

Cam Elyaf Takviyeli Plastik Profilli Pasif Kazık Grup Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

Mehmet Rifat KAHYAOĞLU*

Mutlu SEÇER**

Arif Ş. KAYALAR***

ÖZ

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) kazıkların şev stabilitesinde pasif kazık olarak kullanımı araştırılmış ve bu konuda yapılan ilk model çalışma olması sebebiyle literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmada, kendi ağırlığı ile hareket eden zemin kütle tarafından yüklenen kazık grubu modeli için özel bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Aletlendirilen model CTP kazık grubuna etkiyen zemin basıncı dağılımları, farklı kazıklar arası mesafeler dikkate alınarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, kazıklara etkiyen zemin basıncının, kazıklar arası mesafe azaldıkça kemerlenme mekanizması sebebiyle arttığı görülmüştür. Deneysel olarak belirlenen zemin basıncı dağılımları, analitik yöntemlerle hesaplanan zemin basıncı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: şev stabilitesi, CTP kazık, kazıklar arası mesafe, yük transferi, zemin basıncı dağılımı.

ABSTRACT

Experimental Investigation of Glass Fiber Reinforced Plastic Profiled Passive Pile Group Behavior

In this study, the use of glass fiber reinforced plastic (GFRP) profiled passive piles in slope stability is investigated and it is aimed to contribute to the literature as the first model study regarding this topic. A special experimental setup is designed in order to model pile groups subjected to soil movement under its own weight. Soil pressure distributions acting on instrumented GFRP pile groups are examined for various pile spacings. As a result of experiments, it is revealed that the loads acting on piles increase with decreasing pile spacing due to soil arching. Experimentally determined soil pressure distributions are compared with the soil pressure values calculated by analytical methods.

Keywords: slope stability, GFRP pile, pile spacing, load transfer, soil pressure distribution.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22.10.2010 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Muğla Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla - rkahyaoglu@mu.edu.tr

** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - mutlu.secer@deu.edu.tr

*** Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - arif.kayalar@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Şev stabilitesi sağlama teknikleri arasında pasif kazık kullanımının popülaritesi stabilizasyon mekanizmasındaki gerçek davranışın belirlenmesine yönelik çalışmalara paralel olarak artmıştır [1-3]. Kazıkların şev stabilitesini sağlayabilmesi; hareketsiz zemin bölgesinde pasif direnç ve hareket eden zemin bölgesinde kemerlenme olmak üzere iki temel mekanizmaya bağlıdır. Pasif direnç mekanizması; kazık rijitliğinden kaynaklanan ve özellikle kayma yüzeyi altındaki kazık-zemin etkileşimiyle sağlanır [4-7]. Kemerlenme mekanizmasında ise; hareket eden zemin danesi, yükünü kayma gerilmeleri vasıtasıyla bitişindeki az hareket eden danelere aktarır. Bu danelerde yüklerini hareketi nispeten sınırlı rijit kazıklara iletir [8-9]. Zemin hareketi nedeniyle zeminden kazıklara aktarılan yüklerin dağılımı; zemin ve kazık türüne, kazık boyutlarına, kazıklar arası mesafeye, kazıkla zemin arasındaki görelî yer değiştirmeye bağlıdır [10-14].

Şev güvenliğinin kazıkların yüklenme şekliyle doğrudan ilişkili olması nedeniyle, zeminden kazıklara aktarılan yüklerin dağılımlarının gerçekçi olarak belirlenmesi önem taşır. Hareketli zemin kütesinden kaynaklanan yüklerin tahminine yönelik geliştirilen arazi ve laboratuvar test sonuçlarına dayalı ampirik yöntemler [15, 16], zemin basıncına dayalı yarı analitik yöntemler [17-19], yanall zemin yer değiştirmesinin büyüklüğüne ve şekline dayalı yöntemler [20, 21] ve sonlu elemanlar yöntemleri [22, 23] bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemler; zemin özellikleri, kazıklar arası mesafe, kazık rijitliği ve kazık başı mesnetlenme şekli değişimleriyle farklılık gösteren kazık grubu davranışını tam anlamıyla yansıtamamaktadır.

Analitik yöntemlerin geçerliliklerini incelemek amacıyla birçok deneysel çalışma yapılmıştır [24-26]. Bu deneysel çalışmalarda; model kazıklar alt ve üst parçadan oluşan iki bölümlü kutuların içerisine yerleştirilmiştir. Hareketsiz alt parça içindeki kazığın ucu çelik plaka veya güçlü zeminle sabitlenmiş, hareketli üst parçaya ise yatay yük uygulanmış ve zemin dikdörtgen veya üçgen formunda yatay yer değiştirmeye zorlanarak kazıklar yüklenmiştir. Bu çalışmalarda, zemin yatay bir dış kuvvetle hareket ettirilmiştir. Ancak, şevde zeminin kendi ağırlığı etkisi ile hareket olduğundan, dışarıdan yapılan bir yükleme ile zemin hareketinin modellenmesi, model içerisindeki yük dağılımı değişimini yeterince temsil edememesinden dolayı gerçek davranıştan uzak olmaktadır.

Şev stabilitesi konusunda çalışan mühendisler; kazıklarda korozyon, öz ağırlık ve maliyet gibi sorunların üstesinden gelmek amacıyla teknolojiye paralel olarak betonarme ve çelik kazıklara alternatif olarak kompozit malzemeli kazık türleri üzerine çalışmalara yönelmektedirler [27]. Günümüzde, pultrüzyon yöntemiyle mekanik dayanım özellikleri geliştirilerek üretilen kompozit malzemeler; hafifliği, korozyona dayanımı, düşük taşıma maliyeti, montaj kolaylığı, elektrik yalıtımı, düşük ısı iletkenliğinin olması, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymaması gibi özellikleri nedeniyle birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılabilir hale gelmiştir [28, 29]. Pultrüzyon, takviye malzemesinin bir reçine matrisi ile birleştirilip sıcak kalıp boyunca çekilerek kompozit malzeme üretilmesi işlemi olup bu yöntem ile çelik profil kesitlerine benzer şekillerde ve istenilen boylarda cam elyaf takviyeli plastik (CTP) profiller dünyada olduğu gibi ülkemizde de üretilebilmektedir [30, 31]. CTP malzemeler, palplanş uygulamalarında kullanılmakta olup, bu tip kompozit malzemelerin farklı zemin uygulamaları için kullanılabilirliği araştırılmaktadır [32].

Bu çalışmada, inşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle hızlı, hafif eleman üretimi ve kimyasallara karşı dayanımın gerektiği durumlar için kullanılabilirliği olan CTP profillerden yapılmış şev stabilitesi için kullanılan kazıkların grup davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada, kendi ağırlığı ile hareket eden zemin kütlesi tarafından yüklenen kazık grubu modeli için özel bir deney düzeneği tasarlanmış ve aletlendirilen serbest başlı model CTP kazık grubuna etkiyen zemin basıncı dağılımları, farklı kazıklar arası mesafeler dikkate alınarak incelenmiştir. Hareket eden zeminden kazıklara aktarılan yük kemerlenme davranışı dikkate alınarak deneysel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde serbest başlı kazık grupları için önerilen mevcut analitik yaklaşımlar ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

2. DENEY DÜZENEGİ

CTP malzemeden üretilmiş model kazıkların şev stabilitesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu kazıklara etkiyen zemin basıncı dağılımının belirlenmesi amacıyla bir deney düzeneği yapılmıştır. Şekil 1’de sunulan deney düzeneğini oluşturan temel unsurlar; deney kutusu, sistem taşıyıcı çerçevesi, model kazıklar, deney zemini, yağmurlama düzeneği, yük hücresi, gerinim pulları ve yatay yer değiştirme ölçerlerdir.

