



**LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI POLİMER
İÇİ BOŞ KAZIKLARIN YUMUŞAK KİL
ZEMİN NUMUNELERİNDEKİ DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Fatih ARTUK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Doç. Dr. Seracettin ARASAN
2016
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI POLİMER İÇİ BOŞ KAZIKLARIN
YUMUŞAK KİL ZEMİN NUMUNELERİNDEKİ DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Fatih ARTUK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI POLİMER İÇİ BOŞ KAZIKLARIN
YUMUŞAK KİL ZEMİN NUMUNELERİNDEKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Doç. Dr. Seracettin ARASAN danışmanlığında, Fatih ARTUK tarafından hazırlanan bu çalışma 27/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (....) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Suat AKBULUT

İmza :

Üye : Prof. Dr. A. Şahin ZAIMOĞLU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Seracettin ARASAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 14/07/2016 tarih ve 28/21 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF VE UÇUCU KÜL KATKILI POLİMER İÇİ BOŞ KAZIKLARIN YUMUŞAK KİL ZEMİN NUMUNELERİNDEKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Fatih ARTUK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Seracettin ARASAN

Kazıklı temeller, yüzeysel temellerin yetersiz olduğu ve yüksek yük kapasitelerini karşılamak amacıyla karasal alanlarda ve denizlerde yaygın olarak kullanılan temel türüdür. Kazıklar malzeme bakımından ahşap, beton, çelik veya kompozit malzemelerden imal edilirler. Geleneksel kazıkların korozyon ve bozulma gibi etkiler nedeniyle sınırlı kullanım ömrü katkı polimer kazıkların kullanımını her geçen gün artırmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada lif ve uçucu kül katkı polimer içi boş kazıkların yumuşak kil zeminlerde uygulanabilirliği küçük boyutlu model deneyler ile araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 5 farklı lif, uçucu kül ve polimer karışımı kazık malzemesi olarak kullanılmıştır. Kazıklar ise uç kazık olarak dört farklı çapta (35 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm) ve üç farklı tipte (içi boş, içi boş-altı kapalı ve kırma taş dolgulu) kullanılmıştır. Yumuşak kil zemin olarak plastik kıvamda CL (düşük plastisiteli kil) sınıfı kaolin kili kullanılmıştır. Yapılan model deney sonuçlarına göre içi boş kazıklar en yüksek kazık taşıma kapasitesini vermişlerdir. Kazık çapının artması genel olarak kazık kapasite değerlerini artırmıştır. Sonuçta lif ve uçucu kül katkı polimer içi boş kazıkların yumuşak kil zeminlerde rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir.

2016, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yumuşak kil, içi boş kazık, uç kazık, polimer, uçucu kül

ABSTRACT

MS Thesis

EXPERIMENTAL STUDY OF BEHAVIOUR OF FIBER AND FLY ASH REINFORCED POLYMER HOLLOW PILE IN SOFT CLAYEY SOIL SAMPLES

Fatih ARTUK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Geotechnical Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Seracettin ARASAN

Pile foundations are widely used typical foundation in harsh marine and terrestrial environment when shallow foundation is insufficient and in order to meet high load capacity. In terms of material, piles are manufactured from wood, concrete, steel and composite material. Due to effect such as corrosion and distortion of traditional piles with limited lifetime, use of reinforced polymer piles is increasing every day. For this reason, in this study the applicability of fiber and fly ash reinforced polymer hollow piles is investigated with small-scale model tests. The scope of study, 5 different fiber, fly ash and polymer mixture was used as the material pile. Piles was used as end bearing pile to four different diameters (35 mm, 50 mm, 60 mm and 70 mm) and three different types (hollow, hollow-bottom closed and filled with gravel). Kaolin clay with CL (low-plasticity clay) class was used as soft clay ground in plastic consistency. According to model experiment results, hollow pile gave highest pile capacity. Pile capacity values with increase of the pile diameter generally increased. Ultimately, fiber and fly ash reinforced hollow polymer piles could be used in soft clay soils.

2016, 69 pages

Keywords: Soft clay, hollow pile, end bearing pile, polymer, fly ash

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Seracettin ARASAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında yürütülmüştür. Bu kapsamda deneysel çalışmalar esnasında yardımları ve önerileri ile tezimin gelişmesine katkıda bulunan Prof. Dr. A. Şahin ZAIMOĞLU, Uzman Serkan KARACA ve İnş. Müh. Mustafa KÜÇÜK'e teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve her zaman yanımda olan çok değerli arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Fatih ARTUK

Haziran, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
1.2. Kaynak Özetleri.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Kazıklı Temeller.....	9
2.1.1. Kazıklı temellerin tarihçesi	9
2.1.2. Kazıklı temellerin işlevleri ve kullanıldığı yerler.....	10
2.1.3. Kazık temel çeşitleri.....	11
2.1.3.a. İmal edildikleri malzemeye göre kazık temeller	11
2.1.3.b. Kullanım amaçlarına göre kazık temeller	17
2.1.3.c. Zemine yerleştirilme şekillerine göre kazık temeller	19
2.1.4. Kazık taşıma kapasitesi	20
2.1.4.a. Statik formüller.....	21
2.1.4.b. Dinamik formüller.....	23
2.1.4.c. Kazık yükleme deneyleri	26
2.1.4.d. Arazi deneyleri	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1. Materyal.....	28
3.1.1. Yumuşak kil zemin.....	28
3.1.2. Kompozit kazık üretiminde kullanılacak malzemeler	29
3.2. Yöntem	33
3.2.1. Deneylerde kullanılan model kalıplar	33
3.2.2. Deneylerde kullanılan kazık çakma sistemi	35

3.2.3. Yumuşak kil zeminlerin hazırlanması	36
3.2.4. Lif ve uçucu kül katkılı polimer karışım oranlarının belirlenmesi ve içi boş kazıkların hazırlanması	39
3.2.5. Kazıkların çakılması ve kazık yükleme deneyine hazırlanması	44
3.2.6. Kazık yükleme deneyleri	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	47
4.1. İçi boş kazıkların yükleme deney sonuçları	47
4.2. İçi boş-altı kapalı kazıkların yükleme deney sonuçları	53
4.3. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların yükleme deney sonuçları	58
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

BFRP	Bazalt Lif Katkılı Polimer
c	Kohezyon
CL	CL Kili
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CPT	Koni Penetrasyon Deneyi
D	Kazık çapı
FRP	Lif Katkılı Polimer
H	Hızlandırıcı
h	Tokmak Düşme Mesafesi
L	Kazık Boyu
Q_c	Kazığın Yanal Sürtünme Kapasitesi
Q_{top}	Tek Kazığın Nihai Taşıma Kapasitesi
Q_u	Kazığın Uç Taşıma Kapasitesi
s	Kazığın Zemine Giriş Mesafesi
S	Sertleştirici
SCC	Kendiliğinden Yerleşebilen Beton
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
SRP	Yapısal Olarak Güçlendirilmiş Plastikler
W_p	Kazık Ağırlığı
W_r	Tokmak Ağırlığı
γ	Zeminin Efektif Birim Hacim Ağırlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kompozit kazıklar	16
Şekil 2.2. Dairesel ve kare kesitli içi boş kazık	17
Şekil 2.3. Kullanım amaçlarına göre kazık tipleri	17
Şekil 2.4. Kazık yükleme deneyi	26
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kile ait görüntü	28
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kile ait dane çapı dağılımı	29
Şekil 3.3. Doymamış polyester, polyester hızlandırıcısı ve sertleştiricisi	31
Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan kendir	31
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan uçucu kül	33
Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan model kalıplar	34
Şekil 3.7. Kalıplardan çıkarılan kazıklar	34
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan model kalıplara ait şematik görüntü	35
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan model kalıp	35
Şekil 3.10. Çakma sistemi görüntüleri	36
Şekil 3.11. Mikser içerisinde hazırlanan yumuşak kil numunesi	37
Şekil 3.12. Nem odasında bekletilen kil zeminler	37
Şekil 3.13. Hazırlanan kilin model kalıplara yerleştirilmesi	38
Şekil 3.14. Model kalıplar içerisinde zeminin bekletilmesi	38
Şekil 3.15. Karışımların hazırlanması	40
Şekil 3.16. Karışımların kalıplara dökülerek bekletilmesi	40
Şekil 3.17. S1 model kazıklar	41
Şekil 3.18. S2 model kazıklar	41
Şekil 3.19. S3 model kazıklar	41
Şekil 3.20. S4 model kazıklar	42
Şekil 3.21. S5 model kazıklar	42
Şekil 3.22. İçi boş kazıklar	43
Şekil 3.23. İçi boş-altı kapalı kazıklar	43
Şekil 3.24. İçi boş kırmataş dolgulu kazıklar	43
Şekil 3.25. Model kazıkların çakılması	44

Şekil 3.26. Farklı çaplardaki kazıkların çakmadan sonraki görüntüleri	45
Şekil 3.27. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan cihaz	46
Şekil 4.1. Kazık çapına göre içi boş kazıkların yük-oturma grafikleri	48
Şekil 4.2. Katkı türüne göre içi boş kazıkların yük-oturma grafikleri	49
Şekil 4.3. İçi boş kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri.....	50
Şekil 4.4. İçi boş kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri	53
Şekil 4.5. Kazık çapına göre içi boş-altı kapalı kazıkların yük-oturma grafikleri.....	54
Şekil 4.6. Katkı türüne göre içi boş-altı kapalı kazıkların yük-oturma grafikleri.....	55
Şekil 4.7. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri	56
Şekil 4.8. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri.....	57
Şekil 4.9. Kazık çapına göre içi boş kırmataş dolgulu kazıkların yük-oturma grafikleri	58
Şekil 4.10. Katkı türüne göre içi boş kırmataş dolgulu kazıkların yük-oturma grafikleri	59
Şekil 4.11. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri.....	60
Şekil 4.12. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri	62
Şekil 4.13. Kazık türünün kazık kapasitesine etkisi	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Şahmerdanlara göre c değerleri	24
Çizelge 2.2. Çarpma sayısı (e)'nin temsili değerleri	26
Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan CL kilinin özellikleri	29
Çizelge 3.2. Doymamış polyester, hızlandırıcı ve sertleştiriciye ait özellikler	30
Çizelge 3.3. Kendirin bazı özellikleri	32
Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan uçucu külün bazı geoteknik özellikleri	32
Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan uçucu külün kimyasal bileşenleri	32
Çizelge 3.6. Karışımlara ait yüzdeler.....	39
Çizelge 3.7. Kazık malzemesi olarak kullanılan karışımların serbest basınç mukavemetleri	39
Çizelge 3.8. Kalker kırmataşa ait bazı özellikler	44
Çizelge 4.1. İçi boş kazıkların kazık kapasiteleri	52
Çizelge 4.2. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık kapasiteleri	57
Çizelge 4.3. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların kapasiteleri	61

1. GİRİŞ

Üst yapı yüklerinin fazla olması ve zeminde aşırı oturma problemlerinin oluşabileceği durumlarda özellikle yumuşak kil zeminlerde yüzeysel temeller yetersiz kalmaktadır. Yüzeysel temellerin yetersiz olduğu durumlarda en çok tercih edilen yöntemlerden biriside kazıklı temellerin kullanılmasıdır. Kazıklı temeller, hem kıyı alanlarında hem de karasal alanlarda tarih boyunca kullanılan bir derin temel türüdür. Kazıklı temeller kazık malzemesi, yük taşıma kapasitesi ve yerleştirme türüne göre sınıflandırılmaktadır.

Kazıklı temeller genel olarak kullanıldığı malzemelere göre ahşap, beton ve çelik malzemelerden üretilmektedir. Ancak geleneksel olarak tercih edilen bu kazıklar kötü zemin şartlarında ve sulu ortamlarda kullanılması risklere ve tehlikelere yol açmaktadır. Çünkü ahşabın çürümesi, çeliğin korozyona uğraması ve betonun bozunması gibi problemler ortaya çıkmaktadır ve bu problemler kazık malzemelerinin kesitlerinde azalmalara dolayısıyla taşıma kapasitelerinde önemli düşüşlere yol açmaktadır (Guades *et al.* 2012).

Bu durumda bu geleneksel kazıklara alternatif malzeme arayışı içerisine girilmiş ve alternatif olarak lif katkılı polimer (FRP) kazıklar ve yapısal olarak güçlendirilmiş plastikler (SRP) gibi kompozit malzemeli kazıklar tercih edilmiştir. Bu kompozit malzemeler korozyona karşı dirençlerinin yüksek olması ve uzun servis ömürleri bakımından geleneksel kazıklara göre uygun alternatif olmaktadır. Kompozit kazıkların özel çakma ve yükleme yönetmeliklerinin eksik olması, tam ölçekli geoteknik tasarım verilerinin sınırlı olması, uzun dönem durabilite çalışmaları ve detaylı olarak çevresel etki çalışmalarının olmaması kullanımını sınırlandırmaktadır (Zyka and Mohajerani 2016). Bunun yanında yapım maliyetinin daha düşük olması sebebiyle içi boş kazıklar (hollow pile) gün geçtikçe artan bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Polimer kazıklar ve de özellikle içi boş polimer kazıkların geleneksel kazıklara alternatif kullanılabilirliği araştırmaya açık bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada laboratuvarında küçük ölçekli model deney sistemleri kurularak içi boş, içi boş-altı kapalı ve içi boş kırmataş dolgulu kazıkların yumuşak kil zeminlerde kazık olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Bu araştırmanın amacı;

- Karışım türünün kazık kapasitelerine etkisini araştırmak,
- İçi boş kazık tipinin kazık kapasitelerine etkisini araştırmak,
- İçi boş kazık çapının kazık kapasitelerine etkisini araştırmak,

Çalışma kapsamında Ata Kimya Tic. Ltd. Şti. firmasında temin edilen düşük plastisiteli kaolinit kili (CL) kullanılmıştır. Öğütülmüş halde gelen killer arazi şartlarında suya doygun kil zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için likit limit kıvamına yakın bir su içeriğinde hazırlanmıştır. İçi boş, içi boş – altı kapalı ve içi boş kırmataş dolgulu kazıklar 5 farklı lif ve uçucu kül katkılı ve farklı çaplarda olmak üzere toplam 60 farklı tipte üretilmiştir. Model kalıplar içinde hazırlanan yumuşak kil zemine üretilen FRP kazıklar çakma sistemi ile yaklaşık 15j darbe enerjisiyle uç kazık olarak çakılmıştır. Çakılan kazıklar zemindeki oluşabilecek örselenme ve tiksotropi sebebiyle 10 gün süreyle zemin içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra kazık yükleme deneyleri ile kazık kapasiteleri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada, negatif çevre sürtünmesinin oluşmadığı varsayılarak deneyler yürütülmüştür. Bu bilgiler ışığında yumuşak killi zeminlerde içi boş kazıkların kullanımı hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu bilgiler yeni malzemelerin geoteknik açıdan performansları göz önünde bulundurularak alternatif olarak kullanılması ve bu alanda çalışma yapılması açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.

1.2. Kaynak Özetleri

Son yıllarda kazık temelleri konu alan model deney ve arazi uygulama çalışmaları artarak devam etmektedir. Çalışmalar, kohezyonlu (killi) ve kohezyonsuz (granüler) zeminler üzerinde uygulanan uç ve sürtünme kazıkları olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Bu çalışmaların haricinde kazık malzemesini konu edinen çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Yine de kompozit malzemeden imal edilmiş kazıkları yani katkılı polimer kazıkları konu alan özellikle içi boş kazıklar üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu bölümde araştırma konusu ile ilgili olarak araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalar özetlenerek sonuçları verilmiştir.

Iskander *et al.* (2001) yaptıkları teorik çalışmada, FRP kazıkların geleneksel malzemelere göre daha avantajlı olduklarını ifade etmişlerdir. Kompozit malzemeler düşük sertlik içermesi, yüksek sönümlenme özelliği göstermesi ve düşük dayanımları bakımından kazıkların çakılması ile ilgili birçok zorluklar sunmasına rağmen, kazık malzemesi olarak FRP'nin kullanımı kötü zemin koşullarında ve su kenarı çevrelerde geleneksel malzemelerin bozunma problemlerini elimine ettiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada tipik su kenarı alanlarında FRP kompozit kazıkların çakılabilirliği üzerine zemin şartları ve çeşitli kazık özelliklerinin etkisi teorik olarak araştırılmıştır. Tüm analizler kompozit kazıklarının yük-taşıma kazıkları için uygun kapasitelerde çakılabildiğini göstermiştir.

Ashford *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada, 6 farklı kazığı analiz etmişlerdir ve bu kazıkların 2 tanesi geleneksel materyallerden elde edilmiştir. Bu kazıklar 305 mm öngerilmeli prekast beton kazık ve 340 mm çelik boru kazıklardır. Bu kazıklar 400 kN izin verilen tasarım yüküne sahip ulaşım inşaatlarında kullanılan tipik kazıklar olarak düşünülmüşlerdir. Diğer 4 adet kazık karşılaştırma yapmak için seçilmiştir. Bunlardan biri plastik sargılı çelik boru kazık ve geriye kalan 3 kazık ise cam lif katkılı polimer kazıklardır. Bu kazıklardan 2 tanesi flamen sargılama tekniği ile inşa edilmişler, biri çakmadan önce beton ile doldurulmuş ve diğeri reçine enjeksiyonlu kalıplama prosesi kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada 3 tek yönlü dizel tokmaklar 32 kN.m, 69 kN.m ve 153 kN.m enerji oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada yumuşak ve sıkı olarak 2 farklı zemin profili kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, cam lif katkılı polimer kazıklar diğer kazıklardan daha düşük direnç göstermişlerdir. Ayrıca cam lif katkılı kazıklar da diğer kazıkların nihai taşıma kapasite değerlerinin yaklaşık %65-75'i elde edilmiştir.

Mirmiran *et al.* (2002) yaptıkları arazi test çalışmaları için, toplamda 4 adet kompozit kazık (2 adet içi dolu-2 adet içi boş) ve 1 adet beton kazık üreterek arazi testleri uygulamışlardır. İçi dolu kazıklardaki çakma gerilme değerlerinin beton kazıkların gerilme değerlerine benzer olduğunu elde etmişlerdir. Ancak içi boş kazıkların eğer yumuşak ve sığ derinliklere çakılmazsa çakma etkisi altında eğilme ve kırılma gösterebileceğini bulunmuştur. Ayrıca dalga denklemi analizi sonuçlarına göre aynı kesit alana ve aynı dayanımlara sahip beton kazıklar ile FRP kazıkların çakılabilirliğinde farklılık olmadığını bulunmuştur. Sonuç olarak arazi deneyleri içi dolu FRP kazıkların köprü temelleri için kullanılabilir olduğunu ve büyük darbe etkilerinde bile kazık baş kısmında hasar olmadan çakılabilir olduğunu bulmuşlardır.

Pando *et al.* (2003), kompozit kazıkların yük taşıma testlerinde eksikler olması dolayısıyla Hampto, Virginia'da kazık yük test programları uygulamışlardır. Deneylerinde 1 adet ön gerilmeli beton kazık ve 2 adet farklı tipteki kompozit kazıklar eksenel ve yanal yüklere tabi tutulmuşlardır. Kompozit kazıklardan bir tanesi FRP içi boş kazık olup, yapı çeliği ile güçlendirilmiş ve beton ile doldurulmuş, diğer kompozit kazık ise yine yapı çelikleri ile güçlendirilerek polietilenden oluşturulmuştur. Ön gerilmeli beton kazık ve FRP kazıklar yük aktarım ve uzun dönem bozunma davranışlarının belirlenmesi için köprüye yerleştirilmişlerdir. Yapılan çalışma sonuçları olarak ön gerilmeli beton kazık ve FRP kazığın eksenel gerilme değerleri birbirine yakın bulunmuş ve plastik kazığın eksenel gerilme değerinin yaklaşık 2,5 katı değer elde edilmiş. Aynı zamanda statik yanal yük testlerinde FRP kazık ve ön gerilmeli beton kazık aynı yük-eğilme değerleri göstermişlerdir. Plastik kazık ise aynı yanal yük değerlerinde daha fazla eğilme değerleri göstermişlerdir.

