimi (Akçaözöğlü, 2007)

Silis dumanı ilk kez 1960 yılında Norveç’ de çimento katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Yan atık olarak ülkemizde Antalya ilinde bulunan Eti Elektrometalürji A.Ş. tesislerinden temin edilmektedir. Blaine aleti ile silis dumanının özgül yüzey bazında inceliğini tayin edilir.

SiO_2 partiküllerinden oluşur. Düşük düzeyde puzolanik aktiviteye sahiptir. %85-%98’e kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince parçalardan oluşur. Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda bir araya geldiğinde hidrolik bağlayıcı özelliği gösterir. Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişkenlik göstermekte, rengi içerisindeki karbon miktarı arttıkça koyulaşmaktadır. Su ile bir araya geldiğinde siyah renge dönüşür. Özgül ağırlığı 2,2 -2,3 arasında değişmektedir (Sümer, 2012).

Silis dumanı taneleri portland çimentosundan 100 kat daha küçüktür. Parçaların boyutu 0,1-0,2 µm arasındadır. Çimento ile bir araya geldiğinde C₂S ve C₃S hidrotasyonu sonucu oluşan Ca(OH)₂'i bağlar ve yeni bir CSH jeli meydana getirir. Silis dumanı taneleri böylece çok sayıda daha küçük ve sağlam Ca(OH)₂ kristalleri oluşturur. Çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurur. Silis dumanın kimyasal özelliği üretilen metalin yada alaşımın cinsine göre değişmektedir. Silis dumanın özelliklerinin ülkelere göre değişiklik gösterdiği Çizelge 5.11'de görülmektedir. Silis dumanı yapısında demir, kalsiyum, karbon, magnezyum, sülfür, sodyum ve potasyum oksit çok az oranlarda bulundurulur

Çizelge 5.11. Silis dumanın ülkelere göre kimyasal kompozisyonu (Sümer, 2012)

Bileşen	USA	Norveç	Kanada	Türkiye
SiO ₂	90-93	90-96	89-95	93-95
C	1,3-2,6	0,5-1,4	2,1-4,2	0,8-1
Fe ₂ O ₃	0,4-0,7	0,2-0,8	0,1-3,1	0,4-1
Al ₂ O ₃	0,5-1,6	0,5-3	0,1-0,7	0,4-1,4
MgO	0,3-0,5	0,5-1,5	0,3-1	1-1,5
CaO	0,5-0,8	0,1-0,5	0,1-1	0,6-1
Na ₂ O ₃	0,1-0,3	0,2-0,7	0,1-0,2	0,1-0,4
K ₂ O	1-1,2	0,4-1	0,5-1,4	0,5-1
S	0,1-0,2	0,1-0,4	0,1-0,2	0,1-0,3
Kızdırma Kaybı	1,4-2,8	0,7-2,5	2,3-4,4	0,5-1

Silis dumanının bazı standartları sağlaması gerekmektedir, bunlar;

Amorf SiO₂ = en az %85

Kızdırma kaybı= en fazla %4

Özgül yüzey = en az 15 m²/g

Alaşımındaki silikon miktarı arttıkça, silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artmaktadır. Yüksek silis oranı, silis dumanını etkin bir puzolan haline getirmektedir. Silikon oranına göre SiO₂ miktarı Çizelge 5.12'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.12. Silikon oranına göre SiO₂ miktarları (Akçaözöğlü, 2007)

Ferrosilikon alaşım/metal	SiO ₂ 'nin silis dumanı içindeki miktarı
%50 ferrosilikon	%72-77
%75 ferrosilikon	%84-88
%98 Silikon	%93-98

Silis dumanı aşağıdaki formlarda bulunur;

- Yoğunlaştırılmamış (elde edildiği gibi) silis dumanı
- Yoğunlaştırılmış (sıkıştırılmış) silis dumanı
- Yoğunlaştırılmış formülize silis dumanı
- Şerbet halinde silis dumanı
- Şerbetlenmiş formülize edilmiş silis dumanı
- Pelletize silis dumanı

Silis dumanı tanelerinin çok küçük ve ince olması ayrıca yüksek reaktiviteye sahip olması nedeniyle beton üretiminde kullanılabilir. Ayrıca erken yaşta yüksek dayanım elde etmek istenen betonlarda süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır.

Betonda kullanılan silis dumanı su ihtiyacını artırır, işlenebilirliği azaltır, priz süresini etkilemez, dayanım kazanma hızını artırır, geçirimsizliği azaltır ve kimyasal dayanımı artırır (Gündeşli, 2008). Silis dumanı beton yüzeyinde buharlaşmanın olduğu ortamlarda plastik büzülme olmasına ve sebep olur ve çatlama riskini artırır.

Silis dumanlı çimento üretilirken portland çimentosu klinkeriyle ve küçük miktarda alçı taşı öğütülür. Betonda silis dumanının etkisi çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit, $Ca(OH)_2$, bağlayarak çimento hamurudaki boşlukların doldurulmasıyla görülür. Silis dumanı ilave edildiğinde betonun basınç dayanımı artar, işlenebilirliği azalır. Betonun geçirimsizliği üzerinde olumlu etkiler meydana gelir (Arslantürk, 2007).

Kendiliğinden yerleşen s/ç oranı düşük betonlarda silis dumanı ilavesi iç terlemeyi azaltır. Taze betonda oluşacak boşluk oranının azalmasını sağlar. Hidratasyon ısısının düşüşünü geciktirdiği için betonun priz alması da gecikir. Taze betonda segregasyonu azaltır. Sertleşmiş betonda belirli oranda kullanıldığında (%10-%15) dayanımı artırmaktadır. Silis dumanı uçucu kül gibi doğal katkılarla veya kimyasal akışkanlaştırıcılarla birlikte de kullanılabilir. (Keçeci, 2018)

Silis dumanı katkılı betonlarda eğilme dayanımı tıpkı basınç dayanımı gibi artmaktadır. Bu artış basınç dayanımı kadar fazla olmasa da beton kalitesi açısından önemlidir. Silis dumanı katkılı betonların yarmada çekme dayanımında da artış olmaktadır. Sengupta (2005) yaptığı çalışmalarda en ideal oranın %10-%20 olduğunu belirtmiştir (Acer, 2018).

Silis dumanı yay çeliklerinin üretiminde, dinamo ve jeneratörde kullanılan silisyumlu saçlarda ve transformatörler gibi birçok üründe kullanılır. Demir-çelik sanayisinde oksit giderici olarak, çeliğin korozyon direncini ve mukavemetini arttırmak için alaşım elemanı olarakta kullanılır (Değirmenci, 2006).

Silis dumanının kullanım alanları; yüksek performanslı beton üretimi (Otoyol köprüleri, liman vb. yapılar), onarıcı ürün olarak kullanımda ve tünel kazıları, kaya stabilizasyonu, su yapılarındaki kolon veya kazıkların rehabilite edilmesi (Sofyanlı, 2015).

Bu çalışmada kullanılmak üzere Antalya ilinden Eti Elektrometalurji A.Ş.'den silis dumanı temin edilmiştir. Kullanılan bu silis dumanın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14'de verilmiştir. Deneyler için L16 tasarım tablosuna uygun numunelerin hazırlanması kuru kum ağırlığının %0, 5, 10 ve 20'si oranlarında silis dumanı kullanılmıştır. 16 farklı durum için hazırlanan numunelerde kullanılan uçucu kül oranları Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.13. SiFeCr kule tozuna ait kimyasal analiz sonuçları

%Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	C	S
0,37	91,92	0,2	0,42	20,6	3,69	0,207	0,067

Çizelge 5.14. SiFeCr Kule Tozuna Ait Elek Analiz Sonuçları

Elek Analizi (mm)	%
+0.250	9,49
+0.125	37,53
+0.074	27,82
+0.044	21,63
-0.044	3,53

5.1.6. Çimentonun İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Çimento insanlık tarihinde çok eski zamanlarından beri kullanılan bir bağlayıcıdır. Çimento sözcüğü, yontulmuş taş anlamındaki Latince “Caementum” sözcüğünden türetilmiştir. Çimento su ile bir araya geldiğinde hidrasyon reaksiyonları gerçekleştirir. Bu reaksiyonun başlangıcında ve çimento hamur kıyamında şekil verilebilen bir malzemedir. Reaksiyon sonrası priz alır ve sertleşir. Sertleşen çimento suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır.

Çimentolar hem havada hem de suda sertleşebilmektedir ve hidrolik özeliğe sahip güçlü bağlayıcıdır (Şafak, 2014). Çimentonun ana bileşeni silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitlerdir. Çimento minerallerini oluşturan hammaddeler; kalker, kil ve ayrıca bunların doğal orantılanmış hali olan marndır. Marn, doğal olarak kil ve kalker bileşimini taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özelliğe sahip olduğundan ideal çimento hammaddesidir. Kireç taşından veya kalkerden kalsiyum karbonat elde edilir. Kilden ise silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimleri karşılanır.

Çimento katkı malzemeleri olarak puzolanik maddeler, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, alçı taşı ve demir cevheri kullanılır. Katkı maddeleri çimentonun maliyetini azaltmak içinde kullanılabilir. Puzolanik maddeler %10-30 oranında kullanılmaktadır. Uçucu kül Ca(OH)_2 ile tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcı olarak görev yapar. Alçıtaşı olarak genellikle jips tercih edilir ve çimento sanayinde genellikle hiçbir işleme tabi tutulmaksızın doğal haliyle kullanılır. Demir cevherlerinden hematit, götit ve limonit çimento sanayinde kullanılır (Şafak, 2014).

Çimentonun su, agrega ve gerektiğinde katkı maddeleri ile bir araya gelerek uygun bakım koşullarında sertleşmesi ile beton meydana gelir. Beton yapımında kullanılan çimentolar su içinde priz alırlar ve sertleşirler. Bu çimentolar hidrolik çimentolardır. Portland çimentosu, hidrolik çimentolar grubunun en önemli üyesi olup, özellikleri Çizelge 5.15'te verilmektedir. Portland çimentolar diğer çimento türlerine göre daha pahalıdır.

Çizelge 5.15. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve ana bileşen miktarları (Gündeşli, 2008)

Oksitler	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktarı %	Ana bileşen miktarı
CaO	C	63	
SiO ₂	S	20	C ₃ S=54,1
Al ₂ O ₃	A	6	C ₂ S=16,6
Fe ₂ O ₃	F	3	C ₃ A=10,8
MgO	M	1,5	C ₄ AF=9,1
SO ₃	S	2	
Na ₂ O+ K ₂ O	N+K	1	
Kızdırma kaybı	K.K	2	
Çözünmeyen kalıntı	Ç.K	0,5	
Diğer		1	

Klinkerin ağırlığının çok az bir yüzdesi (yaklaşık % 4-6'sı kadar kalsiyum sülfat (CaSO_4) ile) öğütülür ve elde edilen çok ince öğütülmüş toz ürün portland çimentosudur. Portland çimentosunun, bir miktar alçıtaşı ilave edilerek öğütülmesiyle sülfata dayanıklı çimento elde edilir.

KÜHL (H. Zement Chemie Bd. II. Berlin, 1958) ham maddeyi iki ana gruba ayırmıştır. Buna göre;

1. Kireç taşı, alçı taşı, dolomit ve magnezit bazik özellik gösterir
2. Kil, marn, silisli kireç, silis, boksit ve demir hidrolitik hidrolik özellik gösterir (Gündeşli, 2008)

Çimentonun üretiminde asit ve bazik öğeler birbiriyle birleşerek portland çimentoların dört ana bileşenini oluşturur. Bunlar: Dikalsiyum Silikat, Trikalsiyum Silikat, Trikalsiyum Alimünat ve Tetrakalsiyum Alimüno-Ferrit Silikatlar. Silikatlar çimentonun esas dayanımını etkileyen bileşendir. Hidratasyon sonunda kalsiyum silikat hidrat ve sönmüş kireç meydana gelir. Çimentonun priz alma süresi en erken 1 saat en geç 10 saat olmalıdır. Çimento tanesi inceldikçe mukavemeti artar ve geçirimsizliği azalır (Halilov, 2003).

Çimento 6 farklı dayanım sınıfına sahiptir bunlar Çizelge 5.16'da verilmiştir. Dayanım değerinin yanında belirtilen 'R' harfi erken dayanım kazandığını belirtmektedir (Halilov, 2003).

Çizelge 5.16. Çimento dayanım sınıfları (Halilov, 2003)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanım Sınırları (N/mm^2)		
	2 Gün	7 Gün	28 Gün
32,5		≥ 16	$\geq 32,5$ $\geq 52,5$
32,5R	≥ 10		$\geq 32,5$ $\geq 52,5$
42,5	≥ 10		$\geq 42,5$ $\geq 62,5$
42,5R	≥ 20		$\geq 42,5$ $\geq 62,5$
52,5	≥ 20		$\geq 52,5$
52,5R	≥ 30		$\geq 52,5$

Çimento çeşitleri;

- CEM I portland çimentosu
- CEM II portland kompoze çimento
- CEM III portland yüksek fırın cürüflu çimento
- CEM IV puzolonik çimento
- CEM V kompoze çimento

CEM I Portland Çimentosu: Portland çimentosunun alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir.

CEM II: Puzolanik madde ve portland çimento klinkerinin alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir.

CEM III Yüksek Fırın Cürufllu Çimento: % 36-95 arasında belirtilen oranlarda fırın cürufunun, portland çimentosu klinkerinin ve kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi ile elde edilir.

Portland Kompoze Çimento: Portland çimentosu klinkerinin, katkı maddelerinin ve kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi ile elde edilir.

CEM V Kompoze Çimento: Portland çimentosu klinkerinin ve kalsiyum sülfatın öğütülmesi ile elde edilir.

Diğer özel portland çimentoları sülfata dayanıklı ve beyaz portland çimentosudur.

Sülfatlara Dayanıklı Çimento: C3A miktarı en çok %5 olan portland çimentosu klinkerinin alçıtaşıyla öğütülmesi ile elde edilir.

Beyaz Portland Çimentosu: Özel kireç taşı ile birlikte pişirilmesi ile elde edilir. Rengi beyaz olduğu için estetik amaçlı mimaride kullanılır.

Portland çimentonun avantajları:

1. Köprügü ayağı, baraj yapıları, setler ve diğer su yapılarında kullanıma uygundur, dayanımlıdır.
2. Reaksiyon özellikleri dolayısıyla sıcak havalarda kullanıma uygundur.
3. Dona karşı dayanımı fazla ve su geçirimsizliği azdır.

Portland çimentonun dezavantajları:

1. Mukavemetini geç kazanır.
2. Soğuk iklimlerde hidrasyon ısısı düşük olduğu için uygun değildir.

Çimento ile iyileştirme kumlu ve siltli zeminler ile düşük plastisiteli killerde en etkili yöntemdir. Organik zeminler hariç tüm zemin cinslerinde kullanıma uygundur. Özellikle kum-çakıl türü zeminlerde daha efektif çalışır. Zeminde bulunan su çimento ile bir araya geldiğinde çimento hızlı bir şekilde hidrasyona uğrar. Böylece zemin boşluklarını doldurmaktadır.

Tumluer (2006), yaptığı çalışmada kumlu zemine çimento ve çimento cüruf ilave etmiştir. Çimento ve çimento cürufunun karışım oranlarının artmasıyla mukavemetin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada kompaksiyon deneyleri yapılmış optimum su muhtevası %5,81 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılmak üzere Konya Çimento fabrikasından CEM I Portland Çimentosu temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 5.17’de verilmiştir. Deneyler için L16 tasarım tablosuna uygun numunelerin hazırlanması kuru kum ağırlığının %0, 5, 10 ve 20’si oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. 16 farklı durum için hazırlanan numunelerde kullanılan çimento oranları Çizelge 5.19’da verilmiştir. Deneylerde kullanılan çimento TS EN 197-1 Uygunluk Kriterleri, TS EN 197-2 Uygunluk Değerlendirmesi ve TS EN 196 (Çimento Deney Yöntemleri) standartlarını sağlamaktadır.

Çizelge 5.17. CEM I Portland 42.5 R çimentosu kimyasal özellikleri

Ç.K	K.K	d	Blaine	Hacim Genleşmesi	Priz Başlangıcı	2 Gün	7 Gün	28 Gün
0,5	3,5	3,12	3450	1	185	28	40	50
SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
19,4	4,7	3,9	64,5	1,1	3,2	0,7	0,35	0,03

5.1.7. Deney Tankı

Model kazıkları zemin ortamında yüklemek için deney kumunu belirli bir sıklıkta ($D_r=0,90$) yerleştirildiği 60 cm çapında ve 110 cm yüksekliğinde çelikten imal edilmiş silindirik deney tankı kullanılmıştır (Şekil 5.8). Deney tankının çap ve yüksekliği, model kazık çap ve boyu dikkate alınarak sınır koşullarından etkilenmeyecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 5.8. Deney tankı

5.2. Yöntem

5.2.1. Taguchi Optimizasyon Yöntemi

Bir üretimi veya deneyi etkileyen değişik parametrelerin sonuç üzerinde etkilerini araştırmak için farklı metodlar kullanılır. Parametre sayısına göre tam veya kısmi faktörel tasarım yapılır. Bu iki yöntemde de etkileşimler dikkate alınmamaktadır.

Dezavantajları;

- Parametre ve parametre düzeylerinin fazla olması deneylerin yapım ve değerlendirme süresini uzatmaktadır. Bu durum çalışma ve araştırma maliyetini de artırır.
- Aynı çalışma için kısmi faktöriyel ile yapılan farklı tasarımlarda farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.
- Her faktörün sonuç (hedef değer) üzerinde ki etkisini belirlemek oldukça zordur. Çok faktörlü ve çok seviyeli deneylerin yapılması, analiz edilmesi ve değerlendirilmesi zordur.

Taguchi tarafından tam faktöriyel tasarıma alternatif olabilecek yeni bir optimizasyon yöntemi gerçekleştirilmiştir. Taguchi oluşturduğu kalite anlayışını yedi temel üzerine kurmuştur;

1. Bir ürünün kalitesi o ürünün kullanımı sırasında toplumda meydana getirdiği etkiler ölçülür.
2. Ürünlerin kalitesini geliştirme ve maliyet azaltma çalışmalarının sürekli olması gerekir.
3. Hedef değerden saptama oranının azaltılması için çalışmalıdır.
4. Performans üzerindeki sapmanın tüketici üzerindeki kaybı, performans karakteristiğinin hedef değerden sapma miktarının karesi ile doğru orantılıdır.
5. Ürünün ve bu ürünün üretildiği prosesin tasarlanması sırasında, kalitesi ve maliyeti de belirlenir.
6. Ürünün performans karakteristiğinin üzerinde etkili olan parametrelerin etkileri kontrol altına alınarak, ürünün performansındaki sapma azaltılabilir.
7. İstatistiksel deney tasarımları, ürünün performansındaki değişkenliğe etki eden parametrelerin etkilerini azaltmada kullanılabilir.