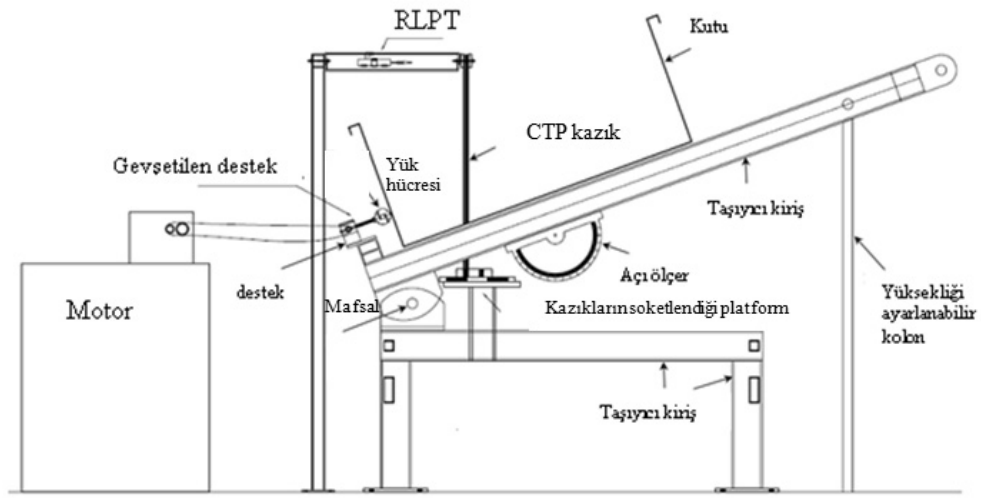


Şekil 1. Deney düzeneği

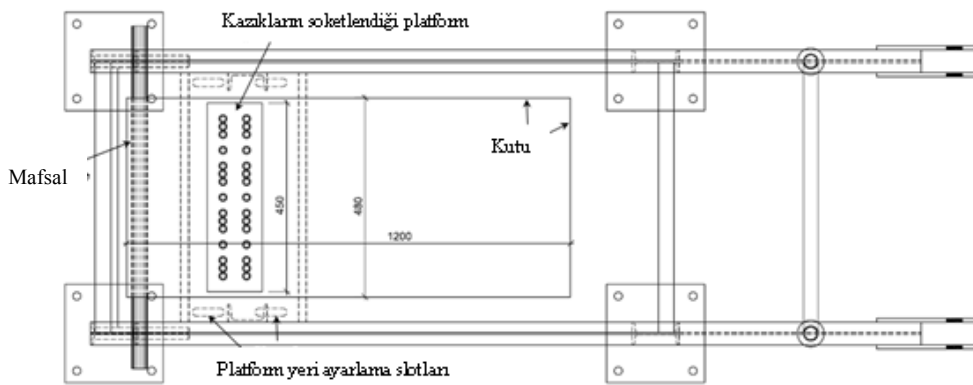
2.1. Deney Kutusu ve Sistem Taşıyıcı Çerçevesi

Çalışmada kullanılan çelik deney kutusunun genişliği 480 mm, boyu 1200 mm ve yüksekliği 500 mm’dir. Deney kutusunun alt ve üst kısımları açık olup çeşitli kazık konfigürasyonlarına olanak sağlayacak şekilde imal edilmiştir. Deney kutusu, 500 mm yüksekliğinde rijit bir platform üzerinde bulunan 2400 mm uzunluğunda iki adet I 120 profilleri ile oluşturulmuş sistem taşıyıcı çerçevesi tarafından taşınmaktadır. Kutunun altında bulunan dört tekerlek, sistem taşıyıcı çerçevesi üzerinde bulunan raylardaki hareketi

kolaylaştırmaktadır. Kazıkların tabanda ankastre olmasını sağlamak amacıyla sistem taşıyıcı çerçevesi üzerinde bir platform hazırlanmıştır. Bu platformun üzerinde, kazıkların çeşitli konfigürasyonlarda yerleştirilmesine olanak sağlayacak şekilde delikler açılmıştır. Kutunun alt kısmı ile sistem taşıyıcı çerçevesi arasında bulunan taban levhası, kazıkların ankastre mesnetlendiği platforma geçişine olanak sağlamak amacıyla boş bırakılmıştır. Boş bırakılan kısım kazıkların yerleştirilmesinden sonra kauçuk ile kapatılmıştır. Kutu, deney düzeneğindeki sistem taşıyıcı çerçevesinde bulunan mafsallarıyla istenilen açılarda tutulup kaydırılabilmektedir. Deney düzeneğine ait ön görünüşü ve planı sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 2. Deney düzeneği ön görünüşü



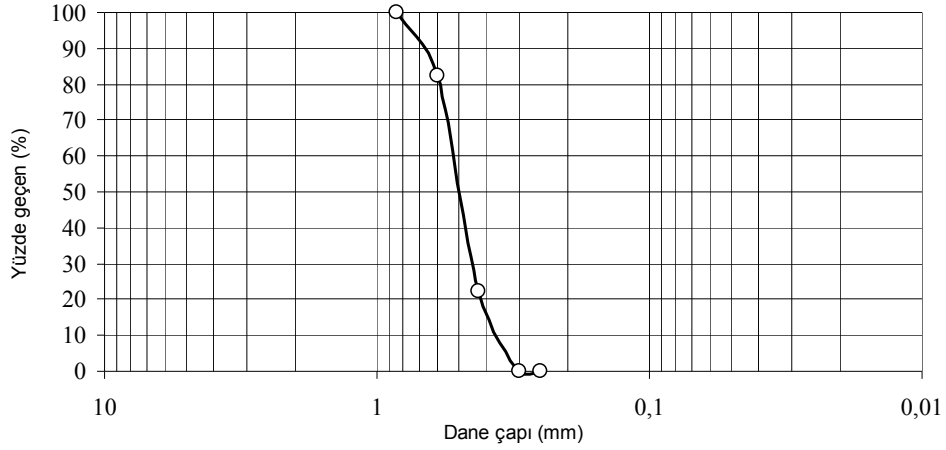
Şekil 3. Deney düzeneği planı

2.2. Model Kazıklar

Çalışmada, dairesel dolu kesitli cam elyaf takviyeli plastik profillerden üretilmiş model kazıklar kullanılmıştır. Bu kazıkların uzunluğu (L) 750 mm ve çapı (d) 20 mm'dir. Davie ve Sutherland (1978)'in çalışmasına benzer şekilde [33], kutu duvar etkilerinden kazık grubunun etkilenmesini engellemek amacıyla kazıklar kutunun ön kısmındaki duvarına 150 mm (7,5 d) mesafede yerleştirilmiştir.