Anido *et al.* (2005), ahşap kazıkların yapısal iyileştirilmesi ve korunması için etkili yöntemler geliştirmeye çalışmışlardır. Ahşap kazıkları onarım yöntemi olarak lif katkılı polimer (FRP) kompozit kılıflar kullanılmış. Lif, reçine, tutkal ve kılıf gerekli sistem performansı sağlaması için sistematik olarak analiz edilmiş. Daha sonra hasar görmüş kazığın etrafına FRP kompozit kılıflar yerleştirilmiş. Yapılan bu çalışmada ahşap kazıklar için önerilen FRP kompozit materyallerin yapısal koruma ve iyileşme sağladığı

görülmüştür. Ayrıca yine bu çalışma sonucunda ahşap kazıklara koruyucu kimyasallar uygulanmadığı için yapılan bu uygulamanın çevreye zarar vermediği tespit edilmiştir.

Seica and Packer (2006), FRP materyallerin yapısal davranışlarını ve çelik elemanları iyileştirmek için uygun olup olmadıklarını araştırmak için deneyler yapmışlardır. Deneyler su altında ki tamir yöntemleri ile ilgili tekniklere göre gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışma sonucu olarak FRP materyallerin çelik kazıkların iyileştirilmesi için uygun oldukları kanıtlanmıştır.

Sakr *et al.* (2007) çalışmalarında, farklı konik açılı FRP borular kendiliğinden yerleşebilen betonla (SCC) doldurmuş ve büyük basınçlı zemin haznesi içerisine yerleştirilmiş kum zemin içerisine çakılmışlardır. Çakma testleri, çakma performansını kazık malzemesi ve geometrik şeklinin nasıl etkilediğini belirlemek için FRP-SCC kompozit kazıkları üzerine uygulamışlardır. Geleneksel kazık malzemelerinin ve FRP-SCC'nin çakılabilirliği dalga denklemi analiz programı PDPWAVE kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ve dalga denklemi analizleri konik şeklin kazıkların çakılabilirlik ve statik dirençlerini olumlu yönde etkilediğini göstermişlerdir. Aynı zamanda FRP-SCC kompozit kazıkların çakılabilirliği, geleneksel ön gerilmeli beton ve çelik kazıklara benzer olduğunu bulmuşlardır. Ancak, boş FRP borular için daha fazla çakma enerjisi gerektiğini bulmuşlardır. Burulma riskleri ile birlikte düşük eğilme dirençleri bu tür kazıkların farklı zemin şartları altında çakılabilirliğini engelleyebileceğini ifade etmişlerdir.

Sen and Mullins (2007) yaptıkları çalışmada, su altındaki kazıkların tamiri için FRP kompozitlerin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada karbon ve cam lifler kullanılarak bu malzemeleri 2 farklı yöntemle; önceden uygulama ve ıslak kaplama şeklinde uygulamışlardır. Yaptıkları deneylerin sonucu olarak FRP kompozitlerin yüksek dayanım, yüksek korozyon direnci ve hafif olmalarından dolayı yapısal tamirler ve acil tamirler için uygun olduklarını bulmuşlardır.

Robinson *et al.* (2008), Elizabeth, New Jersey de yapılan arazi deneylerinde kazıkların yükleme ve yük test davranışları çalışmışlardır. 12 adet kazığa dinamik testler ve 3 adet kazığa da statik testler uygulamışlardır. Yapılan bu çalışmada eksenel yük uygulamalarında plastik kazıkların kullanılabilirliği belirlenmiştir. Polimer kazıkların dinamik testler de ölçülen değerlere bakıldığında ise basınç dalga hızlarında sıradışı azalma görülmüştür. Ayrıca statik testlerde de tüm kazıkların taşıma güç değerlerinin benzer olduğu görülmüştür.

Guades *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada, kompozit kazıkların çakılabilirliğini ve çakma esnasında ki yapmış olduğu davranışlarını araştırmışlardır. Ayrıca lif katkılı polimer içi boş kazıklar üzerine yapılan deneysel çakma test sonuçlarını tartışmışlardır. Levha üzerine yapılan darbe test sonuçları boyuna numunelerin enine numunelere göre daha yüksek enerji emme kapasitelerine sahip olduğunu bulmuşlardır. Çekmeli sıkılmış parça üzerine uygulanan eksenel darbe testleri, rijitliğin bozulması darbe çevrimi ve enerjinin artması ile arttığını ortaya çıkarmıştır. Genellikle literatürde tam ölçekli çakma testleri üzerine bilgilerin sınırlı olduğu ve mevcut tasarım prosedürleri geliştirilerek kullanılan kompozit kazıklarının çakma performanslarını doğrulamak ve değerlendirmek için kazık yükleme testlerinin uygulanması gerektiği vurgulanmışlardır.

Guades and Aravinthan (2012) yaptıkları laboratuvar çalışmasında, eksenel darbe altındaki kare kompozit içi boş kazıkların kalıcı özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu içi boş kazıkların darbe sonrası davranışları üzerine darbe sayıları, tokmak kütlesi, yük sayıları gibi hasar faktörlerinin etkilerini vurgulamışlardır. Daha sonra deney numuneleri alınarak kalıcı basınç çekme ve eğilme özelliklerini belirlemek için statik olarak testler uygulamışlar. Sonuçlar vuruş sayısının, darbe enerjisinin ve tokmak kütlesinin içi boş kazıkların kalıcı dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Darbe uygulanan kazıkların kalıcı basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının maksimum düşme değerleri sırasıyla %6,8, %0,3 ve %10 olarak bulmuşlardır.

Giraldo and Rayhani (2014) yaptıkları çalışmada, model lif katkılı polimer (FRP) ve çelik kazıklar üzerine statik eksenel ve yatay kazık yükleme testleri uygulamışlardır. Bu

çalışmada yumuşak kil zemin içerisindeki FRP kazıklarının geoteknik sürtünme performanslarını içi boş çelik kazıklarla karşılaştırmayı amaçlamışlardır. İçi boş FRP kazıkları farklı lif yönelimleri ile karbon ve cam lifler kullanılarak üretilmişlerdir. Kazık yükleme testleri 700 mm uzunluğunda 55 mm çapında küçük ölçekli kazıklar kullanılarak büyük örselenmemiş kil örneklerinde uygulanmıştır. FRP kazıkların eksenel taşıma kapasiteleri çelik kazıklarla karşılaştırıldığında %5-40 daha yüksek olduğu görülmüştür. Yatay yükleme altında FRP kazıklar çelik kazıklar ile karşılaştırıldığında artan bükülmeler sergilemişlerdir. Çalışma sonucunda FRP kazıklarının eksenel kapasiteleri bakımından yük taşıma elemanları olarak uygulanabilmesi için uygun özelliklerde olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu kazıkların yapısal bütünlüğü ve aşırı bükülmelerin (burkulma) daha fazla araştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Ramaswamy *et al.* (2014), tek yönlü bazalt kumaş ile güçlendirilmiş kazıkların yük taşıma kapasitelerini deneysel olarak çalışmışlardır. 15 tane uç kazık eksenel basınç deneyleri için üretilmiştir. Bu kazıklardan 3 tanesi geleneksel kazık olarak, diğer 3 tanesi çift katlı bazalt lif katkılı polimer (BFRP) ile sargılanarak ve geriye kalan 9 adet kazıklar ise nihai yük değerinin %30, %60 ve %90 değerlerinde önceden yüklendikten sonra çift kat BFRP sargı ile yenilenmiş kazıklar olarak üretilmişlerdir. Elde edilen deney sonuçlarına göre BFRP sargılı kazık elemanların geleneksel kazıklara göre yük taşıma kapasiteleri, eğilme ve deformasyon dirençleri daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Aynı zamanda %30, %60 ve %90 önyükleme yapıldıktan sonra yenilenen kazıklar geleneksel kazıkların basınç dayanımlarından daha büyük değerler göstermişlerdir. Ayrıca BFRP sargılı kazıklar çok yüksek yük değerlerinde kırılma gerçekleştirmişlerdir. Çift katlı BFRP sargılı kazıklar eksenel yükleme esnasında geleneksel kazıklara göre daha stabil davranmışlar ve hacimsel deformasyon değerleri geleneksel kazıklardan daha düşük değerde olduğu elde edilmiştir.

Zhang and Wang (2014) yaptıkları çalışmada, kuru kum içerisine çakılan kazıkların mekanizmalarını belirlemek için model kazık testleri yapmışlardır. Test esnasında kazığı çevreleyen zeminde rijitlik ve basınç değişikliklerini gözlemlemek için eğilme

sistemi ve basınç sensörleri kullanmışlardır. Elde edilen değerlerde, zemin partikülleri arasında normal temas kuvvetlerinin kazık yükleme esnasında ki büyüklüklerinin gittikçe daha homojen olduğu görülmüş. Bu davranış daha büyük sertlikteki zeminleri ile daha stabil zemin yapılarının elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca homojenleşme ile zemin partiküllerinin birbirlerine kenetlenmesi de sağlamıştır.

Aksoy vd (2015) yaptıkları çalışmada, FRP den üretilmiş model kazıkları %10, %40 ve %65 rölatif sıkılıktaki hazırlanmış dere kumu içerisine düşey olarak yüklemişlerdir. Yapılan deneylerden FRP kazıklı radye temellerin oturma ve taşıma gücü grafiklerini elde etmişlerdir. Yük ve oturmalar ile zemin tabakasında meydana gelen gerilme değişimlerini belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda zemin rölatif sıkılığı arttıkça temelin taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Zemin kütleğinde meydana gelen maksimum gerilmeler, kazık uç noktalarına yakın kısımlarda zeminin artan sıkılığı ile çok az miktarda artış göstermiş fakat kazık uçlarına en uzak noktada artan rölatif sıkılıkla ölçülen değerlerin daha fazla artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Zyka and Mohajerani (2016) çalışmalarında, kompozit kazıkların tarihsel kullanımını, yük taşıyan kompozit kazıkların yapısal ve geometrik tasarımını, kazıkların durabilitesini ve son olarak üretim ve inşa sürecini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre FRP kazıkların alternatif bir derin temel olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Aynı zamanda tam ölçekli araştırmaların yapılması gerektiğini yeterli çakma talimatı ve durabilite testleri yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kazıklı Temeller

Kazıklı temeller, zemin taşıma gücünün yetersiz olduğu, temel derinliği bakımından yüzeysel temellerin uygulanabilirliğinin olmadığı, yapıların oturmaya hassas olduğu ve zemine gelen yapı yüklerinden dolayı deprem anında zemin üst tabakalarında sıvılaşma ihtimali olduğu durumlarda uygulanan bir derin temel türüdür.

2.1.1. Kazıklı temellerin tarihçesi

Kullanımı 12000 yıl öncesi, Neolitik Çağlara dayanan kazıklı temeller mühendislik tarihinde en eski yapı elamanlarından biridir. İsviçre’de insanların barınaklarını sığ göl zeminine ahşap kazık çakarak oturttukları bilinmektedir. Yine kazıklı temellerin sanat yapılarında Roma İmparatorluğu tarafından da kullanıldığı bilinmektedir.

Tarih boyunca çeşitli amaçlar için kullanılan kazıklı temeller tarihi gelişimlere de ayak uydurarak kullanılan malzeme açısından da değişiklikler göstermiştir. Ahşap kazıklar yerini basınç, gerilme, deformasyon ve çekme gibi parametreler göz önünde bulundurulduğu zaman kullanılacağı yere göre çeşitli üstünlükler sağlayan beton ve çelik kazıklara bırakmıştır. Ancak günümüzde hala ahşap kazıklı temellerin kullanıldığı alanlarda mevcuttur.

Kazıklı temellerin göstermiş olduğu bu gelişmeler beraberinde daha fazla yapı yüklerinin taşındığı ve kötü zemin koşullarında etkili olarak kullanılabilen yeni bir hal almışlardır. Ayrıca kazıklı temeller deprem, dalga ve rüzgâr yükünün etkin olduğu çeşitli su yapılarında da geniş kullanım alanı bulmuştur.

2.1.2. Kazıklı temellerin işlevleri ve kullanıldığı yerler

Kazıklı temeller, üst yapıdan gelen yükleri sağlam zemine veya kaya tabakalara aktararak yeterli taşıma gücünün sağlanmasını ve oturma değerlerinin sınır değerler içerisinde kalmasını sağlayan derin temel türüdür.

Kazıklı temellere etki eden yükler çoğu zaman üst yapıdan gelen eksenel basınç kuvvetleridir. Su yapılarında, iksa duvarlarında, palplanş perde yapımında ve şev stabilitesi gibi bazı mühendislik uygulamalarında ise kazıklar; erozyon sebebiyle oyulma riskinin, dalga ve deprem kuvvetlerinin meydana getirdiği yatay yüklerin, eğilme momentlerinin etkisinde kalabildikleri gibi; çekme kuvvetlerine de maruz kalabilirler. Aynı zamanda ani oturma ve kabarmanın meydana geldiği zeminlerde üst yapı yüklerini aktif bölge olarak adlandırılan bölgenin dışına iletmek içinde kazıklı temellerden yararlanılır. Ayrıca kazıklı temeller, zemini iyileştirerek yumuşak veya gevşek zeminlerin sağlamlaştırılmasını sağlamak da kazıklı temellerin işlevleri arasındadır (Coduto 2001).

Kazıklı temellerin kullanıldığı yerler detaylı olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Üst yapıdan gelen düşey ve yatay yükleri sağlam zemine aktarmak,
- Yeraltı su seviyesi durumuna göre meydana gelen moment hareketlerini ve yukarı yöndeki hareketleri engellemek,
- Su ile temas halinde, kabarma veya ani oturma meydana gelen zeminlerde üst yapı yüklerini aktif bölge dışına aktarmak,
- Yumuşak ve gevşek zeminlerin sıkıştırılarak iyileştirilmesi,
- Sıkışabilirliği yüksek zeminlerde yapılan tekil temellerin veya temel sistemlerinin oturma değerlerini sınır değerler içerisinde tutmak,
- Köprü temellerinde, erozyon sebebiyle temel altının oyulma riskine karşı güvenlik oluşturmak,
- Deniz platformlarında üst yapı yükünü tabanda sağlam tabakalara aktarmak,
- Şev kaymalarını kontrol etmek için kullanılır (Başeski 2005).

2.1.3. Kazık temel çeşitleri

Amaç ve uygulama yöntemleri bakımından kazıklı temellerin çok çeşitli olması, alt gruplar halinde sınıflandırılmasını zorunlu kılmıştır. Kazıklı temeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- İmal edildikleri malzemelere göre,
- Kullanım amaçlarına göre,
- Zemine yerleşim özelliklerine göre kazıklar

2.1.3.a. İmal edildikleri malzemeye göre kazık temeller

Ahşap Kazıklar:

Çok eski zamanlardan beri kullanılan ahşap kazıklar, taşıma gücüne oranla hafif olması, taşıma kolaylığı ve boyutlarının kolayca ayarlanabilmesi açısından kullanım amacına göre üstün özellikler sunmaktadır. Su seviyesi altındaki ahşap kazıkların servis ömürleri uzundur ve yüzlerce yıl sağlam kalabilirler (Toğrol ve Tan 2009).

Ahşap kazıklar killi zeminlerde kazık-zemin arasında iyi bir adezyon sağlar. Ancak bu tür üstünlüklerine rağmen ahşap kazıklar su seviyesinin alçalması durumunda kolayca tahribata uğramaktadırlar. Bu yüzden özel işlem uygulanmadan su seviyesinin değiştiği, gel-git olaylarının sıkça yaşandığı alanlarda ahşap kazıklar daha dikkatli kullanılmalıdır.

Ahşap kazıkların bozunmasına engel olmak için uygulanabilecek en etkili yöntem kazığın içi bölgelerine iyice nüfuz edecek şekilde basınçlı kreozot uygulanmasıdır. Özel tesislerde yapılan bu işlem deniz suyu altında kalan kazıklar için 1 m³ hacme yaklaşık olarak 250 kg kreozot uygulanmasıdır (Birand 2007). Ahşap kazıklara yapılan bu uygulama kazıklarda mantar oluşumu, böcek ve burğu kurtlarına karşı koruyacaktır.

Ahşap kazıkların sert-kohezyonsuz zeminlere çakılması zordur. Çakma esnasında kazık uç ya da gövde kısımlarında çatlamalar veya kırılmalar oluşabilir. Bu sebeple çakma esnasında kazığın davranışı gözlemlenmeli, giriş miktarı/darbe sayısı oranı dikkate alınmalıdır (Birand 2007).

Kazıkta hasar meydana gelmemesi için çarık kullanılır ve çakma sırasında tokmağın düşme sayısı ve düşme yüksekliği azaltılabilir. Çakmanın zor olduğu zeminlerde tokmak ağırlığı kazık ağırlığına eşit, çakma zorluğu olmayan zeminlerde ise tokmak ağırlığı kazık ağırlığının yarısı alınabilir (Toğrol ve Tan 2009). Ahşap kazıkların taşıma gücü yüksek değildir. Yaklaşık olarak 20–25 cm çapındaki bir kazık 200–300 kN civarında yük taşıyabilmektedir (Birand 2007).

TS EN 12699 ahşap kazıkların ortalama çaplarını kazık boylarına bağlı olarak belirtmiştir. Boyu 6 m den kısa kazıklarda ortalama çap $D=25 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$, boyu 6 m den uzun kazıklarda ortalama çap $D=(20+L) \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ olmalıdır. Burada L metre cinsinde kazığın boyunu göstermektedir (Toğrol ve Tan 2009).

Betonarme Kazıklar:

Betonarme kazıklar geniş uygulama alanı olan kazık tipidir. Kazık uzunluğunun zemin şartlarına göre ayarlanması ve yer altı suyu etkisinin diğer kazıklara göre daha az olması nedeniyle betonarme kazıklar üstün özellik gösterirler. En yaygın olarak betonarme çakma kazıklar ve yerinde dökme betonarme kazıklar olarak kullanılmaktadır.

a) Betonarme çakma kazıklar:

Betonarme çakma kazıklar, kazık dökülmesine elverişli bir yerde hazırlanır, sonra çakılacak alana taşınır. İnşaat alanının elverişli olması durumunda kazıklar şantiyede de dökülebilir. Betonarme kazıklar üst yapıdan gelen büyük yükleri, yumuşak ve gevşek zemin tabakaları altındaki sağlam tabakaya taşımakta çok kullanışlıdır. Betonarme çakma kazıklar genelde kare, dairesel veya sekizgen kesitte üretilirler. Kazıkların

boyları ve çapları imal ve akma Şartlarına bağlı olarak seçilirler. Kazıklar ağırlığından bazen içi boş kesitli üretilerek hafiflik sağlanır (Toğrol ve Tan 2009).

Betonarme akma kazıkların boyutları ve donatı miktarlarının belirlenmesinde, kazığın depolanma ve taŐınması esnasında maruz kalacağı gerilmeler de önemli bir role sahiptir. Kazığa yerleŐtirilecek donatı, kazığın kaldırılması anında meydana gelecek eğilme momentlerini karŐılayabilmelidir (Toğrol ve Tan 2009).

