

## Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi

Tolga Y. ÖZÜDOĞRU\*

Aykut ŞENOL\*\*

Z. Nil TAYLAN\*\*\*

### ÖZ

Bu araştırma, kazıkların imalat kalitesini belirleme yöntemlerini incelemekte ve uygulamadan iki örnek içermektedir. Araştırmanın birinci kısmında düşük deformasyonlu kazık süreklilik deneyi ile kazıklarda meydana gelen süreksizlikler ve imalat hataları ele alınmıştır. Burada bir arazideki 96 kazıkta uygulanan kazık süreklilik deneyi verileri değerlendirilmiştir. TNOWAVE: SITWAVE yazılımı ile kazık süreklilik deneyi simüle edilip, sinyal eşleme tekniği uygulanmıştır. Sinyal eşleme yönteminde, arazideki deney sinyali verileri ile yazılımın oluşturduğu referans sinyalleri eşlenerek analizler yapılmış ve kazıkların kalitesi araştırılmıştır. Araştırmanın ikinci kısmında ise kazık çakılabilirlik analizinde çekiç ve kazık özellikleri girdi olarak kullanılarak ters çözüm tekniği uygulanmış ve arazi değerlendirme sonuçlarına bağlı kalınarak statik ve dinamik zemin direnci parametrelerini de içerecek şekilde geçerli zemin modeli oluşturulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Basınç dalgası teorisi, dalga denklemi, düşük deformasyon, karakteristik yöntem, kazık çakılabilirliği, sinyal eşleme, süreksizlik.

### ABSTRACT

#### Pile Integrity Testing and Drivability Analysis

This research presents the methods in determination of pile quality and the two different related case studies. The first part of the research discusses the low-strain pile integrity testing, discontinuities and defects occurred during the construction along the piles. The pile integrity testing results of 96 piles were evaluated that were performed in the field and the mentioned testing method was also simulated using TNOWAVE: SITWAVE with the signal matching technique. The analyses were performed by matching the signal data obtained in the field with the reference signals created by the software for the determination of the pile quality. In the second part of the research, the hammer and pile properties were used as an input for the pile drivability analyses where in this case the inverse technique

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 27.02.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2009 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - ozudogru@itu.edu.tr

\*\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - senol@itu.edu.tr

\*\*\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - taylanz@itu.edu.tr

were applied in order to evaluate the static and dynamic soil properties as well as the accurate soil profile.

**Keywords:** Stress wave theory, wave equation, low strain, method of characteristics, pile drivability, signal matching, discontinuities.

## 1. GİRİŞ

Kazıklı temeller, günümüzde inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kazıklar, yüzeysel temellerle karşılaştırıldığında daha yüksek taşıma kapasitesine sahiptir ve daha az harekete olanak vermektedir. Bu yüzden, dokuz katlı ve daha yüksek yapıların büyük çoğunluğu zemin koşullarına bağlı olarak kazıklı temeller üzerine oturmaktadır. Zeminin içinde imal edilen kazıklar, görünmediği için, özellikle de yerinde dökme kazıkların kalitesiyle ilgili soru işaretleri oluşabilmektedir. Kazıkların kalitesi yük taşıma kapasitesiyle doğru orantılı olduğundan bu durum daha da önem kazanmaktadır. İmalat sırasında her türlü özen gösteriliyor da olsa, kazıkların istenilen kalitede üretilip üretilmediği deney yapılmadan tespit edilememektedir. Bu amaçla üretilen kazıkların test edilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde, kazık kalitesinin belirlenmesi için iki ana grup altında toplanabilecek, çeşitli deney yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler hasarlı ve hasarsız deney yöntemleri olarak gruplanabilir. Her iki tip deney yönteminin birbirine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Ancak daha kolay, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle hasarsız yöntemler tercih edilmektedir. Bu bağlamda, dalga denklemi analizi teorik olarak rijit bir cisim içinde, bir boyutlu dalga yayılımı teorisine dayanmaktadır. Geoteknik uygulamalarda, bir boyutlu basınç dalga teorisine bağlı olarak geliştirilen deney yöntemleri ve bilgisayar yazılımları kullanılarak kazık çakılabilirliğinin tahmini ve imal edilen kazıkların sürekliliğinin kontrolü yapılabilir.

Düşük deformasyonlu kazık süreklilik deneyi, bir kazık içindeki büyük süreksizliklerin ve üretim hatalarının (boşluklar, çatlaklar, kesitteki daralma ve genişlemeler) hızlı ve ekonomik olarak tespit edilmesine olanak tanır. Bu deneyde alınan veriler, empedandaki değişimi vermektedir. Zemin koşullarından kaynaklanabilecek empedans değişiklikleri daha önceden bilinmelidir. Bu şekilde kazıktaki süreksizliklerden kaynaklanan empedans değişiklikleri ayrı olarak tespit edilebilmektedir. TNOWAVE-SITWAVE yazılımını kullanarak güvenilir sonuçlar elde etmek için, zemin tabakaları ve parametreleri Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçlarından elde edilmiştir. Kazık boyutları ve geometrisi, kazık süreklilik deneyi simülasyonu ve otomatik sinyal eşleme yöntemiyle belirlenmiştir.

Araştırmanın birinci kısmında, 96 kazık üzerinde uygulanmış olan kazık süreklilik deneyi verileri kullanılarak sinyal eşleme prosedürü gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı kazıklardaki büyük süreksizliklerin tespit edilmesi ve bunların derinlik ve zemin profiliyle değişiminin ilişkisini incelemektir.

Araştırmanın ikinci kısmında ise kazık çakılabilirliği analizi ile kazık çakımı esnasında kazığa zarar vermeden, fazla gerilmeye maruz bırakmadan, en uygun çakım ekipmanının seçilmesi ile en ekonomik imalatın nasıl olacağı incelenmiştir. Çakılabilirlik, çakım ekipmanlarına, kazık tipine, boyuna, çapına ve en son olarak da zeminin statik ve dinamik şartlar altındaki direncine bağlıdır. Zeminin statik direnci, mukavemet ve rijitlik ile tanımlanırken, dinamik şartlar altındaki direnci, zeminin sönümleme özelliklerine bağlıdır.

Çakılabilirlik analizi çalışmalarında, tasarımın yapılacağı zemin türü için kazık üzerindeki etkileri ve taşıma gücü şartları da gözönüne alınarak birçok farklı ekipman, kazık tipi ve çakım yöntemi denenmektedir. Önceki yıllarda yapılan çakılabilirlik analizleri temel olarak ampirik dinamik formüllerin kullanımına dayanmaktaydı. Son yıllarda kazık tasarım uygulamalarında çekiç seçimi ve penetrasyon derinliği belirlemelerinde, dalga denklemi yöntemi gelişen programlama teknikleri yardımı ile de yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalga analizi yönteminin sağladığı üstün analitik çözümlere rağmen, kazık tasarımı ve inşaatı için mühendislik deneyimi ve değerlendirmesi çok büyük gereklilik ve önem taşımaktadır. Bu bakımdan benzer zemin özelliklerinde ve mühendislik yapılarında gerçekleştirilen kazık inşaatlarından elde edilen verilerin toplanması ve sonraki çalışmalarda faydalanılması son derece önemlidir. Çakılabilirlik analizlerinden elde edilen sonuçlar arazide dinamik ve statik yükleme deneyleri ile de teyit edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, seçilmiş arazi şartı ve kazık tipi için kazık çakımı analizleri, zeminin dinamik özellikleri ile deney sonuçları da ele alınarak karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Analiz sonucunda ters çözüm metodunun da kullanılması ile, çalışılan arazi karakteristiğini temsil edecek uygun dinamik parametreler elde edilmiştir. Tüm bunlarla birlikte arazi uygulamaları öncesinde çakım analizinin gerekliliği ve yararlılığı da tüm yönleri ile ortaya konmuştur.

