Fore Kazık Uygulamalarında BIM Entegrasyonu ve Çift Yönlü Statik Yükleme Deneyleri ile Kapasite Kontrolü

BIM Integration in Bored Pile Applications and Capacity Control via Bi-Directional Static Load Tests

Pınar Gönenli[1], Arben Üstün[2], Önder Akçakal[3], Sarper Suözer[4], Mustafa Uzunselvi[5], Anıl Utlu[6], Semih Çuhadar[7], Ogan Sevim[8]

ÖZET

Bu çalışma, Suudi Arabistan'da hayata geçirilen bir karma ticari alan projesinin derin temel sistemlerinin tasarım, uygulama ve doğrulama süreçlerini kapsamaktadır. Kazıklar mercanlı kireçtaşı, marl ve ayrışmış kumtaşı tabakalarına üst yapıdan gelen yükler ve taşıma kapasitelerine göre farklı boylarda soketlenecek şekilde tasarlanmıştır. Bölgenin karmaşık jeolojik yapısı içerisinde yüksek düşey yüklerin güvenli bir şekilde taşıyıcı tabakalara aktarılması hassas uygulama takibi ve kapsamlı bir kalite kontrol programı ile sağlanabilmiştir. Bu doğrultuda geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek uygulanan üç boyutlu (3B) sayısal modelleme ve Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) süreçleri yürütülmüştür. BIM kullanımı, yalnızca çakışma analizlerinde değil, aynı zamanda imalat hızı ve toplam imalat hacminin dinamik takibinde de kritik bir rol oynamıştır. Uygulama aşamasında karşılaşılan zorluklar, özellikle bölge zeminindeki değişken tabakalaşmanın delgi ve beton döküm süreçleri üzerindeki etkileriyle birlikte tartışılmıştır. Çalışmanın teknik odak noktasını, sahada gerçekleştirilen çift yönlü statik kazık yükleme deneyleri (BDSLT) ile tasarım aşamasındaki teorik hesapların karşılaştırılması oluşturmaktadır. Tasarımda öngörülen birim sürtünme gerilmesi değerleri, yükleme deneyi sonuçlarından elde edilen verilerle geri-analiz yöntemleri kullanılarak kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular, sürtünme direncinin hesaplanan değerlerle olan korelasyonunu ortaya koymakta ve benzer projeler için tasarım parametrelerinin optimizasyonu konusunda önemli veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Kazık Temeller, BIM, Çift Yönlü Statik Kazık Yükleme Deneyi (BDSLT), 3B Modelleme.*

ABSTRACT

This study presents the design, execution, and verification of deep foundation systems for mixed used commercial center project in Saudi Arabia. Piles were designed to be socketed into coralline limestone, marl, and weathered sandstone layers based on superstructure loads and bearing capacities. Given the region's complex geology, safe transfer of high vertical loads was ensured through precise monitoring and a rigorous quality control program. Advanced 3D numerical modeling and Building Information Modeling (BIM) were implemented to transcend traditional methods. BIM played a critical role in clash detection and the dynamic tracking of production rates and volumes. Execution challenges, particularly the impact of variable soil stratification on drilling and concreting, are also discussed. The technical core of the study compares theoretical design calculations with on-site Bi-Directional Static Load Tests (BDSLT). Predicted unit skin friction values were validated against test results using back-analysis, demonstrating strong correlation and providing essential data for optimizing design parameters in similar projects.

Keywords: *Piled Foundations, BIM, Bi-Directional Static Load Test (BDSLT), 3D Modeling.*

[1] Teknik Ofis Mühendisi, ZETAŞ A.Ş, pinar.gonenli@zetas.com.tr (Sorumlu Yazar)
[2]Teknik Ofis Mühendisi, ZETAŞ A.Ş, arben.ustun@zetas.com.tr
[3] Tasarım Direktörü, ZETAŞ A.Ş, onder.akcakal@zetas.com.tr
[4] Proje Mühendisi, ZETAŞ A.Ş, sarper.suozer@zetas.com.tr
[5] Proje Müdürü, ZETAS AS Dubai Branch, mustafa.uzunselvi@zetas.com.tr
[6] Ülke Müdürü, ZETAS AS Dubai Branch, anıl.utlu@zetas.com.tr
[7] Ortadoğu Bölge Müdürü, ZETAS AS Dubai Branch, semih.cuhadar@zetas.com.tr
[8] Yönetim Kurulu Başkanı, ZETAŞ A.Ş, ogan.sevim@zetas.com.tr

1.GİRİŞ

Bu çalışma, Suudi Arabistan'da geliştirilen büyük ölçekli bir eğlence ve alışveriş merkezi projesi kapsamında gerçekleştirilen derin temel sistemlerinin tasarım ve uygulama süreçlerini ele almaktadır. Proje; otopark, akvaryum bölümlerinin yanı sıra toplam 42.900 m² büyüklüğünde eğlence, kültür ve ticari alanlardan oluşan karma kullanımlı yapıları kapsamaktadır.