2.3. Deney Zemini ve Yağmurlama Sistemi

Deneylerde kullanılan zemin; yıkanmış, temiz, kuru, ince kuvars kumudur. Dane boyutları dağılımı (granülometri) eğrisi, kuru elek analizi sonucunda belirlenmiş ve Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Kumun dane çapı dağılımı

Kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenerek bu değerlere karşılık gelen maksimum ve minimum boşluk oranları hesaplanmıştır. Kumun genel fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Kumun deney kutusuna doldurulması yağmurlama sistemi ile gerçekleştirilmiş, bu sayede kum, deney programı boyunca, sıklık farkı olmadan serilerek homojen bir zemin elde edilmiştir. Yağmurlama sistemi; deney zemini haznesi, elastik boru ve elekten oluşturulmuştur. Deney zemini haznesi, deney kutusunu birkaç adımda doldurabilmek amacıyla yeterince geniş tutulmuş ve sistem sabitlemiştir. Deney zemini haznesi altında bulunan 50 mm çapındaki deliğe yerleştirilen elastik boru ile deney düzeneğinin her noktasına ulaşılmıştır. Elastik borunun ucuna takılan elek sayesinde kumun belirlenmiş sabit yüksekliklerden düşüşü sağlanmış ve deney kutusu içerisinde istenilen boşluk oranında zemin oluşturulmuştur.

Yağmurlama işlemi sırasında zeminin homojenliğinin kontrolü farklı bölge ve seviyelere yerleştirilen, hacmi bilinen metal kaplar sayesinde periyodik olarak yapılmıştır. Farklı düşüş yükseklikleriyle gerçekleştirilen yağmurlama işlemleri sonucunda, metal kaplar çıkarılıp tartılmış, kaplar içerisinde kalan zeminin birim hacim ağırlığı ağırlık/hacim ilişkisiyle belirlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen sonuçların ortalaması kumun birim hacim ağırlığı olarak kabul edilmiştir. Kum, yağmurlama düzeneği ile farklı yüksekliklerden deney kutusuna düşürülerek yükseklik artışına karşılık kutuda biriktirilen kumun birim hacim ağırlığı, boşluk oranı, sıkılık oranı, her sıkılık için içsel sürtünme açıları belirlenmiş ve Tablo 2 ile sunulmuştur.

Tablo 1. Kumun fiziksel özellikleri (Physical properties of sand)

Tanım	Kum
Mineroloji	Kuvars
Zemin Sınıfı (USCS)	SP
Özgül Ağırlık, G_s	2,65
Ortalama Dane Boyutu, D_{50} (mm)	0,50
Maksimum- Minimum Dane Boyutu, $D_{max} - D_{min}$ (mm)	0,70 – 0,30
Uniformluk Katsayısı, C_u	1,39
Eğrilik Katsayısı, C_c	1,01
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{max} (kN/m ³)	16,06
Minimum Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{min} (kN/m ³)	13,13
Maximum Boşluk Oranı, e_{max}	0,98
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0,62

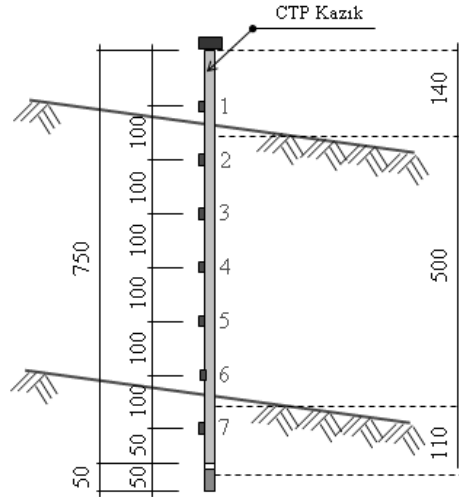
Tablo 2. Yağmurlama testi sonuçları (Results of pluviation test)

Düşüş Yüksekliği (cm)	Ortalama Birim Hacim Ağırlık γ_{ort} (kN/m ³)	Boşluk Oranı (e)	Rölatif Sıkılık (D _r , %)	Sıkılık	İçsel Sürtünme Açısı ϕ (°)
5	13,10	0,98	0		
40	14,15	0,84	39	Gevşek	32
80	14,95	0,74	66	Orta Sıkı	35
120	15,50	0,68	82	Sıkı	39
160	15,90	0,64	93	Sıkı	
240	16,10	0,61	99	Sıkı	
280	16,15	0,61	100		

2.4. Yükleme ve Ölçüm Düzeni

İçerisi zemin ile doldurulmuş deney kutusu, eğimli bir yüzey üzerinden sadece kendi ağırlığının etkisi ile kaydırılmış ve bu şekilde kazık grubu yüklenmiştir. Kutunun aşağı doğru hareketi, kutunun önündeki yer değiştirme ve hız kontrollü bir destek düzeneği ile sağlanmıştır. Kutunun önündeki destek, deneyler süresince sabit 2,9 mm/dak hız ile çekilmiş ve kutunun yer değiştirmesi 50 mm olduğunda deneyler sonlandırılmıştır.

Çalışmada, kazık başlarındaki yer değiştirme ölçerler, kazık uzunluğu boyunca yer alan gerinim pulları ve desteğin önündeki yük hücresi olmak üzere üç çeşit ölçüm aygıtı kullanılmıştır. Ölçüm aygıtları, sinyal kabloları ile 32 kanallı veri toplama sistemine bağlanarak analog sinyalden dijital sinyale dönüştürülmüş ve voltaj okumaları ölçülüp kaydedilmiştir. Kazık başı yer değiştirmesi yer değiştirme ölçerler (RLPT) ile belirlenmiştir. Yer değiştirme ölçerler, referans çerçevesine kutu hareketini engellemeyecek şekilde kazık başı seviyesinde Şekil 2 ile görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Kazık başlarının yer değiştirme ölçümlerine ilave olarak, her bir kazık boyunca yedi noktadan gerinim pulları ile şekil değiştirmeler ölçülmüştür. Gerinim pulları, kazık malzemesinin elastik gerilme aralığında birim şekil değiştirme değerlerini belirlemek amacıyla kazık üzerine 100 mm aralık ile yerleştirilmiştir. Gerinim pulu ara mesafeleri ve kazık aletlendirmesi Şekil 5 ile verilmiştir. Kazık yüzeyleri zımparalanıp, kumlandıktan sonra özel bir kimyasal ile temizlenmiş, gerinim pulları epoksi bazlı yapıştırıcı vasıtasıyla yapıştırılmıştır. Gerinim pulu dirençleri kontrol edildikten sonra, 15 mm uzunluğundaki silikon makaron tüpler gerinim pullarını saracak şekilde ısıtılarak yerleştirilmiştir. Bu şekilde, gerinim pullarının deney esnasında kum ile temas ederek zarar görmeleri engellenmiştir. Kazıklar üzerindeki zemin basıncı dağılımı, gerinim pullarından veri toplama sistemi kullanılarak ölçülen kazık birim deformasyonu ve moment değerlerinin belirlenmesiyle birlikte yorumlanmıştır.



Şekil 5. Kazık aletlendirilmesi ve gerinim pullarının yerleşimi

Zemin hareketi sonucunda kazıklara etki eden kuvvetin belirlenmesi amacıyla kutu önündeki desteğe 1000 kg kapasiteli yük hücresi yerleştirilmiştir. İlk olarak, zemin ile dolu kazıksız kutunun ağırlığı, kutu hareketi başlamadan önce, yük hücresinden elde edilmiştir. Daha sonra, dolu kazıksız kutunun hareketi süresince yük hücresinden yük değerleri kaydedilmiştir. Bu yük değerlerinden dolu kutunun ağırlığının çıkarılmasıyla kutu hareket hattı boyunca sürtünme kuvveti miktarı tespit edilmiştir. Kazıkların kullanıldığı durumda ise, kazıklara etki eden yük, yük hücresinden okunan değerden sürtünme kuvvetinin çıkarılması ile bulunmuştur. Kazık sistemi tarafından taşınan yük, kazıklı ve kazıksız sistemlerdeki yük hücresinden elde edilen yük değerleri arasındaki fark kullanılarak hesaplanmıştır.

3. DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Kazıklarda, kazık derinliği boyunca oluşan birim şekil değiştirmeler ile eğilme momenti arasındaki ilişkinin belirlenmesi model kazık davranışının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle, cam elyaf takviyeli plastik malzemeden yapılmış konsol bir kirişin basit eğilme davranışı dikkate alınmıştır. Konsol kirişin uç kısmından çeşitli yüklemeler yapılmış ve şekil değiştirme değerleri bulunmuştur. Analitik çözüm için gerekli olan elastisite modülü değeri ASTM D790 – 07 (2007)'e uygun şekilde üç nokta eğilme deneyi ile elde edilmiş ve konsol kirişin analitik çözümü bu değer kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları ile analitik çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.1. Elastisite Modülünün Belirlenmesi

CTP profillerin eğilme davranışlarının incelenmesi ve elastisite modülünün belirlenmesi için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır [34]. Deney süreci boyunca numunelerin orta nokta sehimlerini ölçen 1 µm ölçüm hassasiyetinde optik encoder kullanılmış ve yük – kiriş orta noktası düşey yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Deney bu şekilde yer değiştirme kontrollü, kapalı çevrimli olarak 2 mm/dak hızında Şekil 6'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.

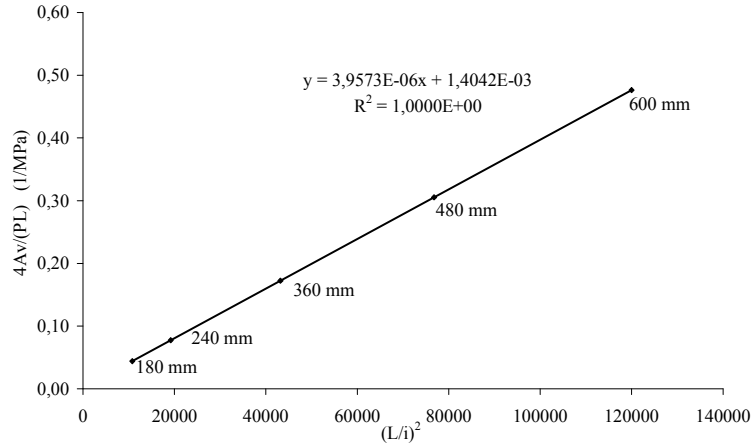


Şekil 6. Üç nokta eğilme deneyi sistemi

Eğilme dayanımı, beş farklı mesnet açıklığı (180 mm, 240 mm, 360 mm, 480 mm ve 600 mm) için CTP profillerden çıkartılmış 40 mm x 6 mm'lik dikdörtgen kesitli numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Üç nokta eğilme deneyi için, deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirmesi denklem (1) ile yazılmıştır [35, 36].

$$\frac{4Av}{PL} = \frac{1}{12E} \left(\frac{L}{i} \right)^2 + \frac{k_y'}{G} \quad (1)$$

Burada; A incelenen kiriş elemanın enkesit alanını, v deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme değerini, P kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değerini, L mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyunu, i deney elemanın atalet yarıçapını, E elastisite modülünü, G kayma modülünü, k_y' ise nümerik çarpanı göstermektedir.



Şekil 7. Üç nokta eğilme deneyi için mesnet açıklıkları ve deney verileri

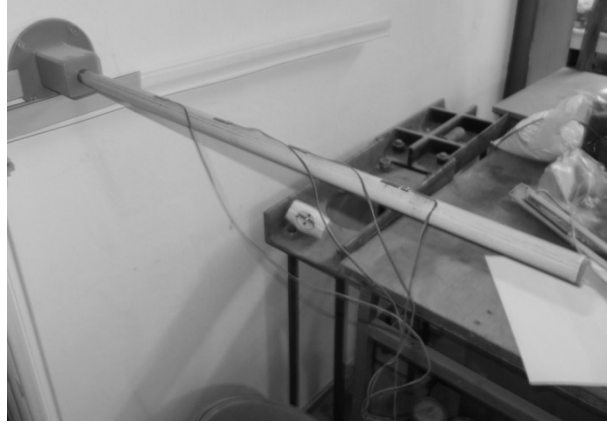
Üç nokta eğilme deneylerinde kullanılan beş farklı mesnet açıklığı için Şekil 7 ile verilen doğrusal ilişki dikkate alınmış ve denklem (1)'den faydalanılarak; elastisite modülü 21058 MPa (21GPa), kayma modülü 855 MPa (0,85 GPa) elde edilmiştir.

3.2. Konsol Kiriş Eğilme Momentinin İncelenmesi

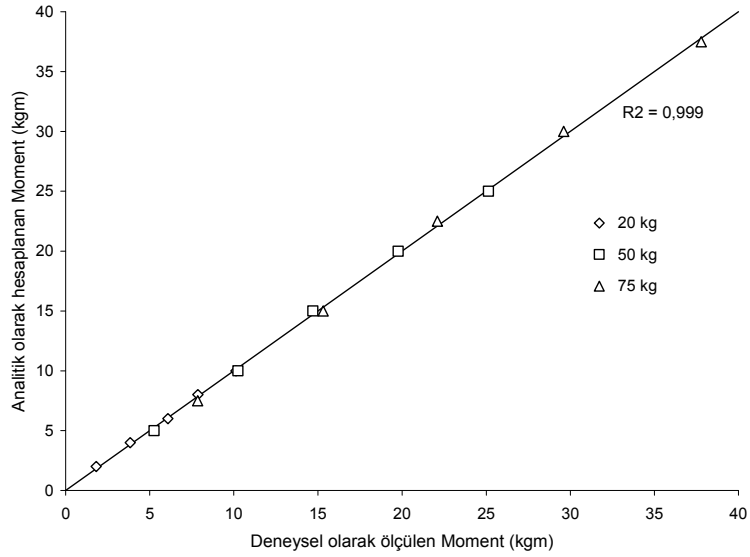
CTP malzemeden yapılmış konsol bir kirişin basit eğilme davranışı deneysel ve analitik yöntemle incelenmiştir. Deneysel kısımda, Şekil 8'de sunulan konsol kiriş dikkate alınmış ve kirişin uç kısmından yapılan yüklemeler ile eğilme davranışı araştırılmıştır.

Bu kalibrasyon testi için; 20, 50 ve 75 kg'lık yükler kullanılmış ve her deney üç kez tekrarlanmıştır. Her bir yük için, gerinim pullarında ölçülen volt değerleri denklem (2) kullanılarak eğilme momentine çevrilmiştir.

$$M = \frac{4 V_{out} EI}{GF V_i Gain \frac{d}{2}} \quad (2)$$



Şekil 8. Aletlendirilmiş CTP kazık için kalibrasyon deneyi



Şekil 9. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Burada; M eğilme momenti, V_{out} veri toplama sisteminde okunan voltaj değeri değişimini, EI kazığın eğilme rijitliğini, GF gerinim pulu faktörünü ($GF=2,05$), V_i başlangıç voltajını, Gain kanal kazancını ($Gain=890$) ve d kazık çapını göstermektedir.