## **2. DÜŞÜK DEFORMASYONLU KAZIK SÜREKLİLİK DENEYİ**

Düşük deformasyonlu kazık süreklilik deneyi uygulaması, ilk olarak Avrupa'da, daha sonra 1970'li yıllarda da Amerika'da yapılmaya başlanmıştır. Deney sonuçları, basınç dalgası teorisi kullanılarak değerlendirilmektedir (ASTM D-5882-00). Düşük deformasyonlu kazık süreklilik deneyi, kazık kalitesini belirlemek için yapılmaktadır. Bu deney yöntemi ile, bir kazık içindeki büyük süreksizlikler (boşluklar, çatlaklar, kesitteki daralma ve genişlemeler) hızlı ve ekonomik olarak belirlenebilmektedir.

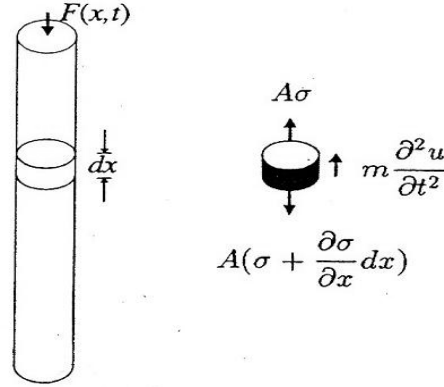
Deneyden önce, kazık başı temiz, kuru ve düz olmalıdır. Ayrıca yüzeyde donatı bulunmamalıdır. Deney yapılmadan önce, kazık betonu en az yedi günlük küre bırakılmalıdır. Deneyde, kazık başında bir çekiç yardımıyla darbe oluşturularak, kazık eksenini boyunca bir basınç dalgası yayılımı başlatılır. Kazık başlığında bulunan bir alıcı (transdüser) yardımı ile ilk darbe ve titreşim tepkisi ölçülüp kaydedilmektedir. Ölçülen sinyaller dijital ortama dönüştürülerek bir bilgisayarda kaydedilir (ASTM D-5882-00). Deney, her bir kazık için üç defa tekrarlanır. Bu şekilde çevresel etkiler ve insan hatalarının deney sonucuna etkisi en aza indirilmiş olur. Her bir kazık için ortalama bir sinyal alınmasına da olanak sağlamaktadır (Chow, vd., 2003).

### **2.1. Basınç Dalgası Teorisi ve Bir Boyutlu Dalga Yayılımı**

Bir kazık çakıldığı zaman veya düşük deformasyonlu bir deney sırasında, bir çekiçle kazık üzerinde darbe yaratıldığında, darbe anında kazık başında bir basınç dalgası oluşmakta ve kazık eksenini boyunca ilerlemektedir. Kazıktaki süreksizlikler ve zeminle olan etkileşim ters yönde yansıyan dalgalar oluşturmaktadır. Şekil 1'de basınç dalgasının silindirik bir çubukta yayılımı sırasında küçük bir parçada oluşan kuvvetler görülmektedir. Bu yaklaşımda, çubuk zeminle etkileşimde değildir (yanlarda sürtünme yoktur) ve dalganın yayılımı sırasında

### Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi

enine düzlemsel kesitlerin düzlemsel olarak kaldığı kabul edilmektedir. Böylece, basınç dalgaları her kesite üniform olarak etkimektedir (TNO, 1997).



Şekil 1. Bir darbe sonucunda silindirik bir çubuk üzerinde oluşan kuvvetler (TNO, 1997).

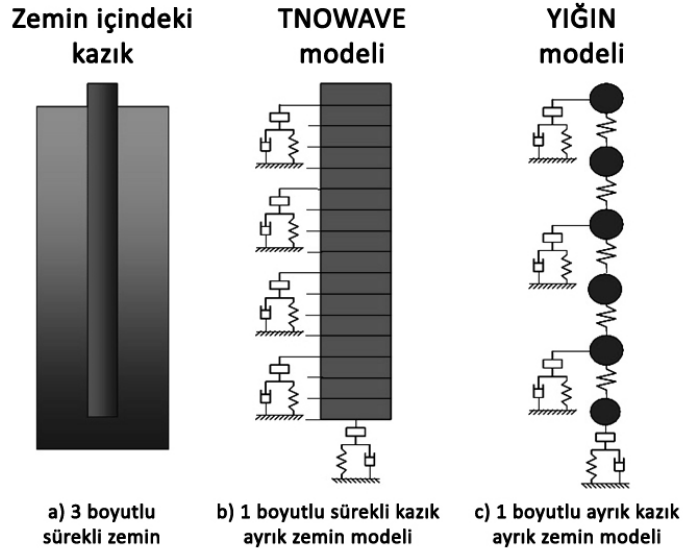
Karakteristik yöntemin orijinalinde, çevre sürtünmesi ve uç direncinin olmadığı kabul edilmektedir. Basınç dalgaları, sürtünmesiz bir kazıkta değişmeden karakteristik bir basınç dalgası hızıyla ilerlemektedir. Parçalı diferansiyel denkleme sürtünme ifadesi eklendiğinde, dalga denkleminin analitik olarak çözülebilmesi için, sürtünmenin de analitik bir fonksiyon olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu durumda, çözüm sadece integrasyon dönüşümleriyle (Laplace dönüşümü gibi) bulunabilmekte ve Fourier serileri formunda elde edilebilmektedir. Pratikte, çevre sürtünmesinin hıza veya deplasmana dayandığı kabul edildiğinde, analitik olarak çözüm bulmak imkansızdır (Middendorp ve Verbeek, 2006). Bu gibi durumlarda, Smith'in dalga denklemi programında olduğu gibi, çözüm için diferansiyel denklemin nümerik integrasyonuna gidilebilmektedir (Chow vd., 2003).

Sayısal integrasyon yöntemi için, kazığın matematik modelinde noktasal kütleler bulunmaktadır (Şekil 2c). Çevre sürtünmesi ve uç direnci noktasal kütlelere bağlı yay mekanizması ile modellenmiştir. Dalga yayılımı nümerik olarak birkaç yolla gösterilebilir. Kazık, genel olarak kütleler ve yaylarla modellenir. Başka bir yöntem de sonlu elemanlar yöntemi kullanmaktır. TNOWAVE'in kullandığı model ise karakteristik yöntemeye dayanmaktadır. Sürtünme belli birkaç noktada yoğunlaştığında, kazığın bu noktalar arasındaki kısımları sürtünmeye maruz kalmamakta ve basitleştirilmiş basınç dalgası teorisi geçerli olmaktadır (Middendorp ve Verbeek, 2006).

## 2.2. Analiz Çeşitleri

Analizler, basınç dalgasının kazık eksenini boyunca yayılmasını temel almaktadır. Basınç dalgası bir çekiç darbesiyle oluşturulmaktadır. Oluşan basınç darbesi, kazık eksenini boyunca ilerlemektedir ve kazık şaftındaki akustik empedans değişimleri yansıyan dalgalar üretmektedir. Çoğu durumda bu değişimler kazıktaki kesit alanı değişiminden kaynaklanır. Kazık başlığındaki transdüser yardımıyla kaydedilen yansıyan dalgalar, empedans

değişimlerini vermektedir. Bu şekilde sonuçlar hem zaman hem de frekans aralıklarında analiz edilebilir. Kazık-zemin sistemini modellemek için farklı çözüm yaklaşımları da ortaya çıkmıştır. Bunlar arasında karakteristik yöntem en güvenilir çözüm yöntemidir. Analizde, temel olarak kazığın geometrisi değiştirilerek yazılımın oluşturduğu sinyaller ölçülen deney sinyalleriyle eşlenmektedir. Süreksizlik tipi, derinliği ve zemin çeşidi ile ilgili bilgi edinmek için daha ileri analizler yapılabilir.