Betonarme kazıkları birbirlerine eklemek için bazı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler bazen elik kazıkların eklenmesi yöntemine göre pahalı olmasına rağmen bazı Őartlar altında hesaplı olabilmektedir. Ayrıca, betonarme kazıkları kesme elik kazıklara göre daha pahalı ve zor iŐlemlerdir (Coduto 2001).

Betonarme akma kazıklar, zorlu akma Şartları altında elik kazıklar kadar elverişli değildir ve taşıma, dağıtma ve çakma esnasında büyük ihtimalle hasar görürler. Fakat bu olumsuzluklara rağmen geniş kullanım alanı bulmaktadır. Çünkü çoğu zaman elik kazıklardan daha ucuzdur ve ayrıca yk kapasiteleri de yüksektir (Coduto 2001).

Çakma kazıklar çakma esnasında sağlam zemine en az 3 m, yumuşak zemine ise en az 6 m girmelidir. Çakma sırasında yıkama kullanılıyorsa, 18 mm’lik iki boru ucundan 7 bar basınçla su pŐkrtecek bir düzenek kullanılmalıdır (Toğrol ve Tan 2009).

b) Yerinde dökme betonarme kazıklar:

Bu tip kazıklar kaplama borusuz, kaplama borusu yerinde bırakılan ve kaplama borusu çakılan tipte retilbilirler, bu Şekilde imal edilen kazıklar taşıyıcı eleman olarak kullanılabileceği gibi zemini sıkıştırma içinde kullanılabilirler (Birand 2007).

Ucu kapalı bir kaplama borusunun Şahmerdan, hidrolik veya titreŐimli bir eki vasıtası ile zemine sokulması ile yer hazırlanan kazıklara yerinde dökülen betonarme çakma

kazık adı verilir. Ucu açık bir kaplama borusu zemine sokularak ve kaplama borusunun içi temizlenerek yeri hazırlanan kazıklara da sondaj kazığı veya fore kazık denilir (Toğrol ve Tan 2009).

Yerinde dökülen betonarme çakma kazıklar:

- Kaplama borusuz kazıklar (Zemin içinde silindirik bir çukur açan çelik bir çarığın çakılması ve meydana gelen çukurun veya kendini tutabilen çukurun betonlanması ile imal edilen kazıklar),
- Kaplama borusu yerinde bırakılan kazıklar,
- Kaplama borusu çıkarılan kazıklar, olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Yerinde dökme beton kazıkların donatısı, genellikle önceden hazırlanıp, beton dökümüne başlanılmadan önce, kazık çukuruna yerleştirilir. Betonlama işlemi, tremi borusu veya beton pompası ile kazık çukuru alt kısmından başlanarak yukarı doğru uygulanır. Dökülen betonun kazık çukurunu tıkaması ve yabancı maddelerin karışmasına dikkat edilmelidir (Toğrol ve Tan 2009).

Fore kazıklar (sondaj kazıkları, delme kazıklar) da zeminde yanal bir deplasman yaratmayan cinsten kazıklardır. Basit şekliyle, delme teknikleri kullanılarak önce zeminde bir delik açılır, boru çakılmak suretiyle bu deliğe donatı yerleştirilir ve alttan başlanarak delik betonla doldurulur ve kazık oluşturulur (Üzel 2011).

Çelik kazıklar:

Çakma kazık olarak kullanılan çelik kazıklar, hafif, nakliyesi kolay ve çok büyük yüklerin aktarılmasını sağlayabildiğinden kullanışlıdır. Çelik kazıklar H, I profili, dairesel boru veya kutu şeklinde olabilir. Boru veya kutu şeklinde olan çelik kazıkların uçları kapalı veya açık olabilir (Birand 2007).

Zemin tabanı kazılarak veya ters su sirkülasyonu uygulanarak, ucu açık kutu ve boru kesitli kazıklar daha kolay çakılabilir. Bu tip kazıkların daha büyük yüklere maruz kalmaları durumunda uçları kapalı olarak çakılabilirler. Kazıkların derin tabakalara çakılmaları durumunda uçları açık bırakılır, ancak kazık uç kısmından belli uzunlukta ortası delik bir plaka ile uç mukavemeti sağlanır. Bu ortası delik plaka aracılığıyla çakma esnasında kazık ucunda sıkışan su, silt veya yumuşak kilin çıkışı sağlanacaktır (Toğrol ve Tan 2009).

Çakma sırasında çelik kazıkların zarar görmemesi için uçları takviye edilirler. Çelik kazıkları uzatma gerektiğinde perçin, bulon veya kaynak yapılarak uzatılırlar. Bu kazıklar yüksek yük taşıma kapasitesine sahip uç kazıkları olarak kullanılabilirler. Çelik kazıklar yeraltı su bulunması durumunda korozyona hassastırlar, ancak örselenmiş veya dolgu zeminlerde oksijen fazla olması dolayısıyla korozyon fazla, sert katı killerde ise oksijenin azlığı nedeni ile korozyona daha az maruz kalırlar (Birand 2007).

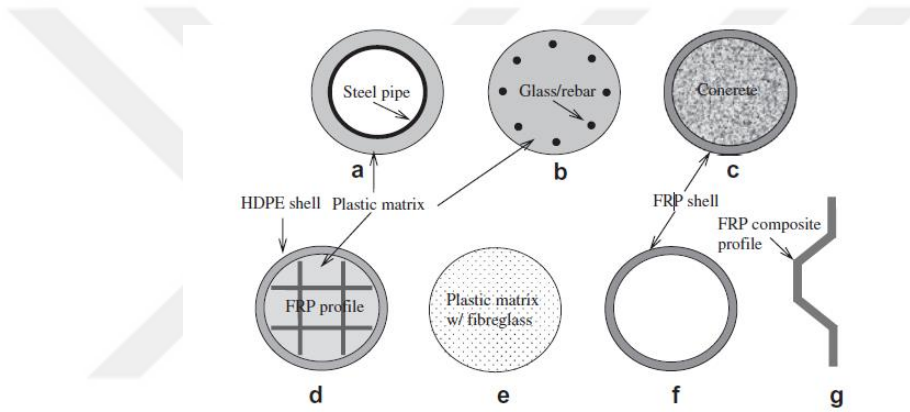
Kompozit kazıklar:

Derin temeller de genel olarak geleneksel kazıklar (ahşap, betonarme, çelik) kullanılmaktadır. Ancak korozyon ve sulu zemin ortamlarında çelik kazıkların korozyona uğraması, ahşap kazıkların çürümesi ve betonarme kazıkların bozunması gibi problemlerle karşılaşmaktadır. Bahsedilen bozulmalar kazıkların kesit alanlarında azalma, malzemelerin hasara uğraması ve hatta kırılmalara neden olmaktadır. Bunun yanında geleneksel kazıkların tamir ve güçlendirme işleri de ciddi maliyetler içermektedir. Bu nedenle bu malzemelere alternatif malzeme arayışı içerisinde girilmiştir ve uzun servis ömürleri, az bakım gerektirmesi, çevre dostu olmaları dolayısıyla birden fazla farklı malzeme kullanılarak yapılan kompozit kazıkların tercih edilmesi yoluna gidilmiştir (Guades *et al.* 2012).

Kompozit kazıklar, liman yapılarında, köprü altyapı projelendirmelerinde, geleneksel kazıkların hasar görmesi durumunda bu kazıkların değiştirilmeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit kazıklar bahsedilen birçok avantaj sağlamaları yanında

tasarım yönetmeliği ve ilk yapım maliyetinin yüksek olması gibi bazı dezavantajlarda göstermektedir (Giraldo 2013).

Kompozit kazıklar günümüzde, çelik boru çekirdek kazık, yapısal olarak güçlendirilmiş plastik kazık (SRP), betonla doldurulmuş lif katkılı kazık, cam lifli çekmeli sıkıştırılmış kazık, cam lifli güçlendirilmiş plastik kazık, içi boş lif katkılı kazık ve lif katkılı levha kazık olmak üzere 7 çeşittir (Guades *et al.* 2012). Şekil 2.1’de bu kazıklar görülmektedir.



Şekil 2.1. Kompozit kazıklar

- (a) Çelik boru çekirdek kazık
- (b) SRP kazık
- (c) Betonla doldurulmuş lif katkılı kazık
- (d) Cam lifli pultrüzyon kazık
- (e) Cam lifli güçlendirilmiş plastik kazık
- (f) İçi boş lif katkılı kazık
- (g) Lif katkılı levha kazık (Guades *et al.* 2012).

İçi boş kazık:

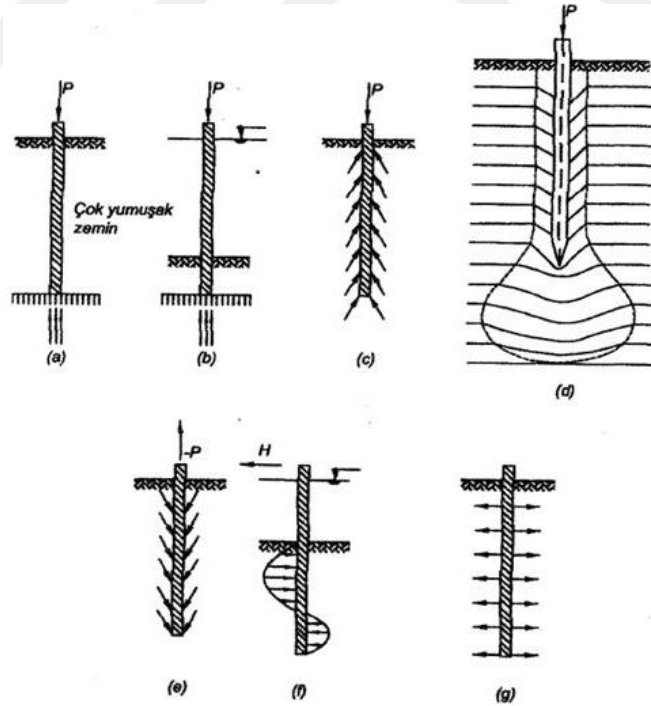
İçi boş kompozit kazıklar cam ya da karbon liflerle güçlendirilmiş ısı ile sertleşen veya epoksi malzemelerden meydana gelmektedir. İçi boş FRP kazıklar pultrüzyon, filament sargı veya kalıplama yöntemi ile üretilir. İçi boş FRP kazıklar yük taşıma kazıkları olarak uygun yapısal ve geoteknik özellikleri sağlamaları yanında bozunma ve korozyon dirençleri bakımından betonla doldurulmuş FRP kazıklar gibi aynı avantajları sağlarlar (Guades *et al.* 2012).



Şekil 2.2. Dairesel ve kare kesitli içi boş kazık (Guades 2013)

2.1.3.b. Kullanım amaçlarına göre kazık temeller

Kullanım amacına göre kazıklı temeller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilirler. Şekil 2.3’de kullanım amaçlarına göre kazıkların tipleri görülmektedir.



Şekil 2.3. Kullanım amaçlarına göre kazık tipleri

- (a, b) Uç kazığı
- (c,d) Sürtünme kazığı
- (e) Çekme kazığı
- (f) Tampon kazığı
- (g) Sıkıştırma kazığı (Toğrol ve Tan 2009)

Uç kazıklar: Taşıma gücü zayıf olan zemini geçerek derindeki sağlam bir tabakaya (kaya veya sıkı kum çakıl) yapı yükünü, kazık uç direnci ile aktaran kazıklara uç kazıkları denir. Uç kazıklarda çevre sürtünmesi ihmal edilebilecek düzeydedir (Afacan 2007).

Sağlam zeminin derinlerde olmadığı durumlarda uç kazıklar uygulanır. Kazık sağlam zemine oturtulabilir veya gömülebilir. Bu tip kazıklar, taşıdıkları yüke ve yükü ilettikleri zeminin taşıma gücüne bağlı olarak iki şekilde imal edilebilirler:

- **Ayaklı:** Genellikle yerinde dökme kazıklarda kullanılan bir uygulama olup, eğer kazığın ulaştığı sağlam zeminin emniyet gerilmesi yeterince büyük değilse bir ayak yardımıyla yük daha geniş alana yayılarak gerilme azaltılır. Bu yöntemle uç direncinde, ayaksız kazıklara oranla %50~100 oranında bir artış sağlanır.
- **Ayaksız:** Eğer kazığın sağlam zemine ileteceği yük çok büyük değilse ve zeminin taşıma kapasitesi yeterli güvenlikle kazığı taşıyabiliyorsa, ayak yapılması gerekli değildir.

Sürtünme kazıkları: Yapı yükler, kazık çevresinde meydana gelen zemin sürtünmesi ile kısmen veya tamamen taşınıyorsa böyle kazıklara sürtünme kazıkları denir. Sürtünme kazıkları bazen yüzen kazıklar olarak da bilinir (Toğrol ve Tan 2009). Uç kazığının uygulanması için gerekli sağlam zemin uygun bir derinlikte değilse bu tür kazıklar uygulanır.

Kompaksiyon kazıkları: Kazıklar, ayrık daneli zeminleri sıkıştırma amacıyla da kullanılabilirler bu tür kazıklara sıkıştırma veya kompaksiyon kazıkları denir (Toğrol ve Tan 2009). Burada ki amaç zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir.

Çekme kazıkları: Suyun kaldırma kuvvetine maruz yapıları veya üst yapıya gelen yanal kuvvetler sebebiyle dönme momenti etkisindeki temel elemanlarını güvenli bir şekilde zemine tespit etmeyi sağlayan kazık tipidir (Toğrol ve Tan 2009). Su altında

yapılan tesisle veya toprağa gömülü tanklar bu tip kazıkların kullanıldığı yerlerdir (Başeski 2005).

Tampon kazıklar: Palplanş perdelerinin yanal hareketlerini önlemek için kullanılan ankraj kazığı ile, gemi bağlama veya dolfen kazıkları yanal kuvvetlere karşı kullanılır. Bu kazıklara tampon kazıklarda denilmektedir (Toğrol ve Tan 2009).

Eğik Kazıklar: Düşey yüklerin yanında yatay yükleri de emniyetli şekilde taşımak için yapılan kazık türüdür. Genel olarak dikeyle 20° açı yaparlar ve bu açının 26° 'nin üzerine çıkması istenmez. Negatif çevre sürtünmesinin, ani ve büyük yüklerin ve deprem kuvvetlerinin etkimesinin muhtemel olduğu bölgelerde kullanılmaları tavsiye edilmez.

2.1.3.c. Zemine yerleştirilme şekillerine göre kazık temeller

Çakma kazıklar (Deplasman kazıkları):

Serbest düşürülen mekanik bir tokmak veya titreşim meydana getiren mekanik bir donanım aracılığıyla zemine çakılırlar. Çakma, gevşek taneli zeminlerde dayanımı arttırırken, kohezyonlu zeminler çakma esnasında örselendikleri için geçici bir kayma mukavemeti değerinde düşme meydana gelebilir. Deplasman kazıkları 2'ye ayrılabilirler.

Büyük Deplasman Kazıkları; zemine yerleştirilmeleri esnasında zeminde büyük miktarda deplasmanlara neden olurlar. Çakma kazıklar genelde bu grup içerisinde yer alırlar. İçi boş fakat alt ucu kapalı veya içi dolu kazıkların çakılarak zeminde bırakılmaları ile oluşturulurlar. İçi dolu kazıklar ahşap veya hazır beton (prefabrik veya öngörmeli) olurken, içi boş kazıklar çelik boru veya beton boru kazıklar olabilirler. İçi boş kazıklar zemine çakıldıktan sonra boş bırakılabilir veya betonla doldurulabilir.

Küçük Deplasman Kazıkları; zemine yerleştirilmeleri esnasında zeminde az miktarda yer değiştirmeye neden olurlar. H kesitli çekme kuvvet dayanım yüksek çelik kazıklarda bu gruba girer (Başeski 2005).

Sondaj kazıkları (Fore kazıklar):

Zeminin kazılarak çukur açılması ve bu çukurların içine donatı yerleştirip üzerine beton dökülmesi ile oluşturulan kazıklardır. Çakmanın zor olduğu sert kil, kaya parçaları, moloz ve kaba taneler içeren zemin tabakalarında ve çakma esnasında titreşim ve gürültünün meydana geleceği yerlerde yapılması elverişlidir. Genel de uç kazıklarda bu yöntemin uygulandığı görülür. Sondaj kazıklar yerleştirilen zemine göre 2 şekilde (kılıflı veya kılıfsız) üretilirler.

2.1.4. Kazık taşıma kapasitesi

Taşıma kapasitesi, kazığın aşırı oturma ve göçme yapmadan taşıyabileceği maksimum yük miktarı olarak ifade edilir ve kazıklı temellerin taşıma gücü hesabı,

- a) Statik formüller
- b) Dinamik formüller
- c) Kazık yükleme deneyleri
- d) Arazi deney sonuçları (Uzuner 2006)

ile belirlenebilir. Bu yöntemler arasından gerçek değerlere yakın sonuçlar veren kazık yükleme deneyleri pahalı olmasına rağmen sıkça tercih edilen yöntemdir.

Bir kazığın taşıma gücünü kazığın yapıldığı malzemenin mekanik özellikleri ile kazığı çevreleyen zeminin mekanik özellikleri belirler. Bu özellikler kullanılarak kazık ve zemin ayrı ayrı değerlendirilir ve hem kazığın hem de zeminin yük altında sağlam kaldıkları kanıtlanır. Ayrıca kazıklı temeller çoğu zaman yanal yüklere maruz kalır ve

kazık tasarımında bu yanal yükler göz önünde bulundurulur. Öncelikle teorik veya ampirik formüllerle kazık malzemesinin taşıyabileceği yük elde edilir. Formüller, kazık zemin etkileşiminin statik dengesini yansıtan veya çakma kazıklarda kazığı çakmak için harcanan enerji ve/veya yapılan işi esas alan bağlantılardır (Birand 2007).

Ayrıca kazığın taşıma gücünü etkileyen birçok unsur vardır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Zemin cinsi ve davranışı
- b) Kazığın taşıyıcı zemin tabakası içindeki uzunluğu
- c) Üst tabakaların kalınlığı
- d) Yeraltı suyunun durumu
- e) Kazık cinsi ve kesit alanı
- f) Kazığın yapıldığı malzeme
- g) Çevre özellikleri
- h) Kazıkların yerine tatbik şekli
- i) Kazıkların yerleştirilme aralığı
- j) Negatif çevre sürtünmesi
- k) Yanlardaki alanların yüklenmesi
- l) Büyük sallantı veya titreşimler gibi dinamik zorlanmalardır (Deneç 2006).

2.1.4.a. Statik formüller

Kazıkların taşıma gücü uç mukavemeti ve çevre sürtünmesinden oluşan taşıma kapasitelerinden belirlenir. Bir kazığın toplam taşıma gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q_{top} = Q_u + Q_{\phi} = q_{u\phi} \cdot A_{u\phi} + q_{\phi} \cdot A_{\phi} \quad (2.1)$$

Q_{top} = Tek kazığın nihai taşıma kapasitesi

Q_u = Kazığın uç taşıma kapasitesi

Q_{ϕ} = Kazığın yanal sürtünme kapasitesi

Sürtünme kazıklarında $Q_{top}=Q_u+Q_{\phi}$ olarak kazık toplam taşıma kapasitesi hesaplanırken, uç kazıklarda sadece Q_u hesaplanır. Yanal sürtünme direnci hesaplanmaz. Kazığın uç taşıma kapasitesi Terzaghi taşıma gücü teorisi kullanılarak dairesel temeller için:

$$Q_u = (1,3.c.N_c + \gamma.L.N_q + 0,3. \gamma.D.N_{\gamma}).\frac{\pi.D^2}{4} \quad (2.2)$$

olarak yazılır. Terimlerin karşılıkları aşağıda ifade edilmiştir.