Analitik kısımda, konsol kirişin basit eğilme davranışı dikkate alınarak gerinim pullarının konumlara ait eğilme momenti değerleri hesaplanmıştır. Gerinim pullarının konumlarına göre hesaplanan teorik moment değerleri ile deney sonucu elde edilmiş olan moment değerleri Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Burada; her üç yükleme için eğilme momenti değerleri ile lineer regresyon doğrusu elde edilmiştir. Bu ilişki için determinasyon katsayısı 0,99 olarak bulunmuştur.

4. DENEY SONUÇLARI

Bu deney çalışmasında, şev stabilitesinde kullanılan CTP malzemeden üretilmiş model kazıkların hareket eden zeminden kaynaklanan yükler altındaki davranışları gerçekleştirilen 24 deney ile araştırılmıştır. Çalışmada beş farklı kazıklar arası mesafe (24d, 12d, 8d, 6d, 4d) göz önüne alınmış ve farklı görelî yer değiştirmeler için kazıklara etkiyen zemin basıncı dağılımları belirlenmiştir.

Yapılan testlerin her biri dört kez aynı gevşek kum zemin koşullarında tekrarlanmış ve sonuçların birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Gerinim pulu okumalarında %7'lik, kazık başı yer değiştirmesi okumalarında %5'lik ve yük okumalarında %4'lük bir değişim tespit edilmiştir. Test serilerindeki kazıklar arası mesafe ve kullanılan kazık sayıları Tablo 3 ile verilmiştir.

Tablo 3. Test programı

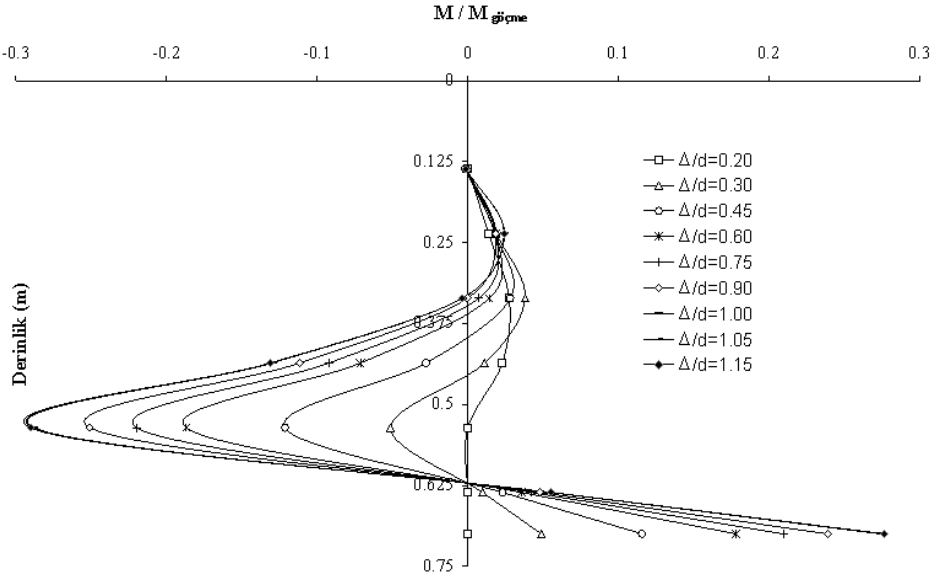
Kazıklar Arası Mesafe (s)	Testteki Kazık Sayısı
Kazıksız	0
24d	1
12d	2
8d	3
6d	4
4d	6

Kazıklar üzerine yerleştirilen gerinim pullarından kutu hareketi boyunca ölçülen birim uzama verileri kullanılarak eğilme momenti değerleri kazık derinliği boyunca hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda, grup içerisindeki kazıkların her birinin benzer moment değerlerine sahip olduğu belirlenmiş, kazıklar ile ilgili yorumlarda orta kazıktan elde edilen deney verileri dikkate alınmıştır. Farklı kutu yer değiştirmeleri sonucunda hesaplanan kazık moment değerleri $s/d=24$ durumu için Şekil 10'da verilmiştir. Kutu hareketi arttıkça, kazıkta oluşan moment değeri artmıştır. Zemin ile kazık arasındaki görelî

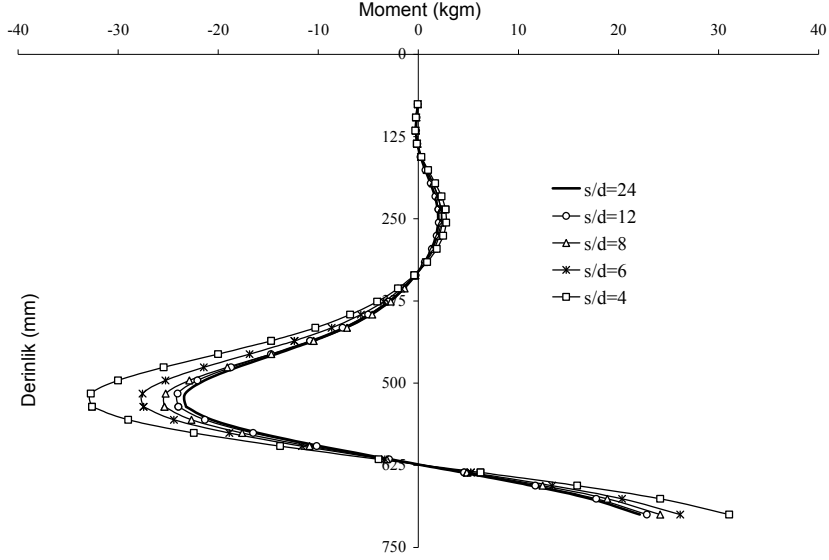
yer değiştirmeler nedeniyle oluşan bu moment artışı, kutu deplasmanın bir kazık çapına ($\Delta/d=1.0$) ulaşmasından sonra durmuştur.

Gerinim pulu lokasyonlarında hesaplanan moment değerleri ile parçalı polinomlar halinde tanımlanan kübik splayn fonksiyonu, kazık boyunca en büyük moment eğrisini en iyi şekilde oluşturmak amacıyla kullanılmıştır [37]. Burada kullanılan splayn–interpolasyon işleminde; komşu üç noktadan geçecek biçimde bir kübik polinom uydurulmuştur. Ayrıca, kübik splayn, çok terimli fonksiyonun hem tanım aralığı içerisinde hem de tanım aralığının uç noktalarında türevlenebilirlik kabiliyeti de sağlamıştır.