Şekil 2. Dalga denklemleri modelleri (TNO, 1997).

#### Zaman Aralığı

Bu analiz tipinde, kazık başında ölçülen hızlar, bunlara karşılık gelen zaman değerleri için grafik üzerinde gösterilir. Deney sonuçlarının sunumunda, belirlenen yansıma dalgaları kullanılarak kazık boyunca oluşan değişiklikler tanımlanır. Kazık çevresindeki zeminin direnci, basınç dalgasını etkileyebileceğinden, bu etki analitik olarak hesaplanabilir.

#### Frekans Aralığı

Zaman aralığındaki sinyaller, Fourier analizi kullanılarak dönüştürüldüğünde, frekans aralığında analiz yapılabilmektedir. Çekiçten alınan veriler ile kazık başının dinamik rijitliği hesaplanabilmektedir. Bu parametre özellikle, kritik bölgedeki (kazığın üst 2D-3D kısmı) süreksizliklerin hesabında kullanılmaktadır.

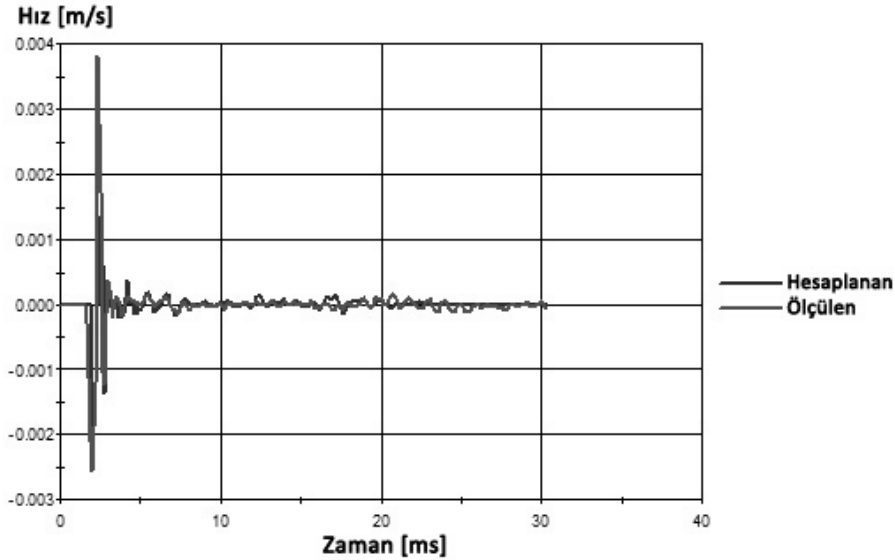
Deney sonuçları hem zaman hem de frekans aralığında analiz edilirse, verilerin yorumlanması daha güvenilir olmaktadır. Değerlendirme için zemin koşulları, kazık boyutları ve beton/donatı bilgilerinin detayları da gerekmektedir. Bu verilerin yardımı ile, şantiyede sorunlu kazıkların tespiti kabaca yapılabilmektedir.

### 2.3. Sinyal Eşleme İşlemi

Bir kazık süreklilik deneyinde, sahada çeşitli yerlerdeki kazıklar teste tabi tutulur. Sadece şüphelenilen kazıklarda uygulanması yeterli değildir. Bir süreklilik deneyi sinyali, kazık kesitindeki değişim, zemin karakteristikleri, kazık yoğunluğundaki değişimler, çatlaklar, kırıklar vb. gibi empedansdaki değişime sebep olacak bilgiler içermektedir.

Süreksizlik deneyi sonuçları, doğrudan kazıklardaki süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak bu analiz ile süreksizliklerle ilgili kısıtlı bilgi edinilmektedir. Bu nedenle, sinyal eşleme işlemi, TNOWAVE-SITWAVE yazılımı kullanılarak uygulanmıştır. İvmeölçerdeki sinyal tüm detayları, özellikle de zayıf uç yansımalarını saklayacak şekilde yükseltilerek dijital forma çevrilir. İvme sinyalinin integrasyonu ile hızlar hesaplanır. Hız-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri kullanılarak deney sonuçları analiz edilebilmektedir. Sinyal eşleme analizi için, sonik süreklilik deneyi uygun olarak yapılmalıdır ve deney verileri güvenilir olmalıdır. Kazık başlığının düz ve temiz olması sağlanmalıdır. Ayrıca çekiç darbesi için yeterli boşluk olmalıdır. Analizler zemin bilgilerine de dayandığı için, zemin araştırması sırasında yapılan deneyler dikkatli yapılmış olmalı ve yeterli sayıda olmalıdır.

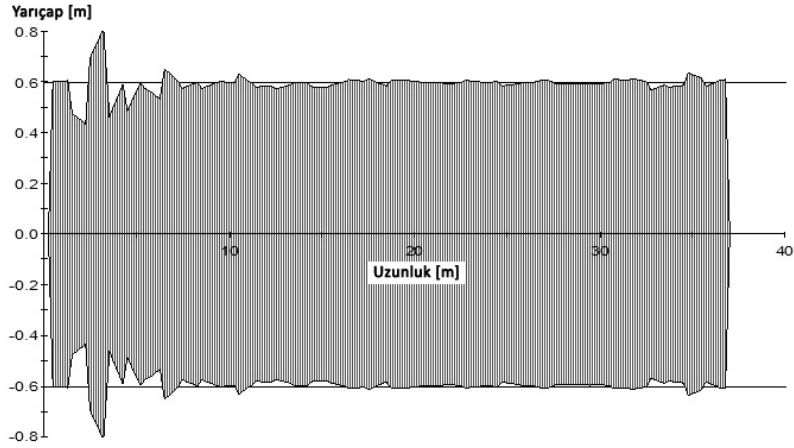
Sinyal eşleme işlemi, arazide ölçülen kazık süreklilik deneyi sinyaline analitik olarak “eş bir sinyal” belirleme yöntemidir. Bu işlem boyunca ilk olarak üniform kazık şekli ile başlanarak, sinyaller eşlenene kadar kazık geometrisi adım adım değiştirilmektedir (Şekil 3).



*Şekil 3. Bir analiz sonucunda, kazık eksenine boyunca ölçülen ve hesaplanan sinyaller.*

Ölçülen sinyal, kazık-zemin sistemine tanımlanmaktadır. Analiz boyunca, analitik sinyal adım adım hesaplanarak, ölçülen sinyal ile karşılaştırılmaktadır. Zemin araştırma verilerine dayanarak zeminin doğru olarak modellendiği düşünülerek, burada iki sinyal arasındaki

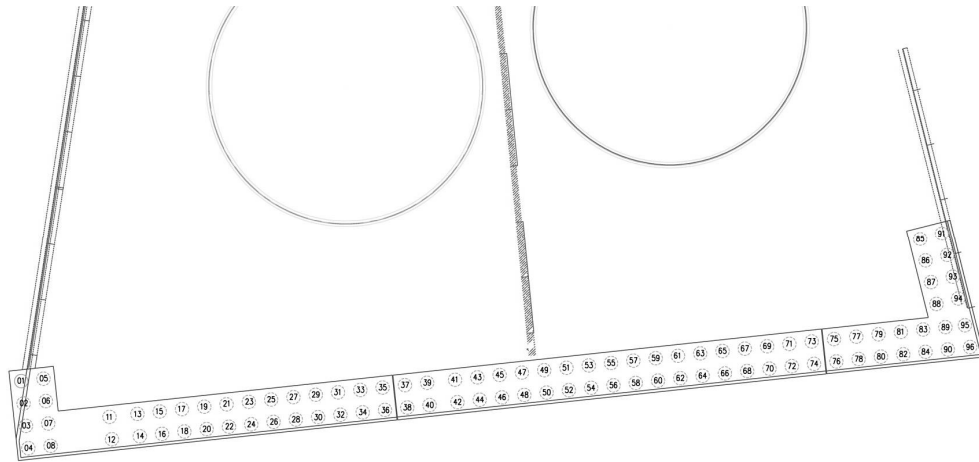
fark kazığın geometrisinden kaynaklanmaktadır. Bu iki sinyal arasında iyi bir uyum sağlanana kadar her bir artım aralığında, kazık kesit alanı değiştirilmektedir. Analiz tamamlandığında kazığın son geometrisi elde edilir (Şekil 4).