Zetaş bu proje içinde derin temel işlerinin tasarımını ve uygulamasını yapan yüklenici olarak görev yapmıştır.Yapıların farklı yükleme koşullarını güvenli ve ekonomik bir şekilde karşılayabilmeleri için kazıklı temel sistemleri ayrı olarak tasarlanmış ve sahada uygulanmıştır.Tasarım ve uygulama aşamalarında BIM teknolojisi kullanılarak farklı alanlar arasında uyum ile yapısal bütünlük elde edilmiştir. Kazıkların taşıma kapasiteleri ve performanslarının kontrol edilmesi için iki yönlü statik yükleme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tasarım kriterleri ile karşılaştırılarak temel sistemlerinin uygunluğu değerlendirilmiştir.Bu çalışma büyük projelerde kazıklı temel tasarımlarının BIM destekli mühendislik yöntemleriyle saha testlerine entegrasyonuna dair örneklerin özetini sunmaktadır.

2. İLETİLEN ZEMİN PROFİLİ

2.1 Yapılan Araştırma Çalışmaları

Saha, karma kullanımlı bir eğlence kompleksini kapsamakta olup, geoteknik araştırmalar kara ve deniz tarafı için iki ayrı bölümde hâlinde yürütülmüştür. Tablo 1.'de yapılan arazi deneyleri verilmiştir.

Tablo 1. Saha araştırma çalışmalarının özeti

Çalışma türü	Kara tarafı	Deniz tarafı	Toplam
Sondaj kuyusu	36 ad. (20 – 43,5 m bgl)	22 ad. (deniz tabanından 20 – 40 m)	58
Piyezometre	4 ad.	—	4
Presiyometre deneyi	15 ad. (4 kuyuda)	17 ad. (8 kuyuda)	32
Permeabilite	49 ad. (düşen seviyeli)	17 ad. (sabit seviyeli, 7 kuyuda)	66
Koni penetrasyon (CPT)	7 ad.	—	7
Arazi CBR	2 ad.	—	2
MASW jeofizik profil	21 hat / 8.910 m	—	21 hat

Saha genelinde dolgu, üstte Kuvaterner yaşlı denizel/kıyı çökelleri, altında ise Hadrukh Formasyonu'na ait ayrışmış kireçtaşı–marn–kumtaşı ardalanmasından oluşmaktadır.

Saha genelinde jeolojik dolgu benzer bir karakter göstermesine rağmen, kara tarafı ile deniz tarafı mühendislik davranışı açısından belirgin farklılıklar sergilediği görülmüştür.Kara tarafında daha kalın bir zemin örtüsü, yer yer yumuşak ve gevşek seviyeler ile kaya birimlerinde nispeten daha iyi kalite gözlenirken, deniz tarafında zemin örtüsü daha ince ancak daha gevşek karakterde olup kaya birimleri daha düşük kalite ve daha yüksek değişkenlik göstermektedir.

Bu farklılıklar kazık tasarım sürecinde dikkate alınmış; kıyı bölgelerinde daha sığ kaya seviyeleri ve düşük kaya kalitesi, otopark bölgesinde ise daha kalın zemin örtüsü, yerel zayıf zonlar ve zemin iyileştirmelerinin olası etkileri tasarım yaklaşımına yansıtılmıştır. Tablo 2 'de bu alınan tasarım parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 2. Tasarımda kullanılan zemin ve kaya parametreleri

Birim / Litoloji	**ν'**	**γ_b**	**c'**	**ϕ'**	**UCS_i**	**E' (E_{mass})**	**E_s**
		(kN/m³)	**(kPa)**	**(°)**	**(MPa)**	**(MPa)**	**(MPa)**
Dolgu	0.3	20	0	33	-	-	30
Kum	0.3	18	0	33	-	-	22
Kumlu Kil	0.3	17	0	25	-	-	5
Killi Kum	0.3	17	0	29	-	-	6
Marn Taşı	0.2	20	16	34	2.0	100	-
Mercan Kireçtaşı	0.2	20	22	34	3.7	150	-
Tam Ayrışmış Kumtaşı	0.2	19	0	34	-	-	100
Çamurtaşı	0.2	20	86	34	3.0	140	-

Yapılan piyezometre ölçümlerinde yeraltı su seviyesi +1.336 m ile +1.602 m MSL arasında belirlenmiştir.