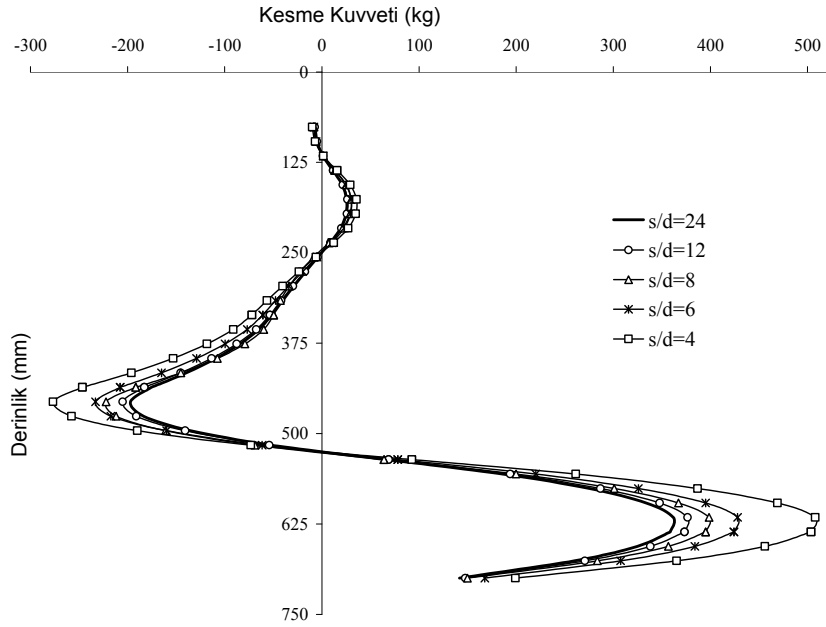
Kazık başlığında eğilme momenti değerlerinin ve zemin yüzeyinde zemin basıncı değerlerinin sıfır girilmesi ile doğal sınır koşulları oluşturularak splayn-interpolasyon işlemi ile sürekli bir moment eğrisi elde edilmiştir. Bu fonksiyonların, konuma göre birinci ve ikinci türevleri ile sırasıyla; kesme kuvveti, zemin basıncı dağılımları belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kazıklar arası mesafeler için kübik splayn interpolasyonu kullanılarak kazık gruplarına ait moment profilleri elde edilmiş ve Şekil 11 ile sunulmuştur. Bu profilin birinci türeviyle kesme kuvveti, ikinci türevinin kazık çapına bölümüyle zemin basıncı profilleri belirlenmiş ve sırasıyla, Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir.



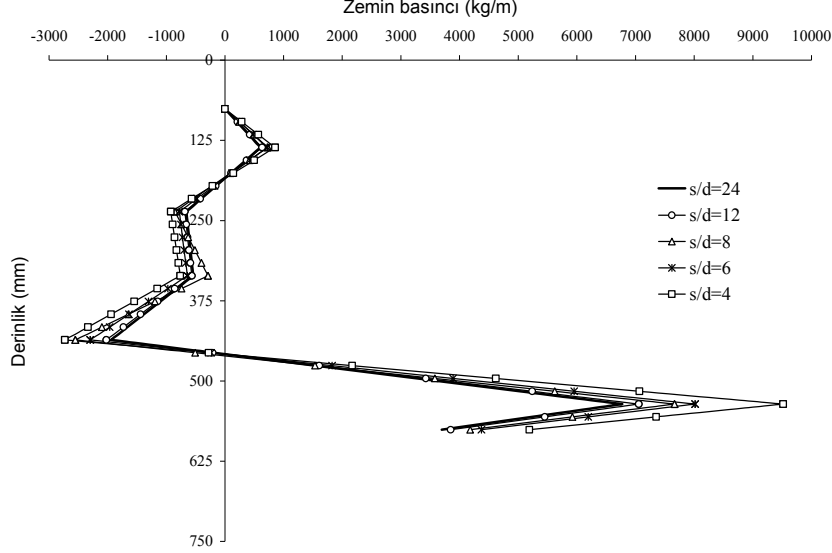
Şekil 10. Kutu yer değiştirmesine bağlı normalize edilmiş tek kazık moment profili ($s/d=24$)



Şekil 11. Kübik splayn ile eğriler uydurulmuş moment profilleri



Şekil 12. Kazıklar arası mesafeye bağlı kesme kuvveti dağılımı değişimi

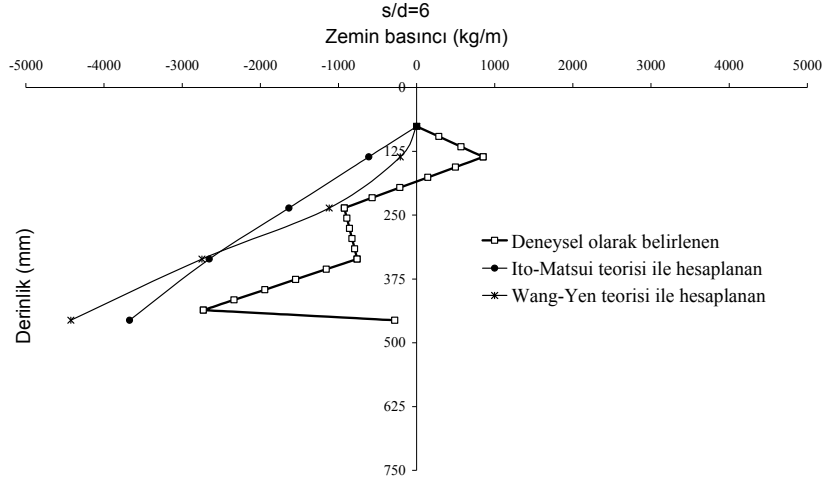


Şekil 13. Kazıklar arası mesafeye bağlı zemin basıncı dağılımı değişimi

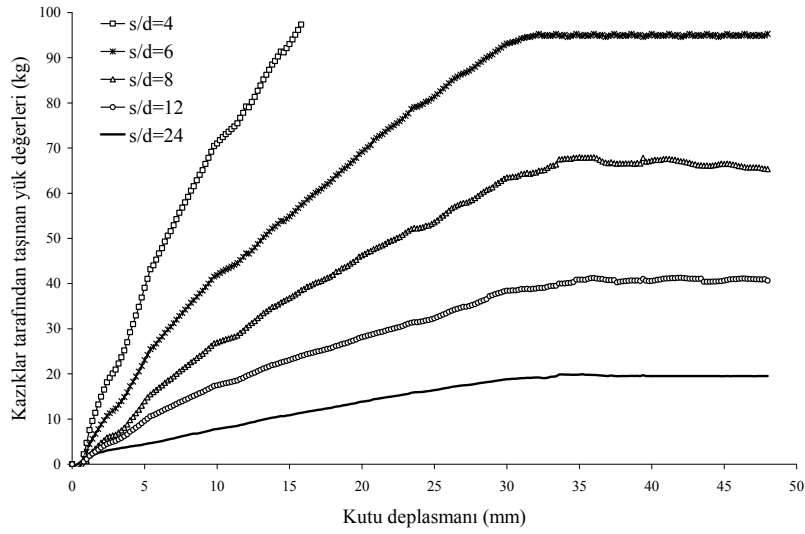
Şekil 11'den görüldüğü gibi kazıklar arası mesafe azaldıkça kazıklarda oluşan en büyük moment kemerlenme mekanizması nedeniyle artmıştır. Şekil 12 ve Şekil 13 ile görüldüğü üzere kazıklar arası mesafe azaldıkça kazıklarda oluşan en büyük kesme kuvveti ile zemin basıncı artmıştır. Ayrıca kazıklar arası mesafenin kazık çapının 8 katından büyük olması durumunda ($s > 8d$) kazıkların tek bir kazık gibi davrandığı görülmüştür. Kazık başı yer değiştirmesinin zemin yer değiştirmesinden fazla olması nedeniyle, zemin yüzeyinden (kutu üst kotu) itibaren 100 mm'lik bölgede pozitif (pasif) zemin basıncı oluşmuştur. Bu derinliğin altında, yaklaşık 300 mm boyunca negatif (aktif) zemin basıncı belirlenmiştir. Bu derinlikten sonra pozitif zemin basıncı kazık alt ucundan sağlanan direnç nedeniyle oluşmuş ve bu bölgedeki en büyük pozitif basınç kazık boyunca meydana gelen negatif basıncın yaklaşık 3 katına kadar çıktığı Şekil 13 ile görülmüştür.