Şekil 4. Bir analiz sonucunda bulunan bir kazığın geometrisi, (Özüdoğru, 2007).

### 3. VAKA ANALİZİ-1

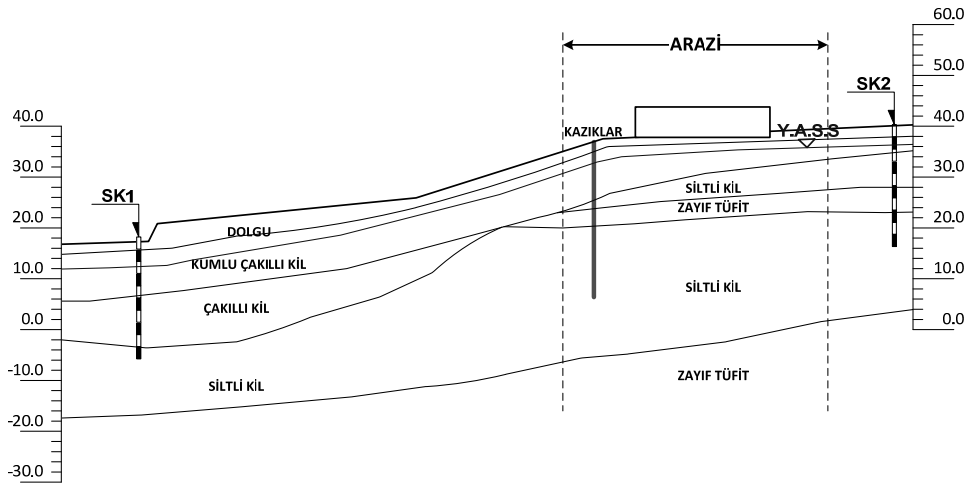
İstanbul, Büyükçekmece'de, bir sahada bulunan 96 fore kazık üzerinde kazık süreklilik deneyi yapılmıştır. Kazıklar 120 cm çapında ve 30.50 m uzunluğundadır. İki sıra halinde imal edilmiş olan kazıkların yerleşim planı Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Test edilen kazıkların yerleşim planı.

### 3.1. Zemin Koşulları ve Kazık Yerleşim Planı

Zemin incelemesi kapsamında yapılan standart penetrasyon deneyinden zemin profili çıkartılmıştır. Profilin üst kısmında dolgu ve altında ise Çukurçeşme ve Gürpınar formasyonları görülmektedir. Dolgu tabakası, 1.60 m ila 3.00 m kalınlıklarında değişmekte olup kum, çakıl ve kil karışımından oluşmaktadır. Çukurçeşme formasyonu, kil, kum ve ince çakıl tabakalarını içermektedir. Gürpınar formasyonu ise genellikle aşırı konsolide, fisürlü killer ile ince zayıf tüfit tabakalarından oluşmaktadır. Zemin profili ağırlıklı olarak siltli kil olmasına rağmen, kumlu ve çakıllı kil tabakaları da mevcuttur. Şekil 6’da zemin profili, kazıkların yeri ve sondaj kuyularının yerleri görülmektedir.



Şekil 6. Sondaj kuyuları, kazıklar ve zemin profili (Özüdoğru, 2007).

Standart penetrasyon deney sonuçlarına göre kazıklara yakın kısımdaki sondaj kuyusunda SPT  $N_{30}$  değerleri 6.00 m derinlikten sonra 40 vuruş sayısı değerini aşmakta ve 10.50 m’de 50’ye ulaşmaktadır. Sondajlar 30.00 m derinliğe kadar yapılmıştır.

### 3.2. Süreklilik Deneyi

Kazıkların kalite kontrolü ve olası süreksizlikleri tespit edebilmek için sonik eko yöntemi kullanılmıştır (Şekil 7). Bu yöntem sonik süreklilik deneyi de denmektedir. Her kazıkta üçten fazla deney yapılarak, değerlendirme için ortalamaya en yakın üç kayıt kullanılmıştır. Deney sonuçları doğrudan kazıklardaki süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak bu analiz tipi kalitatif olduğundan süreksizliklerle ilgili kısıtlı bilgi edinilebilir ve bazı detaylar atlanabilmektedir. Bu nedenle, sinyal eşleme işlemi kullanılarak kantitatif analiz yapılmıştır.



*Tolga Y. ÖZÜDOĞRU, Aykut ŞENOL, Z. Nil TAYLAN*

Sinyal eşleme işleminde, sahadaki kazıklar 30 parçaya bölünmüştür. Böylece, her bir kazık için 1.00 m'lik bir artım aralığı seçilmiştir. Aralık boyutu küçüldükçe, analiz daha hassas bir şekilde yapılmaktadır. Ancak, aralık boyutu yarıya indiğinde analiz için geçen süre dört katına çıkmaktadır. Farklı artım aralıkları ile yapılan çeşitli denemeler sonucunda, 1.00 m'lik uzunluğun yeterli olduğu ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür.



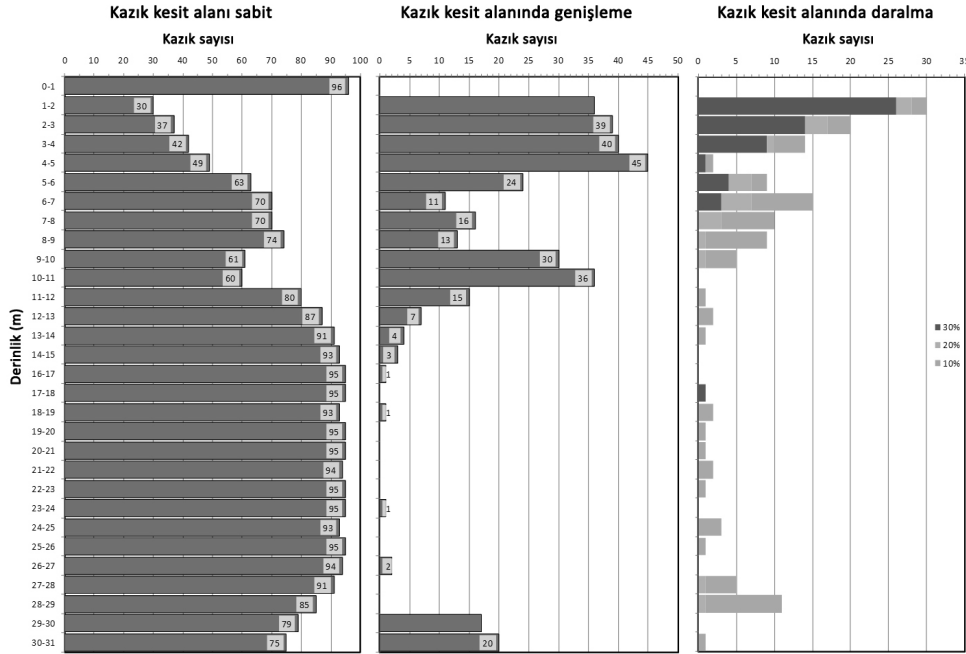
*Şekil 7. Kazık süreklilik deneyi (Özüdoğru, 2007).*

Analiz sonuçlarından, her bir artım aralığındaki kesit alanlarından faydalanarak kazıkların geometrileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak kazık eksenli boyunca oluşan süreksizlikler tespit edilmiştir. Her bir artım aralığında üç durum meydana gelebilmektedir; kazık kesit alanında genişleme, daralma veya kesit alanının sabit kalması.