Taguchi'ye göre kaliteli bir ürün, ürünün performans özelliklerinin iyileştirilmesiyle ortaya çıkar. Yöntemin asıl amacı; hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmaktır. Öncelikle ürünün performansında değişkenliğe sebep olan kontrol edilebilir faktörler belirlenir ve kontrol edilemeyen faktörlerden en az etkilenecek şekilde ürün ve proses geliştirme süreci tasarlanır (Şanyılmaz, 2006).

Taguchi'nin kalite kontrol anlayışı diğer kalite kontrol anlayışlarından farklıdır. Geleneksel yöntemler kaliteyi kar üzerinden değerlendirirken, Taguchi için esas olan üründür. Taguchi tüm ekibi ve tüm süreci baz alır. Taguchi'nin tasarım anlayışı ile geleneksel kalite anlayışı arasındaki fark Çizelge 5.18'de verilmiştir.

Çizelge 5.18. Geleneksel kalite anlayışı ve Taguchi'nin kalite anlayışı arasındaki farklar (Karagöz, 2014)

	Geleneksel Kalite Kontrol Anlayışı	Taguchi'nin Kalite Kontrol Anlayışı
1	Kalite maliyeti artırır.	Kalite maliyeti azaltır.
2	Kalite kontrolle sağlanır.	Kalite elde etmek için kontrol en son çaredir.
3	Kalite sadece uzmanların gözetimleri ve iradeleri sayesinde sağlanır.	Kalite tüm personelin ortak ürünüdür.
4	İşletmelerde en iyi üretimi gerçekleştirenler ödüllendirilirken, en kötü üretimi yapan cezalandırılır.	İşletmelerde en iyi üretimi gerçekleştirenler ödüllendirmek ve en kötü üretimi yapan cezalandırmak ilerde ekip çalışmasının yapılmasını imkânsız hale getirecektir.
5	En ekonomik malzemeyi üreten yan sanayi ile çalışmalıdır.	Üretim politikası kalite üzerine olan yan sanayi ile çalışmalıdır.
6	Kar sağlamak için gelir seviyesi artırılıp, maliyet düşürülmelidir.	Kar sağlamak için ürüne olan talep artırılmalıdır.
7	Kar oranları bir işletmede gelişmenin göstergesidir.	Kar oranları bir işletmede sadece geçmişte sağlanan gelişmenin göstergesidir, gelecek için bir şey ifade etmez.

Taguchi'nin deneysel tasarım aşamaları;

- Değerlendirme yapılacak kontrol edilebilir faktör ve etkileşimlerin seçilmesi,
- Faktör düzeylerinin (seviyelerinin) belirlenmesi,
- Uygun ortogonal tasarım tablosunun seçilmesi,
- Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması,
- Numunelerin hazırlanması,
- Testlerin yapılması,
- Sonuçların analiz edilmesi (S/N ve Varyans analizleri),
- Doğrulama deneylerinin yapılması (Taylan, 2009).

Çizelge 5.19 'da bu tez çalışmasında kullanılan 5 parametrelilik ve 4 seviyeli bir ortogonal dizisi gösterilmiştir. Çizelgedeki F1, F2, F3, F4 ve F5 çalışmada seçilen parametreleri gösterirken, her deney numarası satırındaki rakamlar ise parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 5.19. Ortogonal dizin L16

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri				
	F1	F2	F3	F4	F5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	2	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Bu tabloda da görüldüğü gibi $4^5 = 1024$ adet deney Taguchi yöntemiyle 16 adet deneye indirgenmiştir.

Performans istatistiğinde, kontrol edilebilen faktörler, farklı seviyelerde karşılaştırılır ve en uygun faktör-seviye kombinasyonu seçilir. Taguchi kontrol edilebilen faktörlerin ve kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisini ölçmek için ortalama ve standart sapmanın yanında S/N (Sinyal/Gürültü) olarak adlandırılan performans istatistiği (değişim indeksi) kullanılmaktadır.

S/N oranı ile ortalama ve standart sapma, aynı analiz tekniği ile analiz edilmektedir. S/N oranı, ortalamanın standart sapmaya oranıdır. Bu şekilde oranlamak ortalama veya standart sapmanın tek tek kullanılmasına göre daha dengeli ve güvenilirdir. Taguchi performans karakteristiğinde olması istenilen durumlara göre S/N oranları tanımlanmaktadır. Bunlar;

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right), \quad \text{en küçük, en iyi durumu için} \quad (5.1)$$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right), \quad \text{en büyük, en iyi durumu için} \quad (5.2)$$

$$S/N = 10 \log(Y^2/S^2), \quad \text{optimum, en iyi durumu için} \quad (5.3)$$

$$S/N = -10 \log_{10}(\text{MSD}) \quad (5.4)$$

MSD, hedef değer etrafındaki sapmanın karelerinin ortalaması olup;

Hedef değer maksimum olması durumu için;

$$\text{MSD} = \left\{ \frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right\} / n \quad (5.5)$$

Hedef değer minimum olması durumu için:

$$\text{MSD} = (Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2) / n \quad (5.6)$$

Hedefin bilinen (optimum) bir değer olması durumu için:

$$\text{MSD} = \left\{ \left[(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2 \right] / n \right\} \quad (5.7)$$

eşitlikleri ile belirlenir.

Yukarıda S/N oranları için belirtilen eşitliklerde;

n: Bir deneydeki tekrar sayısı

Y: Performans değeri (ölçülen değer)

S²: Varyans

En Küçük + En İyi → Y'nin hedef değeri sıfıra yakın olur.

En büyük + En iyi → Y'nin hedef değeri sonsuza kadar olabilir.

Optimum en iyi Y için belli bir hedef değer verildiğinde hedef değer en iyi durumdadır.

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

$$Y_{\text{beklenen}} = \sqrt{\frac{1}{MSD}} \quad (5.8)$$

5.2.2. Serbest Basınç Mukavemeti için Polyester Esaslı Numunelerin Hazırlanması

Her 1000 gr'lık kum içinde kullanılacak doymamış polyester oranı Taguchi Yöntemi ile belirlenmiştir. Polyesterin %1,5 oranlarında hızlandırıcı (H) ve H/S=3 olacak şekilde sertleştirici (S) kimyasal malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan hızlandırıcı ve sertleştirici miktarı oldukça az olduğu için kaplardan şırınga yardımı ile alınmıştır. Kap olarak su şişesi kapakları kullanılmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Hızlandırıcı (mor) ve sertleştirici (şeffaf)

Beş adet 50 mm çap ve 100 mm yükseklikte numune kabını dolduracak şekilde 1500 gr'lık kum için gerekli doymamış polyester, hızlandırıcı ve sertleştirici miktarı hesaplanmıştır. Polyesterin içerisine sırasıyla H ve S ilave edilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi mor renge dönüşmüştür. Bu karışım ayrı bir kapta iyice karıştırılmıştır.



Şekil 5.10. Polyester, hızlandırıcı ve sertleştirici karışımı

Daha sonra L16 tasarım tablosunda belirlenen oranlarda silis dumanı, uçucu kül, çimento ve su tartılarak sırasıyla karıştırma kabına eklenmiştir. Karışımın homojen olması için karıştırma işlemi her aşamada devam ettirilmiştir. Karıştırma süresi 3-5 dakika olarak Şekil 5.11'de görüldüğü gibi elle uygulanmıştır.



Şekil 5.11. Karışımın hazırlanması

Karıştırma sonrasında, hemen 50 mm çaplı ve 100 mm yüksekliğe sahip silindirik kalıplara dökülerek sabit ağırlıktaki bir tokmakla sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 5.12’de görüldüğü gibi rengi açık gri, gri ve siyah renkli olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.12. Kalıba yerleştirilen numuneler

5.2.3. Kazık Yükleme Deneyi için Polyester Esaslı Model Kazıkların Üretilmesi

L16 tasarım tablosuna uygun 16 farklı karışım için hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin belirlenmesinden sonra 8,10 ve 15 nolu deneylere ait karışım oranları kullanılarak içi dolu kazıkların hazırlanması karar verilmiştir. Bu şekilde hazırlanan üç farklı karışım, 70 mm çaplı ve 400 mm yükseklikli silindirik kalıplara dökülerek 28 gün süre ile beklenilmiştir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13. Hazırlanan model kazıklar

Polyester esaslı içi boş model kazık elde etmek için 12 nolu deneye ait karışım oranları kullanılmıştır. Hazırlanan karışım malzemesi dış çapı 70 mm, yüksekliği 400 mm ve et kalınlığı 10 mm olan kalıplara dökülerek 28 gün süre ile beklenilmiştir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Hazırlanan içi boş mini kazıklar

H ve S oranları arttıkça reaksiyon ısısının arttığı ve sertleşmenin hızlandığı kalıplara dokunulduğunda anlaşılmıştır. Polyester ve su oranı artıkça karışımın daha akışkan kıvamlı hale geldiği tespit edilmiştir. Bu durum sertleşme oranını geciktirmektedir. Numuneler sertleştikten sonra 28 gün sonra kalıptan çıkarılmıştır. Sıkı kum ile dolu deney tankı içerisinde kazık yükleme deneyleri yapılmıştır.

5.2.4. Serbest Basınç Mukavemeti Deneyleri

Serbest basınç deneyi hızlı ve pratik bir deney olmasından dolayı çok tercih edilen bir deneydir. Hazırlanan numunenin çap/boy oranı genellikle 1/2 olarak belirlenir. Numuneler aksenal yüke (tek eksenli) tabi tutularak serbest basınç mukavemeti hesaplanır. Bu tip deneyler, gerilme kontrollü veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Yaygın olarak sabit yükleme hızında birim boy kısalması kontrollü olanı tercih edilmektedir.

Numunede düşey yönde eksenel birim şekil değiştirme (%);

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad \text{Eşitliği ile belirlenir. Bu eşitlikte} \quad (5.9)$$

ΔH : Numunede ölçülen eksenel şekil değiştirme (mm)

H_0 : Numunenin ilk boyu (mm)

Kırılma (göçme) anındaki deformasyon sonrası kesit alanı (A_f) ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$A_f = \frac{A_0}{1-\varepsilon} \times 100 \quad (5.10)$$

Hızlı göçme koşullarında deney başlangıcındaki numune hacmi ile kırılma anındaki numune hacminin değişmediği kabul edilir.

A_0 : Numunenin deney başındaki kesit alanıdır. Numunenin serbest basınç dayanımı (mukavemeti) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$q_u = \frac{P_{\max}}{A_f} \quad (\text{kPa}) \quad (5.11)$$

Burada; P_{\max} , Göçmeyi sağlayan eksenel yük (kN) tür. Gevrek kırılma durumlarında $A_0=A_f$ kabul edilebilir.

Bu çalışmada polyester esaslı kazık imalatını etkileyen malzemelerin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etki oranlarını ve optimum karışım oranlarını belirlemek için 16 farklı karışım oranlarında hazırlanmış 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğindeki numuneler üzerinde TS 1900-2'de belirtildiği şekilde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Gerilme kontrollü olarak yapılan deneylerde plaka yükleme deney aletinin pistonu ve yükleme düzeneği kullanılmıştır.

Serbest basınç mukavemeti $q_u \leq 10$ MPa olan numunelerde (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 11) sabit hızda (1mm/dk) yükleme yapılarak numunenin kırıldığı veya akmanın gerçekleştiği yük belirlenmiştir.

Serbest basınç mukavemeti $10 \text{ MPa} \leq q_u \leq 20 \text{ MPa}$ olan numunelerde (9, 12, 13 ve 14) yükleme boşaltma- tekrar yükleme kademeleri uygulanmıştır.

Serbest basınç mukavemeti $q_u > 20$ MPa olan numunelerde (10, 15 ve 16) ise yükleme (10 MPa)-boşaltma (0 MPa)- tekrar yükleme (kırılana kadar) kademeleri uygulanmıştır. Her karışım için en az iki numunede olmak üzere serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Yükleme boşaltma işlemi ile malzemenin sünekliği ve enerji sönümleme kapasitesinin gözlenmesi hedeflenmiştir. Böylece tasarımda kullanılan polyesterin mini kazık üzerindeki elastik ve plastik deformasyon etkileride araştırılmıştır. Numunelerde oluşacak deformasyonları belirlemek amacıyla deney düzeneğine deformasyon saati yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneylerin yükleme boşaltma işleminin grafikleri Ek 1 de tezin ekler kısmında verilmiştir. Oluşan grafiklerde boşaltma işleminin deformasyonu azalttığı ve malzemenin sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Her numune Şekil 5.15 'te görüldüğü gibi gevrek, diagonal ve akma şekillerinde kırılmıştır. Baş kısmı deforme olan, yarılan, çatlayan ve hasar almayan numuneler görülmüştür.



(a)



(b)



(c)

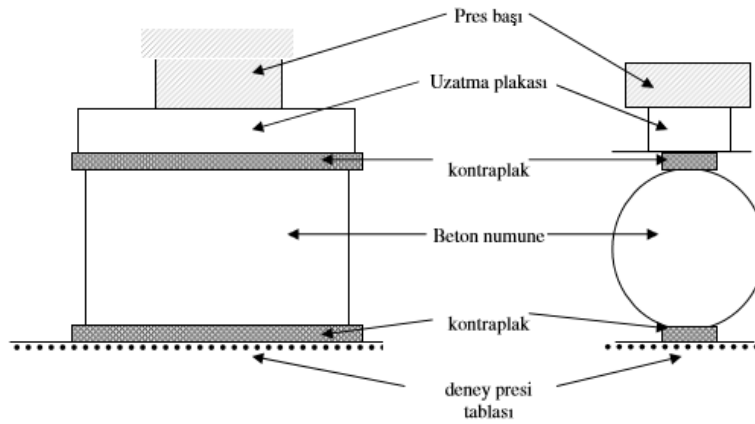
Şekil 5.15. (a),(b) ve (c) Serbest basınç deneyi ile kırılan numuneler

5.2.5. Yarmada Çekme Deneyi

Betonun çekme dayanımını belirlemek amacıyla ilk kez Brezilyalı Fernando Carneio çalışma yapmıştır. Bu çalışmayı geliştiren ise Japonlar olmuştur. Test cihazının basınç levhaları arasında yatay vaziyette beton silindir numune yerleştirilir. Şekil 5.16'da gösterilen deney düzeneğinde numuneye basınç uygulanır. Düşey çap doğrultusunda yarılmayla parçalanma oluncaya kadar yük artırılır.

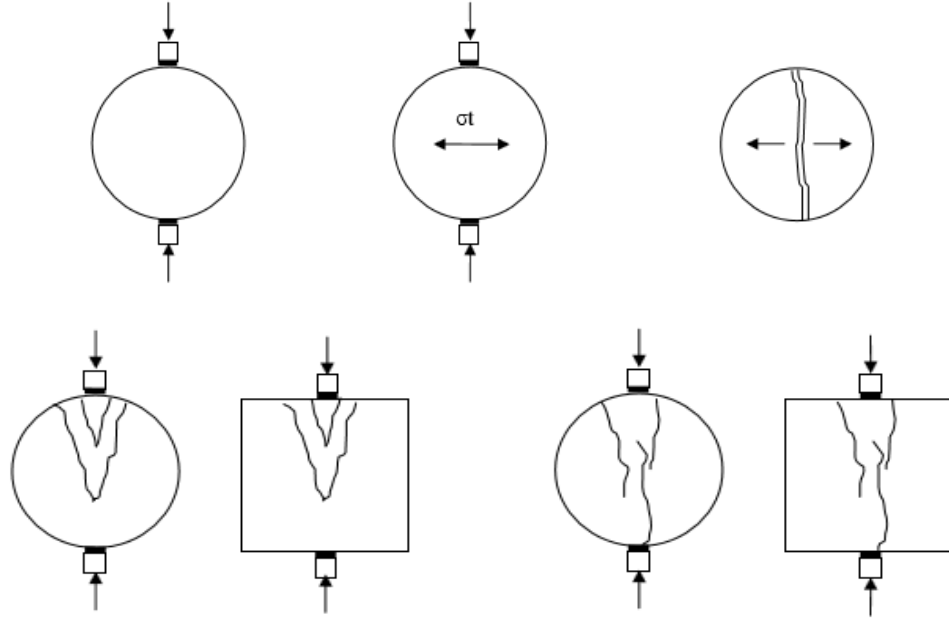
Yüklemeye alanında numuneye iki yönden eşit artan bir yüklemeye yapılır. Yüklemeye yapılan her iki yüzeye ağaçtan yapılan ince tabakalar yerleştirilir böylece yerel göçme engellenir.

Yatay olarak yerleştirilen silindir numuneye basınç uygulandığında numune üzerinde, biri düşey yönde oluşan basınç gerilmesi diğeri ise bu eksene dik doğrultuda oluşacak olan yataydaki çekme gerilmesi olarak iki farklı gerilme oluşur.



Şekil 5.16. Yarma deneyi düzeneği (Arslan, 2006)

Yarma deneyindeki dayanım değeri, kırılma moduna göre betonun gerçek çekme dayanımına daha yakındır. Yarma dayanımı direkt çekme dayanımından %5-12 arasında daha fazladır. Deneyde kırılmalar Şekil 5.17'de gösterildiği gibi farklı şekillerde olabilmektedir. Direkt kırılma ve farklı kırılma modları olabilir.