Deneysel olarak belirlenen zemin basıncı dağılımları, Ito-Matsui (1975) ve Wang-Yen (1974) teorileri kullanılarak hesaplanan zemin basıncı dağılımları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 14 ile verilmektedir. Zemin basıncı dağılımları zeminde göçmenin meydana geldiği ve kazık grup davranışının görülebildiği kazıklar arası mesafenin 6 çap olduğu durum için ilk 400 mm derinlikte karşılaştırmalı olarak verilmiş, diğer kazıklar arası mesafeler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 14 ile görüldüğü üzere, serbest başlı kazık durumu için kazık başı yer değiştirmesinin zemin yer değiştirmesinden fazla olması nedeniyle oluşan pozitif zemin basıncı analitik yöntemlerde dikkate alınamamıştır. Bu deneysel çalışmada, negatif bölgede oluşan basınç dağılımının analitik yöntemlerle hesaplanan üçgen basınç dağılımından farklı olduğu belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 14 ile sunulmuştur.



Şekil 14. Deneyel ve analitik zemin basıncı dağılımları karşılaştırması

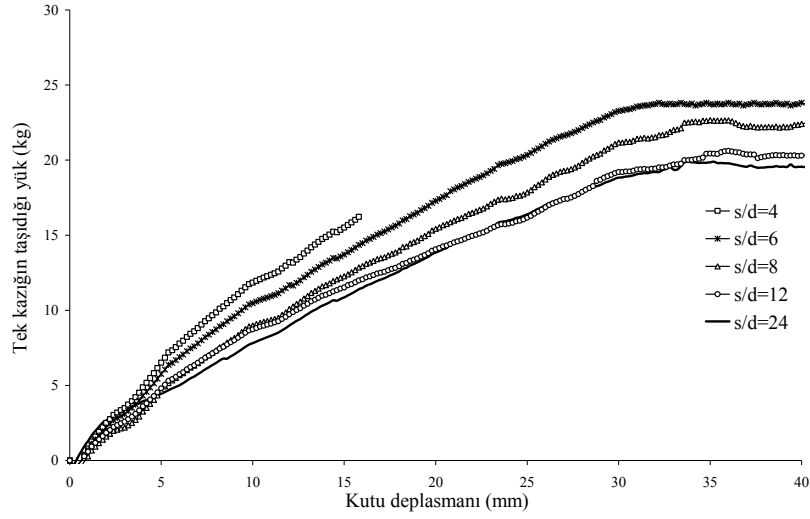


Şekil 15. Kazıklar arası mesafeye bağlı kazıklar tarafından taşınan yük değerleri

Kutu yer değiştirmesine karşı kazıklar tarafından taşınan yük değerleri Şekil 15 ile sunulmuştur. Kutu yer değiştirmesi ile birlikte yük hücresinden okunan değerlerde azalma tespit edilmiş ve kazıkların yük almaya başladığı belirlenmiştir. Belirli bir kutu yer değiştirmesinden sonra (33~38 mm), kutu yer değiştirmesi artmaya devam ederken yük hücresindeki değerler değişmemiştir. Bunun nedeni, zeminde göçme oluşmasıyla birlikte zeminden kazıklara olan yük aktarımının tamamlanmış olmasıdır. Kazıklar arası mesafenin

4d olduğu deneylerde, kutu hareketi zeminde herhangi bir göçme oluşturmadan ancak 15,6 mm hareket edebilmiştir. Bu şekilde, kazıklar şev stabilitesini sağlamış ve kutunun hareket etmesini engellemiştir.

Kazık gruplarındaki kazıklar arası mesafenin davranışa etkisini belirleyebilmek amacıyla tek bir kazığın aldığı yükün tespit edilmesi ve yorumlanması gerekir. Bu sebeple, kazıklar tarafından taşınan yük, gruptaki kazık sayısına bölünerek tek bir kazığın taşıdığı yük belirlenmiş ve Şekil 16 ile sunulmuştur. Tek bir kazığın taşıdığı yük; düşük kutu yer değiştirmesi (~3mm) durumu için kazıklar arası mesafeden bağımsız olup değişmemektedir. Özellikle 30 mm (1,8d) kutu yer değiştirmesinden sonra, kazıklar arası mesafe azaldıkça kemerlenme mekanizması sebebiyle tek bir kazığın taşıdığı yük artmıştır.



Şekil 16. Model deneyler süresince grup içindeki tek kazığın taşıdığı yükler

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışma, inşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle hızlı, hafif eleman üretimi ve kimyasallara karşı dayanımın gerektiği durumlar için kullanılabilirliği olan cam elyaf takviyeli plastik profillerden yapılmış kazıkların şev stabilitesi açısından pasif kazık olarak kullanılmasının araştırılması konusunda gerçekleştirilmiş ilk model çalışmadır. Çalışmada, şevdeki zemin hareketinin dışarıdan ekstra bir yük uygulanması yerine hareketin zemin öz ağırlığıyla gerçekleştirilmesi sağlanmış ve bu açıdan benzer çalışmalardan ayrılarak literatüre önemli katkı sunulmuştur. Farklı kazıklar arası mesafelerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Kazıklar arası mesafe seçimi doğru bir şekilde yapıldığında, CTP kazıkların hareket eden zemin kütlelerini durdurduğu görülmüş ve şev stabilitesinde pasif kazık olarak kullanılacakları belirlenmiştir.

- Kutu yer değiştirmesi ile birlikte yük almaya başlamış kazıklarda, belirli bir kutu yer değiştirmesinden sonra ($\Delta/d=1,8$) yük aktarımı tamamlanıp zeminde göçme oluşmaya başladığı belirlenmiştir.
- Tekil kazığın taşıdığı yük, kazıklar arası mesafe azaldıkça kemerlenme mekanizması sebebiyle artmıştır.
- Kazıklar arası mesafe azaldıkça kazıklarda oluşan en büyük kesme kuvveti ile zemin basıncı artmıştır. Ayrıca kazıklar arası mesafenin kazık çapının 8 katından büyük olması durumunda ($s > 8 d$) kazıkların tekil kazık gibi davrandıkları görülmüştür.
- Serbest başlı kazık durumunda, kazık başı yer değiştirmesinin zemin yer değiştirmesinden fazla olmasından dolayı, üst bölgede belirli bir derinliğe kadar pozitif (pasif) zemin basıncı oluşmuştur. Bu nedenle, serbest başlı kazık grupları için önerilen analitik yöntemlerle hesaplanan zemin basıncı değerleri, deneysel olarak belirlenen zemin basıncı değerlerinden bir miktar daha yüksek çıkmıştır. Bu da mühendislerin projelendirmede güvenli tarafta kalmasını sağlamaktadır.