### **3.3. Süreklilik Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Tüm kazıklar analiz edildikten sonra, derinliğe bağlı olarak kesitteki daralma ve genişleme histogramları çizilmiştir. Buna ilave olarak, kesitte herhangi bir değişiklik olmayan kazıklar da gösterilmiştir. Son olarak kazık kesitindeki değişimler tek bir grafik üzerinde özetlenmiştir (Şekil 8).

## Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi



Şekil 8. Süreksizliğe sahip olmayan kazıklar ve kesitlerinde derinlik boyunca değişim olan kazıklar (Özüdoğru, 2007).

## 4. KAZIK ÇAKIMINDA DALGA DENKLEMİ ANALİZİNİN KULLANILMASI

1960 yılında E. A. L. Smith sayısal integrasyon yöntemini kazık çakım probleminin tanımında dalga denkleminin bir çözümü olarak ortaya koymuştur. Bu yöntem, dalga denklemi analizini temel alan tüm bilgisayar programlarında yaygınca tercih edilmektedir. Smith modelinde, kazık, çekiç ve diğer çakım ekipmanları sırasıyla; ağırlık, rijitlik ve sönümlenme etkilerine karşılık gelecek şekilde; kütle, yay ve amortisör sistemleri ile tanımlanmaktadır (Chen, vd., 2003). Tanımlanan bu sistem tümüyle Smith modeli olarak bilinmektedir ve zeminin gösterdiği direnç, statik ve dinamik bileşenlerle tanımlanmaktadır. Çakım işlemlerinde uygulanan dalga denklemi analizi iki ana sonuç ortaya koyar. Bunlardan ilki; uygun şartlardaki çakım ekipmanının seçilmesi ile kazığın izin verilen gerilme değerlerini aşmadan gerekli çakım derinliğine ulaşmasını sağlamaktadır. Diğeri de; mümkün olan en düşük çakım derinliğinde istenilen taşıma kapasitesine erişmektir. Analiz, tanımlı bir zemin profilinde belirli bir tip ve uzunluktaki kazık tipi ve çakma düzeneği için kurulmuştur. Çözümleme sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği mutlak olarak öngörülen ve gerçek mevcut zemin parametrelerinin uyumluluğuna bağlıdır. Sonuçlar yalnızca ele alınan sistem için uygulanabilir. Sadece incelenen kazık için kullanılmalıdır. Hassas ve güvenilir sonuçlar elde etmek için çekiç, kazık başlığı, kazık ve zemin direnci giriş verilerinde ciddi mühendislik muhakemesi gerekmektedir (Smith, 1960).

## 5. KAZIK ÇAKIMINDA DALGA DENKLEMİ ANALİZİNDE ZEMİN PARAMETRELERİ

Zemin profili ve zemin cinsinin belirlenmesi, analizi etkileyen en önemli parametrelerdir. Bu çalışmanın başlıca amacı, çakım ekipmanları ve kazık tipleri ikinci planda bırakılarak, çakım analizlerine örnek teşkil edecek şekilde zemin modelinin oluşturulmasıdır. Analiz için mevcut zemin durumu SPT, CPT, MPT ve dilatometre arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerine dayanılarak modellenmelidir. Zemin parametreleri her zemin tabakası için tanımlanmıştır. Ayrıca, zemin-kazık sisteminin yük koşulları altındaki dinamik davranışını modelleyebilmek için zeminin direncini karakterize eden statik ve dinamik zemin parametreleri gerekmektedir. Zemin modellemesinde kullanılacak ve çalışma kapsamında dikkate alınan statik ve dinamik parametreler akma gerilmesi, gerekli kazık deplasman (quake) değeri, sönümlenme sabiti, akma faktörü ve zemin yorulma (azalma) faktörüdür.

## 6. VAKA ANALİZİ-2

İncelenen bu ikinci vaka analizi, Kocaeli Körfezi'ndeki bir tersane inşaatı sahasıdır. Ayrıca bölge, 1999 yılında 7.4 Mw şiddetindeki Kocaeli Depremi'ne maruz kalan, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) üzerinde sismik olarak aktif bir konumda bulunması nedeni ile büyük bir önem arz etmektedir. Tüm kazıklar 711 mm dış çap ve 22 mm et kalınlığına sahip, yaklaşık 32.00 m uzunluğunda, kapalı uçlu ve çelik boru kesitli Vibrex kazıktır. Kazık çakım tahminleri ve ilgili sonuçlar böyle bir inşaat alanında çok daha fazla önem kazanmaktadır. Çelik boru kazıkların çakılması işinde tüm sahada Delmag D46 dizel çekiç ve Junttan HHK 9A hidrolik çekiç kullanılmıştır.

Bu araştırma, çalışma sahasının tüm inşaat alanının ilgili kazıkların bulunduğu bölge itibari ile olan küçük bir bölümün zemin profili üzerinde sürdürülmüştür. Zemin incelemesi sonucunda, zemin profilinin üstte dolgu, daha sonra çakıllı kum, kumlu kil ve kil tabakalarından oluştuğu görülmüştür. Dolgu malzemesine tüm sondaj kuyularında zemin yüzeyinden itibaren 2.50 - 3.20 m derinliklerde rastlanmaktadır. Zemin malzemesi kilden çakıla çok değişken dane boyutu aralığında olup heterojen bir yapı göstermektedir. Zemin profilinde, dolgu malzemesini takiben 9.50 - 18.00 m derinliklere kadar değişken kalınlıklarda tabakalanmış genç deniz çökelleri yer almaktadır. Yeraltı su seviyesi 0.50 m gibi çok sığ bir derinlikte olduğundan tamamen yeryüzü seviyesinde olduğu kabulü yapılabilmektedir. Bu durum da zeminin tamamen doymuş olduğunu ortaya koymaktadır.

Arazi değerlendirmeleri sonucunda elde edilen SPT deney sonuçları, tariflenmiş bölgede ve koşulda yer alan bir zemin profili için çok yüksek değerler vermektedir. Bu nedenle ters çözüm tekniği kullanılarak, çakılabilirlik analizi sonuçlarından zemin direnci de göz önünde bulundurularak, bölgeyi daha doğru tanımlayacak yeni SPT vuruş sayıları değerleri elde edilmiştir. Bu sayede, yapılan bu teknik ile ileriki analizler için programın ve tekniğin kalibrasyonu da sağlanmış olmaktadır. Kazık çakım ön analiz program akışı bir bakıma karmaşık olarak değerlendirilebilir. Program veri olarak girilmiş olan arazi deney sonuçlarını otomatik olarak zemin dinamik parametrelerine dönüştürmektedir. Teorik olarak yazılım bu dönüşüm için birtakım korelasyon faktörleri kullanmaktadır. Sözü edilen bu bağıntılara örnek teşkil edecek şekilde Denklem 1 ve 2'de korelasyon formu gösterilmiştir. Ancak, yapılan analizler sonucunda çalışılan saha şartları için belirlenmiş olan bu korelasyon katsayıları uygun sonuç vermemiştir. Bu nedenle birçok algorithma

### *Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi*

olduğu gibi sözü edilen algoritmanın da öncelikle belirli zemin özellikleri ve çakım şartları altında kalibre edilmesinin gerekliliği ortaya konmuştur (Taylan, 2006).