L = Kazık boyu

c = Kohezyon

γ = Zeminin efektif birim hacim ağırlığı

D = Kazık çapı

N_{γ} , N_q ve N_c = Zeminin kayma mukavemeti açısına bağlı taşıma gücü katsayılarıdır.

Kumlarda, kohezyon sıfır alınarak kazığın uç mukavemeti ($c=0$, $\phi \neq 0$):

$$Q_u = (\gamma.L.N_q + 0,3. \gamma.D.N_{\gamma}).\frac{\pi.D^2}{4} \quad (2.3)$$

olup, ikinci terim genellikle birinci terimin yanında ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan formül aşağıdaki gibi;

$$Q_u = \gamma.L.N_q. \frac{\pi.D^2}{4} \quad (2.4)$$

revize edilebilir.

Kohezyonlu zeminlerde uç mukavemeti ($c \neq 0$, $\phi = 0$):

$$q_u = 1,3.c.N_c + \gamma.L.N_q \quad (2.5)$$

bu eşitlik $\phi = 0$ durumunda $N_c = 5,7$ olması dikkate alınarak Eşitlik 2.6'daki halini alır.

$$q_u = 9.c_u \text{ ve } Q_u = (9.c_u). \frac{\pi.D^2}{4} \quad (2.6)$$

2.1.4.b. Dinamik formüller

Kazıklar ya bir şahmerdanın kazık başına serbest düşürülmesi ya da buharlı veya dizel motorlu çekiçler kullanılarak çakılırlar. Çakma sırasında kullanılan düzeneklere göre kazığın çakılmasını sağlayan enerji kaynağı şekli aşağıda özetlenmiştir.

- a) Serbest düşmeli şahmerdanla, tokmak belli bir yükseklikten serbestçe kazık başına düşürülerek kazık darbelenir. Bundan sonra şahmerdan makaraya sarılı halatla kaldırır ve işlem tekrar edilir.
- b) Tek tesirli şahmerdan kullanılır ise tokmak serbest düşme ile kazığın başlığına düşürülür, buhar veya basınçlı hava gücü ile yukarı kaldırılır ve işlem tekrar edilir.
- c) Çift tesirli şahmerdanla tokmak hem yukarı kalkarken hem aşağı inişte buhar ve basınçlı hava gücünden yararlanır.
- d) Dizel motorlu şahmerdanlar da yaygın olarak kullanılan araçlardandır. Bu şahmerdanlarda tokmağın çakma gücü motordaki mazotun patlaması sonucu oluşan enerji ile sağlanır (Birand 2007).

Çakma kazıkların taşıma gücü hesabında dinamik kazık formülleri de kullanılır. Dinamik kazık formülleri, kazık çakma işlemi sırasında harcanan enerjinin, diğer deyişle mekanik olarak yapılan işin, kazığın zemine batma miktarı ve zeminde oluşan toplam direnç ile ilgili olacağı görüşünden yola çıkarak elde edilmişlerdir (Birand 2007). Kazıkların çakma kayıtlarına dayanan birçok dinamik çakma formülü

önerilmiştir. Bu formüller aslında enerjinin korunumu prensibinden yola çıkılarak elde edilmiştir. Çakma esnasında kazığın darbe başına batma miktarı ‘’refü’’ dikkate alınır (Toğrol ve Tan 2009).

100’e yakın dinamik kazık formülü vardır. Formüller arasındaki fark enerji kayıplarının farklı olarak değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Aşağıda en sık kullanılan dört formül verilmiştir.

Sanders formülü: Dinamik kazık formülleri arasında en basit olanı Sanders Formülü olup, (W_r) ağırlığındaki tokmağın (h) mesafesinden düşmesiyle yapılan işin kazığın zemine giriş miktarı (s) ile kazığın çakmaya karşı toplam direncinin (Q) çarpımına eşit olacağı kabulüne dayanır. Enerji kayıpları göz önüne alınmamıştır (Üzel 2011).

$$Q = (W_r \cdot h) / s \quad (2.7)$$

Engineering news formülü: Serbest düşmeli ve tek tesirli şahmerdanlar:

$$Q = (W_r \cdot h) / (s + c) \quad (2.8)$$

Çift tesirli şahmerdanlar:

$$Q = E_n / (s + c) \quad (2.9)$$

c değeri enerji kayıplarını ifade eden bir sabittir.

Çizelge 2.1. Şahmerdanlara göre c değerleri

Şahmerdanlar	c (cm)
Serbest düşmeli ve Tek	2,5
Tesirli Şahmerdanlar	
Buharlı Şahmerdanlar	0,25
Çift Tesirli Şahmerdanlar	0,25

“En” ise çift tesirli şahmerdanlarda tokmağın darbe sırasında uyguladığı enerji olup makine kataloglarında verilir. Engineering News Formülü’nde güvenlik katsayısı 4-10 arasında alınarak emniyetli yük bulunur (Birand 2007).

Brix formülü: Bu formül kullanılarak emniyetli taşıma gücü bulunmak istendiğinde, 3 ile 5 arasında bir güvenlik sayısı uygulanır. Brix formülü sadece serbest düşmeli şahmerdanlar için kullanılmakta olup, daha ziyade ahşap kazıklar için uygundur. Burada W_p kazık ağırlığıdır (Birand 2007).

$$Q = (W_r \cdot W_p \cdot h) / s \cdot (W_r + W_p)^2 \quad (2.10)$$

Hiley formülü: En çok kullanılan ve enerji kayıplarını diğer formüllere göre en gerçekçi şekilde göz önüne aldığı söylenen formül budur:

$$Q = [(e_f \cdot W_r \cdot h) / (s + \frac{1}{2} \cdot (c_1 + c_2 + c_3))] \cdot [(W_r + e^2 \cdot W_p) / (W_r + W_p)] \quad (2.11)$$

Burada;

e_f : Tokmağın tesir katsayısı (0.65 - 1.00)

c_1 : Kazığın başındaki takozun ve yastığın elastik kısılması

c_2 : Kazığın elastik kısılması

c_3 : Zeminin elastik kısılması

e : Çarpma sayısı

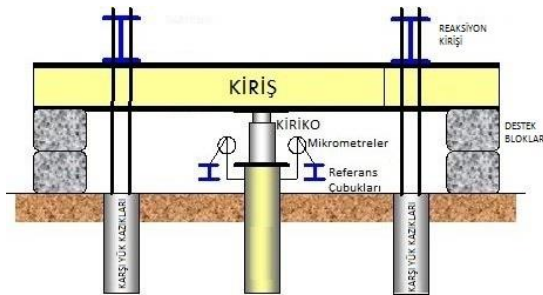
“ e_f ” değeri serbest düşmeli şahmerdanlarda 1.00, buharlılarda 0.90 ve tambura sürtünme ile sarılan tel halata bağlı noktalarda 0.75 alınabilir. Güvenlik sayısı 3 alınabilir. Çarpma sayıları (e) Çizelge 2.5 den alınabilir (Birand 2007).

Çizelge 2.2. Çarpma sayısı (e)'nin temsili değerleri (Chellis 1961)

MALZEME	Çarpma Sayısı
Harap olmuş ahşap	0
Ucu bozulmamış ahşap kazık	0,25
Sağlam ahşap yastıklı çelik kazık	0,32-0,40
Çelik başlıklı çelik veya beton kazık	0,5
Başlıksız beton kazık üstüne dökme demir tokmakla vurulması halinde	0,4

2.1.4.c. Kazık yükleme deneyleri

Kazık yükleme deneyi, kazıkların taşıma kapasitesinin elde edilmesinde gerçeğe en yakın değeri veren bir deneydir. Bu deneyler sayesinde negatif çevre sürtünmesi değerini bulmak ta mümkündür. Kazık yükleme deneyleri kazığın üzerine yerleştirilen bir platformdan yararlanılarak gerçekleştirilir (Şekil 2.4). Kazığın yüklenmesinden sonra kazık başının yer değiştirmesi ölçülür ve göçme anında yüklemeye son verilir. Böylece kazığın nihai taşıma gücü belirlenmiş olur (Deneç 2006).

**Şekil 2.4.** Kazık yükleme deneyi (Anonim 2016)

2.1.4.d. Arazi deneyleri

Kazık taşıma kapasitesi standart penetrasyon deneyi(SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT) ve presiyometre gibi arazi deneyleri kullanılarak da elde edilebilir. SPT deneyinden elde edilen verilerle kazık çevre sürtünmesi ve uç direncinin de belirlenmesi

sağlanabilir. Koni penetrasyon deneyi sonucunda belirlenen koni penetrasyon uç direnci ve çevre sürtünmesi de kazık taşıma gücü hesaplanmasında yararlı olmaktadır. Presiyometre deneyinde ise zeminin yatay yönde ki nihai taşıma gücü ve deformasyon özellikleri belirlenir. Bu arazi deneyleri ile doğrudan taşıma gücü değerlerini elde edemeyiz ancak iri çakıl ve yumuşak kaya gibi zeminlerden numune almak zor olduğu için kazık taşıma kapasitesi ve oturma değerleri hakkında tahmin imkânı elde ederiz (Deneç 2006).

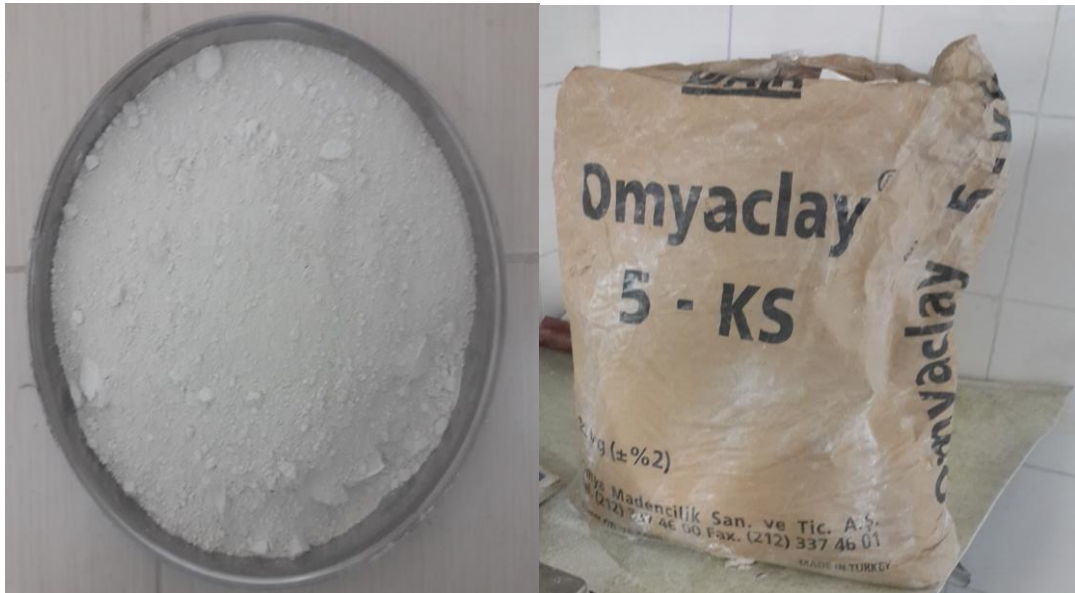


3. MATERİYAL ve YÖNTEM

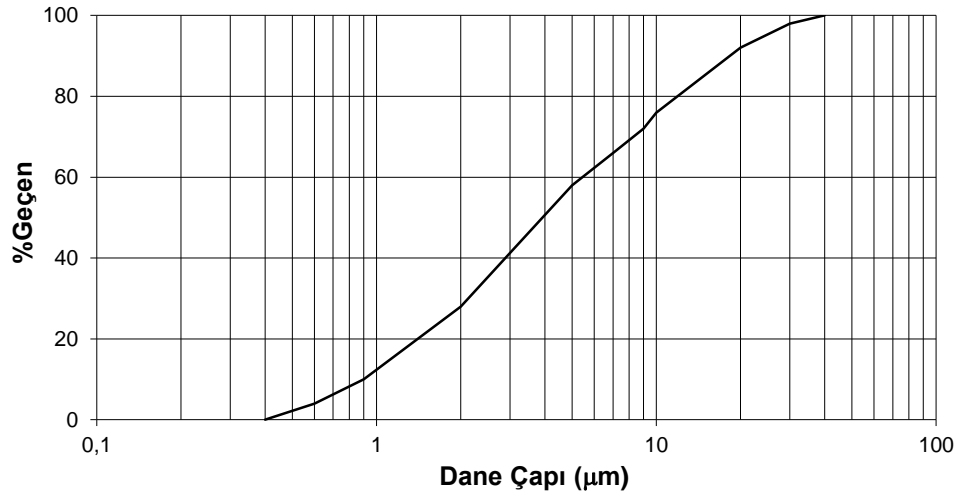
3.1. Materyal

3.1.1. Yumuşak kil zemin

Çalışma kapsamında düşük plastisiteli kaolinit kili (CL) kullanılmıştır. Kaolinit kili Ata Kimya TİC. LTD. ŞTİ.'den 20 kg'lık torbalarda kuru ve öğütölmüş olarak temin edilmiştir (Şekil 3.1). CL kiline ait dane çapı dağılımı firmadan temin edilmiş ve bazı geoteknik özellikleri ise Atatürk Üniversitesi Mühendislik Faköltesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Arazi şartlarında suya doygun kil (yumuşak kil) zemin özelliklerini deneylerde uygulayabilmek için ön deneyler yapılmış ve geoteknik özellikleride göz önünde bulundurularak uygun su içeriğinde zemin hazırlanmıştır. Kil zemine ait dane dağılımı eğrisi Şekil 3.2'de ve belirlenen bazı geoteknik özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kile ait görüntü



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan kile ait dane çapı dağılımı

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan CL kilinin özellikleri

		CL
Geoteknik Özellikler		
< 0,002 mm	(%)	28
< 0,075 mm	(%)	100
Özgöl ağırlık		2,69
Likit limit	(%)	43
Plastik limit	(%)	27
Plastisite indisi	(%)	16
Aktivite		0,57

3.1.2. Kompozit kazık üretiminde kullanılacak malzemeler

Kazık (çakma kazık) üretimi için lif ve uçucu kül katkılı polimer kullanılmıştır. Model kazıkların üretiminde sadece polimer kullanılarak üretilenlere ek olarak katkılı polimer kazıkların davranışını da inceleyebilmek için Zemin Mekaniği Laboratuvarında diğer bir Yüksek Lisans tez çalışması yürütülmüştür. Karaca (2016) çalışmasından elde edilen serbest basınç deney sonuçları dikkate alınarak katkılı polimer için lif olarak kendir ve katkı olarak ta uçucu kül kullanılmasına karar verilmiştir.

a) Polimer

Kazık üretiminde polimer olarak doymamış polyester (Boytek-Döküm Tipi) kullanılmıştır. Doymamış polyesterin sertleşmesinde; hızlandırıcı (H) olarak Kobalt Naftanat, sertleştirici (S) olarak Metil Etil Keton Peroksit kullanılmıştır (Şekil 3.3). Doymamış polyester, H ve S'nin üretici firma kataloğundan temin edilen bazı özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. H ve S oranları, doymamış polyester kullanılarak kompozit malzeme (mermerit vb.) üretimi üzerinde yapılmış bazı çalışmalardan belirlenmiştir (Akın 2007; Gürü *et al.* 2007; Bagherinia 2013).

Çizelge 3.2. Doymamış polyester, hızlandırıcı ve sertleştiriciye ait özellikler (Bagherinia 2013)

	Polyester	Hızlandırıcı	Sertleştirici
Kimyasal Adı	Polyethylene terephthalate	Cobalt(II) naphthenate	2-Hydroperoxy-2-((2-hydroperoxybutan-2-yl)peroxy)butane
Formülü			
Renk	Renksiz	Mavimsi kırmızı	Renksiz
Asit Değeri	22 mg KOH/g	-	-
Viskozite	600 cps	-	-
Katı Oranı	%65	%6 (Co ⁺²)	-
Yoğunluk	1,133 g/cm ³	0.96 g/cm ³	1.170 g/cm ³
Mol Ağırlığı	-	-	210.22 g mol ⁻¹
Parlama	N/A	-	82°C
Erime Noktası	250°C	140°C	-
Kaynama	-	>150°C	-



Şekil 3.3. Doymamış polyester, polyester hızlandırıcısı ve sertleştiricisi

b. Lif (kendir)

Kazık (lif katkılı polimer kazık) üretiminde lif olarak kendir kullanılmıştır (Şekil 3.4). Kazık üretiminde kullanılacak kendir, Karaca (2016) dikkate alınarak 4 mm boyunda ve toplam ağırlığın %1'i olarak belirlenmiştir. Kendir lifine ait bazı özellikler Çizelge 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.4. Deneylerde kullanılan kendir

Çizelge 3.3. Kendirin bazı özellikleri (Li *et al.* 2006)

Kendir lifinin özellikleri		
Özgül ağırlık		1,5
Genişlik	μm	23,15 ± 17,60
Nem emme oranı	%	9,40 ± 0,53
Su emme oranı	%	85-105
Gerilme direnci	MPa	900
Elastisite modülü	GPa	34

c. Uçucu kül

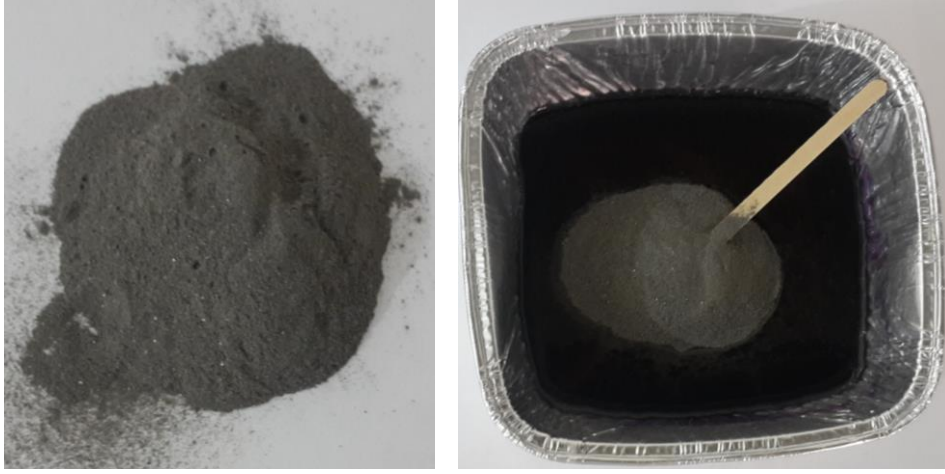
Kazık üretiminde katkı olarak Afşin-Elbistan Termik santralinden temin edilen C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır (Şekil 3.5). Uçucu küle ait bazı indeks özellikleri ve kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 3.4’te ve Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan uçucu külün bazı geoteknik özellikleri (Arasan ve İkiz 2015)

Uçucu Kül		
Özgül Ağırlık, G_s		2.82
Kum Miktarı	> 0.075 mm (%)	35
İnce Malzeme Miktarı	<0.075 mm (%)	65
Likit Limit	(%)	48
Plastik Limit	(%)	NP
Zemin Sınıfı (USCS’ye göre)		ML

Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan uçucu külün kimyasal bileşenleri

Bileşen	(%)
SiO ₂	23.08
Al ₂ O ₃	6.25
Fe ₂ O ₃	2.58
CaO	47.03
MgO	1.60
Na ₂ O	0.32
SO ₃	14.61
K ₂ O	0.47
Kızdırma Kaybı	3.95



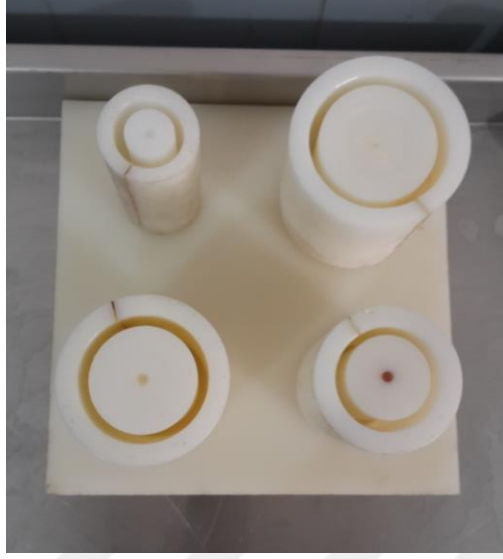
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan uçucu kül

3.2. Yöntem

3.2.1. Deneylerde kullanılan model kalıplar

a) İçi boş kazık üretiminde kullanılan kalıplar:

Deneylerde polimer katkılı içi boş kazık üretimi için Şekil 3.6’da verilen kalıplar kullanılmıştır. Kalıplar, et kalınlığı 5 mm, boyları 115 mm ve farklı çaplarda (35 mm, 50 mm, 60 mm ve 70 mm dış çaplarında) kazıklar üretebilmek için tasarlanmıştır (Şekil 3.6). Çalışmada içi boş uç kazıklar kullanılacağı için model deneylerin yapılacağı kalıp boyunda kazık boyları üretilmiştir. İçi boş kazıkların et kalınlığı ise içi boş kazıklarda et kalınlığı ile ilgili literatürde verilen şartlara uygun olması için 5 mm seçilmiştir. Yine benzer şekilde kazık dış çapları ise model deneylerde kullanılacak kalıp çapları (152 mm) dikkate alınarak alan oranları %5, %10, %15 ve %20 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu alan oranları, model kalıp boyutları(kalıp içindeki zemin yüzey alanı) dikkate alındığında kazık dış çapları sırasıyla 35 mm ($A_s=\%5$), 50 mm ($A_s=\%10$), 60 mm ($A_s=\%15$) ve 70 mm ($A_s=\%20$) olmaktadır. Kazık üretimi için kullanılan kalıplar Şekil 3.6’da ve kalıplardan çıkarılan kazıklara ait örnek görüntüler ise Şekil 3.7’de verilmektedir.