3. UYGULAMA ÖNCESİ KAZIK TESTLERİ (PTP) VE DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1 Çift Yönlü Statik Eksenel Basınç Yükleme Deneyi

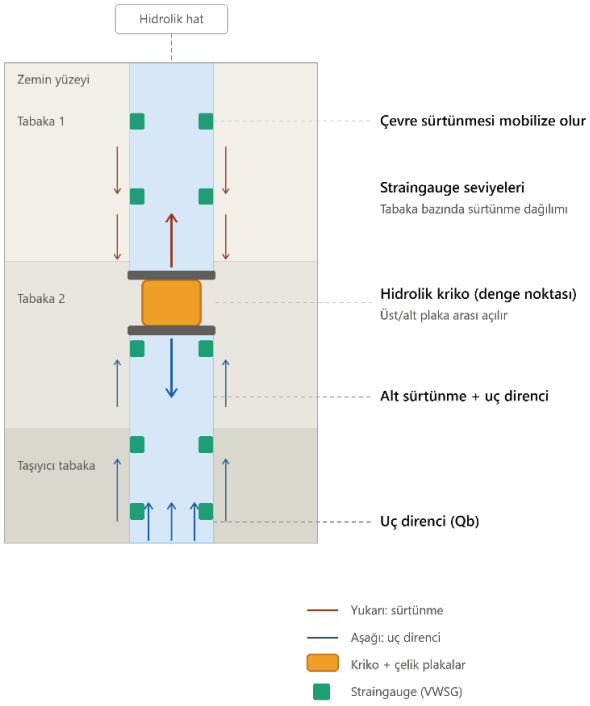
Çift yönlü statik eksenel basınç yükleme deneyi (BDSLT), kazıkların gerçek saha koşullarındaki yük taşıma davranışının belirlenmesinde kullanılan en güvenilir deney yöntemlerinden biridir.

Kazık içerisine yerleştirilen hidrolik yük hücresinin oluşturduğu çift yönlü yükleme sayesinde çevre sürtünmesi ve uç direnci ayrı ayrı analiz edilebilmekte, böylece kazığın taşıma mekanizması ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir. Bu özellik, yöntemin hem tasarım kabullerinin doğrulanmasında hem de kazık performansının gerçekçi bir şekilde ortaya konulmasında önemli avantajlar sağlamaktadır.

Proje kapsamında gerçekleştirilen BDSLT çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, kazık taşıma kapasitesinin doğrulanması ve tasarımda kullanılan zemin parametrelerinin sahadaki davranışla uyumunun değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

3.2. Çift Yönlü Statik Yükleme Testi Prosedürü

Denge noktasına yerleştirilen hücre, hidrolik basınçla genişleyerek üst yüzüyle çevre sürtünmesini, alt yüzüyle uç direncini mobilize eder; reaksiyon kütlesi gerekmez. Kademeli yükleme ve boşaltma sonrası elde edilen üst/alt eğrilerden eşdeğer tek yönlü eğri kurgulanır. Testin çalışma prensibi Şekil 1'de görsel olarak anlatılmaktadır.



Şekil 1. Çift yönlü kazık yükleme deneyi çalışma prensibi(*Claude AI desteği ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur).*

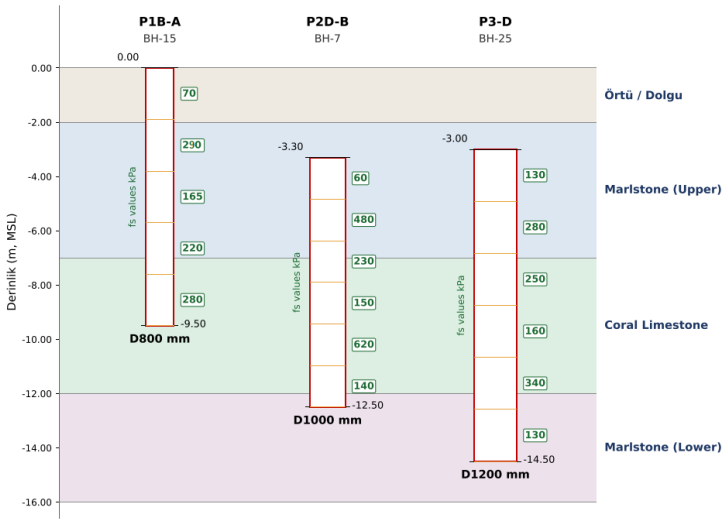
3.3 Uygulama öncesi BDSLT Sonuçları

Yükleme kademeleri, çalışma yükünün %5'lik artımlarıyla çalışma yükünün %150'sine kadar çıkarılmış; bir teste ait örnek olarak çift yönlü yük (kN), eşdeğer tek yönlü yük (ton) ve hidrolik basınç (kg/cm² ve bar) karşılıkları verilmektedir.