$$\text{SPT } N_{60} * K_{uç} = \text{Akma gerilmesi}_{uç} \quad (1)$$

$$\text{SPT } N_{60} * K_{çevre} = \text{Akma gerilmesi}_{çevre} \quad (2)$$

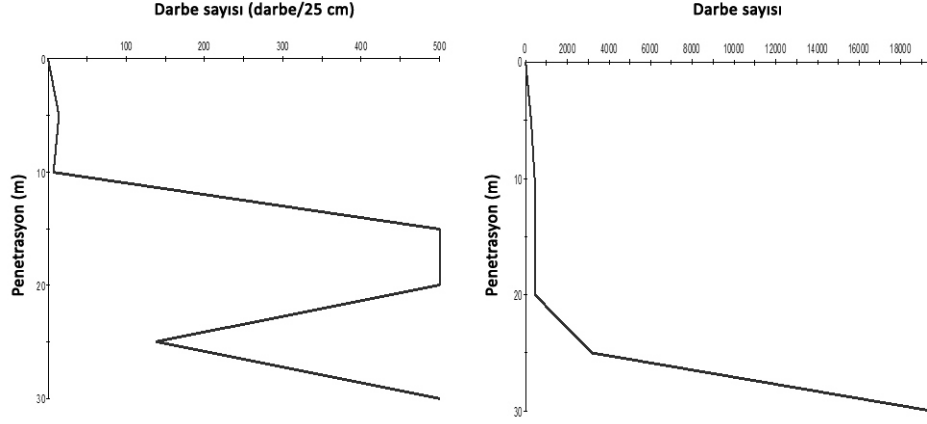
Araştırma kapsamında, program çıktıları ile arazi kayıtları arasında birçok farklı yaklaşım ve ters çözüm sonucunda kalibrasyon sağlanmıştır. Vaka çalışması ile beraber analiz sırasında gerçekleştirilen başlıca işlemler aşağıdaki şekilde ana hatları ile özetlenebilir;

- Analiz ilk önce dinamik zemin parametresi veya zeminin örselenme etkisi gibi hesap sonuçlarını etkileyecek herhangi bir parametreyi değiştirmeden yalnızca  $N_{60}$  değerlerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir.
- İkinci aşamada analiz düzeltilmiş SPT vuruş sayıları;  $N_{(1)60}$  kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak bu defa aynı zamanda zemin karakteristik parametleri de, eldeki çakım kayıtlarına uygun olacak şekilde modifiye edilmiştir.
- En son ve üçüncü aşamada ise, bir tür ters çözüm tekniği uygulanarak arazi çakım kayıtları ile de uyum gösteren, gerçeğe en yakın olan ideal zemin kesiti elde edilmiştir.

Her üç adımda analizlerden elde edilenler grafiklerle (her 0.25 m penetrasyon için gerekli vuruş sayısı ve toplam vuruş sayısı gibi) Delmag D-46 dizel çekiç için arazide elde edilen kayıtlar karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve yapılan tahminlerin doğruluğu tartışılmıştır. Aynı zamanda sahayı en iyi şekilde temsil edecek zemin profili de elde edilmeye çalışılmıştır.

#### **6.1. SPT $N_{60}$ Değerleri Kullanılarak Elde Edilen Çözüm**

Standart penetrasyon deneyi sonuçlarından elde edilen N vuruş sayısı düzeltilerek  $N_{60}$  değerleri elde edilir. Bu değerler giriş verisi olarak kullanılmış ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan dinamik zemin model parametreleri değiştirilmemiştir. Bu sayede Delmag D-46 tipi kazık çakma ekipmanı için elde edilmiş olan ön analiz sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, orta sıkı kum tabakası içerisinde kazık çakımı esnasında her 25 cm için gerekli vuruş sayısı 500 değerine ulaşmıştır ki belirlenmiş zemin tipi için mantıklı bir yaklaşım sunmamaktadır. Elde edilmiş bu değer aynı zamanda mevcut arazi kayıtları ile de herhangi bir uyum göstermemektedir. Uyumsuzluk ve güvenilir olmayan sonuçların elde edilmesi bahsi geçen korelasyon katsayılarının zemin şartını daha gerçeğe yakın temsil edecek şekilde düzeltilmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede, aynı zamanda sonraki benzer davranıştaki zeminlerle yapılacak çalışmalar için de daha uygun bir başlangıç noktası hazırlanmış olmaktadır. Birinci adımdan elde edilen sonuçlarla farklı bir yaklaşımın devam ettirilmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür.



Şekil 9.  $N_{60}$  değerlerine bağlı vuruş sayısı / 25 cm ve toplam vuruş sayısı grafikleri

## 6.2. Düzenlenmiş Model Parametrelerinin Kullanılması ile Elde Edilen Çözüm

Sistemin kalibre edilebilmesi için öncelikle düzeltilmiş vuruş sayısı değerleri ( $N_{60}$ ) sabit tutularak karşılık gelen akma gerilmesi değerleri Denklem 1'de tanımlanan seçilmiş oran faktörü kullanılarak her bir tabaka için ayrı ayrı değiştirilmiştir. Yapılan düzeltmeler sonucunda Şekil 9'da verilmiş olan grafik Şekil 10'a dönüşmektedir. Her iki grafik de karşılaştırma amaçlı olarak arazi çakım kayıtları ile birlikte verilmiştir.

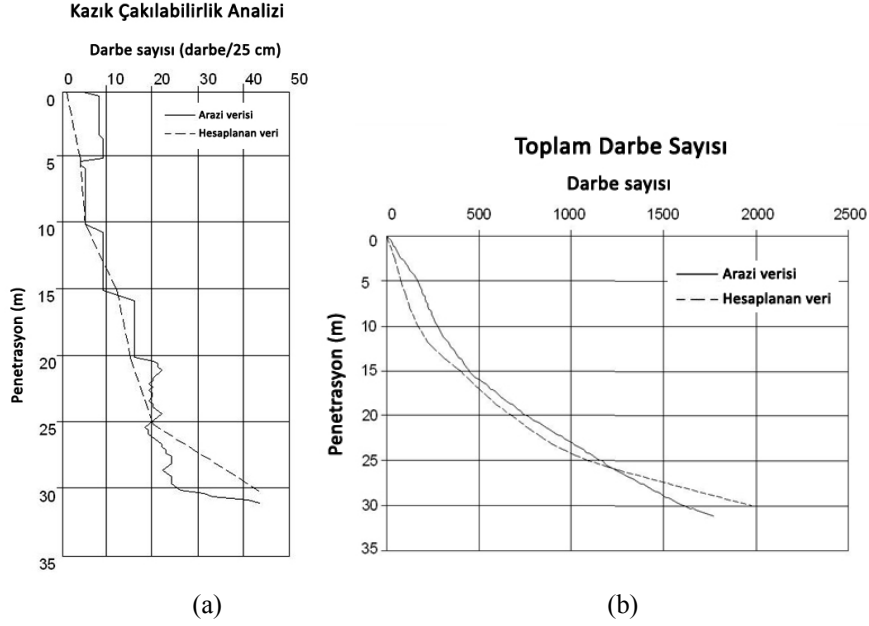
Seçilmiş akma gerilmesi değerleri, sönümlenme katsayıları ve gerekli kazık deplasman değerleri Çizelge 1 ve 2'de kazık çevresi ve kazık ucu için ayrı ayrı verilmiştir. Toplam azalım katsayısı, çakım esnasındaki örselenme etkisini de gözönüne alarak kapalı uçlu boru kazıklar için uygun olan 0.8 değeri seçilmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğu arazi değerleri ile de karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 10). Uç penetrasyon değerleri 30 m'ye varan kazıklarda yapılan ön analiz sonuçları bu anlamda doğrulanmıştır ve aynı zamanda da seçilen çekiç tipi için geçerli refü kriteri olan 43 vuruş / 0.25 m'de sağlanmıştır. Analiz sonuçları mevcut arazi koşulları ile uyum göstermektedir.