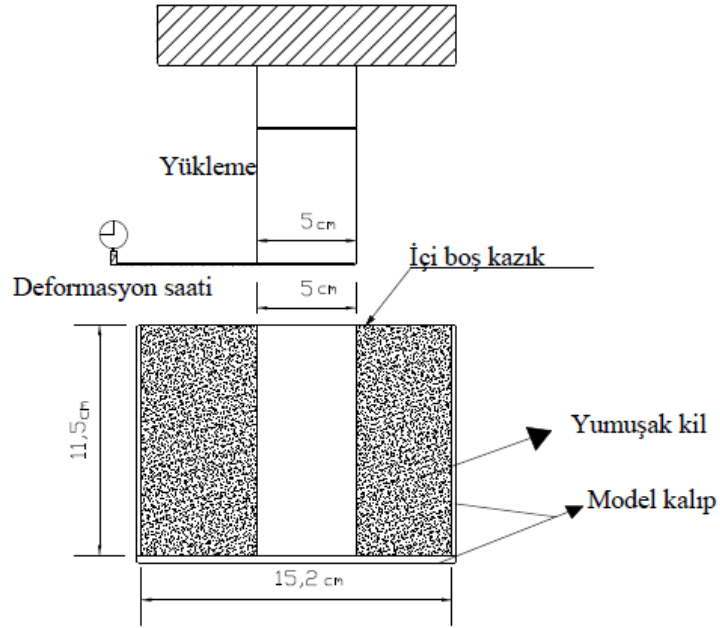
Şekil 3.6. Deneylerde kullanılan model kalıplar



Şekil 3.7. Kalıplardan çıkarılan kazıklar

b) Kazık yükleme deneylerinde kullanılan model kalıplar

Yumuşak kil zeminin yerleştirildiği, kazıkların çakıldığı ve kazık yükleme deneylerinin yapıldığı kalıplar şematik olarak Şekil 3.8’de, Şekil 3.9’da ise fotoğrafı verilmektedir. Kalıplar silindirik iç çapları 152 mm ve boyları 115 mm olan model kalıplardır.



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan model kalıplara ait şematik görüntü

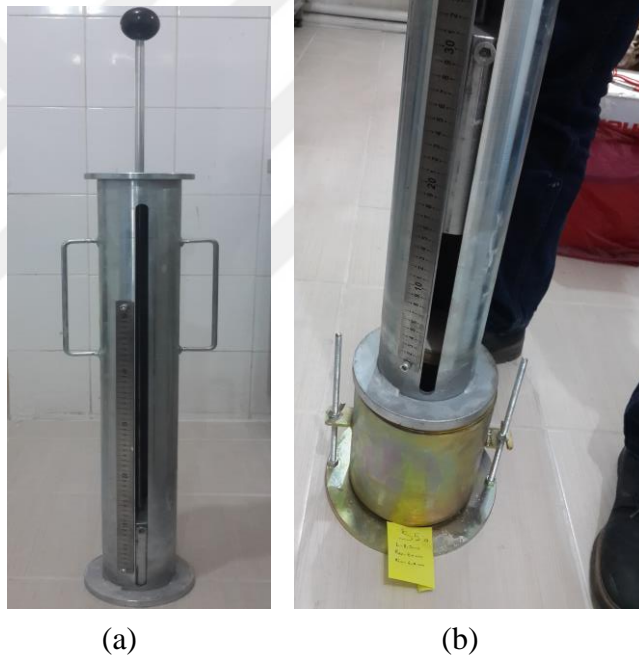


Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan model kalıp

3.2.2. Deneylerde kullanılan kazık çakma sistemi

Çalışma kapsamında içi boş kazıkların model kalıplar içinde hazırlanan yumuşak kil zemine çakılmasında serbest düşümlü bir kazık çakma sistemi kullanılmıştır. İçi boş kazıkların uygulamada ve deneysel çalışmalarda çakılması sırasında genellikle dizel

tokmaklara göre bazı üstünlükler sağlayan tek-yönlü kazık çakma sistemleri kullanılmaktadır (İskander *et al.* 2001). Fakat kazık uç direncinin düşük olduğu kil zeminlerde hidrolik tokmakların kullanılması kazıkların çakılması için daha etkili olmaktadır. Giraldo (2013) yumuşak kil zemine içi boş kazıkların çakılmasında tokmak düşüm yüksekliği yaklaşık 15 cm ve tokmak ağırlığı ise 8,8 kg olarak bir sistem kullanmışlardır. Bu çalışmada ise Giraldo (2013) ve Ashford *et al.* (2001) çalışmaları da dikkate alınarak tokmak düşüm yüksekliği 15 cm ve tokmak ağırlığı 10 kg olarak belirlenmiştir. Çakma işlemi sırasında düşüm yüksekliğinin değişmemesi için özen gösterilmiştir. Çakma sistemine ait görüntüler Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Çakma sistemi görüntüleri

(a) Çakma sistemi

(b) Çakma sistemi uygulaması

3.2.3. Yumuşak kil zeminlerin hazırlanması

İçi boş kazıkların çakılacağı yumuşak kil zemin model kalıplara yerleştirilmeden önce kilin likit limitine yakın bir su muhtevasında (%36) su ilave edilerek mikser yardımıyla laboratuvarda karıştırılmıştır (Şekil 3.11). Karıştırma işlemi sırasında homojen bir karışım elde etmek için su, kademeli olarak eklenmiştir. Hazırlanan kil zeminlerin su

muhtevalarının değişmemesi için 2 saat poşetler içinde nem odasında bekletilerek daha homojen olması sağlanmıştır (şekil 3.12).



şekil 3.11. Mikser içerisinde hazırlanan yumuşak kil numunesi



şekil 3.12. Nem odasında bekletilen kil zeminler

İki saat bekletilen kil zeminler model kalıplara yerleştirilmeden önce kalıp iç yüzeyleri zemin-kalıp sürtünmesini azaltabilmek için yağlanmıştır. Model kalıpların tabanı delikli olduğu için su drenajına imkn vermektedir. Bu sebeple kalıp tabanlarına ek olarak drenajı sağlamak için çakıl vb. tabaka serilmemiştir. Likit limite yakın su muhtevalarında hazırlanan killi zeminler birim hacim ağırlığı $17,5 \text{ kN/m}^3$ olacak şekilde model kalıplara poşetten çıkarılarak üç tabaka halinde yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmiş ve aynı miktarda tokmak ile vurarak sıkıştırma

sağlanmıştır. Yerleştirme işlemi model kalıp içinde 115mm yüksekliğe (kalıbın üst seviyesi) ulaşıldığında sonra sonlandırılmıştır (Şekil 3.13). Yumuşak kil zeminler model kalıplara yerleştirildikten sonra yerleştirme sırasında kilde meydana gelen örselenmeleri minimize edebilmek için kalıp içindeki zeminler yine poşetler içerisinde nem odasında bir gün süreyle bekletilmiştir (Şekil 3.14). Model kalıplar içerisinde hazırlanan yumuşak kil zemin üzerinde yapılan yükleme deneylerinde yaklaşık 160 N (0.16 kN) yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Hazırlanan kilin model kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 3.14. Model kalıplar içerisinde zeminin bekletilmesi

3.2.4. Lif ve uçucu kül katkılı polimer karışım oranlarının belirlenmesi ve içi boş kazıkların hazırlanması

Yumuşak kil zeminlerde kullanılacak içi boş çakma kazık malzemesi olarak kendir lifi ve uçucu kül katkılı polimer karışımları kullanılmıştır. Deneylerde lif katkılı polimer karışımlarının etkisini inceleyebilmek için 5 farklı karışım kullanılmıştır. Bu karışımlara ait yüzdeler Çizelge 3.6’da verilmektedir. Lif katkılı polimer karışımları belirlenirken Karaca (2016) çalışmasında elde edilen serbest basınç mukavemetlerinden yüksek olan, yerleştirme ve döküm kolaylığı olan 5 karışım kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan karışımların 7 günlük serbest basınç mukavemetleri Çizelge 3.7’de verilmektedir.

Çizelge 3.6. Karışımlara ait yüzdeler

Karışım Adı	Polimer (%)	Uçucu Kül(%)	Kendir (%)
S1	100		
S2	90	10	
S3	90	9	1
S4	75	25	
S5	75	24	1

Çizelge 3.7. Kazık malzemesi olarak kullanılan karışımların serbest basınç mukavemetleri (Karaca 2016)

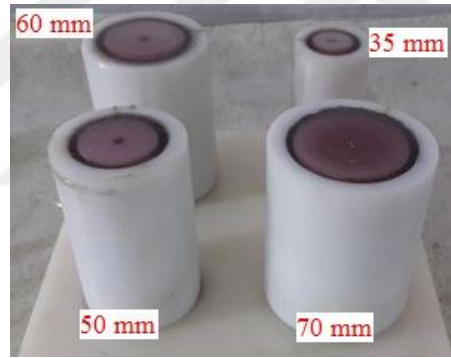
Karışım Adı	Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)
S1	37,13
S2	37,70
S3	35,55
S4	66,15
S5	62,86

Lif katkılı polimer kazıklar için kullanılacak kendir, uçucu kül ve polimer gerekli miktarda tartılarak kaplar içerisinde elle karıştırılmıştır. Karışımların homojen olması için 5 dakika karıştırma işlemi devam ettirilmiştir (Şekil 3.15). Hazırlanan beş farklı

karışım kazık üretimi için kullanılan kalıplara yerleştirilmiş ve 1-2 saat kalıp içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.16).

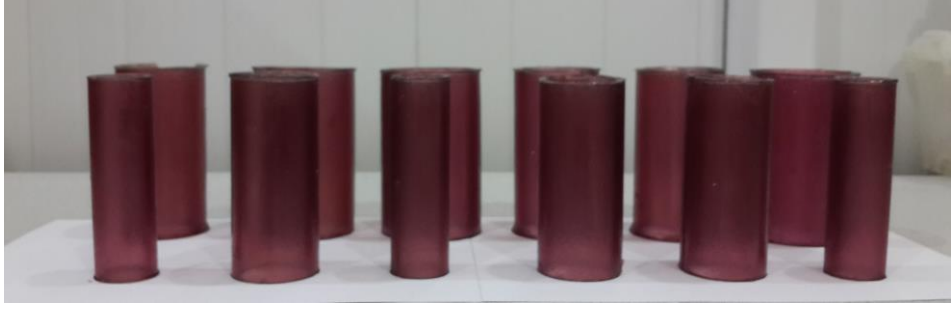


Şekil 3.15. Karışımların hazırlanması

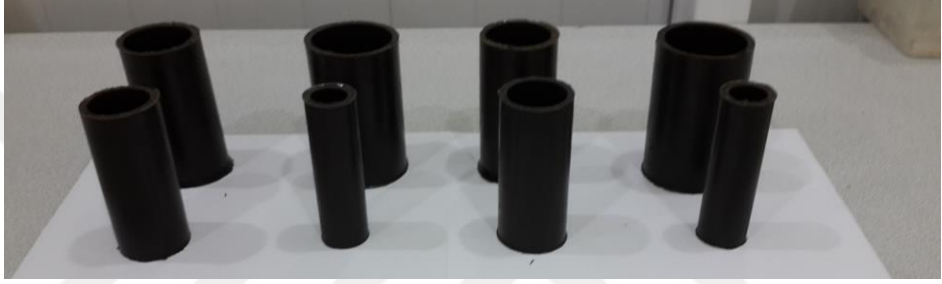


Şekil 3.16. Karışımların kalıplara dökülerek bekletilmesi

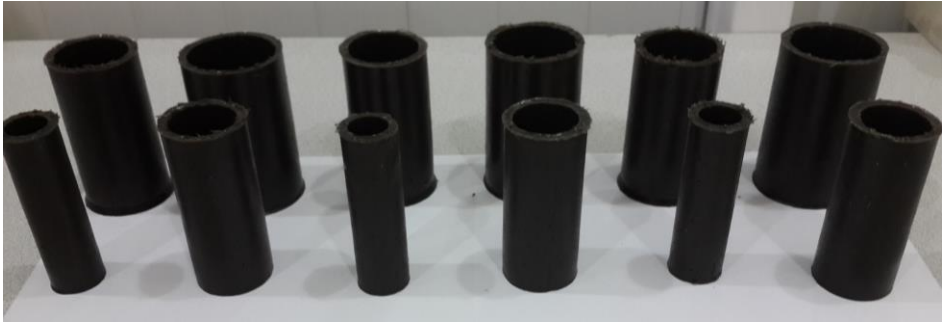
Kompozit malzeme birkaç saatte kalıptan çıkarılacak dayanıma sahip olmaktadır. Daha sonra üretilen kazıklar 7 gün süre ile nem odasında kür edilmişlerdir. Kür sonrasında üretilen kazıklar kazık çakımı için kullanılmışlardır. Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de ise farklı karışım oranlarında üretilen kazıklar toplu olarak verilmektedir.



Şekil 3.17. S1 model kazıklar



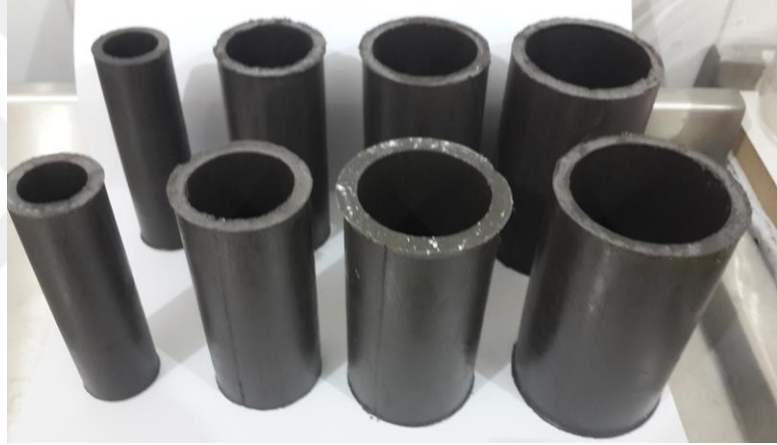
Şekil 3.18. S2 model kazıklar



Şekil 3.19. S3 model kazıklar



Şekil 3.20. S4 model kazıklar



Şekil 3.21. S5 model kazıklar

İçi boş kazıkların davranışını inceleyebilmek için çalışmada üç farklı tipte içi boş kazık kullanılmıştır. Birinci tipte 5 mm et kalınlığına sahip içi boş kazıklar üretilmiştir. Bu kazıkların altı açıktır (Şekil 3.22). İkinci tip kazıklarda ise kazıkların altı kapatılarak çakma esnasında içlerine zemin girmesi önlenmiştir (Şekil 3.23). Son grup kazıklarda ise yine altı kapalı olarak üretilen kazıklar zemine çakıldıktan sonra içlerine kırmataş doldurularak (taş kolon) üretilmiştir (Şekil 3.24). Son grupta uygulanan taş kolon ve kırma taşa ait bazı özellikler Çizelge 3.8’de verilmektedir. Taş kolon yapımı için dane çapı 2,3 mm-2,8 mm aralığında üniform kalker kırmataşı kullanılmıştır.



Şekil 3.22. İçi boş kazıklar



Şekil 3.23. İçi boş-altı kapalı kazıklar



Şekil 3.24. İçi boş kırmataş dolgulu kazıklar

Çizelge 3.8. Kalker kırmataşa ait bazı özellikler

Parametre		Değer
Dane Birim Hacim Ağırlığı	t/m^3	2,62
Kazık içinde birim hacim ağırlık	t/m^3	1,50
İçsel Sürtünme Açısı		47^0

3.2.5. Kazıkların çakılması ve kazık yükleme deneyine hazırlanması

Model kalıplar içine yerleştirilen ve birer gün bekletilen yumuşak kil zeminlere daha önce hazırlanmış içi boş kazıklar kazık çakma düzeneği ile çakılmıştır (Şekil 3.25). Kompozit kazıklar 7 günlük kür süreleri sonunda çakılmışlardır. Kazık çakma işlemi sonrasında meydana gelen örselenmeler sebebiyle kazık yükleme deneyleri 10 gün sonra yapılmıştır. Kil zeminlerde yapılacak kazık yükleme deneyleri kazık çakımından 1-3 hafta sonra yapılmalıdır (TS EN 1997-1). Yine bu süre içerisinde kazık çakılmış zeminler poşetler içerisinde kür odasında bekletilmişlerdir. Kazık çakılmış zemin numunelerine ait bazı görüntülerde Şekil 3.26’da verilmektedir.