Testler sonucunda hesaplanan mobilize edilebilen çevre sürtünme değerleri Şekil 2.'de verilmektedir .

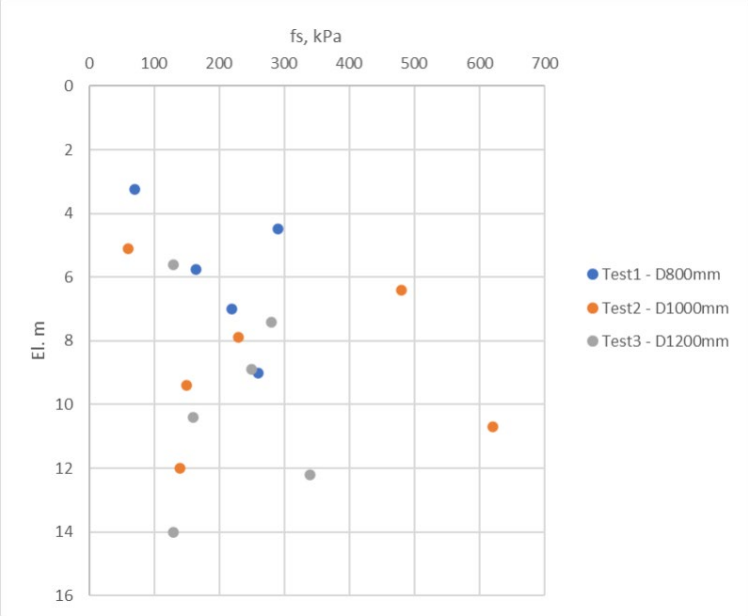
Tablo 3. Yükleme ve Yükleme Kademeleri

Kazık No	Çalışma Yükü (kN)	%150 Çift Yönlü Yük (kN)	Eşdeğer Tek Yönlü (ton)	Maks. Basınç (bar)
P2A-B-43, P2A-B-138	2.614	3.921	199.9	540.3
P2A-B-54, -159, -177, -211	2.685	4.028	205.3	555.0
P2A-B-181	2.658	3.987	203.3	549.4
P2B-B-58, -236, -335	3.049	4.574	233.2	630.2
P2C-B-03, P2C-B-67	3.708	5.562	283.6	641.5
P2C-B-257	3.678	5.517	281.3	636.3
P3B-128	4.308	6.462	329.5	745.3



Şekil 2 Derinliğe bağlı olarak BDSLT sonucundaki çevre sürtünme değerleri(*Claude AI desteği ile yazarlar tarafından oluşturulmuştur)*

Yapılan test sonucunda kazık çaplarına göre hesaplanan mobilize edilebilmiş çevre sürtünme değerleri dağılımı Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 3. Kazık çaplarına göre hesaplanan mobilize edilebilmiş çevre sürtünme değerleri dağılımı

4. KAZIK TASARIM AŞAMASI

Proje kapsamında, saha ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen zemin ve kaya parametreleri esas alınarak kazık tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ön tasarım aşamasında, birim çevre sürtünmesi değerlerinin belirlenmesinde her tabakalar için birbirinden farklı ampirik yaklaşımlar benimsenmiştir.

Zemin tabakalarında birim çevre sürtünmesi, SPT darbe sayılarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır (Tomlinson ve Woodward, 2015):

$$fs = 1.6 \times N_{60} + 6\ (kPa)$$

Kaya tabakalarında ise birim çevre sürtünmesi, tek eksenli basınç dayanımına (UCS) bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile değerlendirilmiştir (Kulhawy ve Phoon, 1993):

$$fs = 0.25 \times UCS^{0.5}(MPa)$$

Ön tasarımda kullanılan bu yaklaşımın doğrulanması, kazık kapasitelerinin ve çevre sürtünmesi değerlerinin gerçek saha koşullarında değerlendirilmesi amacıyla, BDSLT testi sonuçları ile karşılaştırılma yapılmıştır.