## 6.3. Ters Çözüm ve İdeal Zemin Profili

Araştırmanın bu ikinci kısmının son aşamasında, ideal zemin modelinin elde edilmesi için arazi kayıtları da dikkate alınarak ters çözüm tekniği uygulanmıştır. Bu aşamada her bir tabaka için Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilen akma gerilmesi değerleri sabit tutularak 1 no'lu denklem sistemi SPT  $N_{60}$  değerlerinin elde edilmesi için çözülmüştür.  $N_{60}$  değerlerinin hesaplanmasından arazi zemin durumunu tanımlayan idealize zemin profili elde edilmiştir. Zemin kıvamı veya sıklığı gibi karakteristik özellikleri çok değişim göstermezken, diğer yandan ters çözüm tekniği ile hesaplanan SPT N değerleri arazi deneyleri sonucunda bulunan değerlere kıyasla çok belirgin şekilde düşük hesaplanmıştır. Başta da belirtildiği gibi, deniz çökellerinin tamamen suya doymun olması ve normal konsolide genç kil zemin yapısından meydana gelmesinden ötürü literatürde SPT  $N_{60}$

### Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi

değerinin 0 - 9 arasında değişim göstermesinin beklendiği, aynı zamanda kaba daneli kum malzemelerde ise bu değer 3 - 9 arasında olduğu belirtilmiştir. İdeal zemin profili mevcut arazi inceleme test sonuçlarından büyük oranla farklılık göstermektedir. Oluşturulan profil arazi kayıtları ile uyum göstermekte ve çalışma sahasını temsil etmek için kabul görmektedir.



Şekil 10. Karşılaştırma: (a) kazık çakılabilirlik analizi sonuçları (b) Delmag D46 çekiciyle elde edilen toplam darbe sayısı (Taylan, 2006).

Çizelge 1. Çevre sürtünmesi model parametreleri

Derinlik	Akma Gerilmesi	Quake Değeri 1	Quake Değeri 2	Akma Faktörü	Sönümlenme Katsayısı
[m]	[MPa]	[mm]	[mm]	[-]	[MNs/m <sup>3</sup> ]
0.0	0.011	2.5	2	1	0.003
-3.5	0.011	2.5	2	1	0.003
-3.5	0.016	2.5	2	1	0.003
-8.5	0.016	2.5	2	1	0.002
-8.5	0.032	2.5	2	1	0.002
-13.0	0.032	2.5	2	1	0.002
-13.0	0.032	2.5	2	1	0.002
-23.5	0.032	2.5	2	1	0.020
-23.5	0.032	2.5	2	1	0.020
-33.5	0.032	2.5	2	1	0.020

Çizelge 2. Uç direnci model parametreleri

Derinlik	Akma Gerilmesi	Quake Değeri 1	Quake Değeri 2	Akma Faktörü	Sönümlenme Katsayısı
[m]	[MPa]	[mm]	[mm]	[-]	[MN/m <sup>3</sup> ]
0.0	1.0	2.5	2	0.1	0.250
-3.5	1.0	2.5	2	0.1	0.250
-3.5	2.0	2.5	2	0.1	0.250
-8.5	2.0	2.5	2	0.1	0.310
-8.5	1.5	2.5	2	0.1	0.310
-13.0	1.5	2.5	2	0.1	0.310
-13.0	2.0	2.5	2	0.1	0.310
-23.5	2.0	2.5	2	0.1	0.275
-23.5	2.0	2.5	2	0.1	0.275
-33.5	2.0	2.5	2	0.1	0.275

Çizelge 3. İdealize zemin profili

Derinlik	Akma Gerilmesi (Çevre)	Akma Gerilmesi (Uç)	Korelasyonla elde edilen SPT N <sub>60</sub> değerleri	Korelasyonla elde edilen SPT N değerleri	Zemin Tipi
[m]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]
0.0	0.011	1	3	4	Dolgu malzemesi
-3.5	0.011	1	3	4	
-3.5	0.016	2	5	7	Gevşek kum
-8.5	0.016	2	5	7	
-8.5	0.032	1.5	8	10	Orta katı kil
-13.0	0.032	1.5	8	10	
-13.0	0.032	2	5-7	7-9	Gevşek kum
-23.5	0.032	2	5-7	7-9	
-23.5	0.032	2	9-12	12-16	Orta katı kil
-33.5	0.032	2	9-12	12-16	

## 7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu araştırmada, ilk vaka analizinde bir sahada 96 kazık üzerinde yapılan kazık süreklilik deneyi verileri analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Kullanılan deney yöntemi, sonik eko yöntemidir ve deney "Sonik Süreklilik Deneyi" olarak isimlendirilmektedir. Bu deneyde amaç kazık eksenini boyunca oluşan süreksizliklerin bulunmasıdır. Sonik süreklilik deneyinin sonucundan herhangi bir analiz yapmadan kazıklar hakkında doğrudan belli bir oranda fikir edinilebilmesine rağmen, nicel bir analize ihtiyaç duyulmuş ve TNOWAVE: SITWAVE yazılımı kullanılarak sinyal eşleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

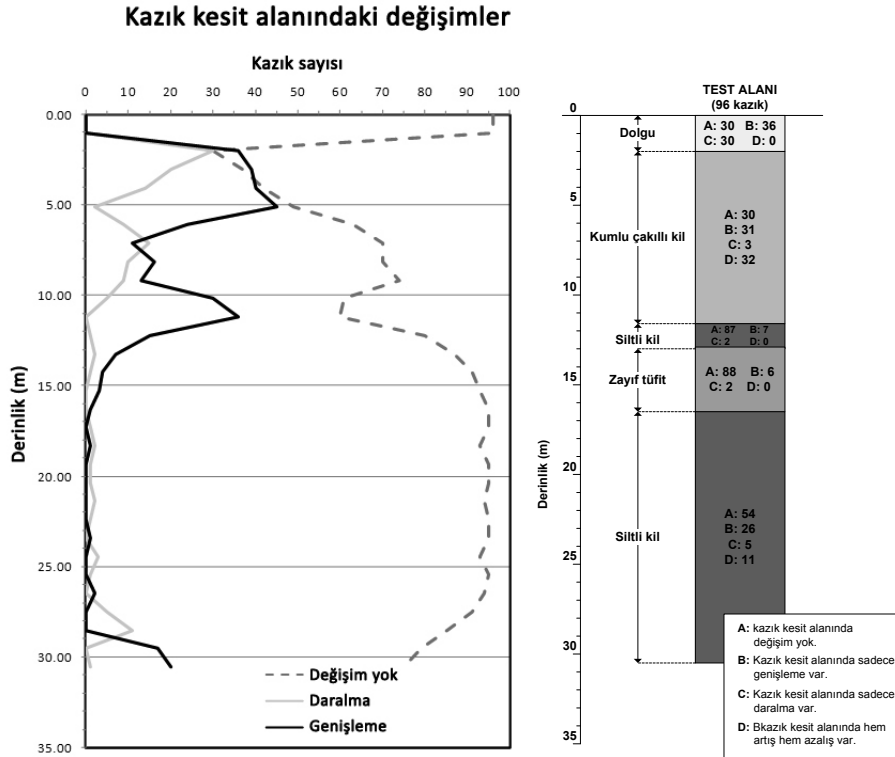
Birinci vaka analizi Büyükçekmece'deki bir inşaat sahasında bulunan 96 fore kazık üzerinde yapılan kazık süreklilik deneylerini içermektedir. İlgili zemin profili üstte dolgu,

### Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi

derinlerde ise Çukurçeşme-Gürpınar formasyonlarından oluşmaktadır. Zemin profili genelde siltli kilden oluşmaktadır. Ancak kumlu ve çakıllı kil tabakaları da mevcuttur. Ayrıca yer yer zayıf tüfite rastlanmıştır.