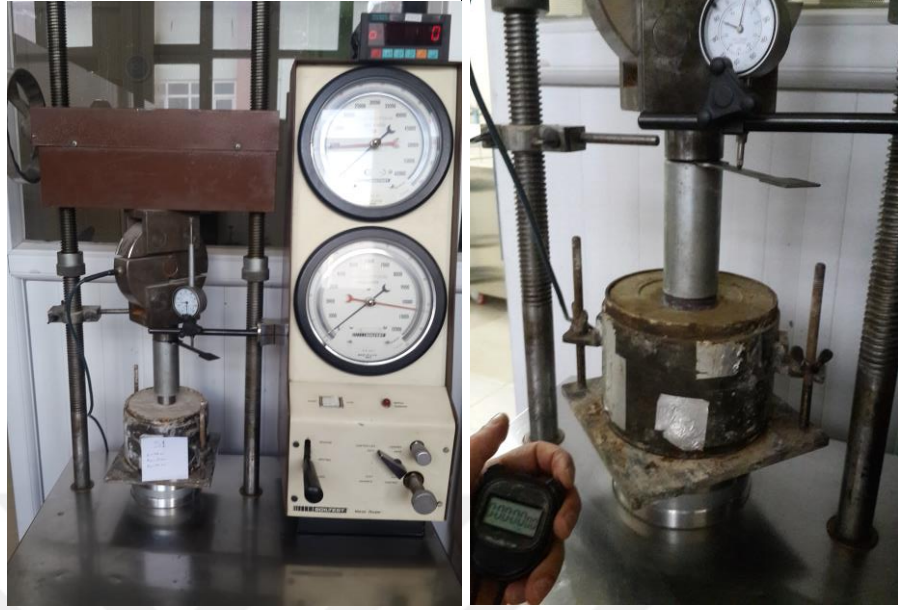
Şekil 3.25. Model kazıkların çakılması



Şekil 3.26. Farklı çaplardaki kazıkların çakmadan sonraki görüntüleri

3.2.6. Kazık yükleme deneyleri

Kazık yükleme deneyleri ASTM D1143 ve TS EN 1997-1'e göre Atatürk Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneylerde SoilTest 20 ton kapasiteli serbest basınç deney aleti kullanılmıştır. Şekil 3.27'de deney aleti görülmektedir. Yükleme hızı olarak 0,8 mm/dakika kullanılmıştır. Deney sonuçları yük-kazığın eksenel deformasyon grafikleri çizilerek elde edilmiştir.



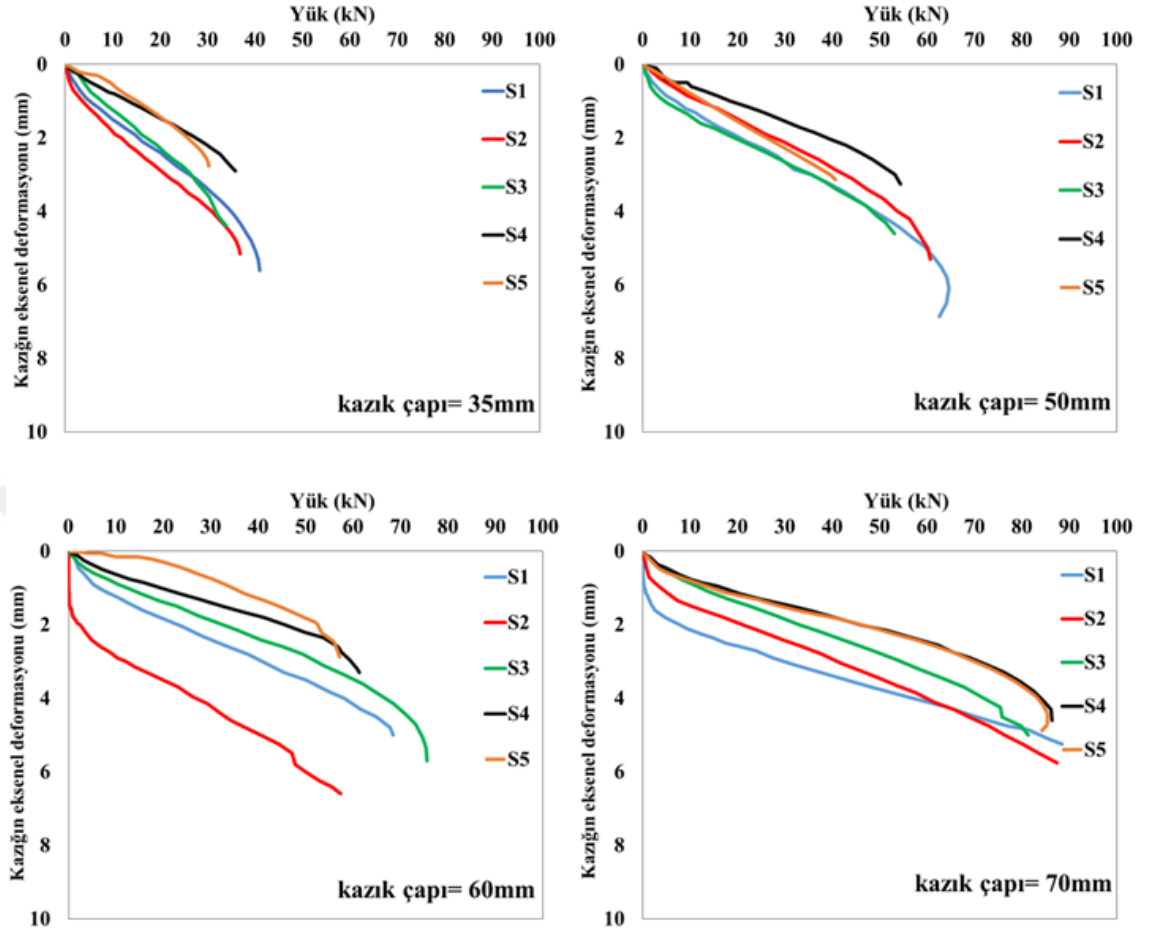
Şekil 3.27. Serbest basınç mukavemeti deneylerinde kullanılan cihaz

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

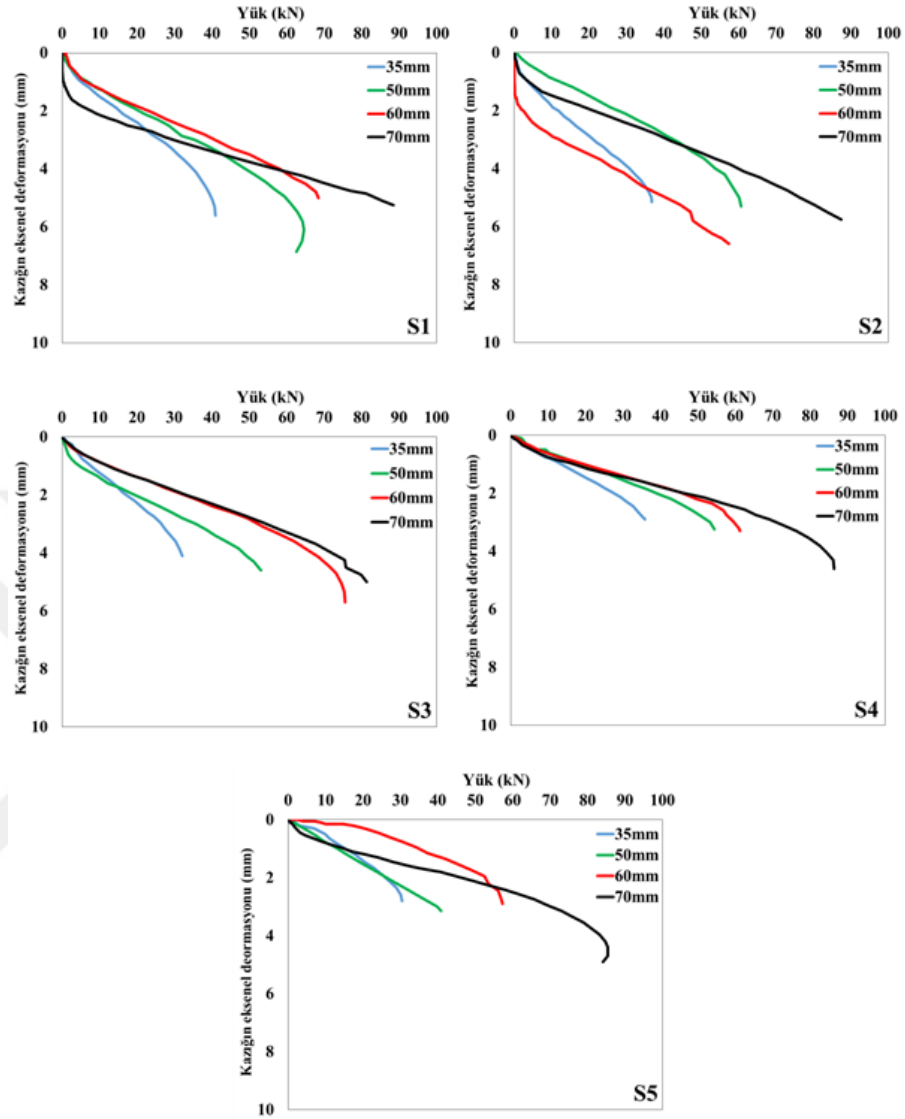
Katkılı polimer içi boş kazıkların yumuşak kil zeminlerdeki davranışının model deneylerle inceleyebilmek için 5 farklı karışımda kazıklar üretilmiş ve laboratuvarında kazık yükleme deneyleri yapılmıştır. Yine kazık çapı ve kazık tipini etkisini inceleyebilmek için toplamda 60 farklı içi boş kazık üretilmiş ve yükleme deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde olunan bulgular aşağıda 3 başlık halinde sunulmuştur.

4.1. İçi boş kazıkların yükleme deney sonuçları

Üretilen kazıklar yumuşak kil zemine çakıldıktan on gün sonra kazık yükleme deneyine tabi tutularak, kazıkların yumuşak kil zemin içerisindeki davranışları belirlenmiştir. Yapılan serbest basınç deneyine ait yük-deformasyon grafikleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1’de üretilen 5 farklı malzemenin 4 farklı çapına ait yük-deformasyon grafikleri, Şekil 4.2’de ise her bir malzemenin kendi içerisinde ki 4 farklı çapına ait yük-deformasyon grafikleri verilmiştir. Deneyler kazık ve zeminde göçme meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Şekil 4.1 ve 4.2 incelendiğinde deformasyonun 2,8 mm ile 6,85 mm aralığında değiştiği, göçme yük değerlerinin ise 30,36 kN ile 88,42 kN değerleri arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.1. Kazık çapına göre içi boş kazıkların yük-deformasyon grafikleri



Şekil 4.2. Katkı türüne göre içi boş kazıkların yük-deformasyon grafikleri

Üretilen kazıkların model kalıp içerisindeki zemine çakılması esnasında tüm kazıklarda zemin kazık içerisine girmekte ve zeminde kabarma olmamaktadır. Şekil 4.3’de içi boş kazıkların yükleme deney öncesi, yükleme deneyi sonrası ve kalıptan çıkarıldıktan sonraki görüntüleri verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi küçük çaplı kazıklar yükleme sonrasında tamamen parçalanırken büyük çaplı kazıklarda kısmen parçalanma görülmüştür.



Şekil 4.3. İçi boş kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri

- (a) yükleme deneyi öncesi
- (b) yükleme deneyi sonrası
- (c) zemin ve kazıkların kalıptan çıkarılmış hali

İçi boş kazıkların yükleme deneylerinden elde edilen maksimum taşıma kapasiteleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kazık kapasite değerleri en düşük 30,36 kN ile S5 (%75 polimer-%24 uçucu kül-%1 kendir) kazığında görülürken, en büyük değer 88,42 kN değeri ile S1 (%100 polimer) kazık malzemesinde elde edilmiştir.

Kazık yükleme deney sonuçlarından kazık kapasiteleri hesaplanırken farklı yöntemler kullanılabilir. Literatürde bu konuda birçok öneri mevcuttur (Birand 2007). En yaygın olarak kazık kapasitesi olarak göçme yükü alınır. Bunu haricinde özellikle arazi kazık yükleme deneylerinde, kazık nihai kapasitesine kadar yüklenmeyeceği için alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesinde kazık çapının %10’una denk gelen deformasyon değerine karşılık gelen yükün taşıma kapasitesi olarak kullanılmasıdır (De Nicola and Randolph 1999). Çalışma kapsamında, kazık çapının %10 deformasyonuna denk gelen yüklerde elde edilerek Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’den anlaşılabacağı gibi göçme anında elde edilen kazık kapasiteleri ile %10 deformasyonda elde edilen kazık kapasiteleri birbirlerine yakın çıkmaktadır. Ayrıca birçok kazıkta %10 deformasyona ulaşılmadan göçmeler meydana gelmiştir.

Kazık çapının kazık kapasitesine etkisini inceleyebilmek için Şekil 4.4’de kazık çaplarına göre taşıma kapasiteleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde görüleceği gibi kazık çapı arttıkça doğrusala yakın bir şekilde kazık kapasiteleri artmaktadır. Kullanılan tüm kazık malzemelerinde 70 mm’lik kazıklarda yaklaşık olarak 35 mm’lik kazıklarda elde edilen kapasitelerin 2-3 katı olarak bulunmuştur.

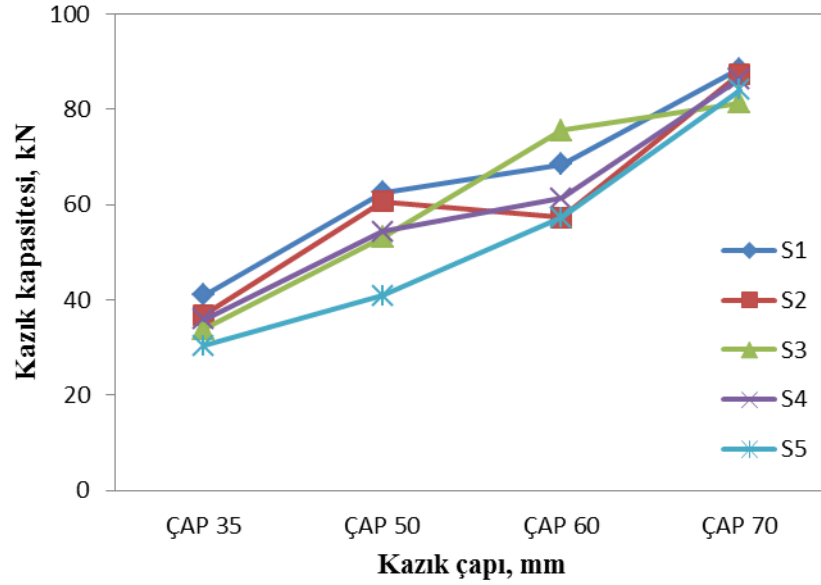
Giraldo and Rayhani (2014) yapmış oldukları çalışmada kazık yükleme deneyleri test sonuçlarına bağlı olarak yumuşak killi zeminlerde FRP kazıkların geleneksel kazıklara göre önemli iyileşme ve gelişme sağladıklarını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda yaptıkları çalışmada üretilen FRP kazıkların geleneksel kazık türü olan çelik kazıklara göre %5-%40 daha yüksek taşıma kapasiteleri elde etmişlerdir. Çizelge 4.1’de verilen kazık kapasiteleri Giraldo (2013) ve Giraldo and Rayhani (2014) çalışmalarında elde edilenlere göre biraz daha yüksektir. Bu çalışmada kullanılan polimerin (polyester) yüksek basınç dayanımı sebebiyle elde edilen kazık kapasitelerinin Giraldo (2013)’den

daha yüksek elde edilmesinin sebebi olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada üretilen içi boş katkılı polimer kazıklarının geleneksel kazıklara alternatif olabileceği ve yumuşak kil zeminlerde rahatlıkla kullanılabilmesi söylenebilir.

Çizelge 4.1. İçi boş kazıkların kazık kapasiteleri

Deney Serileri	Kazık Çapları (mm)	Kazık Kapasiteleri (kN) (göçme yüküne göre)	Kazık Kapasiteleri (kN) (%10 deformasyon değerine göre)
S1	35	40,96	30,96
S1	50	62,54	59,80
S1	60	68,48	*68,48
S1	70	88,42	*88,42
S2	35	36,82	25,96
S2	50	60,62	60,16
S2	60	57,32	50,04
S2	70	87,38	*87,38
S3	35	33,9	29,70
S3	50	53,1	*53,10
S3	60	75,62	*75,62
S3	70	81,32	*81,32
S4	35	35,9	*35,90
S4	50	54,36	*54,36
S4	60	61,26	*61,26
S4	70	86,36	*86,36
S5	35	30,36	*30,36
S5	50	40,84	*40,84
S5	60	57,26	*57,26
S5	70	84,07	*84,07

*%10 deformasyona ulaşmadan göçme meydana gelen kazıklar



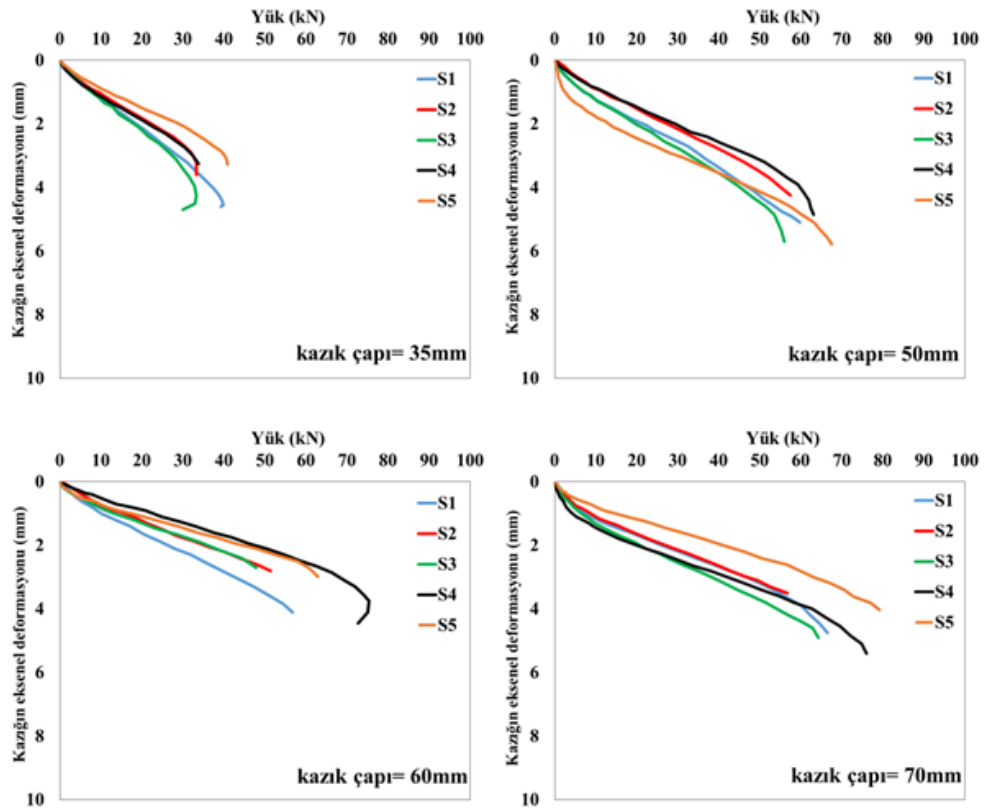
Şekil 4.4. İçi boş kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri

4.2. İçi boş-altı kapalı kazıkların yükleme deney sonuçları

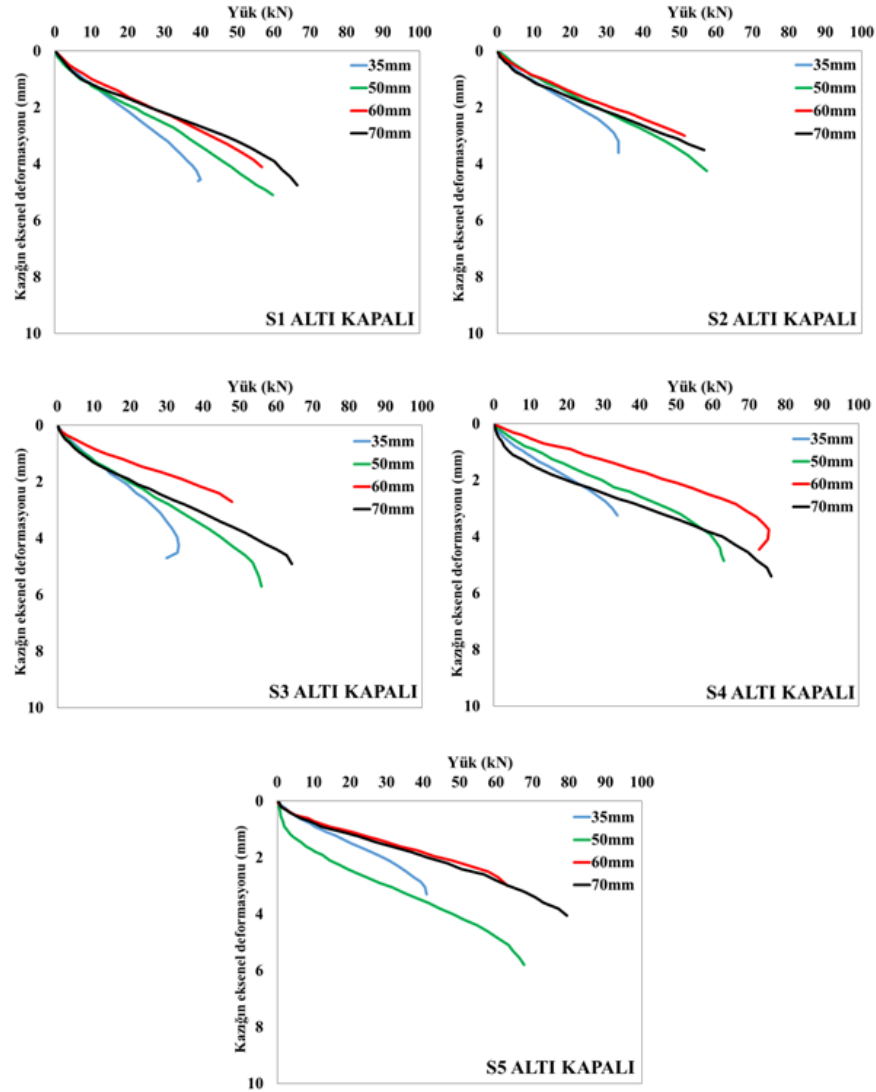
İçi boş-altı kapalı olarak üretilen kazıklarda aynı su muhtevsındaki yumuşak kil zeminlere çakıldıktan on gün sonra yükleme deneyleri uygulanmıştır. Yapılan yükleme deneylerine ait yük-deformasyon grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.5'de üretilen 5 farklı malzemeye ait yük-deformasyon grafikleri, Şekil 4.6'da ise malzeme türüne bağlı olarak 4 farklı çapa ait yük-deformasyon grafikleri verilmiştir. İçi boş-altı kapalı olarak üretilen kazıkların deformasyon değerlerinin 2,7 mm ile 5,8 mm aralığında değiştiği, yük değerlerinin ise 33 kN ile 79,44 kN değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 4.7'de içi boş-altı kapalı kazıkların deney öncesi ve deney sonrası görüntüleri verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi kazıkların altlarının kapalı olması sebebiyle zeminde kabarmalar meydana gelmiştir. Bu kabarmalar kazık çapının artması ile artmıştır. Yumuşak kil zeminlerde uygulanan çakma kazıklarda kabarma beklenen bir olaydır. Bazen arazi çalışmalarında daha önceki çakılmış kazıklar yeni çakılan kazıklar sebebiyle zeminde meydana gelen kabarma etkisi ile yukarı çıkmaktadırlar. Benzer davranış yaptığımız bu çalışmada da elde edilmiştir. İçi boş-kapalı kazıkların çakılması

sırasında gözlenen kabarma içi boş kazılarda elde edilenden daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi olarak içi boş kazıkların çakılması sırasında içlerinin zemin ile dolması olduğu düşünülmektedir. Yine Şekil 4.7 incelendiğinde küçük çaplı kazıkların yükleme deneyi sonucunda tamamen parçalandığı büyük çaplıların ise kısmen parçalandığı görülmektedir. İçi boş-altı kapalı kazıkların yükleme deneylerinden elde edilen kazık kapasiteleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Yük taşıma kapasite değerleri en düşük 33 kN ile S3 kazığında görülürken, en büyük değer 79,44 kN değeri ile S5 kazık malzemesinde elde edilmiştir. Çizelge 4.2’den anlaşılacağı gibi göçme anında elde edilen kazık kapasiteleri ile %10 deformsayonda elde edilen kazık kapasiteleri birbirlerine yakın çıkmaktadır. Ayrıca birçok kazıkta %10 deformasyona ulaşılmadan göçmeler meydana gelmiştir.

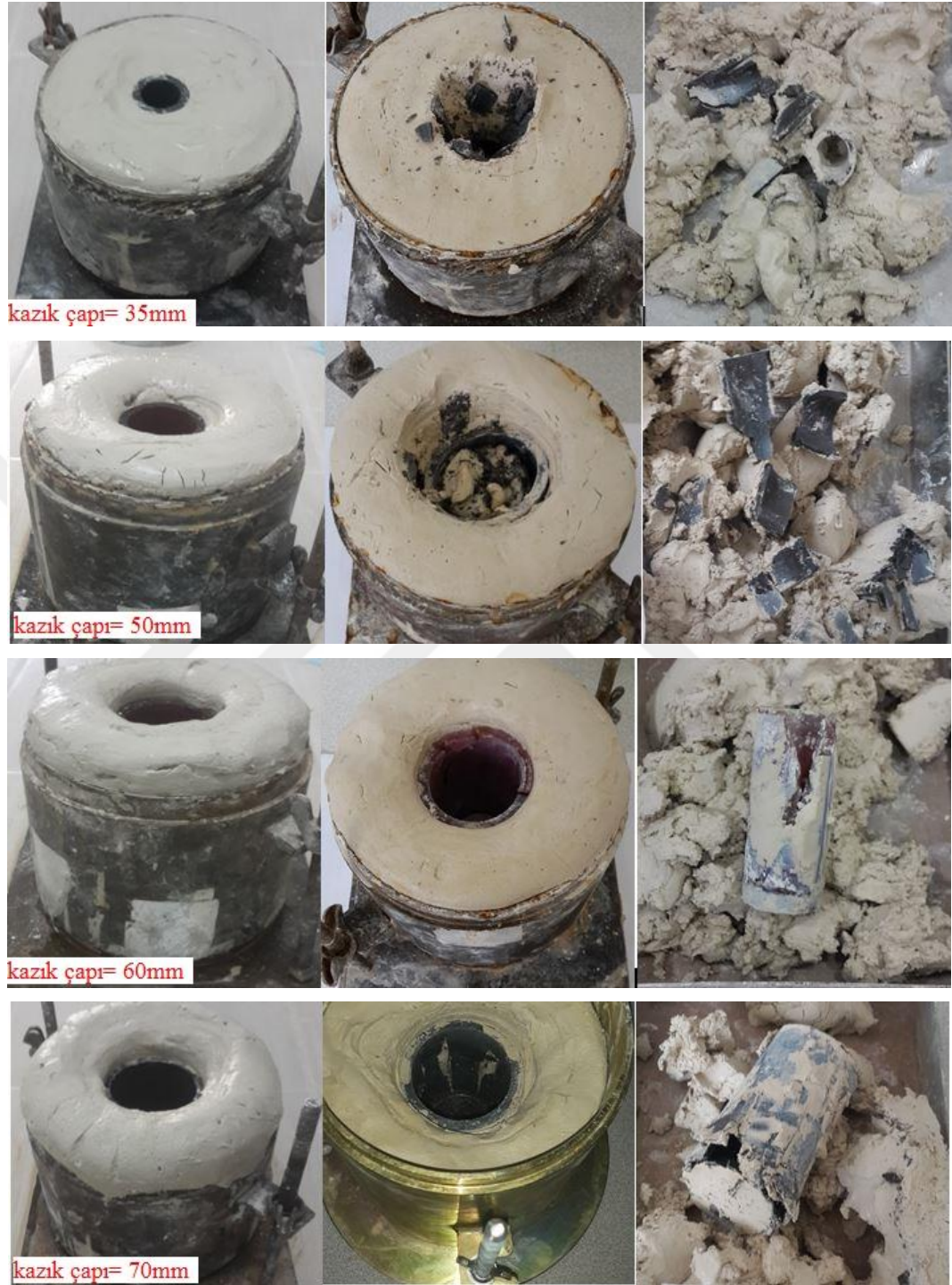


Şekil 4.5. Kazık çapına göre içi boş-altı kapalı kazıkların yük-deformasyon grafikleri



Şekil 4.6. Katkı türüne göre içi boş-altı kapalı kazıkların yük-deformasyon grafikleri

Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.8’de görüleceği gibi 60 mm’lik kazık çapı hariç kazık çapı arttıkça kazık kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Çapın 60 mm olduğu kazıklarda ise çapın 50 mm olduğu kazıklara göre kısmi azalma elde edilmiştir. Kazık kapasitesinin en yüksek olduğu değer %75 polimer-%24 uçucu kül ve %1 kendir katkılı S5 numunesinde elde edilmiştir. İçi boş kazıklar ile kıyaslandığı zaman bu kazıkların kapasitelerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak içi boş kazıkların içine zemin girerek daha güçlü bir kazık-zemin etkileşimi oluşturulmakta ve bu da kazık kapasitesini artırmaktadır.



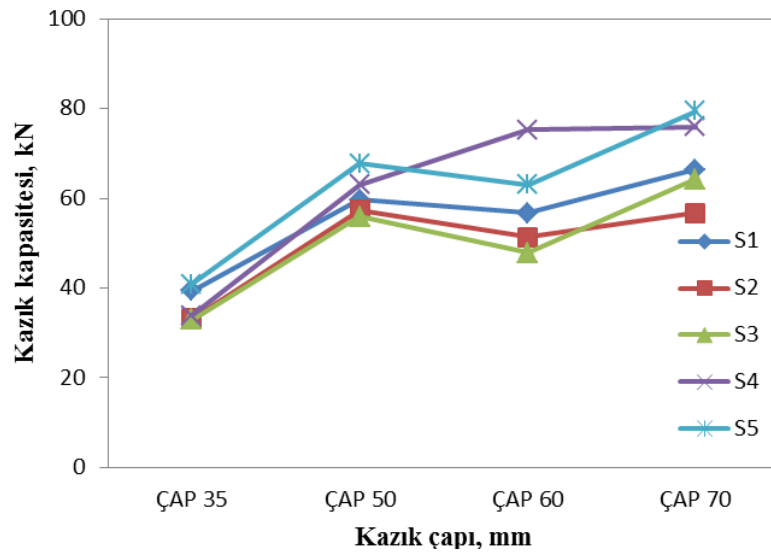
Şekil 4.7. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri

- (a) yükleme deneyi öncesi
- (b) yükleme deneyi sonrası
- (c) zemin ve kazıkların kalıptan çıkarılmış hali

Çizelge 4.2. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık kapasiteleri

Deney Serileri	Kazık Çapları (mm)	Kazık Kapasiteleri (kN) (göçme yüküne göre)	Kazık Kapasiteleri (kN) (%10 deformasyon değerine göre)
S1	35	39,42	33,3
S1	50	59,76	58,7
S1	60	56,72	*56,72
S1	70	66,48	*66,48
S2	35	33,26	*33,26
S2	50	57,44	*57,44
S2	60	51,38	*51,38
S2	70	56,72	*56,72
S3	35	33	30,58
S3	50	56	54,38
S3	60	47,92	*47,92
S3	70	64,3	*64,3
S4	35	33,84	*38,34
S4	50	63,06	*63,06
S4	60	75,34	*75,34
S4	70	75,98	*75,98
S5	35	40,92	*40,92
S5	50	67,72	62
S5	60	63,06	*63,06
S5	70	79,44	*79,44

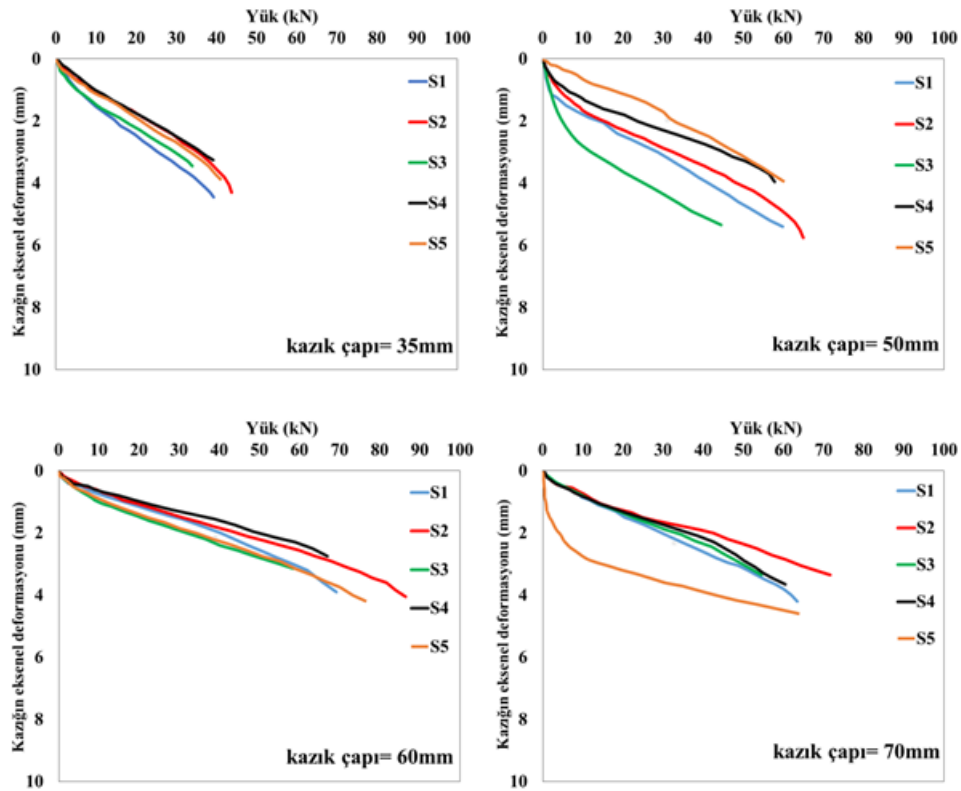
* %10 deformasyona ulaşmadan göçme meydana gelen kazıklar



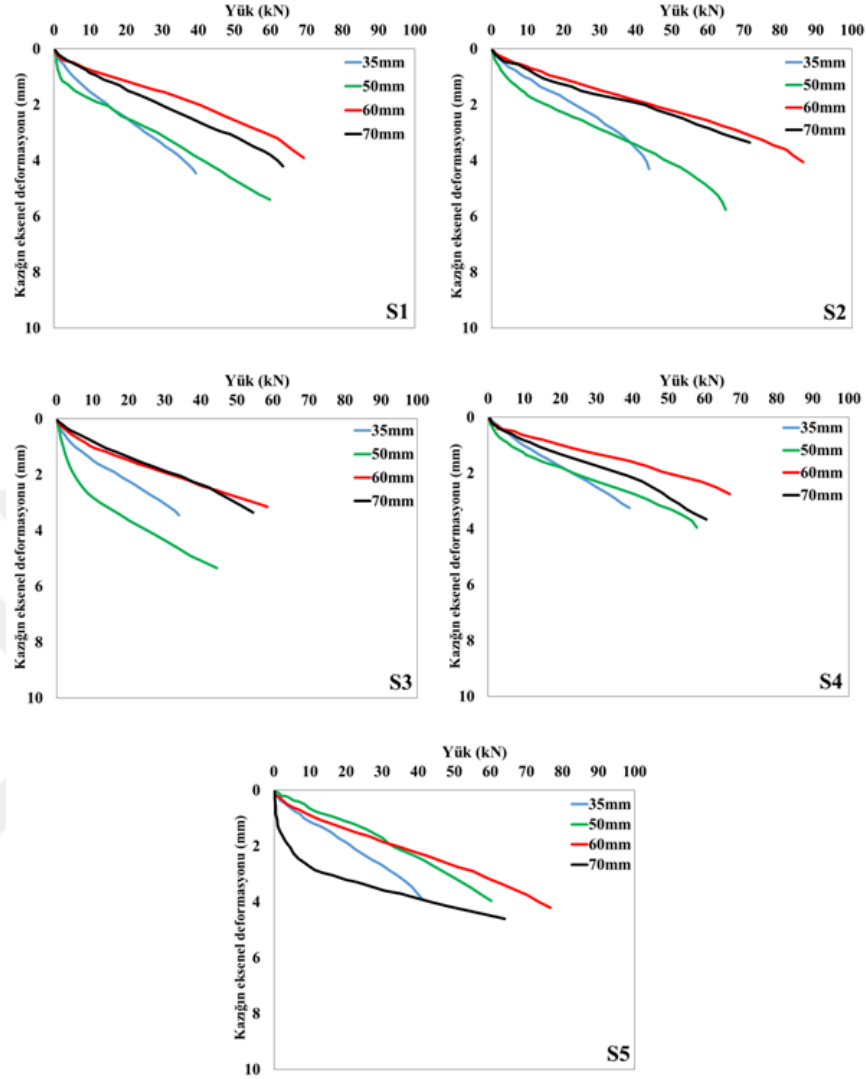
Şekil 4.8. İçi boş-altı kapalı kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri

4.3. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların yükleme deney sonuçları

İçi boş kazıkların kapasitesini artırmak için beton ile doldurularak da uygulanabilir (Önalp ve Sert 2010). İçi boş kazıkların doldurulmasının etkisini inceleyebilmek için betona göre daha maliyetinin ucuz olduğu kırmataş agregası ile kazık içleri belirli sıklıkta doldurulmuştur. Diğer seri deneylerde olduğu gibi içi boş-kırmataş dolgulu kazıklarında yükleme deneyleri çakma işleminden on gün sonra yapılmıştır. Yükleme deney sonuçlarından elde edilen yük-deformasyon grafikleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.9'da 5 farklı malzemenin yük-deformasyon grafikleri, Şekil 4.10'da ise 4 farklı çapa ait yük-deformasyon grafikleri verilmiştir. Kırmataş dolgulu kazıkların deformasyon değerleri 2,75 mm ile 5,75 mm aralığında değiştiği, yük değerlerinin ise 33,94 kN ile 86,42 kN değerleri arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.9. Kazık çapına göre içi boş kırmataş dolgulu kazıkların yük-deformasyon grafikleri



Şekil 4.10. Katkı türüne göre içi boş kırmataş dolgulu kazıkların yük-deformasyon grafikleri

Altı kapalı olarak hazırlanan kazıklar model kalıplar içerisindeki zeminlere çakılmışlardır. Çakma esnasında zeminlerde kabarma görülmüştür ve burada büyük çaplı kazıkların çakma esnasında oluşturduğu kabarma miktarı küçük çaplı kazıkların meydana getirdiği kabarma miktarında fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çakılan kazıkların içerisine kırmataş yerleştirilip 10 gün sonra kazık yükleme deneyine tabi tutulmuş ve Şekil 4.10'da verilen yük-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Kırmataş dolgulu kazıkların yükleme deneyi öncesi, sonrası ve kalıptan çıkarıldıktan sonraki durumu Şekil 4.11'de verilmektedir.