Şekil 5.17. Kırılma şekilleri (Arslan, 2006)

Yarmada çekme aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\sigma_{\zeta} = \frac{2xP}{\pi x h x d} \quad (5.12)$$

- σ_{ζ} : Yarmada çekme dayanımı, N/mm²
P: Disk numunesinin taşıyabildiği en büyük yük değeri, N
h: Disk numunesinin yüksekliği, mm
d: Disk numunesinin çapı, mm

Bu çalışmada polyester esaslı numunelerin çekme dayanımını (dolaylı olarak) belirlemek amacıyla yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Yarmada çekme deneyleri iki metal plaka arasına silindirik numunenin yatay olarak yerleştirilmesi ve sabit hızda yüklemesi yapılmıştır (Şekil 5.18). Plakaların alt ve üst yüzeylerinin numune ile direk temasını engellemek için ahşap çubuk parçalar aynı doğrultuda yapıştırılmıştır. Hız 0,4 mm/dk olarak seçilmiştir. Deney sonucunda numunelerin taşıyabildikleri en büyük yarmada çekme yük değerleri belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.18. (a) ve (b) Yarmada çekme deneyi ile kırılan numune örnekleri

5.2.6. Kazık Yükleme Deneyi

Dış çap $D=70$ mm ve $L=400$ mm boyunda içi dolu imal edilen model kazıkların ve dış çap $D=70$ mm, $L=400$ mm boyunda ve $T= 10$ mm et kalınlığında içi boş imal edilen model kazıkların yük taşıma kapasitelerini belirlemek için kazık yükleme deneyleri yapılmıştır.

Yükleme sisteminin altına metal plaka sabitlenmiş ve deformasyonu ölçmek için bu plakaların üzerine Şekil 5.19'da görüldüğü gibi iki adet LVDT yerleştirilmiştir. Plakanın altına yükleme esnasında uygulanan yükü ölçmek için yük hücresi yerleştirilmiştir.



Şekil 5.19. LVDT ve yükleme sistemi

Deney kumu, tank içerisine, önce kazık alt ucu seviyesine kadar tabakalar halinde serilip tokmak (kalıp) belirli yükseklikten düşürülerek sıkıştırılmıştır. Ön deneyler sonucunda sıkıştırılan kumun rölatif sıklığı $D_r = 0,90$ olarak belirlenmiştir. Model kazık tam düşey olacak şekilde kum üzerine sabitlenerek tankın üst kısmında benzer şekilde tabakalar halinde serilerek sıkıştırılmıştır. Yükleme hızı 2,5 mm/dak seçilerek imal edilen içi dolu ve boş model kazıklar için yükleme deneyleri tekrarlanmıştır. Kazık yüklendikten sonra üzerindeki yük kaldırılmış 1 saat beklenmiş tekrar yüklenmiş tekrar 1 saat beklenmiştir. Bu şekilde içi dolu her kazık için üç yükleme yapılmıştır. Yükleme deneylerinde içi dolu (Çap: 70 mm, Boy: 400 mm) ve içi

boş (Et kalınlığı: 10 mm, Boy: 400mm) tekil kazıklar kullanılmış kazık taşıma kapasitesi ve zeminin göçme yükü belirlenmiştir.

İçi boş kazıklar altı kapalı olarak ve altı açık içi kum dolu olarak yüklenmiştir ve içi boş kazıkların üst kısmında kırılma meydana geldiğinde yükleme sona ermiştir (Şekil 5.20).



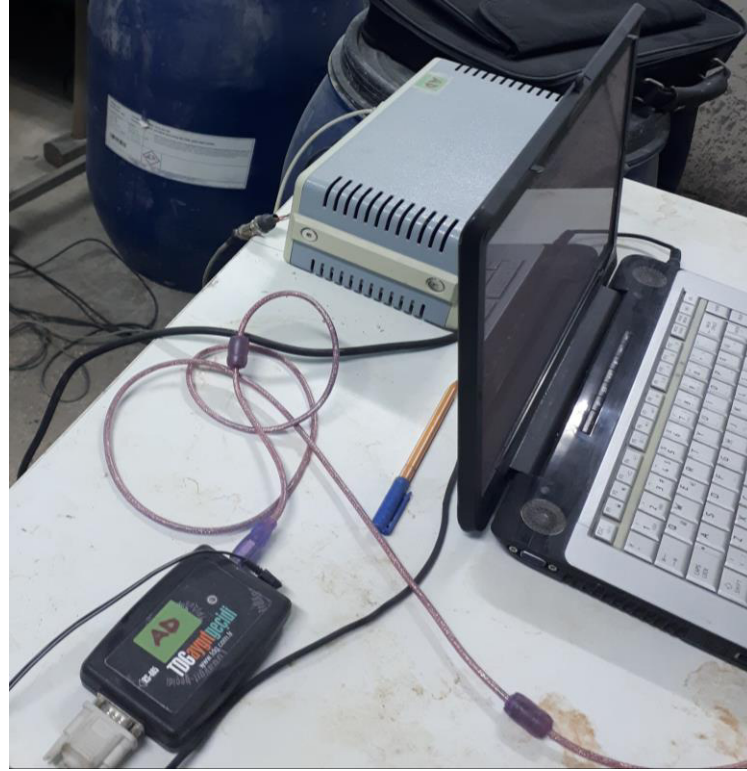
Şekil 5.20. İçi boş kazık

Oluşacak yük-deplasman ilişkisini doğru ölçmek ve veri kaybını engellemek için bu sistemler Şekil 5.21’de ve 5.22’de görüldüğü gibi bilgisayar programına bağlanmıştır. Yük-deformasyon grafik verileri TESTLAB Basic programı ile kaydedilmiştir. Hassas ölçüm elde etmek için 0,125 saniyede bir aralıkla veri alınmıştır. Veriler Excel’e aktarılarak grafikler oluşturulmuştur.

Grafiklerden kazık çapının %10’u kuralı ile göçme yükü bulunmuştur. Statik yöntemler ile uç ve çevre direnci hesaplanmıştır. Hesaplanan kazık taşıma kapasitesiyle ilgili kazık yükleme deneylerinde oluşan göçme yükü kıyaslanmıştır.



Şekil 5.21. Deney düzenęi



Şekil 5.22. Data logerlar

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

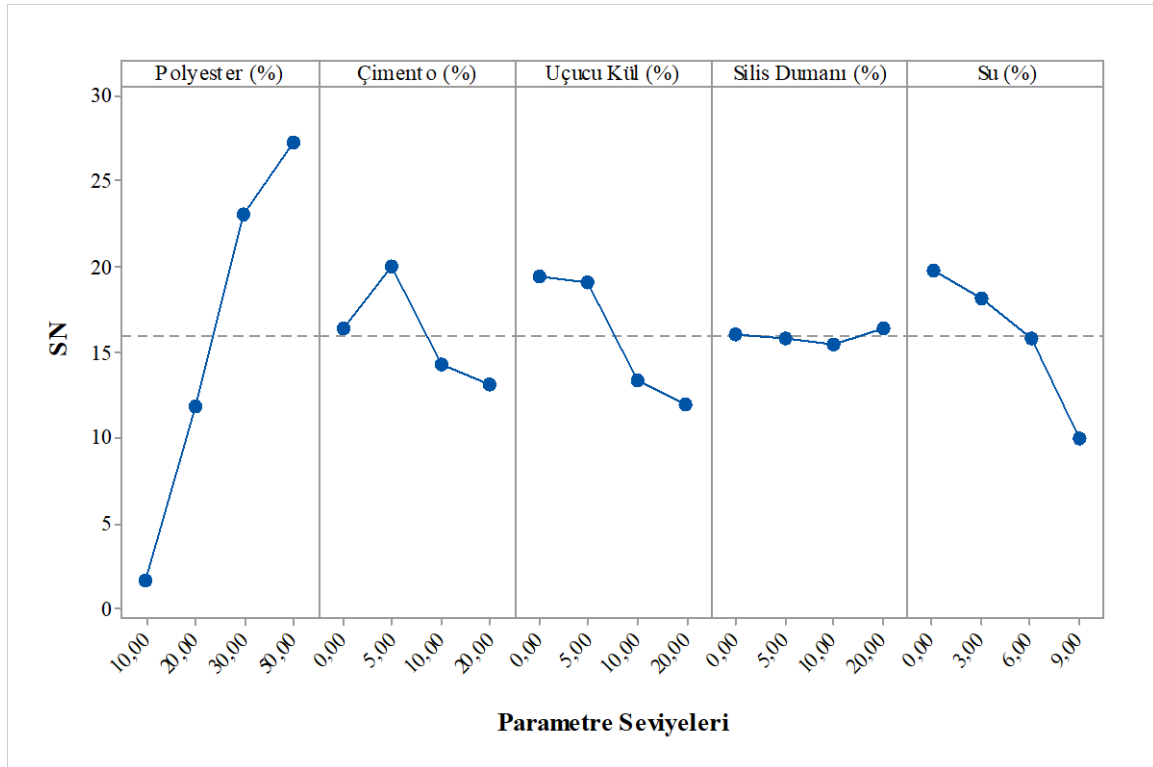
Bu çalışmada kullanılan parametre seviyeleri, karışım oranları ve 28 günün sonunda elde edilen serbest basınç mukavemetleri Çizelge 6.1.'de verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan parametreler sırasıyla polyester, çimento, uçucu kül ve silis dumanıdır. Çizelgeye bakıldığında en yüksek mukavemetin (45,52 MPa) 15 nolu deneyde elde edildiği görülmektedir. En düşük mukavemetin ise (0,29 MPa) 4 nolu deneyde elde edildiği görülmektedir. Çizelgede 16 nolu numunenin de oldukça yüksek mukavemet gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 6.1. Deney verileri ve serbest basınç dayanımları

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları					Serbest Basınç Mukavemeti (Mpa)
	F1	F2	F3	F4	F1 (Polyester)	F2 (Çimento)	F3 (Uçucu Kül)	F4 (Silis Dumanı)	F5 (Su)	
1	1	1	1	1	10	0	0	0	0	3,02
2	1	2	2	2	10	5	5	5	3	3,55
3	1	3	3	3	10	10	10	10	6	0,71
4	1	4	4	4	10	20	20	20	9	0,29
5	2	1	2	3	20	0	5	10	9	2,81
6	2	2	2	4	20	5	0	20	6	9,63
7	2	3	4	1	20	10	20	0	3	2,71
8	2	4	3	2	20	20	10	5	0	3,22
9	3	1	3	4	30	0	10	20	3	15,06
10	3	2	4	3	30	5	20	10	0	21,19
11	3	3	1	2	30	10	0	5	9	8,87
12	3	4	2	1	30	20	5	0	6	14,79
13	4	1	4	2	50	0	20	5	6	14,94
14	4	2	3	1	50	5	10	0	9	13,90
15	4	3	2	4	50	10	5	20	0	45,52
16	4	4	1	3	50	20	0	10	3	32,23

Bu çalışmada birden fazla verinin olması ve birbirleri ile etkileşimin yorumlanmasının güç olması sebebiyle Taguchi Analizi yapılmıştır. Bu analizin yapımında MINITAB programı kullanılmıştır. Analiz ile parametre seviyelerinin basınç dayanımı ile etkileşimi ve SN değerinin parametre seviyelerinin basınç dayanımı ile etkileşimi incelenmiştir.

Şekil 6.1'de polyester oranı ile dayanım artışının doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Karışımda belirli oranlarda su kullanılmış, su miktarı arttıkça dayanımı olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Çimento, uçucu kül ve silis dumanının arasında ki bağlayıcılığı bu çalışmada suyun değil polyesterin üstlendiği varsayılabilir.



Şekil 6.1. SN Grafiği

Şekil 6.1’de elde edilen grafikler incelendiğinde polyester oranının artmasının dayanımı olumlu etkilediği gözlenmiştir. Bu sonuçlar %100 polyesterden elde edilen numunelerin dayanımının oldukça yüksek olduğu ve darbeleri absorbe ettiğini öne süren diğer çalışmaları destekler niteliktedir (Karaca, S., 2017 ve Guades E. ve ark., 2012).

Şekil 6.1’de çimentonun davranışı incelendiğinde %0-5 arasında dayanım artarken %5’den sonra düştüğü gözlemlenmiştir. Özaydın (1997), yapmış olduğu çalışmada iyi derecelenmiş kumda ağırlık olarak çimento yüzdesinin %2 ile %4 arasında uygun olduğunu gözlemlemiştir. Küçükali (2008), yaptığı çalışmada zemin iyileştirmede kullanılacak çimento içeriğinin %2 ile %10 arasında olduğunu belirtmiştir. Çimento oranının iyi ayarlanması gerektiğini, az olduğu durumlarda uygun karışım olmayacağını, fazla olması durumunda çatlaklar ve büzülme oluşacağını belirtmiştir.

Parametre seviyelerine göre ortalama SN değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Parametre seviyelerinin ortalama SN değerleri

Seviye	Polyester(%)	Çimento (%)	Uçucu Kül(%)	Silis Dumanı (%)	Su (%)
1	1,649	16,395	19,43	16,11	19,848
2	11,844	20,01	19,129	15,866	18,207
3	23,076	14,337	13,331	15,478	15,826
4	27,287	13,113	11,966	16,402	9,974

Taguchi optimizasyon yöntemi ile hazırlanan numunelerin SN grafiğine göre Varyans analizi Çizelge 6.3' te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Varyans analizi

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	%P
Model	15	2117,77	100
Polyester	3	1602,76	75,68
Çimento	3	109,31	5,16
Uçucu Kül	3	179,79	8,49
Silis Dumanı	3	1,84	0,09
Su	3	224,09	10,58
Hata	0	0	0
Toplam	15	2117,77	100

Çizelge 6.3 incelendiğinde çalışmada en etkili parametrenin polyester olduğu (%75,68) en az etkili parametrenin ise silis dumanı (%0,09) olduğu gözlenmiştir. En yüksek serbest basınç mukavemetinin elde edildiği numuneye bakıldığında (Çizelge 61.) %20 silis dumanı kullanımı ile yüksek miktarda atık malzeme kullanılabilceği gözlenmiştir. Bu da silis dumanının dayanım üzerinde çok etkili bir parametre olmamasına rağmen malzeme tasarrufu açısından önemli olduğunun göstergesidir. Böylece atık malzeme ile daha düşük maliyetli kazık elde edilebilir.

Uçucu küller diğer puzolanik malzemeler gibi, Ca(OH)_2 ile tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcı özelliği kazanır. Bu çalışmada Şekil 6.1'e bakıldığında uçucu külün fazla kullanımının tepkime yapabileceği yeterli malzeme olmaması sebebiyle dayanımı olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

Gündeşli (2008), beton üretiminde kullanılacak uygun silis dumanının oranını %7 ile %10 arasında değiştirdiğini, bazı özel durumlarda ise %15'e kadar kullanılabilceğini vurgulamıştır. Shannag (2000), yaptığı deneysel çalışmada, çimento ağırlığının %15'i oranında silis dumanı kullanarak, standarttan 10 MPa olan yüksek dayanımlı beton elde ettiğini belirtmiştir. Bu çalışmada ise Şekil 6.1'de en iyi sonucun %20 oranında kullanımında verildiği gözlenmiştir.

Hazırlanan 16 adet numunenin parametre seviyeleri, karışım oranları ve 28 günün sonunda elde edilen yarmada çekme mukavemetleri Çizelge 6.4.'te verilmektedir

Çizelge 6.4. Deney verileri ve yarmada çekme dayanımları

Deney No	Parametreler ve Seviyeleri				Parametre Oranları					Yarmada Çekme Mukavemeti (Mpa)
	F1	F2	F3	F4	F1 (Polyester)	F2 (Çimento)	F3 (Uçucu Kül)	F4 (Silis Dumanı)	F5 (Su)	
1	1	1	1	1	10	0	0	0	0	0,53
2	1	2	2	2	10	5	5	5	3	0,21
3	1	3	3	3	10	10	10	10	6	0,22
4	1	4	4	4	10	20	20	20	9	0,01
5	2	1	2	3	20	0	5	10	9	0,39
6	2	2	2	4	20	5	0	20	6	2,66
7	2	3	4	1	20	10	20	0	3	0,37
8	2	4	3	2	20	20	10	5	0	0,8
9	3	1	3	4	30	0	10	20	3	3,75
10	3	2	4	3	30	5	20	10	0	3,02
11	3	3	1	2	30	10	0	5	9	2,28
12	3	4	2	1	30	20	5	0	6	3,58
13	4	1	4	2	50	0	20	5	6	3,4
14	4	2	3	1	50	5	10	0	9	3,13
15	4	3	2	4	50	10	5	20	0	6,95
16	4	4	1	3	50	20	0	10	3	3,6

Acer (2018), beton karışımlarında çimento yerine silis dumanı kullanarak kontrol betonuna yarmada çekme deneyi yapmıştır. Deney sonucuna göre 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerlerinin arttığını gözlemlemiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı değeri %15 SD kullanılan beton numunede görmüştür.

S/Ç oranı 0,75 olan CEM I Portlant Çimentosu kullanılarak hazırlanan beton numunelere 28 günlük kür süresi sonunda yarmada çekme deneyi yapılmıştır. Bu deney sonucunda ortalama basınç dayanımı 3,43 MPa elde edilmiştir. Polyester esaslı hazırlanan numunelerin yarmada çekme dayanımına bakıldığında en yüksek mukavemet 15 nolu numunede elde edilmiştir. Polyester esaslı bu numune, standart beton numunelere kıyasla daha yüksek yarmada çekme dayanımına sahiptir. Buradan polyesterin malzemede yarmada çekme dayanımı olumlu etkilediği sonucuna varılabilir.

Turkuaz polyesterden temin edilen malzemenin özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiş olup polyesterin çekme dayanımının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yarmada çekme deneyinde numunenin düzlemi boyunca gerilmeler meydana geldiği, yükleme çapı merkezi çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan çatlakların genişliğinin malzemelerin karışım oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir.

Bu çalışmada mini kazıklar 40 cm boyunda imal edilmiştir. Fakat 5 cm kazık başı kumun dışında bırakılarak kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Bu yüzden kazık boyu 35 cm kabul edilerek aşağıdaki gibi statik hesaplar yapılmış ve kazık taşıma kapasitesi bulunmuştur. 8, 10, 15 ve 12 nolu deneylere ait karışım oranları kullanılarak 4 adet model kazık kullanılmıştır. Bu model kazıklardan biri içi boş kazıktır, fakat statik yöntemlerle hepsinin sürtünme direnci aynı kabul edilmiş sadece içi boş kazığın uç direnci değişmiştir. Bilgisayar programından alınan verilerle oluşan grafikler Ek-2'de verilmiştir. Grafikler yük-deplasman ilişkisini rahat görebilmek için her yükleme ayrı ayrı verilmiştir.