Semboller

CTP	Cam elyaf takviyeli plastik
L	Kazık uzunluğu
d	Kazık çapı
s	Kazıklar arası mesafe
USCS	Birleřtirilmiř zemin sınıfı
G_s	Özgöl ağırlık
D_{50}	Ortalama dane boyutu
D_{max}	Maksimum dane boyutu
D_{min}	Minimum dane boyutu
C_u	Uniformluk katsayısı
C_c	Eğrilik katsayısı
γ_{ort}	Ortalama birim hacim ağırlık
γ_{max}	Maksimum birim hacim ağırlık
γ_{min}	Minimum birim hacim ağırlık
e	Boşluk oranı
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
D_r	Rölatif sıklık

ϕ	İçsel sürtünme açısı
RLPT	Yer değiştirme ölçerler
A	İncelenen giriş elemanın enkesit alanı
v	Deney numunesi orta noktası düşey yer değiştirme değeri
P	Kirişin açıklık ortasına uygulanan tekil yük değeri
L	Mesnetler arasında kalan deney elemanın net boyu
i	Deney elemanın atalet yarıçapı
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülünü
k_y'	Nümerik çarpan
M	Eğilme momenti
V_{out}	Veri toplama sisteminde okunan voltaj değeri değişimi
EI	Kazığın eğilme rijitliği
GF	Gerinim pulu faktörü
V_i	Başlangıç voltajı
Gain	Kanal kazancı
Δ	Kutu yer değiştirmesi

Kaynaklar

- [1] Ito, T. and Matsui, T., Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles. *Soils and Foundations*, 15(4): 43-59, 1975.
- [2] Reese, L.C, Wang, S.T. and Fouse, J.L., Use of Shafts in Stabilizing a Slope, *Slopes and Embankments-II*, American Society of Civil Engineers, Specialty Session, 1992.
- [3] Hong, W.P. and Han, J.G., The Behavior of Stabilizing Piles Installed in Slopes, *Proc. 7th International Symposium on Landslides*, Rotterdam, 1709-1714, 1996.
- [4] Chen L.T., Poulos H.G., and Hull, T.S., Model Tests on Pile Groups Subjected to Lateral Soil Movement, *Soils and Foundations*, 37(1): 1-12, 1997.
- [5] Chen, C.Y. and Martin, G.R., Soil-structure Interaction for Landslide Stabilizing Piles, *Computers and Geotechnics*, 29(5): 363-386, 2002.
- [6] Liang, R. and Zeng S., Numerical Study of Soil Arching Mechanism in Drilled Shafts for Slope Stabilization, *Soils and Foundations*, 42(2): 83-92, 2002.
- [7] Kahyaoglu, M.R., Imancli, G., Ozturk, A.U. and Kayalar, A.S., Computational 3D Finite Element Analyses of Model Passive Piles. *Computational Materials Science*, 46(1): 193-202, 2009.

- [8] Bosscher, P. J. and Gray, D. H., Soil Arching in Sandy Slopes, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(6): 626-645, 1986.
- [9] Adachi, T., Kimura, M. and Tada, S., Analysis on the Preventive Mechanism of Landslide Stabilizing Piles, *Third International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, 691–698, 1989.
- [10] Pan, J.L., Goh, A.T.C., Wong, K.S. and TEH, C.I., Model Tests on Single Piles in Soft Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 37: 890-897, 2000.
- [11] Cai, F. and Ugai, K., Response of Flexible Piles under Laterally Linear Movement of the Sliding Layer in Landslides, *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 46-53, 2003.
- [12] Zhao, M. H., Liu, D. P., Zhang, L. and Jiang, C., 3D Finite Element Analysis on Pile-Soil Interaction of Passive Pile Group, *Journal of Central South University of Technology*, 15(1): 75-80, 2008.
- [13] Analay, B., Lateral Resistance of a Rigid Socketed Single Model Pile, Fixed at Head, in a Cohesionless Soil, M.Sc. Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1999.
- [14] Ergun, M.U., “Stabilization of Landslides Using Piles”, *Proc. of the 8th Int. Symposium on Landslides, Cardiff, Vol 1 pp. 513-18, Thomas Telford Pub. Co., 2000*
- [15] De Beer, E.E. and Wallays, M., Forces Induced in Piles by Unsymmetrical Surcharges on the Soil round the Piles. *Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 1: 325–332, 1972.
- [16] Nakamura, H., Design of Rigid Dowel Piles for Landslide Control, *4th International Symposium on Landslides*, 2: 149-154, 1984.
- [17] Wang, W.L. and Yen, B.C., Soil Arching in Slopes, *Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers*, 100: 61-78, 1974.
- [18] Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P., Design Method for Stabilizing Piles Against Landslide-One Row of Piles, *Soils and Foundations*, 21(1): 21-37, 1981.
- [19] Popescu, M.E., *Landslide Control by Means of a Row of Piles, Slope Stability Engineering*, London, Thomas Telford, 389-394, 1991.
- [20] Stewart, D.P., Jewell, R.J. and Randolph, M.F., Design of Piled Bridge Abutments on Soft Clay for Loading from Lateral Soil Movement, *Geotechnique*, 44(2): 277–296, 1994.
- [21] Poulos H.G., Design of Reinforcing Piles to Increase Slope Stability, *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 808–818, 1995.
- [22] Oakland, M.W. and Chameau J.L.A, Finite-Element Analysis of Drilled Piers Used for Slope Stabilization, Laterally Loaded Foundation-American Society for Testing and Materials, 182–193, 1984.

- [23] Chen, L.T. and Poulos, H.G., Piles Subjected to Lateral Soil Movements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 123(9): 802–811, 1997.
- [24] Nalçakan M.S., Stabilization of Landslides by Piles in Cohesive Soils with Special Reference to Group Action Reduction, Ph.D. Thesis in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1999.
- [25] Nalçakan, M., Ergun, U., “Lateral Loading of a Row of Model Passive Piles in a Cohesive Soil”, 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.2, İstanbul, Turkey, 2001.
- [26] Liang, R. and Yamin, M., Three-Dimensional Finite Element Study of Arching Behavior in Slope/Drilled Shafts System, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34: 1157-1168, 2010.
- [27] Heinz, R., Plastic Piling, *Civil Engineering*, 63(4): 63-65, 1993.
- [28] Quinn, J.A., Pultrusion: An Economic Manufacturing Technique, *Engineering Plastics*, 5: 270–273, 1989.
- [29] Qiao, R., Zou, G. and Davalos, J.F., Flexural–Torsional Buckling of Fiber-Reinforced Plastic Composite Cantilever I-Beams, *Composite Structures*, 60: 205–217, 2003
- [30] Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State of The Art Review, *ASCE Journal of Composite for Construction*, 6(2), 2002.
- [31] Pul-tech, Ürün Kataloğu, Pul-tech FRP, Uşak, 2009.
- [32] Creative, Composite Sheet Pile System, Wale & Retaining Wall Systems (US Patent 6,893,191 B2/May17, 2005) Creative Pultrusions Inc. Product Brochure, 2010.
- [33] Davie J.R. and Sutherland H.B., Modeling of Clay Uplift Resistance, *Journal of The Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 104(6): 755–760, 1978.
- [34] ASTM D790 – 07 (2007), Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials. Philadelphia.
- [35] Bank, L.C., Flexural and Shear Moduli of Full-Section Fiber Reinforced Plastic (FRP) Pultruded Beams, *Journal of Testing and Evaluation*, 17(1): 40–45, 1989.
- [36] Neto A.B.S.S. and Rovere H.L.L., Flexural Stiffness Characterization of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Pultruded Beams, *Composite Structures*, 81: 274–282, 2007.
- [37] Ferecova V. ve Akdeniz, R., Mathcad ile Sayısal Analiz, Güncel Yayıncılık, İstanbul, 2006.