Yapılan deneyler ve analizler sonucunda birinci vaka analiziyle ilgili şu sonuçlara ulaşılmaktadır, (Şekil 11);

- 96 kazığın 22 tanesinde (%23) süreksizlik yoktur. Kazıkların büyük kısmında (%49) hem kesit alanı daralması hem de kesit alanı genişlemesine rastlanmıştır.
- Kesit alanındaki daralmaların büyük bölümünün dolgu içinde, zemin profilinin ilk 2.00 m'si içinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Deney sahasında, kazık çapında %30'dan fazla olan daralmalar 2.00 - 4.00 m derinlikte görülmüştür. Bu bölgedeki zemin profili çakıllı kilden oluşmaktadır.
- Sinyal eşleme analizi için, sonik süreklilik deneyi yapılırken şartlara uygun yapılmalıdır. Kazık başının düz, temiz ve kuru olması ve ayrıca darbe için yeterli boşluğun olması gerekmektedir.
- Analizler sonucunda kazıklarda ciddi süreksizlikler bulunduğu bu kazıkların incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 11. Kazıklardaki kesit alanı değişiminin özeti.



Analiz sonuçlarının başarılı olabilmesi için yapılan zemin araştırmalarının düzgün ve deney sayısının yeterli olması gerekir. Yapılan deneyler sonucunda bulunan zemin parametrelerinin, kazığın etrafındaki zemini temsil etmesi gerekmektedir.

İkinci vaka analizinde kazık çakılabilirliğine ait bir ön çalışma ve zemin mukavemet parametreleri gözönünde bulundurularak kazığın dinamik yüklemeler altındaki (çakım esnasında olduğu gibi) davranışı değerlendirilmiştir. Teorik anlamda statik ve dinamik kazık formülleri çok geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Ancak, geçmiş seneler içinde hesap tekniklerindeki gelişmeler sonucunda, mevcut alışılmış yöntemlerin doğruluğu ve güvenilirliğini tartışılır bir hale gelmiştir. Dalga denklemi analiz yönteminin kazıklı sistemlerde uygulanması kazık davranışı modellemesinde kapsamlı bir bakış açısını ortaya koymaktadır. Kazık modellemesinde birçok farklı çözüm yaklaşımları geliştirilmiş, bunlar arasında karakteristik yöntem ve Smith'in yığın modeli en çok kabul görenler arasında yer almaktadır. Sözü edilen çözüm metotları temel alınarak çeşitli bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bu programlar sayesinde arazide kazık çakımı esnasında meydana gelebilecek erken ya da geç refü, çekiç tipi ile ilgili olarak meydana gelebilen kazık hasarları, vb. gibi olası durumlar ön analiz ile tahmin edilebilir hale gelmiştir.

İkinci vaka analizi kısmını oluşturan uygulama Kocaeli Körfezi'nde yer alan bir sahada gerçekleştirilmiştir. Çakım verileri birebir arazide inşaa edilen kazıklardan elde edilmiştir. Kazığın penetrasyona karşı gösterdiği dinamik direnç (vuruş sayısı / 25cm) arazide ölçülmüştür. Mevcut çakım ekipman özellikleri ve çakma sistemi (kazık ve zemin modeli) programa girdi olarak verilmiştir. Analizin kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve bu şekilde birçok döngü oluşturulmuştur. Sonuç olarak, korelasyon katsayılarının mühendislik çalışmalarında benzer sahalarda gerçekleştirilen analizler için içerisinde tecrübe faktörünü de kapsayan çok önemli bir rehber olduğu anlaşılmıştır. Çalışmaya ait değerlendirme ve sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Akma gerilmesi için korelasyon faktörü,  $K_{\text{çevre}}$  killer için 0.002-0.003 ve kumlar için 0.0032-0.0064 seçilmiştir.
- $K_{\text{uç}}$ , korelasyon faktörü, killer için 0.16-0.22 ve kumlar için 0.15-0.30 seçilmiştir.
- Uygun kalibrasyon uygulandığında elde edilen analiz sonuçları, saha verileri ile uyumluluk göstermektedir. Bu yolla çakım direnci (darbe / 25 cm) ve darbe sayısı grafikleri ölçülen verilerle örtüşmektedir. Sonuç olarak bu da seçilen dizel çekiç tipinin çakılan kazığa zarar vermemesi, dolayısıyla çakım için uygun olduğunu göstermektedir.
- Diğer yandan, çakım analizini etkileyen çok çeşitli etkenler olması sebebiyle sonuçların güvenilirliği detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu noktada saha gözlemleri büyük önem kazanmaktadır.
- Çeşitli etkenlere bağlı olarak, bilgisayar ortamında hesaplanmış olan sonuçlar saha üzerinde güvenilir zemin etüt sonuçlarıyla doğrulanmalıdır. Gerçeğe en yakın analiz sonuçlarına ancak tahmin, doğrulama ve analiz sonrası çalışmaları döngüsü yeterli sayıda yapılarak ulaşılabilir.
- Uygun dinamik model parametrelerinin seçilmesinde ve yargılamada mühendisin tecrübesi en önemli rolü oynamaktadır.

### *Kazıklarda Sinyal Eşleme Yöntemi ve Çakılabilirlik Analizi*

- Dizel çekicinin performansında kazığın ve zeminin direnci en önemli etkiyi üstlenir ve tahmin kısmında dikkate alınması gerekir.
- Son olarak zemin etüt sonuçları güvenilir olmalıdır. Deneyler standartlarında taviz verilmeden özen ile gerçekleştirilmelidir.

### **Teşekkür**

Bu araştırmada kullanılan tüm parametreler ve birimler analizi gerçekleştiren programlara dayalıdır. Yazarlar, bu yazının sunulmasına imkan verdikleri için Geogrup İnşaat Şirketi'nden Yüksek Müh. Orhan Esat İNANIR ve Yüksek Müh. Müge İNANIR'a, sahadaki çalışmalarındaki işbirliği ve yardımlarından ötürü Yüksek Müh. Emine ALHAS'a teşekkürü borç bilirler.

### **Kaynaklar**

- [1] ASTM D-5882-00, Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles, American Society for Testing and Materials, USA, 2000.
- [2] Chow, Y.K., Phoon, K.K., Chow, W.F. and Wong K.Y., Low Strain Integrity Testing of Piles: Three-Dimensional Effects, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, pp. 1057-1062, 2003.
- [3] TNO Building and Construction Research, Foundation Pile Diagnostic System, Sonic Integrity Testing User's Guide, The Netherlands, 1997.
- [4] Middendorp, P. and Verbeek, G.E.H., 30 Years of Experience with the Wave Equation Solution Based on the Method of Characteristics, In Proceedings of the GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, Atlanta, USA, 26 February-1 March 2006, eds. Don J. DeGroot, Jason T. DeJong and David FrostNick, 1-6. American Society of Civil Engineers, 2006.
- [5] Özüdoğru, T.Y., Determination of Pile Quality Using Low Strain Integrity Testing and Automatic Signal Matching, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [6] Chen, R. P., Wang, S. F., Chen, Y. M., Study of Pile Drivability With One Dimensional Wave Propagation Theory. Journal of Zhejiang University Science, 4 (6): 683-693, 2003.
- [7] Smith, E. A. L., Pile Driving Analysis by the Wave Equation, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 86, 35-61, 1960.
- [8] Taylan, Z. N., Verification of Pile Driving Prediction Using PDPWAVE, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.