Ø7 cm çapında, L=35 cm boyunda fore kazığın yanal sürtünme direncinin genel ampirik yöntemlerle hesaplanması;

Kazık taşıma kapasitesi kumun kayma direnci parametreleri kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre kolon ucu seviyesinde içsel sürtünme açısı $\phi_u=44^\circ$ olmaktadır.

$$\text{Toprak basıncı katsayısı; } K=1-\sin\Phi = 1-\sin44 = 0,30 \quad (6.1)$$

$$\text{Ortalama düşey efektif gerilme; } \sigma'_v = \gamma \cdot L = 1,99 \cdot 0,35 = 0,70 \text{ t/m}^2 \quad (6.2)$$

$$\delta = 0,80 \cdot \Phi = 0,80 \cdot 44 = 35,20^\circ \approx 35 \quad (6.3)$$

$$f = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan\delta = 0,30 \cdot 0,70 \cdot \tan35 = 0,147 \text{ t/m}^2 \quad (6.4)$$

$$Q_{\text{skum}} = p \cdot L \cdot f = (0,070 \cdot \pi) \cdot 0,35 \cdot 0,147 = 0,0113 \text{ ton} \quad (6.5)$$

Ø70 cm çapında, L= 35 cm boyunda fore kazığın uç direncinin genel ampirik yöntemlerle hesaplanması;

$$\Phi = 44 \text{ için } N_q \approx 120,8 \quad (6.6)$$

$$Q_{s_{uc}} = \sigma'_{v_{uc}} \cdot N_q \cdot A_{uc} = 0,70 \cdot 120,8 \cdot \pi \cdot (0,070^2)/4 \approx 0,325 \text{ t} \quad (6.7)$$

$$\text{Buradan kazık taşıma kapasitesi; } Q_{em} = (0,0113 + 0,325) = 0,336 \text{ t} \quad (6.8)$$

Yapılan iş ve zemin şartları göz önüne alınarak; FS= 2,50 alınması durumunda,

$$Q_{all} = 0,336/2,5 \approx 0,134 \text{ ton} = 1,314 \text{ kN} \quad (\text{Kazık taşıma kapasitesi}) \quad (6.9)$$

İçi boş fore kazığın uç direncinin genel ampirik yöntemlerle hesaplanması;

$$Q_{s_{uc}} = \sigma'_{v_{uc}} \cdot N_q \cdot A_{uc} = 0,70 \cdot 120,8 \cdot \pi \cdot (0,070^2 - 0,050^2)/4 \approx 0,159 \text{ t} \quad (6.10)$$

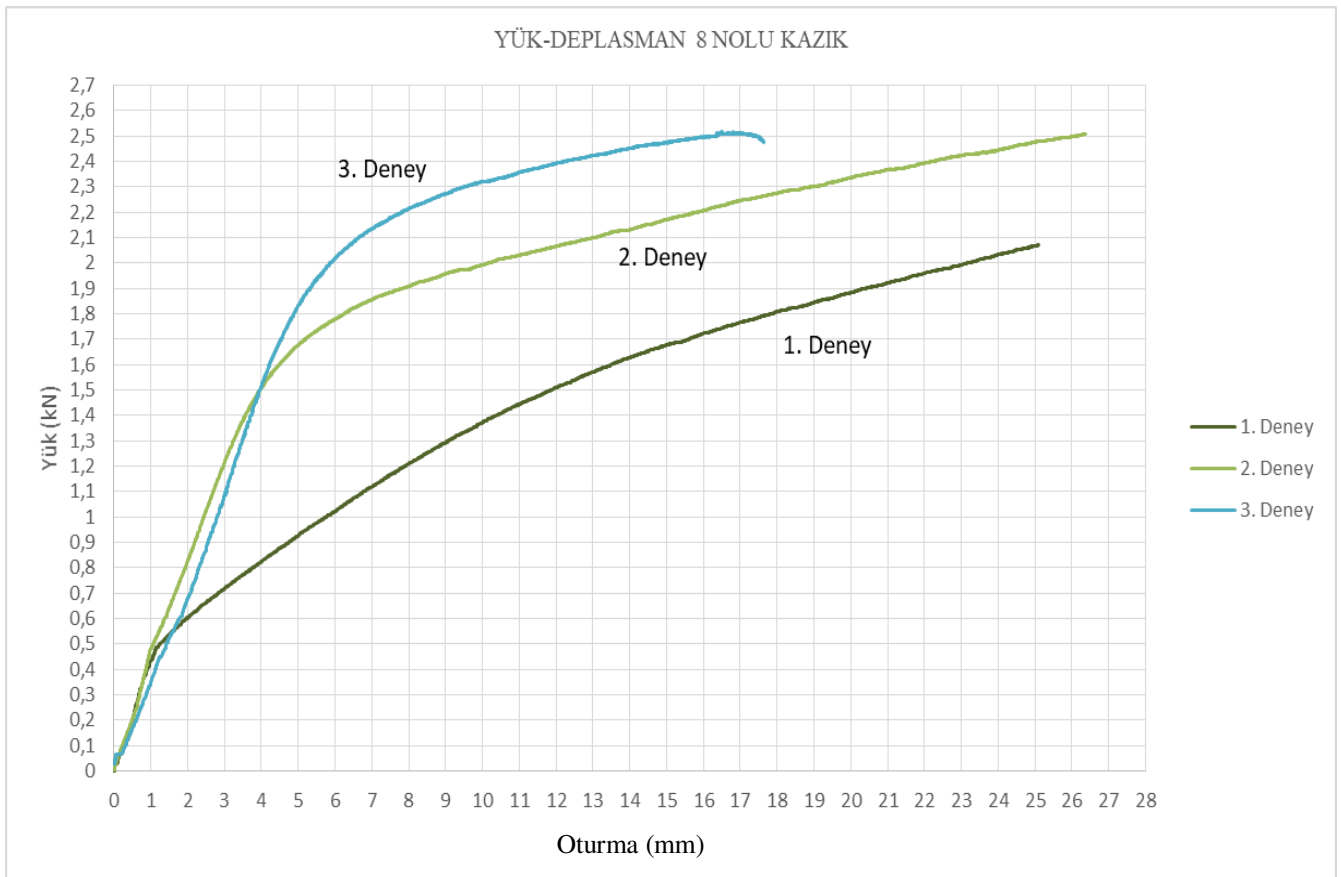
$$\text{Buradan kazık taşıma kapasitesi; } Q_{em} = (0,0113 + 0,159) = 0,1703 \text{ t} \quad (6.11)$$

Yapılan iş ve zemin şartları göz önüne alınarak; FS= 2,50 alınması durumunda,

$$Q_{all} = 0,1703/2,5 \approx 0,0681 \text{ ton} = 0,681 \text{ kN} \quad (\text{Kazık taşıma kapasitesi}) \quad (6.12)$$

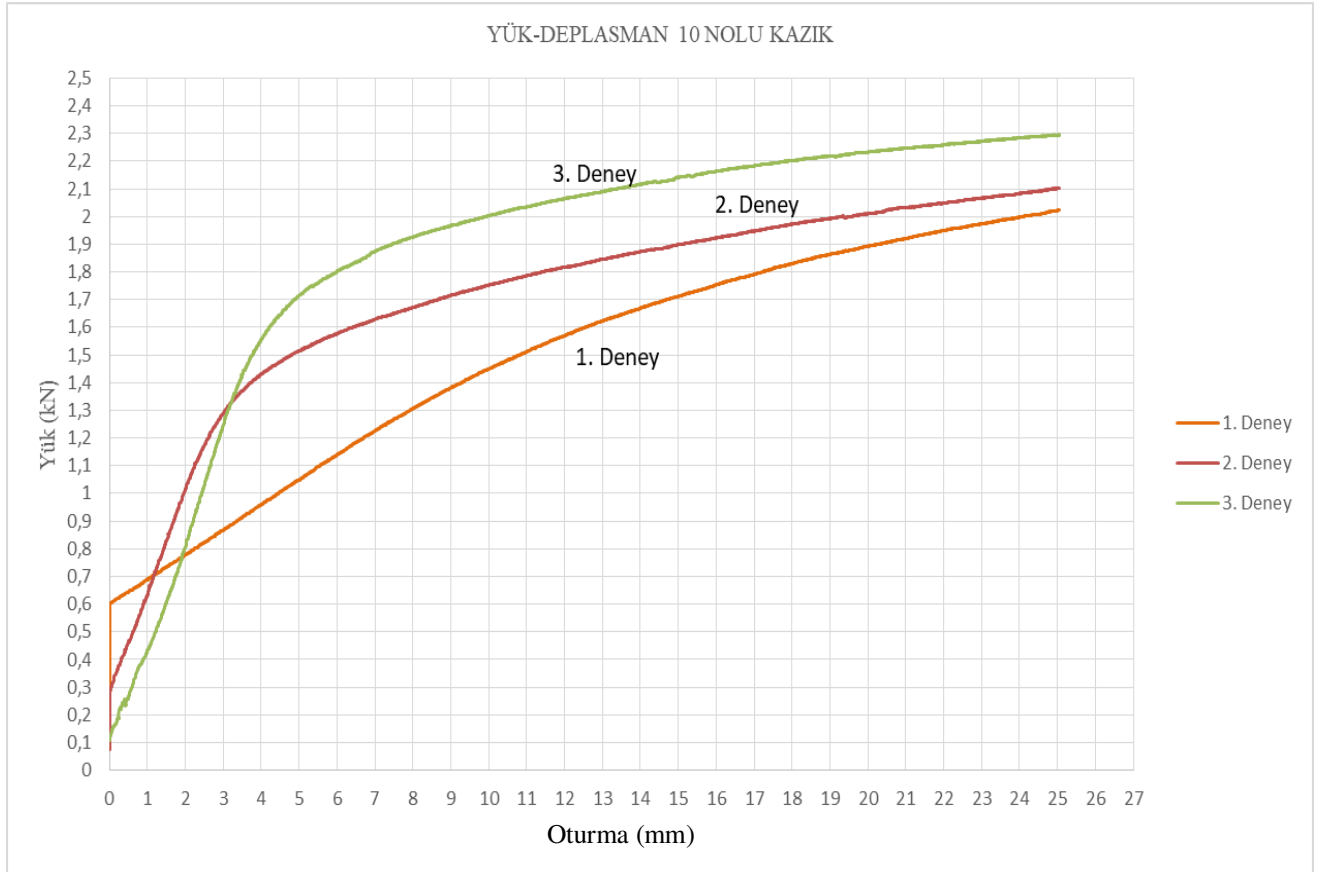
Model kazıkların her yükleme için oluşan grafikleri bir araya getirilip Şekil 6.2-5 arasında verilmiştir. Buradan kazık çapının %10'u kuralı ile kazık göçme yükü hesabı yapılmıştır. Böylece ampirik yöntemler ile kazık yükleme deneyi arasındaki ilişkiyi yorumlamak daha kolay olmuştur. Ayrıca yüklemeler sonrası model kazıkların davranışındaki değişimler daha anlaşılır şekilde gözlenmiştir.

İçi boş model kazıklar kırıldığı için deneyler tekrarlanamamış olduğundan bu kazıklar altı kapalı ve içi kum dolu olarak kıyaslanmış davranış bu ikisi arasında yorumlanmıştır.



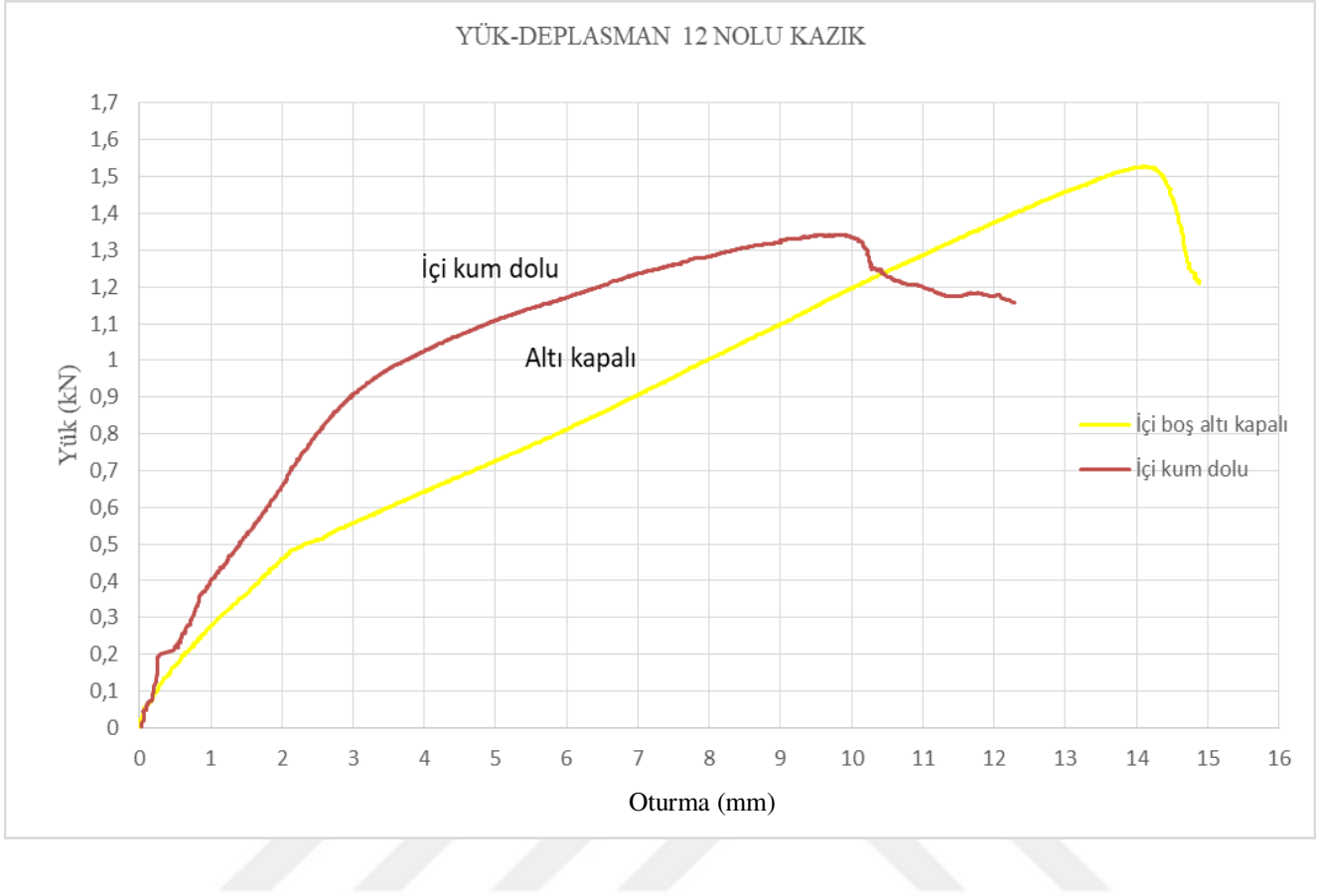
Şekil 6.2. 8 nolu kazık

8 nolu model kazıkta, kazık çapının %10'u kuralına göre göçme yükü ilk yükleme için 1,1 kN olarak bulunur. Buda teorik yaklaşımlar ile bulunan kazık taşıma kapasitesine (1,314 kN) oldukça yakındır. Model kazık ilk başta yükü almış lakin çok az deplasman yapmıştır. Buda çevre direncini yenmesi olarak tanımlanabilir. Uç direncinin mobilize olması net bir şekilde gözlenememektedir fakat yükleme devam ettikçe yükün artma hızının oturmaya göre azaldığı gözlenmektedir. 1 saat beklenip tekrar yüklenen model kazığın zeminde oturması için daha fazla yüke ihtiyacı olmuştur.



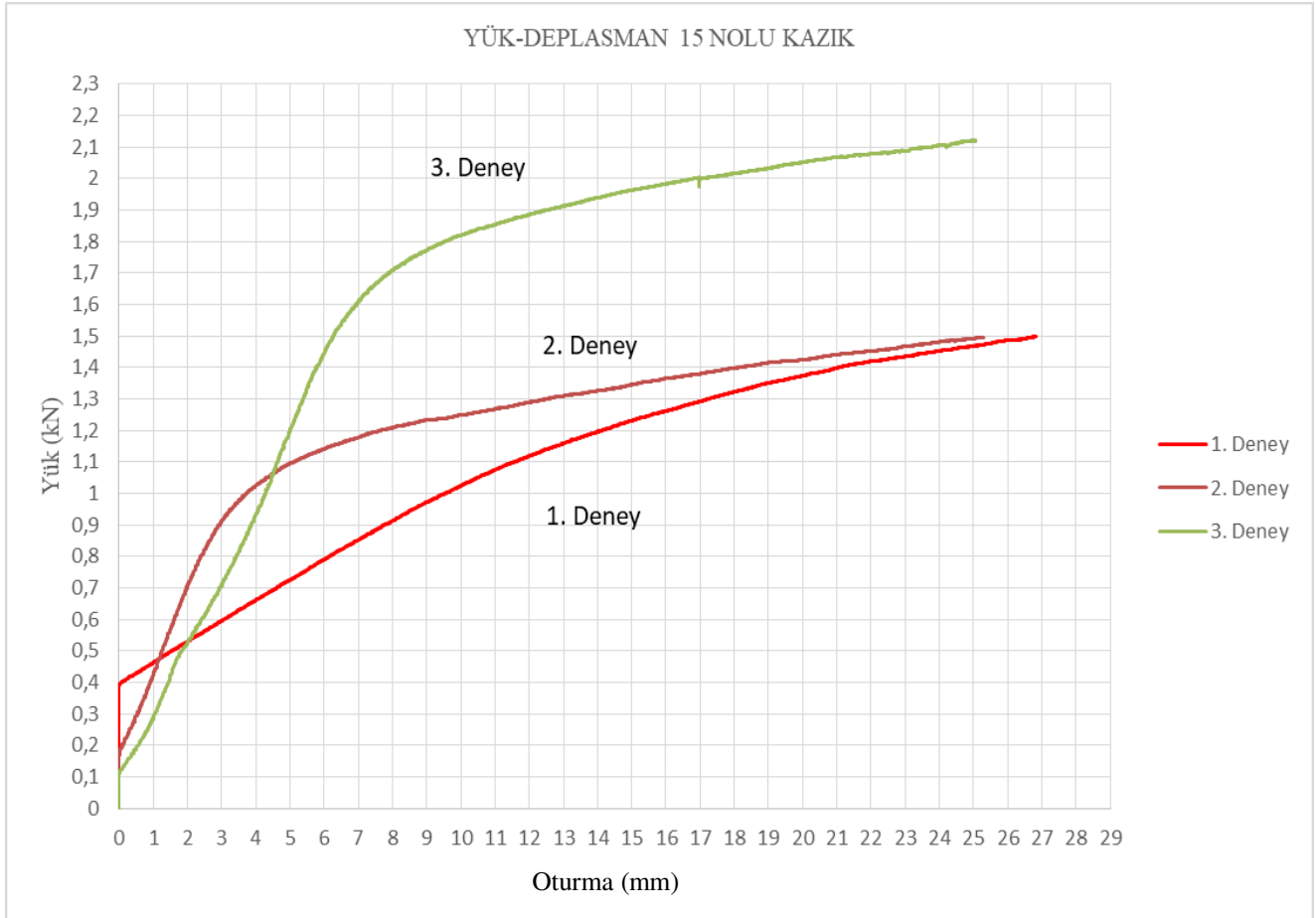
Şekil 6.3. 10 nolu kazık

10 nolu model kazıkta da kazık çapının %10'u kuralına göre göçme yükü ilk yükleme için 1,22 kN olarak bulunur. Buda teorik yaklaşımlar ile bulunan kazık taşıma kapasitesine (1,314 kN) oldukça yakındır. Fakat bu model kazık, 8 nolu model kazığa göre farklı bir davranış göstermiş olup belli bir yüke kadar nerdeyse hiç zeminde oturma meydana gelmemiştir. Bunun sebebi çok sıkı olan zeminin yenilememesi olduğu gibi 5 cm zemin dışında olan kazığın içinde bulunan polyester sebebi ile yükü absorbe etmesi olabilir. Deneyler genellikle müsaade edilen maximum oturma miktarı olan 25 mm'e kadar devam edilmiştir. Sebebi grafikte oluşacak eğimin ne kadar azabileceğini net görmek ve maximum alabileceği yükü gözlemlemek. 1 saat bekledikten sonra tekrarlanan deneylerde daha düşüklerde deformasyon başlamış buda önceki yükleme etkisi ile kazık yüzeyine yakın zeminin yenildiğinin göstergesidir. Çevre direncinin yenilmesinin ardından kazığın zeminde oturması için daha fazla yüke ihtiyaç olmuştur. Buda model kazık altında kalan zeminin daha fazla sıkışması ve zemine gömülü olan kazık boyunun artması ile ilgilidir.