Şekil 4.11. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların kazık yükleme deneyi görüntüleri

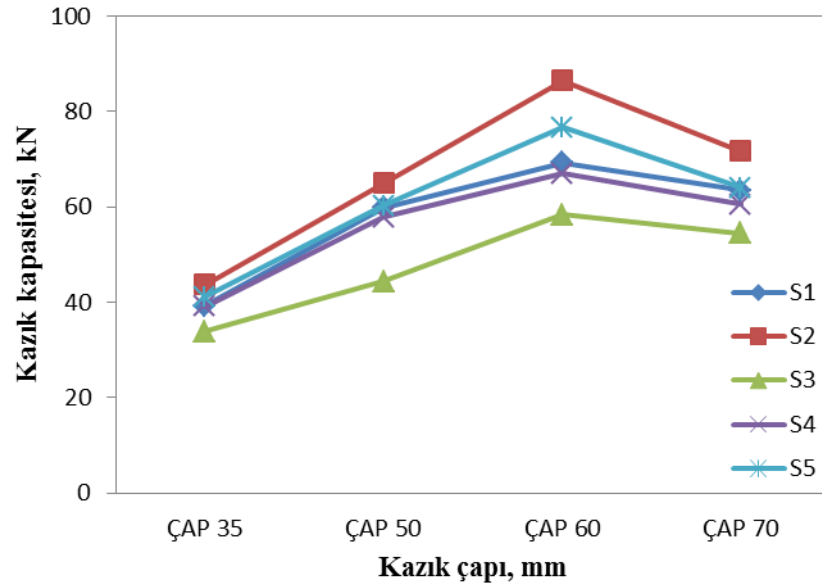
- (a) yükleme deneyi öncesi
- (b) yükleme deneyi sonrası
- (c) zemin ve kazıkların kalıptan çıkarılmış hali

Kırmataş dolgulu kazıklarda da kırım sonrasında büyük çaplı kazıklarda meydana gelen parçalanma, küçük çaplı kazıklarda meydana gelen parçalanmalardan daha az olduğu görülmüştür. Tüm üç kazık türü incelendiğinde en fazla kabarma ve göçme anındaki kazıklarda en fazla parçalanma kırma taş dolgulu kazıklarda elde edilmiştir. İçi boş-kırmataş dolgulu kazıkların yükleme deneylerinden elde edilen kazık kapasiteleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Kazık kapasite değerleri en düşük 33,94 kN ile S3 kazığında görülürken, en büyük değer 86,42 kN değeri S2 kazık malzemesinde görülmektedir. Çizelge 4.3'den anlaşılabacağı gibi göçme anında elde edilen kazık kapasiteleri ile %10 deformasyonda elde edilen kazık kapasiteleri birbirlerine yakın çıkmaktadır. Ayrıca birçok kazıkta %10 deformasyona ulaşılmadan göçmeler meydana gelmiştir. Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.12'de görüleceği gibi genel olarak kazık çapı arttıkça içi boş kırma taş dolgulu kazıkların kapasitelerinin arttığı ancak en büyük çapa(70mm) ait kazıkların 60mm çaplı kazıklara göre kazık kapasitelerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir.

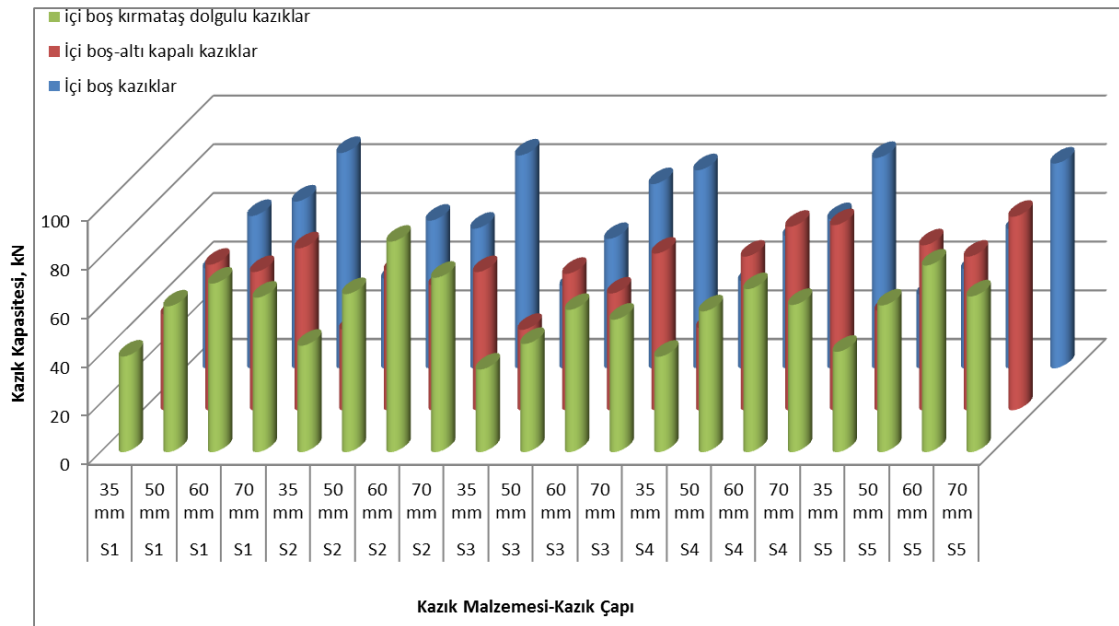
Çizelge 4.3. İçi boş kırmataş dolgulu kazıkların kapasiteleri

Deney Serileri	Kazık Çapları (mm)	Kazık Kapasiteleri (kN) (göçme yüküne göre)	Kazık Kapasiteleri (kN) (%10 deformasyon değerine göre)
S1	35	39,28	30,94
S1	50	59,84	54,1
S1	60	69,22	*69,22
S1	70	63,44	*63,44
S2	35	43,7	39,42
S2	50	64,9	60,21
S2	60	86,42	*86,42
S2	70	71,62	*71,62
S3	35	33,94	*33,94
S3	50	44,42	39,38
S3	60	58,42	*58,42
S3	70	54,42	*54,42
S4	35	39,18	*39,18
S4	50	57,82	*57,82
S4	60	66,94	*66,94
S4	70	60,44	*60,44
S5	35	41,2	38,96
S5	50	60,20	*60,20
S5	60	76,64	*76,64
S5	70	63,96	*63,96

* %10 deformasyona ulaşmadan göçme meydana gelen kazıklar



Şekil 4.12. İçi boş kırmataş dolgu kazıkların kazık çaplarına göre kazık kapasiteleri



Şekil 4.13. Kazık türünün kazık kapasitesine etkisi

Şekil 4.13'te ise kazık türünün kazık kapasitesine etkisi verilmektedir. Şekil incelendiğinde görüleceği gibi en yüksek kazık kapasiteleri içi boş kazıklarda elde edilmiştir. En düşük kazık kapasiteleri ise içi boş-altı kapalı kazık türlerinde elde

edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında uygulaması daha kolay olan ve maliyeti daha az olan içi boş kazıkların yumuşak kil zeminlerde ki kazık uygulamalarında kullanılması önerilmektedir.

Tüm sonuçlar dikkate alındığında yumuşak kil zeminde uygulanan katkılı polimer çakma içi boş kazıklardan 30-90 kN aralığında yüksek kazık kapasiteleri verdiği görülmektedir. Yumuşak kil zemin üzerinde yapılan yükleme deneyi sonucunda kilin maksimum yük kapasitesi 0,16 kN olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlere kıyasla içi boş kazıklar ile deformasyonların %10 kazık çapından daha düşük olduğu durumlarda bile 30-90 kN'luk kazık kapasiteleri elde edilmiştir.

Kazık kapasiteleri benzer zeminler üzerinde yapılan çalışmalarında (Giraldo 2013; Giraldo and Rayhani 2014) elde edilenlere göre daha yüksektir. Bu çalışmada kullanılan polimerin (polyester) yüksek basınç dayanımına sahip olması sebebiyle elde edilen kazık kapasitelerinin Giraldo (2013)'den daha yüksek elde edilmesinin sebebi olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada üretilen içi boş katkılı polimer kazıklarının geleneksel kazıklara alternatif olabileceği ve yumuşak kil zeminlerde güvenle kullanılabileceği söylenebilir. Yine de, daha kesin sonuçlara varabilmek için negatif çevre sürtünmesinin oluşacağı durumların da dikkate alındığı yeni büyük model deneylerin ve arazi çalışmalarının yapılması önerilmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, model deneyler ile katkılı polimer içi boş kazıkların düşük plastisiteli (CL) yumuşak kil zeminlerdeki davranışını inceleyebilmek için 5 farklı karışım ve 60 farklı tipte kazıklar üretildi ve üretilen kazıklar yumuşak kil zeminlere çakılarak laboratuvarda kazık yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

İçi boş kazık yükleme deneylerinde, en yüksek kazık kapasitesi 88,42 kN değeri ile 70 mm çaptaki S1 (%100 polimer) numunesinde elde edilmiştir. Kazık kapasite değerleri, çap arttıkça artmıştır. İçi boş kazıklar çakma esnasında kazık içerisine zeminin girmesi sebebiyle zeminde kabarma olmamıştır. Yükleme deneyi sonrası küçük çaplı kazıklar tamamen parçalanırken, büyük çaplı kazıklar kısmen parçalanmışlardır. İçi boş olarak üretilen bu kazıklar geleneksel kazıklara göre dayanım ve dayanıklılık gibi üstün özellikleri sebebiyle alternatif olarak kullanılabilir ve aynı zamanda yumuşak zeminlerde rahatlıkla kullanılabileceği söylenebilir.

Aynı su muhtevastaki yumuşak zeminlere çakıldıktan on gün sonra içi boş-altı kapalı kazıklara yükleme deneyi uygulanmıştır. Yükleme deneyi sonucunda en yüksek kazık kapasitesi 79,44 kN değeri ile S5 (%75 polimer-%24 uçucu kül-%1 kendir) kazığında elde edilmiştir. Kazık kapasite değerleri 60 mm çapındaki kazıklar hariç çap arttıkça artmıştır. Kazıkların altı kapalı olması nedeniyle çakma esnasında zeminde kabarmalar meydana gelmiştir. Kabarma miktarı kazık çapı arttıkça artmıştır. Kazıkların yükleme deneyi sonrası küçük çaplı kazıklarda tamamen, büyük çaplı kazıklarda ise kısmen parçalanma görülmüştür.

Kazık kapasite değerini nasıl etkilediğini araştırmak için içi boş kazıklar kırmataş ile doldurulmuştur. İçi boş kırmataş dolgu kazıklarda çakıldıktan on gün sonra yükleme deneylerine tabi tutulmuştur. Yükleme deney sonucunda en yüksek kazık kapasitesi 86,42 kN değeri ile S2 (%90 polimer-%10 uçucu kül) kazık numunesinde elde

edilmiştir. İçi boş kırmataş dolgulu kazıklarda kazık çapı arttıkça kazık kapasitesinin arttığı ancak 70 mm çaptaki kazıkların kapasitelerinin 60 mm çaplı kazıklara göre azaldığı tespit edilmiştir. Çakma esnasında zeminde kabarmalar olmuştur ve burada yine büyük çaplı kazıklarda meydana gelen kabarmanın, küçük çaplı kazıklara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yükleme deney sonrası ise büyük çaplı kazıklarda meydana gelen parçalanmanın, küçük çaplı kazıklara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. İçi boş kırmataş dolgulu kazıklarda geleneksel kazıklara alternatif olarak kullanılabileceği söylenilebilir.

Yükleme deney sonuçlarından elde edilen değerlere bakıldığında zaman, kazık malzemesi bakımından kazık kapasite değerlerinin yüksek olduğu değerler genel olarak %100 polimer katkılı S1 numunesinde elde edilmiştir. Bu durumda FRP kazıklarının maliyet açısından ilk etapta yüksek bir değere sahip olacağı düşünülse de korozyona, bozunmaya karşı direncinin yüksek olması bakımından uzun servis ömürleri de dikkate alındığında zaman hem maliyet hem de kullanım açısından büyük avantajlar sağlar.

Tüm kazıkların kazık kapasiteleri değerlendirildiğinde zaman genel olarak kazık çapı arttıkça kazık kapasite değerlerinin de arttığı görülmüştür. Ancak kazık çapı arttıkça zeminde kabarma miktarının da arttığı görülmüştür. Bu kabarma normalde beklenen bir durum olduğu için değerlendirme de diğer üstün özelliklerinin dikkate alınması daha sağlıklı olmaktadır.

İçi boş, içi boş-altı kapalı ve içi boş kırmataş dolgulu kazıklar değerlendirildiğinde zaman, içi boş kazıklar daha yüksek kazık kapasiteleri göstermiştir. Kırmataş dolgulu kazıklar ise altı kapalı kazıklara göre kazık kapasitesi bakımından daha üstün olduğu elde edilmiştir. İçi boş kazıkların hem kazık kapasite değerlerinin yüksek olması hem de zeminde çakma esnasında kabarma değerlerinin az olması bu kazıkları daha kullanışlı yapmaktadır. Aynı zamanda içi boş kazıklar uygulama ve maliyet açısından da üstün özellikler göstermektedir.

Bu tezde sunulan sonuçlara göre içi boş lif katkılı polimer kazıkların yumuşak kil zeminlerde kullanılabilir olduğu elde edilmiştir. Yine de laboratuvarında yapılan bu model deneyler, daha büyük ölçekli model deneyler ve arazi çalışmaları ile desteklenmelidir. Daha kesin sonuçlara varabilmek için negatif çevre sürtünmesinin oluşacağı durumların da dikkate alındığı yeni çalışmaların yapılması önerilmektedir. Ayrıca lif katkılı polimer kazıklarının geleneksel kazıklara alternatif olabileceklerini söyleyebilmek için uzun dönem durabilite, dayanıklılık ve korozyon deneylerinin yapılması da önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Afacan, K. B., 2007. Perde Kazıkların Düşey Taşıma Gücünün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akın, E., 2007. Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aksoy, H.S., Gör, M., İnal, E., 2015. FRP kazıklı radye temellerin davranışının deneysel olarak incelenmesi. 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Anonim, 2016. www.zeminarastirma.com/kazik_yukleme_deneyi_nasil_yapilir.html
- Arasan, S., İkiz, H., 2015. Polimer, kimyasal ve katkıları ile modifiye edilmiş uçucu küllerin katı atık depolama alanı şiltesi olarak kullanılabilirliği. 6. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Ashford, S. A., Jakrapiyanun, W., 2001. Drivability of glass FRP composite piling. *Journal of Composites for Construction*, 5(1), 58-60.
- ASTM D1143 / D1143M-07 (2013), Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- Bagherinia, M., 2013. Killerin Derin Karıştırma Yöntemi İle İyileştirilmesinde Doymamış Polyesterin Kullanılabilirliği. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Başeski, C., 2005. Teğet Kazıkların Düşey Taşıma Gücünün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Birand, A. A., 2007. Kazıklı Temeller. Teknik Yayınevi, 462 sayfa, Ankara.
- Coduto, D. P., 2001. Foundation Design Principles and Practices. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Deneç, G., 2006. Sinyal Eşleme Yöntemi Kullanılarak Kazık Süreklilik Deneylerinin Değerlendirilmesi ve Kazık Kalitesinin Belirlenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Giraldo, J., Rayhani, M. T., 2014. Load transfer of hollow Fiber-Reinforced Polymer (FRP) piles in soft clay. *Transportation Geotechnics*, 1(2), 63-73.
- Guades, E. J., 2013. Behaviour of glass FRP composite tubes under repeated impact for piling application. Doctoral Thesis, University of Southern Queensland, Australia.
- Guades, E. J., Aravinthan, T., Islam, M. M., 2011. Driveability of composite piles. In *Proceedings of the 1st International Postgraduate Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing (eddBE 2011)* (pp. 237-242). Queensland University of Technology.
- Guades, E., Aravinthan, T., 2013. Residual properties of square FRP composite tubes subjected to repeated axial impact. *Composite Structures*, 95, 354-365.
- Guades, E., Aravinthan, T., Islam, M., Manalo, A., 2012. A review on the driving performance of FRP composite piles. *Composite Structures*, 94(6), 1932-1942.

- Gürü, M., Tekeli, S., Akin, E., 2007. Manufacturing of polymer matrix composite material using marble dust and fly ash. *Key Engineering Materials*, Volume 336-338 II, 1353-1356.
- Iskander, M. G., Hanna, S., Stachula, A., 2001. Driveability of FRP composite piling. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(2), 169-176.
- Karaca, S., 2016. Lif ve Uçucu Kül Katkılı Polyester Esaslı Kompozit İçi Boş Kazıkların Mekanik ve Dinamik Özelliklerinin Araştırılması. Y. Lisans Tez Çalışması, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Li, Z., Wang, X., Wang, L., 2006. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 37(3), 497-505.
- Lopez-Anido, R., Michael, A. P., Sandford, T. C., Goodell, B., 2005. Repair of wood piles using prefabricated fiber-reinforced polymer composite shells. *Journal of performance of constructed facilities*, 19(1), 78-87.
- Mirmiran, A., Shao, Y., Shahawy, M., 2002. Analysis and field tests on the performance of composite tubes under pile driving impact. *Composite Structures*, 55(2), 127-135.
- Nicola, A. D., Randolph, M. F., 1999. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads. *Géotechnique*, 49(3), 295-318.
- Önalp, A., Sert, S., 2010. *Geoteknik Bilgisi III Bina Temelleri*. Birsen Yayınevi, 426 sayfa, İstanbul.
- Pando, M., Filz, G., Ealy, C., Hoppe, E., 2003. Axial and lateral load performance of two composite piles and one prestressed concrete pile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1849), 61-70.
- Ramaswamy, A., Chachithanantham, S., Arumugam, S., 2014. Performance of BFRP retrofitted RCC piles subjected to axial loads. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Robinson, B., Iskander, M., 2008. Static and dynamic load tests on driven polymeric piles. In *GeoCongress 2008@ sGeosustainability and Geohazard Mitigation* (pp. 939-946). ASCE.
- Sakr, M., El Naggar, M. H., Nehdi, M., 2007. Wave equation analyses of tapered FRP-concrete piles in dense sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(2), 166-182.
- Seica, M. V., Packer, J. A., 2007. FRP materials for the rehabilitation of tubular steel structures, for underwater applications. *Composite Structures*, 80(3), 440-450.
- Sen, R., Mullins, G., 2007. Application of FRP composites for underwater piles repair. *Composites Part B: Engineering*, 38(5), 751-758.
- Toğrol, E., Tan, O., 2009. *Kazıklı Temeller*. Birsen Yayınevi, 142 sayfa, İstanbul.
- TS EN 1997-1 (2005), *Jeoteknik tasarım- Bölüm 2: Genel kurallar*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uzuner, B. A., 2006. *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi, Trabzon.
- Üzel, S., 2011. *Endüstriyel Çelik Binalarda Kazık Temellerin Binanın Dinamik Davranışına Olan Etkisi*. Y. Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Velez, J. D. G., 2013. *Experimental study of Hollow Fibre Reinforced Polymer Piles in soft clay*. Doctoral Thesis, Carleton University, Ottawa.

- Zhang, Z., Wang, Y. H., 2014. Examining setup mechanisms of driven piles in sand using laboratory model pile tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(3), 04014114.
- Zyka, K., Mohajerani, A., 2016. Composite piles: A review. *Construction and Building Materials*, 107, 394-410.



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Erzurum şehrinde doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Erzurum’da okudu. Lisans eğitime 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2013’te mezun oldu. 2013 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesinin Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