Şekil 6.4. 12 nolu kazık

İçi boş altı kapalı model kazıkta, kazık çapının %10'u kuralına göre göçme yükü 0,9 kN ve içi kum dolu model kazıkta 1,23 kN'dur. Ampirik yöntemler ile hesaplanan taşıma kapasitesi ise altı kapalı model kazık için 1,314 kN, içi boş kum dolu model kazık için 0,681 kN'dur. Bu iki kazık arasındaki farkın içi kum dolu kazığın hem içindeki kum hem de kazık alt ve yüzeyindeki kumun hareketi için daha fazla yüke ihtiyaç duyması olarak yorumlanabilir. Model kazıklar belli bir yükten sonra kesit alanı yetersizliğinden dolayı kırılmış ve diğer kazıklarda olduğu gibi tekrar yükleme yapılamamıştır.



Şekil 6.5. 15 nolu kazık

15 nolu model kazıkta da kazık çapının %10'u kuralına göre göçme yükü ilk yükleme için 0,85 kN olarak bulunur. Buda teorik yaklaşımlar ile bulunan kazık taşıma kapasitesine (1,314 kN) göre düşüktür. Fakat bu kazık 2. Yüklemede 1,19 kN ile amprik hesaplara yakın göçme yükü göstermektedir. 15 nolu kazık ilk yükleme yapılan kazık olması sebebiyle bu şekilde davranış göstermiş olduğu varsayılabilir. Yükleme tankında sıkışmayan tabaka bu yükleme ile sıkıştığı varsayılabilir. Bu deneyde tıpkı 8 ve 10 nolu kazık gibi 1 saat beklemenin ardından tekrarlanarak yapılmış ve maximum 25 mm oturmaya kadar devam ettirilmiştir. Yine 10 nolu kazık gibi belli bir yüke kadar nerdeyse hiç zeminde oturma meydana gelmemiştir. Bunun sebebi çok sıkı olan zeminin yenilememesi olduğu gibi 5 cm zemin dışında olan kazığın içinde bulunan polyester sebebi ile yükü absorbe etmesi olabilir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yapılan deney sonuçları yorumlanarak aşağıda ki sonuçlar elde edilmiştir:

- Uçucu kül, silis dumanı ve çimentonun yüksek oranlarda karışmasıyla numuneyi hızlı hidrasyona uğrattığı, yandığı ve taşıma kapasitesini minimuma indirdiği tespit edilmiştir.
- Hazırlanan numunelerde uçucu kül oranının fazla olmasının dayanımı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.
- Polyester oranının artmasının dayanımı olumlu etkilediği, suyun ise dayanımı düşürdüğü gözlenmiştir.
- Polyesterin bu çalışmada bağlayıcı davranmakla birlikte kumlu zeminde ki boşlukları doldurarak dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.
- Serbest basınç deneyinde en düşük taşıma gücü %10 polyester, %20 uçucu kül, %20 silis dumanı ve %20 çimento karışımında elde edilmiştir.
- Serbest basınç deneyinde en yüksek taşıma gücü ise %50 polyester, %5 uçucu kül, %20 silis dumanı ve %10 çimento karışımında elde edilmiştir.
- SN grafiğine göre bu çalışmadan elde edilecek en yüksek dayanım için %50 polyester, %5 çimento, %0 uçucu kül ve %20 silis dumanı kullanılması gerektiği gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmanın genel yorumlanmasında ise en etkili parametrenin polyester olduğu sonucuna varılmıştır.
- Serbest basınç ve yarmada çekme deneyleri ile polyester kullanımının numunelerin sönmleme kapasitelerini arttığı, elastik davranış göstermesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır.
- Ek 1’de çizilen σ - ϵ grafikleri incelendiğinde yükleme boşaltma sırasında numunelerin elastik davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yapılan kazık yükleme deneyleri ile model kazıkların beton numunelere benzer davranış gösterdiği ancak içinde bulunan polyester nedeniyle sönmleme kapasitesinin arttığı gözlenmiştir. Böylece polyester esaslı kazıkların yatay ve sismik yükler altında avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

- Model kazık yük aldığıında belirli bir oturma değerine kadar çevre sürtünmesinin uç direncinden fazla olduğu gözlenmiştir.
- 8 ve 10 nolu model kazıkta ilk yüklemde elde edilen göçme yükünün yakın olduğu tespit edilmiştir.
- 8, 10 ve 15 nolu model kazıklarda 3. Deneyde oluşan yük-oturma grafiğinin benzer olduğu gözlenmiştir. Buda zeminin belirli yük ve deformasyondan sonra iyice sıkıştığını ve kazık gömüldükten sonra oturma için daha fazla yüke ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Aynı zeminde taşıma gücü artmış, bunun sonucu olarak uç direncinin belli bir değerden sonra doğrusala yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- 10 ve 15 nolu model kazıkta kumun çok sıkı olması sebebiyle başta deformasyon almadığı gözlemlenmiştir. Tanelerin yukarı doğru hareketi, kırılma ve ufalanması ile deformasyon başlamıştır.
- Sıkı zeminlerde kazıklara etkileyen çevre sürtünmesi gevşek olan bir zeminden daha büyük olmalıdır. Deney tekrarlarında aynı deformasyon için gerekli olan yükün artması bunun kanıtıdır. Sıkı zeminlerde kazığın düşey yönde deplasmanı zor olduğundan ona etkileyen çevre sürtünmesi de fazladır. Zeminin sıklığı arttıkça içsel sürtünmesi de artar fakat teorik yöntemlerde içsel sürtünme açısı (θ) arttıkça $\sin \theta$ artarken, K_0 yani $(1 - \sin \theta)$ azalmaktadır. Bu sebepten ilk yüklemelerde teorik hesaplar ile yükleme deney sonuçlarının yakın olduğu tespit edilmiştir. Fakat ikinci ve üçüncü yüklemde zemin göçme yükünün amprik yöntemlere göre fazla olduğu tespit edilmiştir.
- 25 mm oturma için en fazla yüke ihtiyaç duyan kazık 8 nolu model kazıktır. 8 nolu model kazık bu oturmadan sonra 3. Deney tekrarında aynı yüke ulaştığında oturma yapmış fakat artık yük azalışa geçmiştir. Bu sebepten 25 mm olmadan deney sonlandırılmıştır.
- İçi boş model kazık için seçilen kesit alanın yetersiz olduğu ve bu model kazığın daha yüksek dayanım elde edilen tasarıma göre üretilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Deney sonunda tank boşaltıldığında kazığın olduğu bölgenin altında sıkışmanın oldukça fazla olduğu, üçgen şeklinde bir küme oluştuğu gözlenmiştir.

7.2. Öneriler

Çalışmadan elde edilen bilgiler doğrultusunda aşağıdaki öneriler yapılmıştır:

- Çalışmada bileşenlerin birbirleri ile etkilemişini tam yorumlayabilmek için parametrelerde azaltma yapılarak yeni deneyler yapılmalı ve davranışlar tekrar gözlenmelidir.
- Taguchi analizi değiştirilerek farklı karışım oranları ile yeni numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılarak parametlerin etkileri tekrar yorumlanmalıdır.
- Silis dumanı ve uçucu külün çimento ile bir araya geldiğinde ki davranışı betonda dayanımı artmıştır. Fakat bu malzemelerin polyester içinde ki davranışı ile ilgili yeni araştırmalar yapılmalıdır.
- Kumlu zeminlerde iyileştirmede kullanılan çimentonun davranışı polyester ile birlikte tekrar yorumlanmalıdır.
- Hazırlanan model kazıkların çevresel etkilere karşı dayanımı araştırılmalı ve davranışlar arazi deneyleri ile yorumlanmalıdır.
- Çalışma kapsamında kullanılan polyesterin kimyasal özelliklerinin dayanım üzerindeki etkisini gözlemleye bilmek için farklı özellik ve markalarda polyesterler ile deneyler tekrarlanmalıdır.
- Bu numuneler kumun belli bir yüzdesi oranında silis dumanı, çimento, uçucu kül ve polyester katılarak hazırlanmıştır. Farklı bir zemin ile hazırlanarak deneyler tekrarlanabilir. Farklı granülometriye sahip kum tercih edilebileceği gibi killi, siltli zeminlerde tercih edilebilir.
- Kazık yükleme deneyinde farklı sıklıkta kumlar için aynı model kazıklar ile deneyler tekrarlanıp zemin kazık ilişkisi tekrar yorumlanmalıdır.
- Yükleme hızı, kazık boyu ve kazık çapı gibi parametreler değiştirilerek bu çalışma tekrarlanmalı. Böylece parametrelerin göçme yüküne etkisi tespit edilmelidir.
- Kazık tasarımının kazık yükleme deneyinde etkili olup olmadığı deney sayısı artırılarak incelenmelidir.
- Yükleme tankında kum yüzeyinde bırakılan kazık boyunun etkisini incelemek için aynı kazık için deneyler tekrarlanabilir.

- İçi boş kazık tasarımı değiştirilmeli ve et kalınlığı artırılmalıdır. Daha sağlıklı yorum yapılabilmesi için diğer kazıklar gibi deney tekrarı gözlenmelidir.
- Sıklığın artması ile dayanımın artması teorik yaklaşımların sorgulanması gerektiğini göstermektedir. Çevre sürtünmesi hesaplanan fore kazıklarda K değeri yerine K_o ile K_p arasında bir değer alınarak tekrar hesaplanmalı ve kazık yükleme deneyi buna göre tekrar yorumlanmalıdır.
- Atık malzemelerinde kullanılması ile elde edilen bu kazıkların standart kazıklara alternatif olabilmesi için konu hakkında çalışmaların devam ettirilmesi gerekmektedir.
- Bu çalışma, polyester esaslı model kazıkların bilimsel çalışmalar için yeni bir alan oluşturacağını ve çok sayıda yeni bulguların elde edilmesine öncülük edeceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

1' <http://kaucukdergisi.com/polyester-nedir-nasil-uretilir/>

ACI Committe 226, 1987, Silica Fume in Concrete, ACI Material Journal, v.84, pp.158-16

Acer Ş., 2018, Silis dumanı ve öğütölmüş pomzannın yüksek ferformanslı beton özellikleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Niğde

Adar, M., 2018, Uçucu kül ve polipropilen lif içeren kendiliğinden yerleşen betonun yüksek sıcaklık altında özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Erzurum

Akbulut, R.K., 2014, Kazıklı radye temellerin tasarımını etkileyen faktörlerin araştırılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Konya

Akçaözoğlu, K., 2007, Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerine etkisi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana

Akyüncü, V., 2012, F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin karşılaştırılacak incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Arslan, E., 2006, Betonun yarma dayanımında geometrik değişimlerde boyut etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ

Arslantürk, C., 2007, Uzun süre karıştırmaya maruz uçucu kül ve silis dumanlı betonlarda süperakışkanlaştırıcı ile kıvam iyileştirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Artuk, F., 2016, Lif ve uçucu kül katkılı polimer içi boş kazıkların yumuşak kil zemin davranışının deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Erzurum

Aruntaş, H.Y., ,2006, “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 21, No 1, Ankara, Sayfa 193-203

ASTM C618, 1991, “Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”, ASTM, 1991

ASTM D698-00a., Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³(600 kN-m/m³)), Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1-7

Ayan, E., 2009, Derin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul

Aytekin, M., 2004, Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik & Mimarlık Yayınları, Ankara

Bagherinia, M., 2013, Killerin derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmesinde doymamış polyesterin kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

Bolat, H., 2009, Polyester ve polipropilen telli betonların yol kaplaması olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Cullazoğlu, F., FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisi altındaki analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde

Çalışkan, Ö., 2003, Kazıklı temellerin analitik yöntemlerle statik ve betonarme çözümleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir

Çelik, Ö., 2004, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Çetinkaya, M., 2012, Polipropilen liflerin uçucu kül zemin karışımlarında geoteknik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Çinicioğlu, S.F., 2005, Zeminlerde statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü anlayışı ve hesabı, Seminer notları, IMO, İstanbul

Dalyan, İ., 2019, Lifli polimerlerle farklı biçimlerde güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme performanslarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Das, B. M., 2007, "Principles of Foundation Engineering", Thomson Canada Limited, 6. Edition, Kanada

Değirmenci, A., 2006, Silis dumanı katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Demir, E.M., 2018, Kazık taşıma gücünün kazık yükleme testi ve statik formüller vasıtası ile tayini ve değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Dermatas, D., Meng, X., 2003, Utilization of Fly Ash for Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils, W.M. Keck Geoenvironmental Laboratory, Center for Environmental Engineering, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ 07030, USA.

Doğanay, S. ve Ulçay, Y., 2007, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 12, Sayı 2, Bursa

Eker, A., 2008, ‘‘Plastik Matrisli Kompozitler’’, yildiz.edu.tr.akdogan.lessons.imalattakompozit.plastik_matrisli_kompozitler

Eti Elektrometalurji A.Ş., 2019, SiFeCr kule tozuna ait kimyasal analiz sonuçları, Antalya

Guades E. and Aravinthan T., 2012, Residual properties of square FRP composite tubes subjected to repeated axial impact, , Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland 4350, Australia

Guades E., Aravinthan T., Manalo A. and Islam A, 2012, A review on the driving performance of FRP composite piles,CEEFC, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland 4350, Australia

Guades E., Aravinthan T., Manalo A. and Islam A, 2012, Experimental investigation on the behaviour of square FRP composite tubes under repeated axial impact, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland 4350, Australia

Gündeşli, U., 2008, Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın çürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana

Halilov, S., 2003, Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkı lifli betonların özellikleri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Kalinski, M.E. and Hıpley, B.T., 2005, The effect of water content and cement content on the strenght of portland cement-stabilized compacted fly ash, Fuel84, 1812-1819.

Karaca, S., 2017, Lif ve uçucu kül katkı polimer esaslı kompozit içi boş kazıkların mekanik ve dinamik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Erzurum

Karagöz, N., 2014, Taguchi methodunun hava aracı kanat tasarımı sürecine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri

Karahan, O., 2006, Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana

Kaygusuz, M., A., 2018, Yüksek sıcaklık hasarına uğramış betonarme kirişlerin FRP ile onarım ve güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

Keçeci, A., 2018, Kendiliğinden yerleşen betonlarda silis dumanı kullanımının beton basınç dayanımına ve aderansa etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya

Keskin, Ş. F., Perlit ve taban külü katkılı harç özelliklerinin taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli

Kurt, E.B., Silis dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Küçükali, N., 2008, Demiryolu altyapısının jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon

Lkhagva, T., 2006, Uçucu küllerin agrega olarak beton üretiminde kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Mayerhof, G. G., 1951, "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations", Geotechnique, 2. Basım, No:4, 301-331

Mert, M., 2012, Statik ve dinamik kazık yükleme deney sonuçlarının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Mohamed, O.A., Syed, Z. I. and Najm, O.F., 2016. Splitting Tensile Strength of Sustainable Self-Consolidating Concrete. Procedia Engineering, 145, 1218-1225.

Naiboğlu, H., 2019, Farklı zemin koşullarında kazık-zemin yapı etkileşiminin sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van

Odbay, O., 1995, Kazıklı temeller ve düşey yükler altında kazıklı temel sistemlerinin hesap ve analiz yöntemlerinin rasyonelleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Öz, M.Y., 2015, Sıvılaşmaya karşı jet grouting yöntemi ile örnek bir iyileştirme uygulamasının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli

Özaydın, K., 1997, Zemin Mekaniği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul

Özen, E.S., 2019, Kumlu zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde doymamış polyester kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya

Özkara, S., 2009, Cam takviyeli polyesterin asfalt içinde geri dönüşümü, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

Paşa, O., 2018, Uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik

Shannag, M. J., 2000, High Strength Concrete Contening Naturel Pozzolan and Silica Fume. Cement & Concrete Composites, v.22, pp.399-406.

Sofyanlı, Ö., 2015, Silis dumanı katkılı geri kazanılmış agregalı betonların özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Solmaz M. Y. ve Gür M., 2007, Tabakalı kompozit plakalarda takviye malzemesi ve oryantasyon açısının gerilme analizine etkisi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları

Sondermann, W. and Wehr, W., 2004, Deep vibro techniques, (eds: M.P. Moseley and K. Kirsch), Jet grouting, New York: Spon Press, 57-92

Sümer, B., 2012, Silis dumanı katkılı betonlarda polipropilen lif kullanımını beton özelliklerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Şafak, A., 2014, Çimento minerolojisinin ve petrografisinin çimento teknolojisine katkısı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde

Şanyılmaz, M., 2006, Deney tasarımı ve kalite geliştirme faaliyetlerinde taguchi yöntemi ile bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya

Şenol, A., Edil, T. B., Acosta, H., A. and Benson, C.H., 2003, Soft Subgrades Stabilization by Using Various Fly Ashes. Resources, Conservation and Recycling, vol.46, p.p. 365-376.

Şermet, F., 2018, Kompozit kolon-betonarme kiriş birleşim noktasının tersinir tekrarlı yükler altındaki davranışının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

Şimşek, O., 2004, Beton ve beton teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, I. Baskı, Ankara, 118 Sayfa

Taylan, D., 2009, Taguchi deney tasarımı uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Toğrol, E. ve Tan, O., 2009, Kazıklı Temeller, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 142 Sayfa

Tohumcu, İ., 2011, Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonlarda farklı kür koşullarının basınç dayanımına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

TS 1900-1, İnşaat mühendisliğinde zemin lâboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS 1900-2, İnşaat mühendisliğinde zemin lâboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 197-1, 2002, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 196-1, 2002, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

TS EN 197-2, 2002, Çimento- Bölüm 2: Uygunluk değerlendirmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

Tumlumer G., 2006, Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana

Turkuaz Polyester, 2019, Ürün Teknik Sertifikası, TP100, Kocaeli

Türker P., Erdoğan B., Katnaş F. ve Yeğınobalı A., 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB, Arge, Y03.03, Ankara

Uysal, N., 2014, Polimerler ile stabilize edilmiş kumların kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Uzuner, B. A., 2011, Temel Mühendisliğine Giriş, 4. Baskı, *Derya Kitabevi*, Trabzon

Uzuner. B.A., 2013, Temel Mühendisliğine Giriş, *Derya Kitabevi*, Trabzon

Ünal, C., 2019, Tekil kazıkların sonlu elemanlar ile analizi ve analitik yöntemlerle karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli

Üte, A.A., 2008, Uçucu kül ve polipropilen lif kullanımının silindirle sıkıştırılmış betonun özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

Yıldırım, S., 2011, Ürün tasarımı geliştirilmesi: Taguchi tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Yılmaz, H.R. ve Eskişar, T., 2000, Zemin iyileştirme yöntemleri ders notları, İzmir: Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

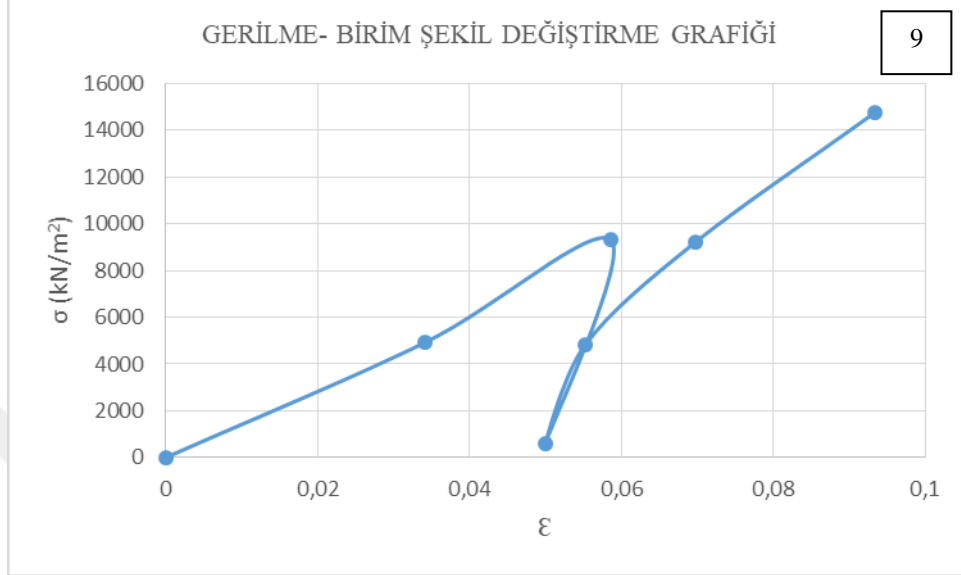
Yılmaz, O., 2013, Standart ve Modifiye Proctor enerji düzeylerinde sıkıştırılan uçucu kül – CL sınıfı kil karışımlarından serbest basınç dayanımları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

Yücesoy, Ü.B., İki tabakalı kompozit perde duvarların eğilme momenti altındaki davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri

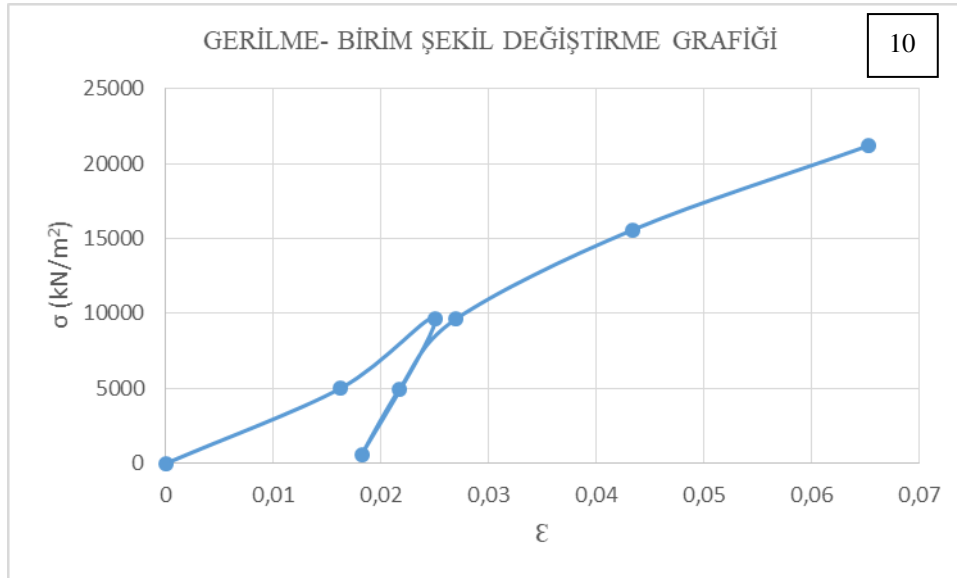
Zaimoğlu, A.Ş., 2003, Bentonit uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento enjeksiyonu karışımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerin taguchi yöntemi ile incelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum

EKLER

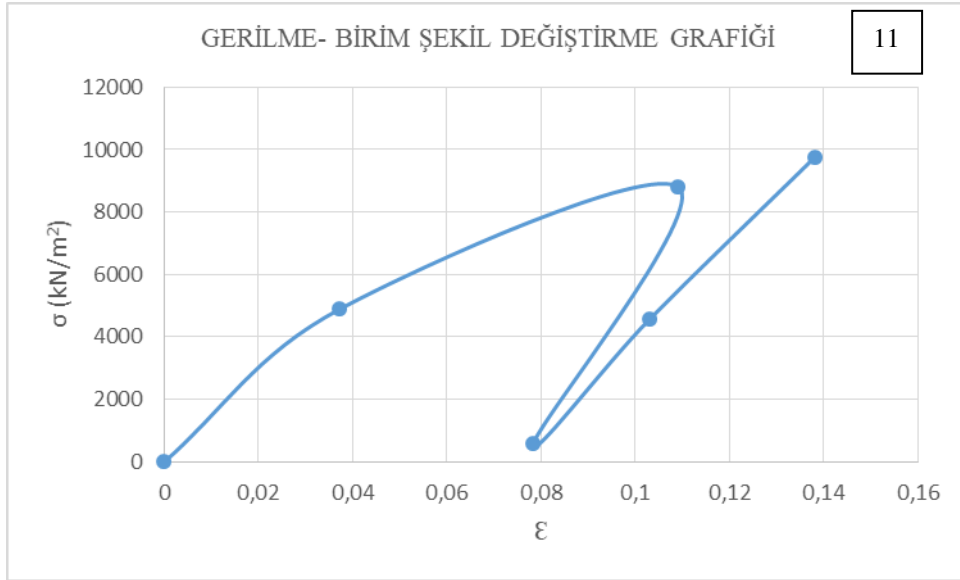
EK-1 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



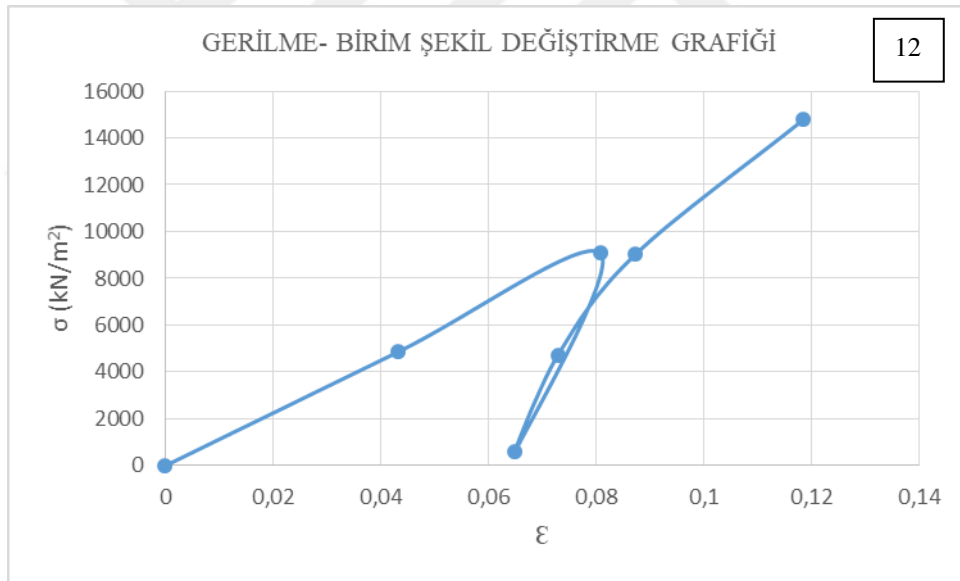
Ek 1.1. Deney No:9 Birim deformasyon grafiği



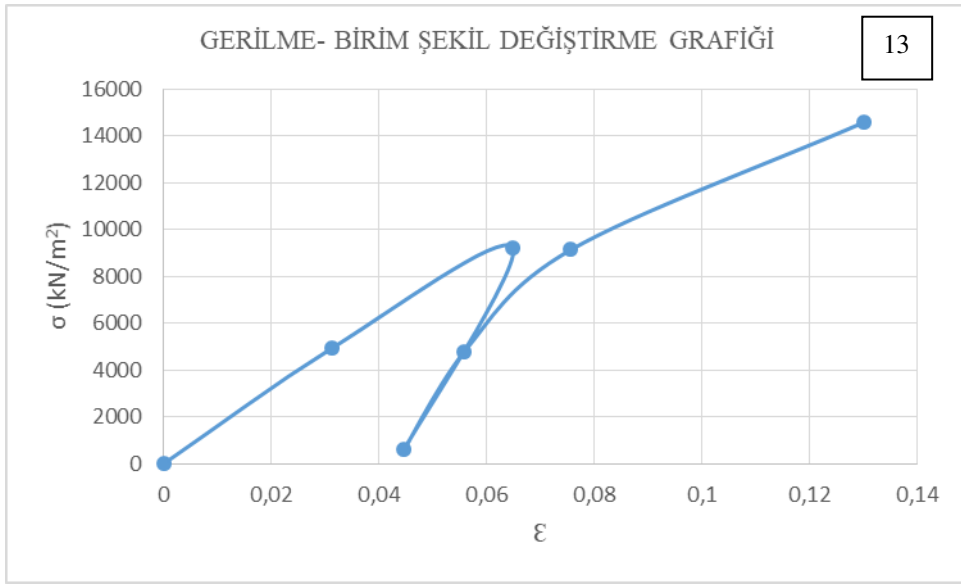
Ek 1.2 Deney No:10 Birim deformasyon grafiği



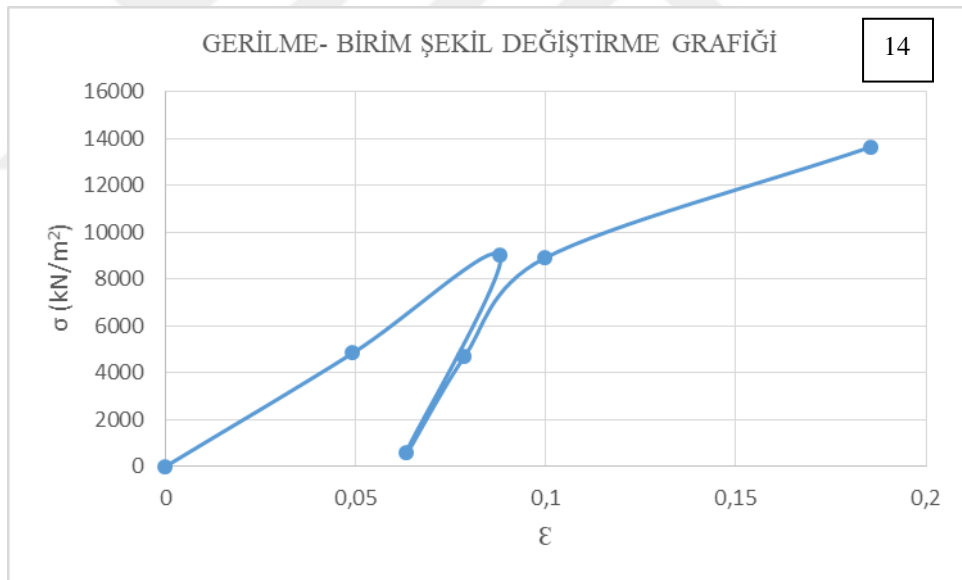
Ek 1.3 Deney No:11 Birim deformasyon grafiği



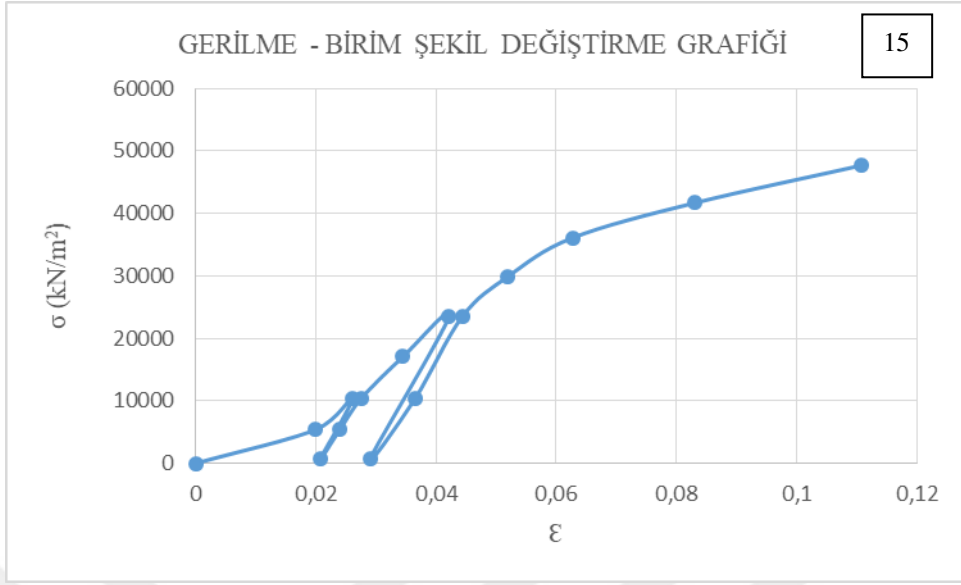
Ek 1.4. Deney No:12 Birim deformasyon grafiği



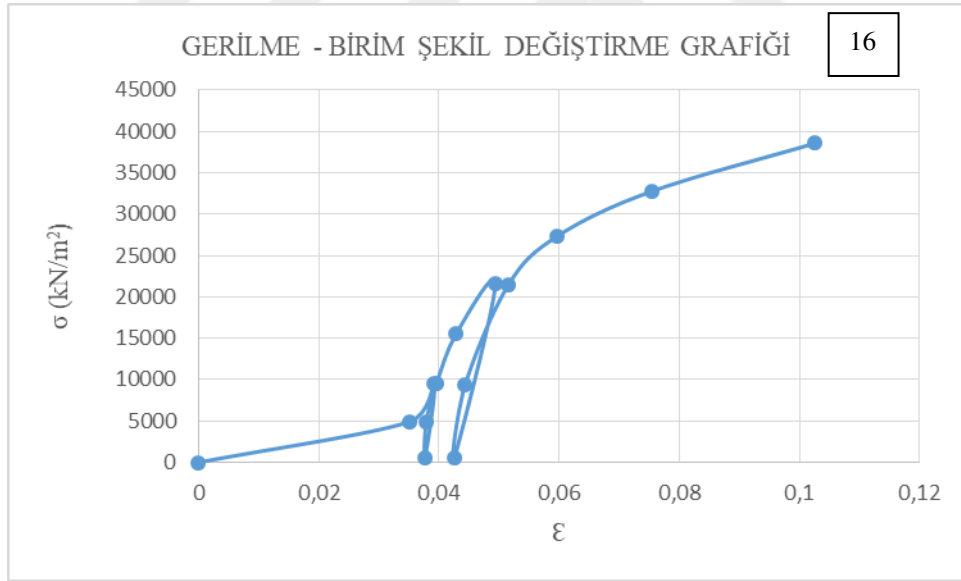
Ek 1.5. Deney No:13 Birim deformasyon grafiği



Ek 1.6. Deney No:14 Birim deformasyon grafiği

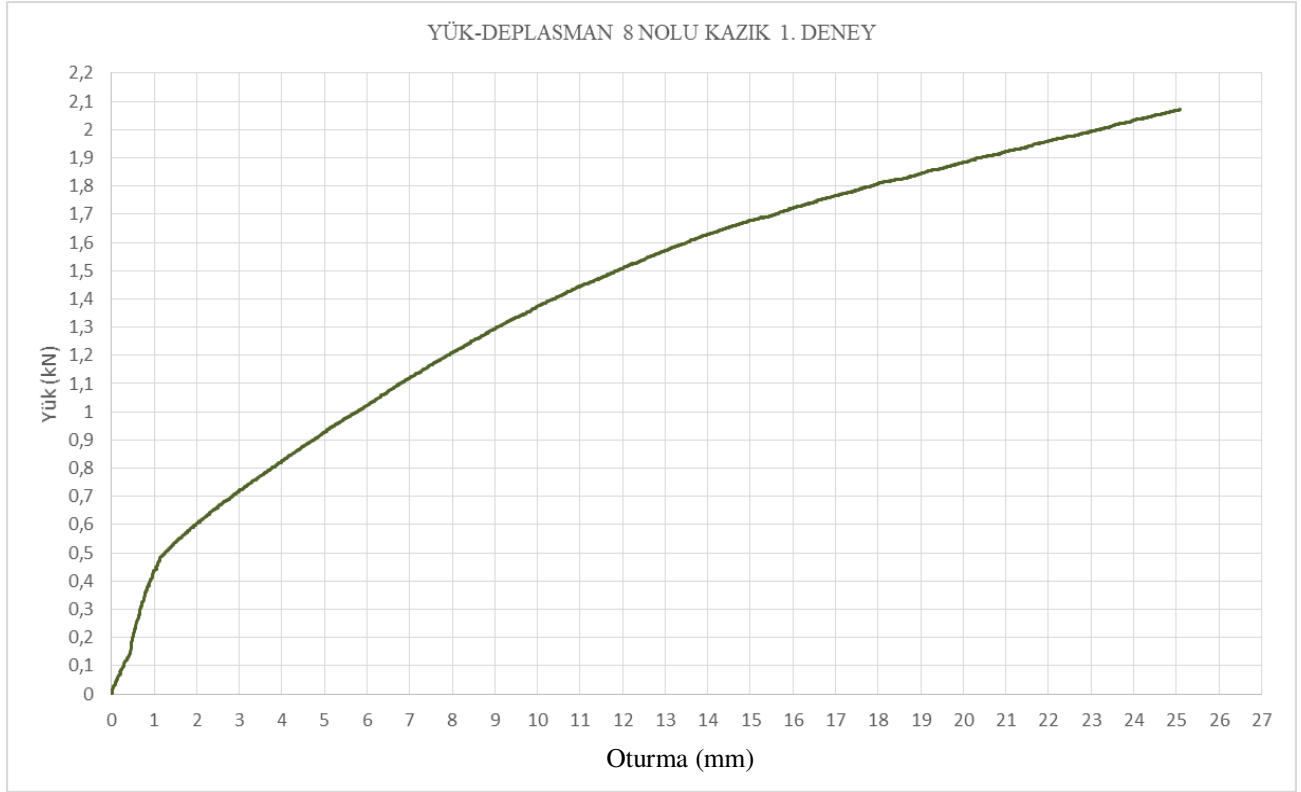


Ek 1.7. Deney No:15 Birim deformasyon grafiği

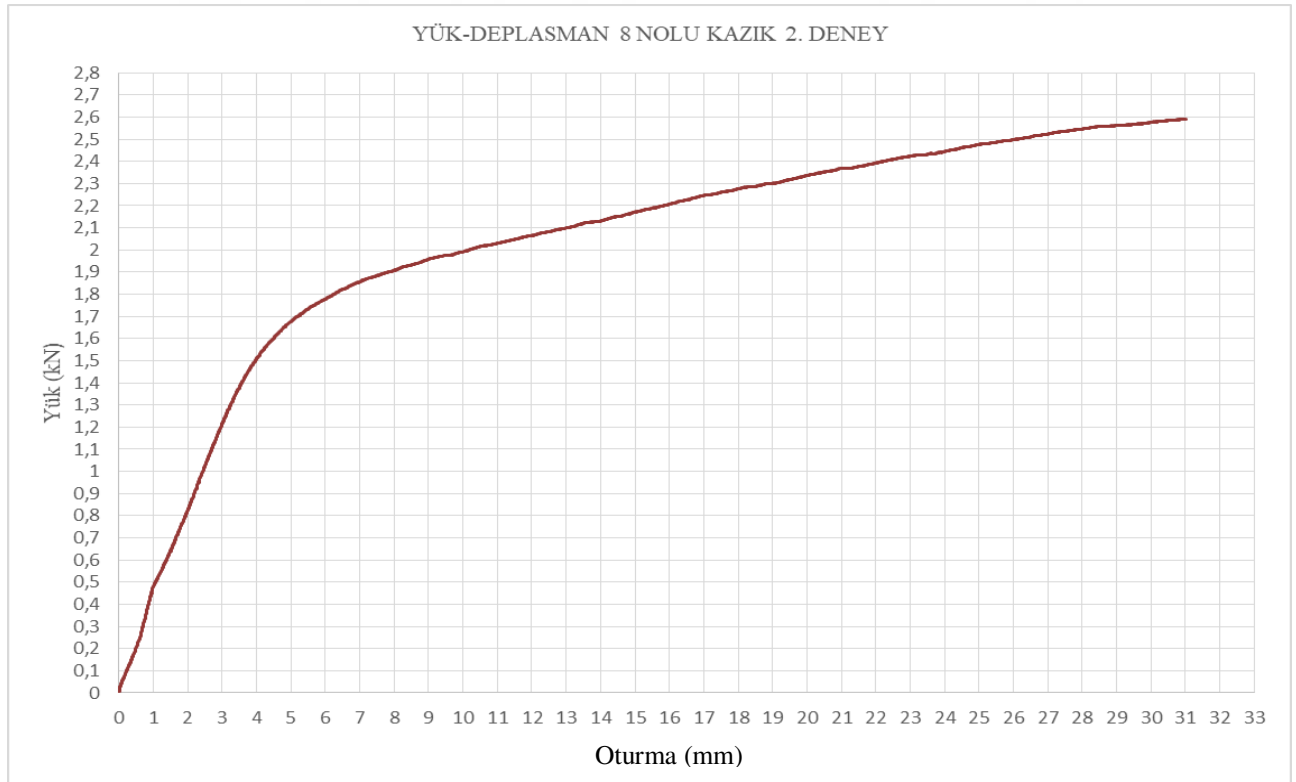


Ek 1.8. Deney No:16 Birim deformasyon grafiği

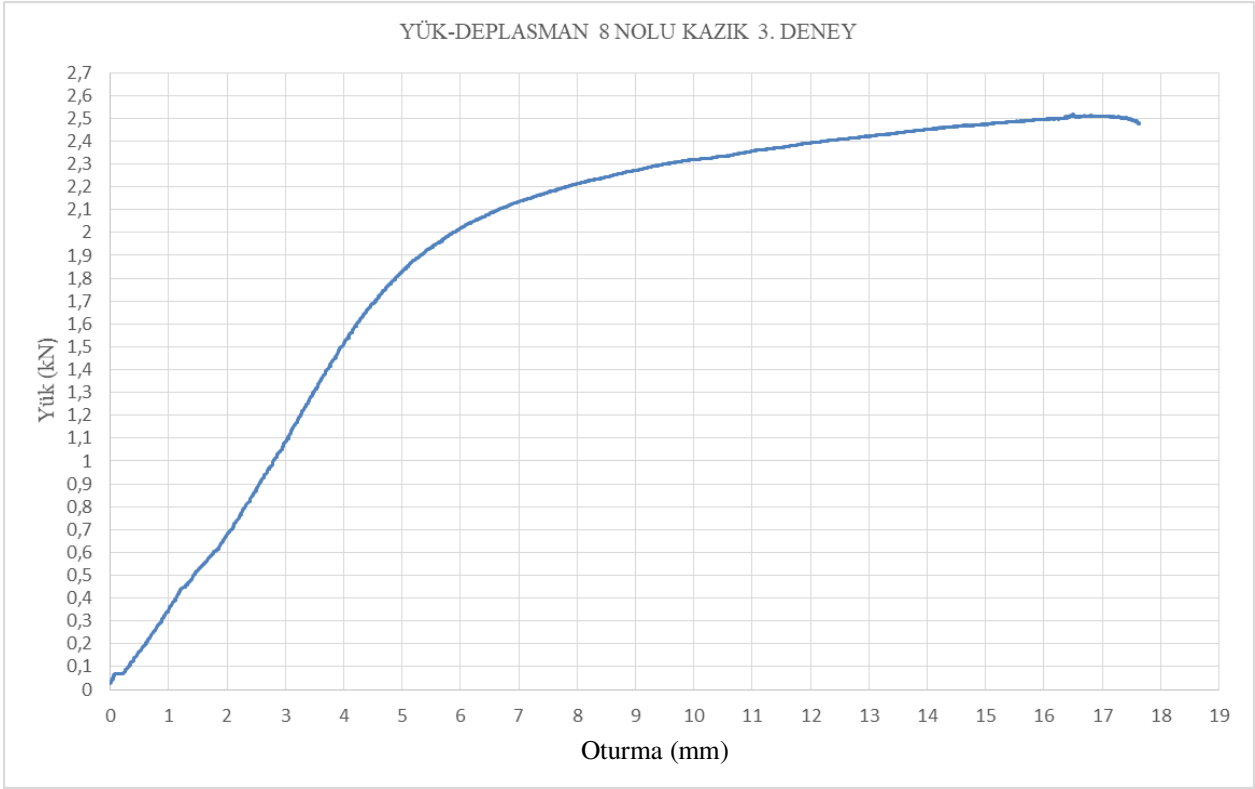
EK-2 Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları



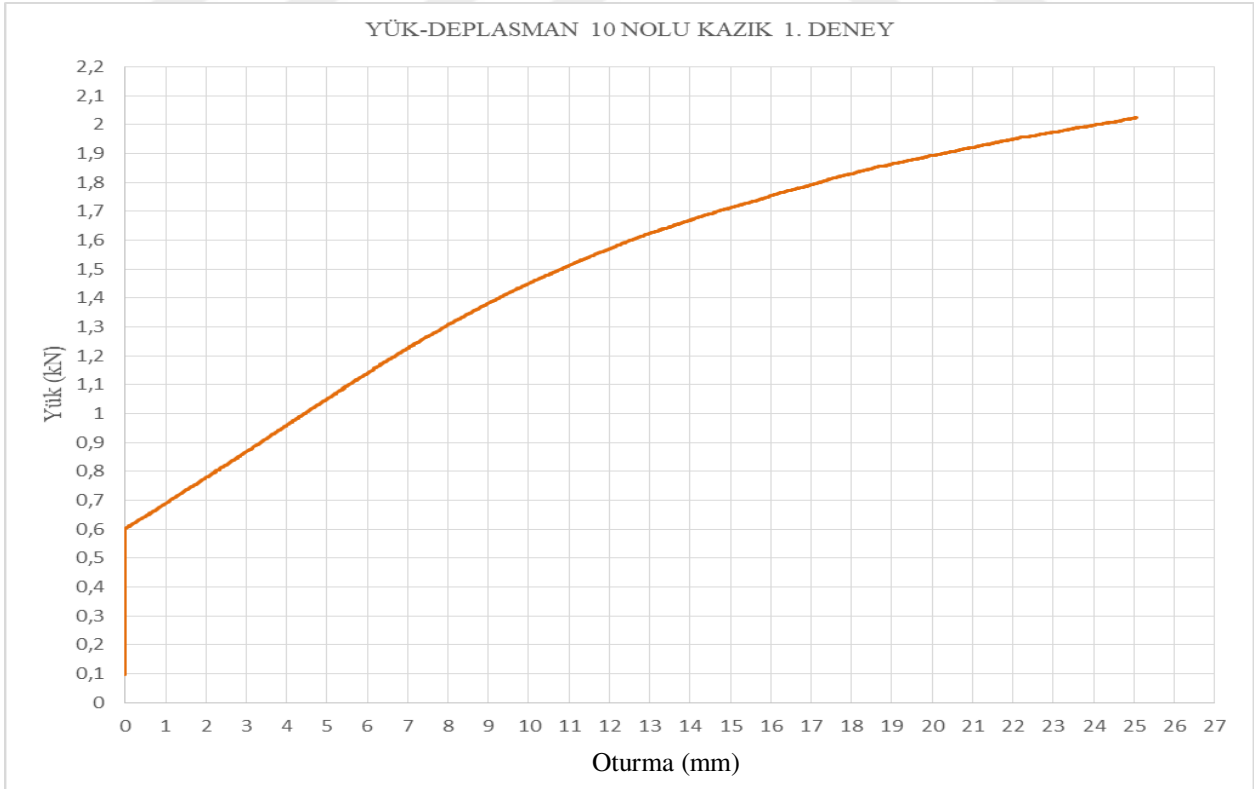
Ek 2.1. 8 nolu kazık 1. deney



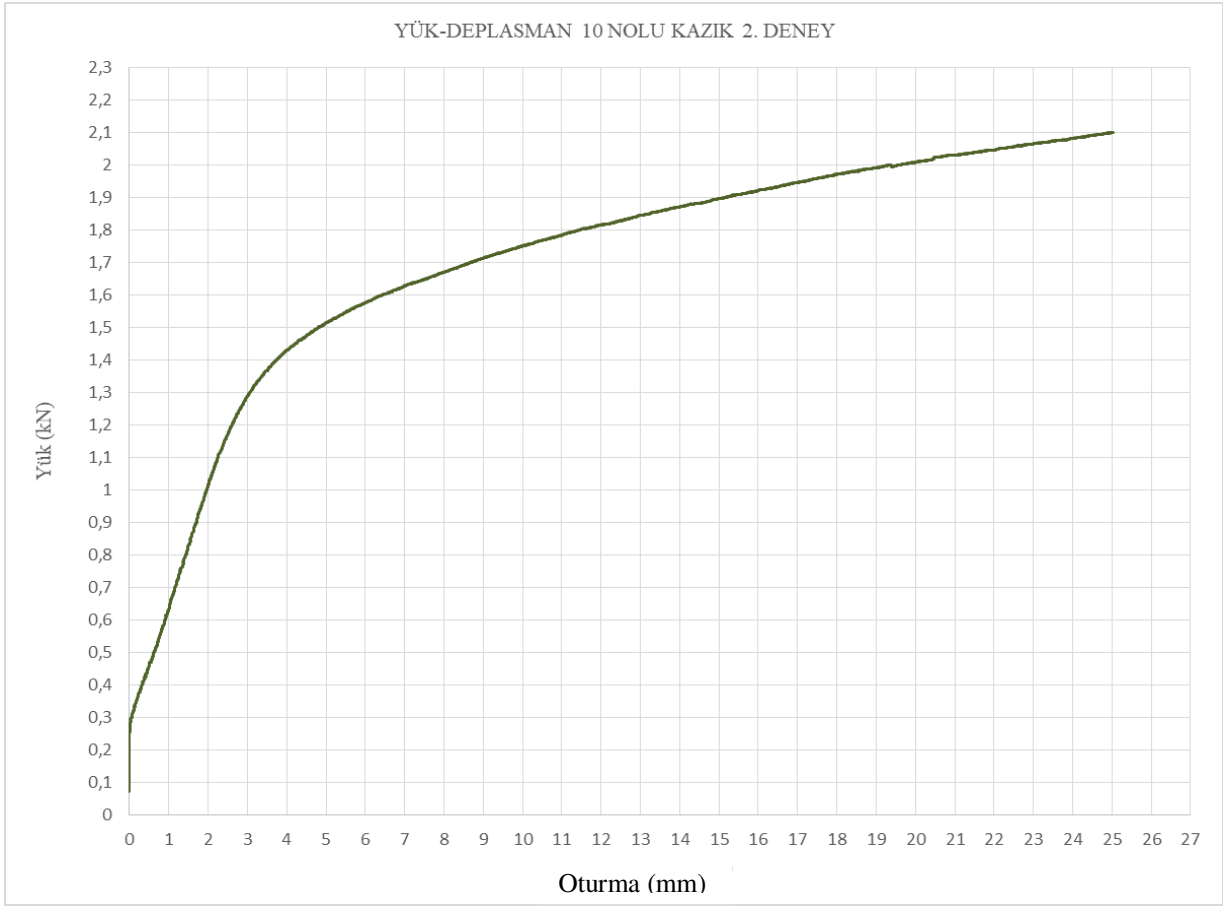
Ek 2.2 8 nolu kazık 2. Deney



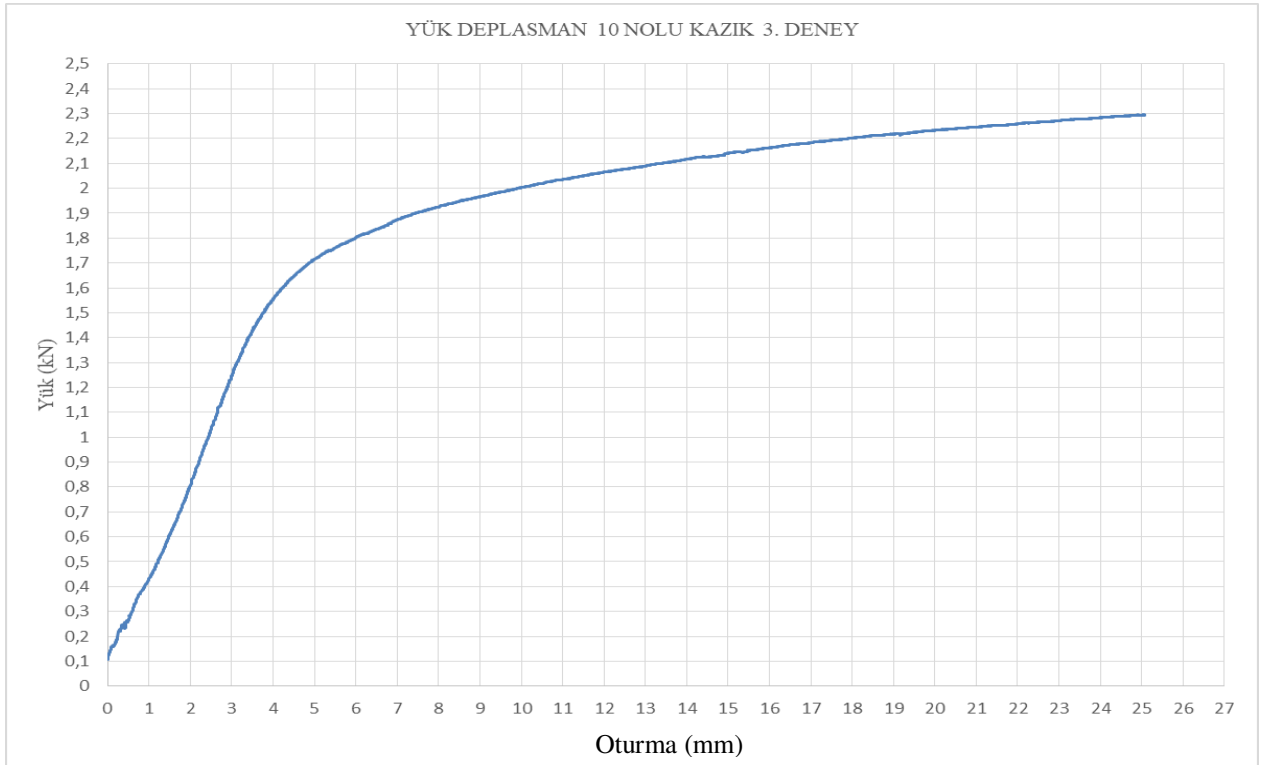
Ek 2.3. 8 nolu kazık 3. Deney



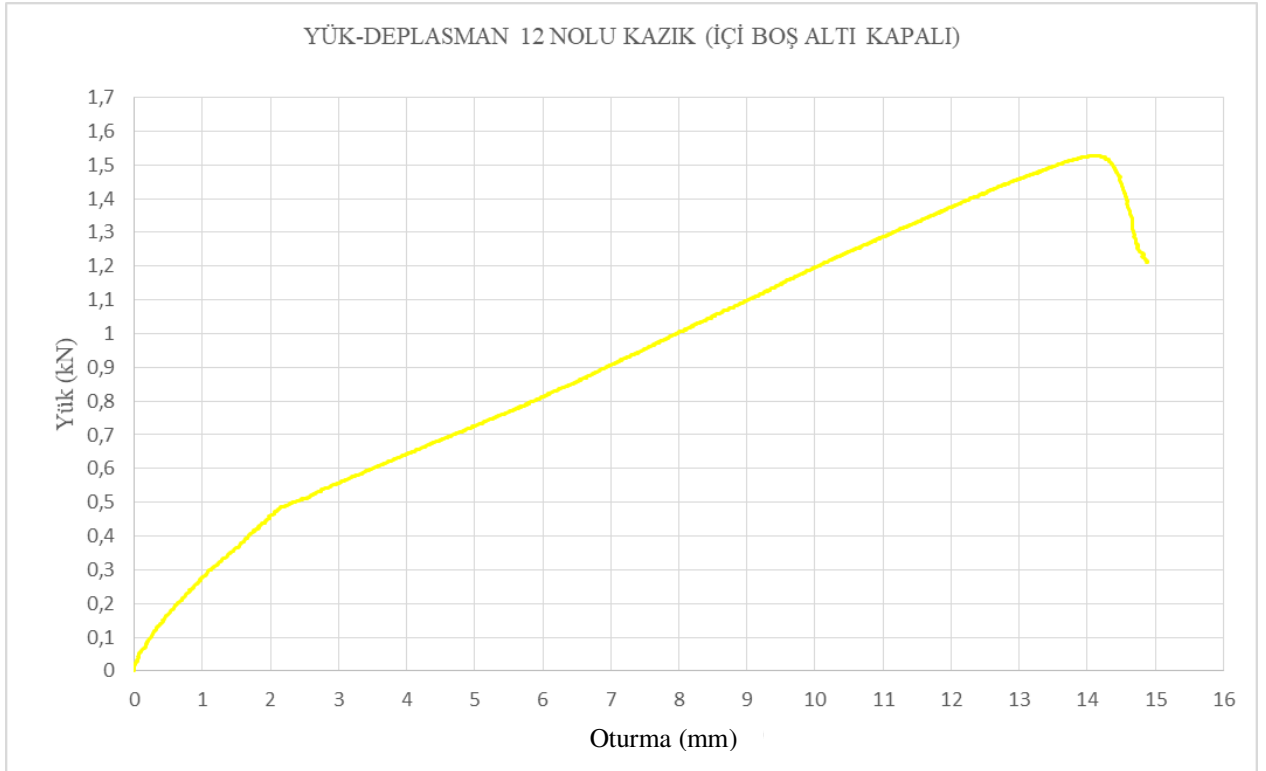
Ek 2.4. 10 nolu kazık 1. Deney



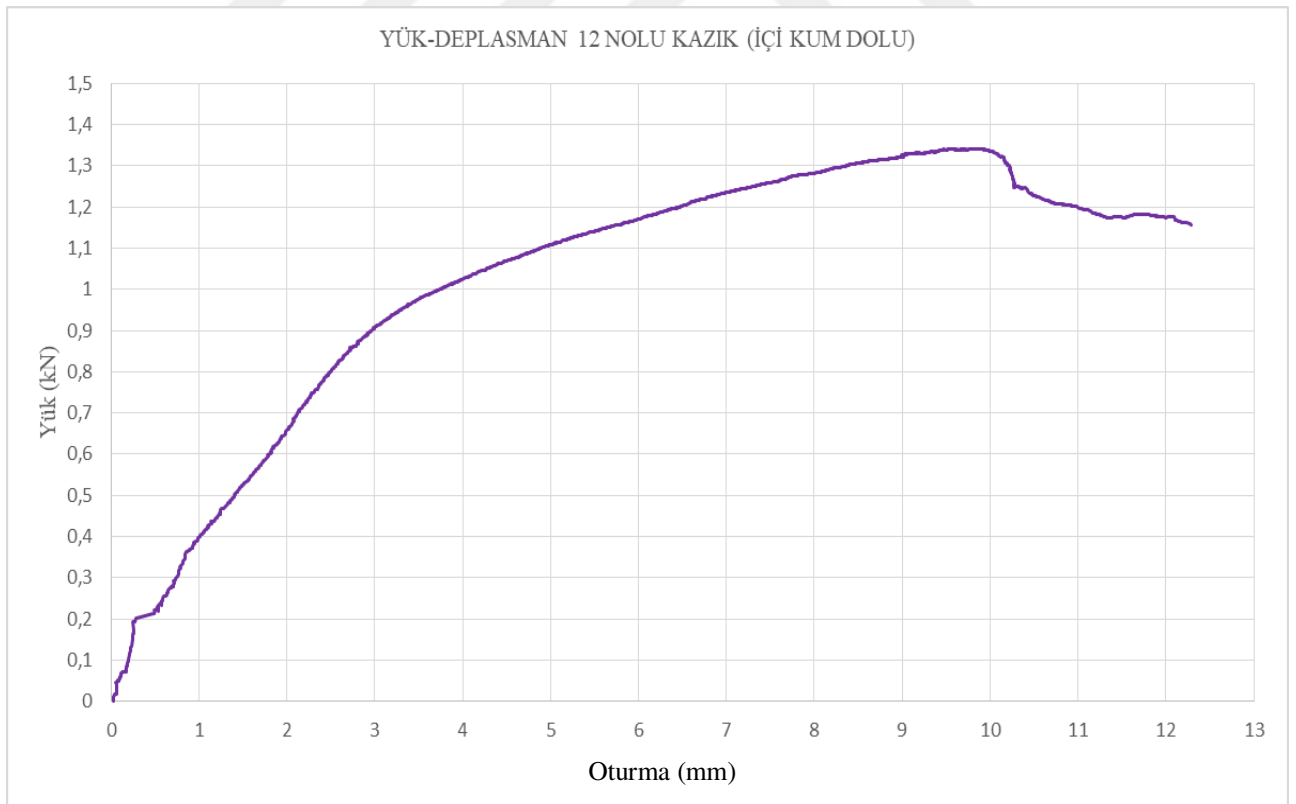
Ek 2.5. 10 nolu kazık 2. Deney



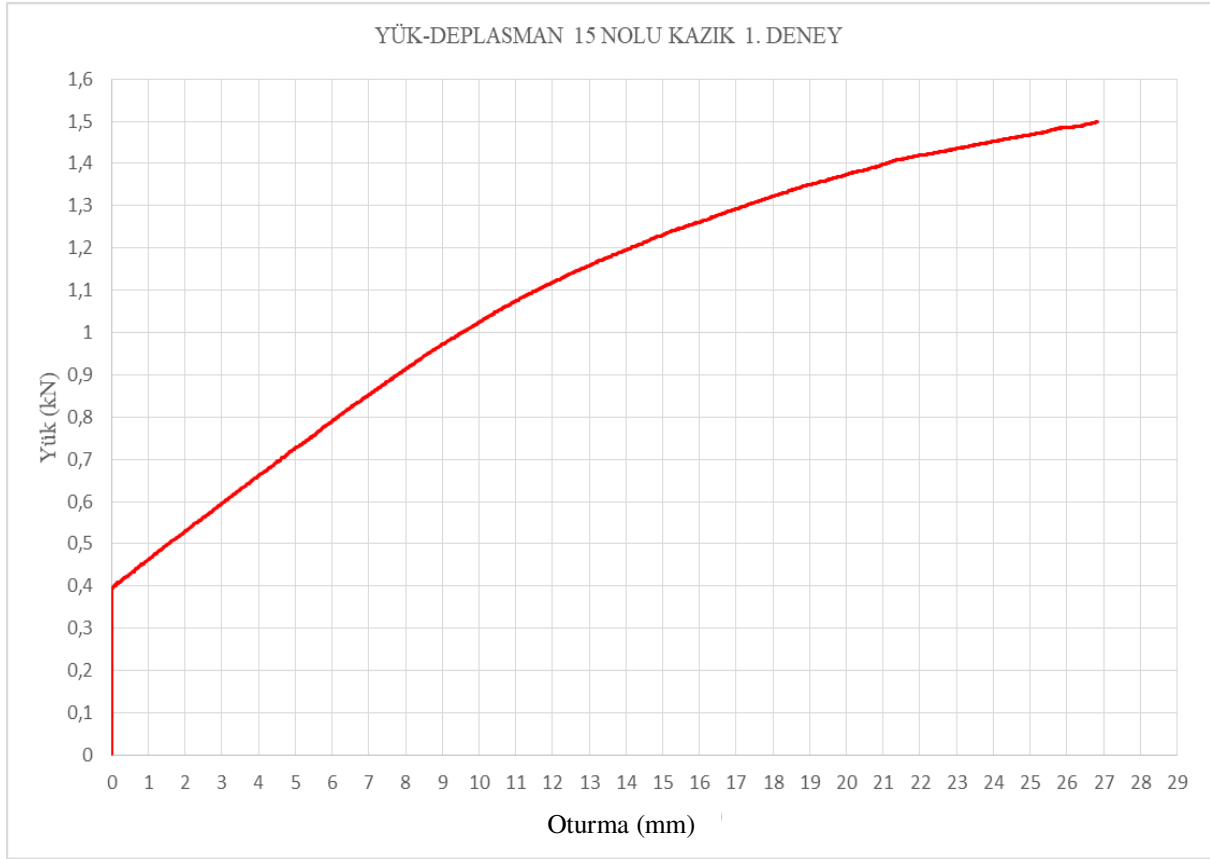
Ek 2.6. 10 nolu kazık 3. Deney



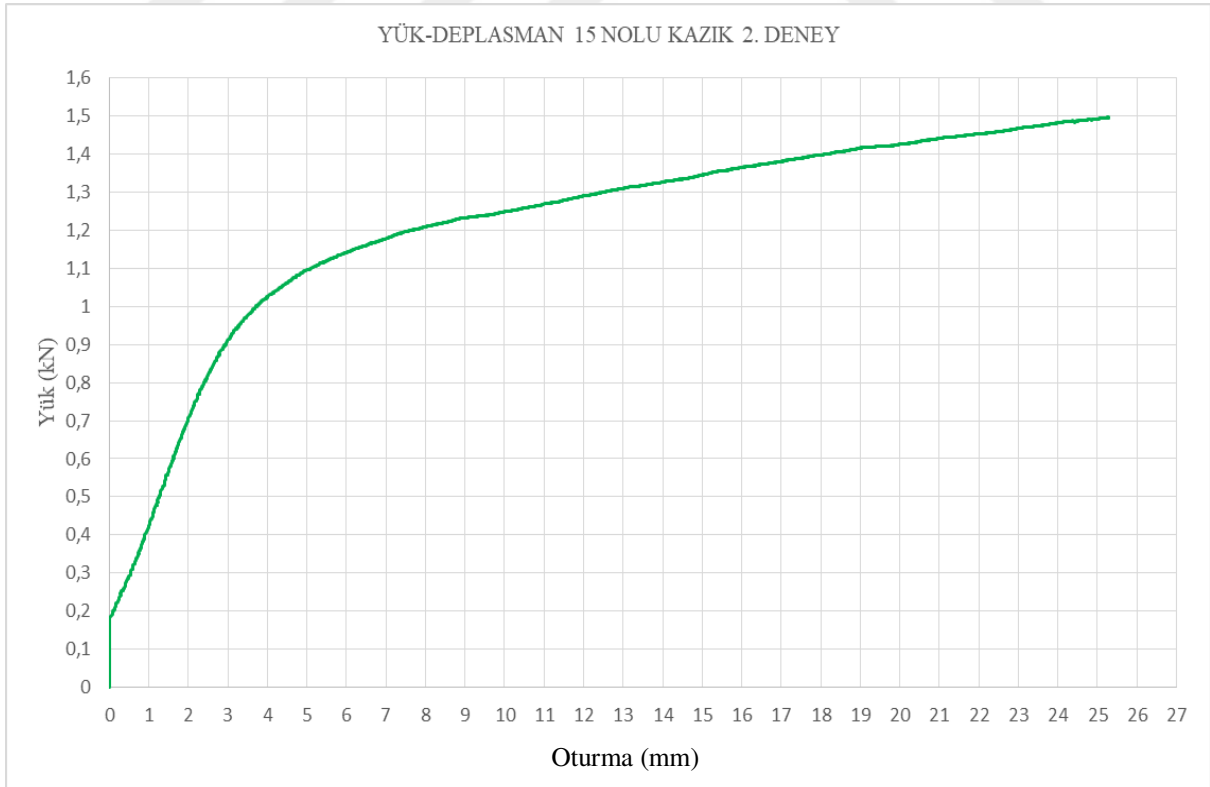
Ek 2.7. 12 nolu kazık 1. Deney



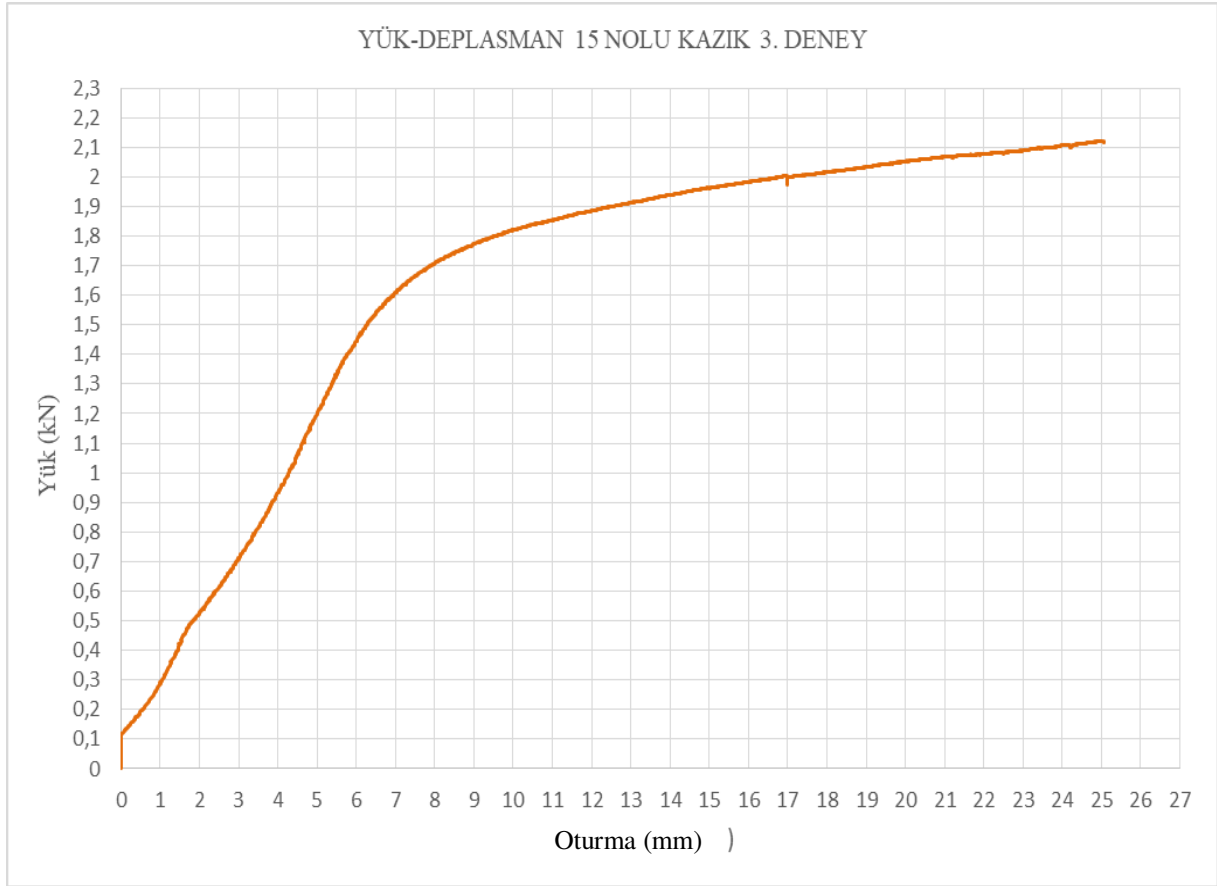
Ek 2.8. 12 nolu kazık 2. Deney



Ek 2.9. 15 nolu kazık 1. Deney



Ek 2.10. 15 nolu kazık 2. Deney



Ek 2.11. 15 nolu kazık 3. Deney

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şeyma Nur BÖLÜKBAŞI
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Cihanbeyli, 15.07.1994
Telefon : 0541 242 84 27
e-mail : nrsym@hotmail.com, seymabolukbasi@ltasarim.com.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2012
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği	2016
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği A.B.D	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016	Kanaat Çelik Konstrüksiyon	Dizayn Mühendisi
2017-2018	Arba Yapı Denetim	Kontrol Elemanı
2018- halen	L Tasarım Müşavirlik ve Mühendislik	Planlama Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce İyi düzeyde (Upper İntermediate Deulcom İnternational Sertifikalı)

İspanyolca Başlangıç düzeyinde (Hobi olarak)

YAYINLAR

Tan, Ö., BÖLÜKBAŞI, Ş.N., 2019, " Polyester Esaslı Kompozit Kazıklarda Performansın Model Deneylerle Araştırılması", 1. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi, Nevşehir, 12.