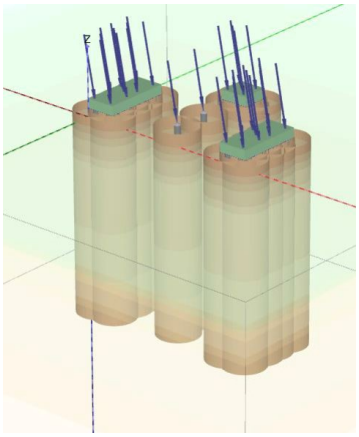
Test kazıklarının boyları 9,20 m ile 11,50 m arasında değişmektedir. Test kazıklarından yalnızca biri, kazık boyunun yaklaşık üçte biri kadar ayrışmış kumtaşı tabakası içerisine soketlenmiştir. Söz konusu tabakanın diğer birimlere kıyasla daha düşük taşıma kapasitesine sahip olması beklenmektedir. Bu nedenle uygulanan test yükleri esas olarak, UCS değerleri 1–10 MPa aralığında değişen üst marn taşı (marlstone) ve mercan kalkeri (coral limestone) tabakaları tarafından karşılanmıştır.

BDSLT değerlendirme raporlarından elde edilen çevre sürtünmesi değerleri, yukarıda verilen ampirik bağıntılar kullanılarak ayrıca hesaplanmış ve analitik hesap sonuçlarının test sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, tasarım parametrelerinin belirlenmesinde test sonuçları ile hesap sonuçları birlikte değerlendirilmiş ve aşağıdaki değerler esas alınmıştır:

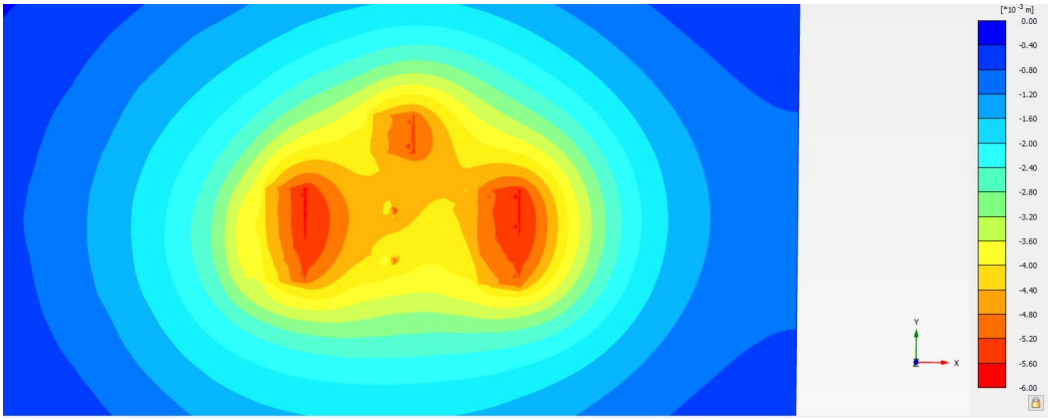
- Üst Marn ve Mercan Kireçtaşı Tabakaları için Birim Çevre Sürtünmesi: 290 kPa
- Ayrışmış Kumtaşı Tabakası için Birim Çevre Sürtünmesi: 130 kPa
- Alt Marn Tabakasındaki Birim Çevre Sürtünmesi: $f_s = 0{,}25 \times UCS^{0{,}5} = 0{,}25 \times 2{,}0^{0{,}5} \approx 350\,\text{kPa}$
- Üstte Bulunabilecek Kum/Kil Tabakalarındaki Birim Çevre Sürtünmesi: $f_s = h\gamma K_s \tan(0{,}9\varphi) \approx 10\,\text{kPa}$

Kıyıya yakın konumda elde edilen saha ve laboratuvar verileri, nispeten daha zayıf zemin karakteristiklerine işaret etmektedir. Bu nedenle ilgili bölgede kullanılan geoteknik tasarım parametreleri, mühendislik yaklaşımı doğrultusunda daha düşük ve konservatif değerler seçilmiştir. Plaxis 3D programında oturmalar hesaplanmıştır.

Kazık grubunun oturma davranışı Plaxis 3D analizleri ile değerlendirilmiştir. Analiz modeli, sunulan zemin parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Kazıklar, sonlu eleman modelinde zemin hacmi olarak tanımlanmış ve projede verilen koordinatlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Plaxis 3D modellemesi



Şekil 5. Oturma dağılımı

Ortalama oturma değeri yaklaşık 4-5 mm'dir. Hesaplanan oturma, proje için belirlenen 5 mm'lik izin verilebilir sınırın altında kalmakta olup, bu nedenle tasarım için kabul edilen oturma kriterini sağlamaktadır. Farklı oturma 1,70 mm, açısal dönme (distortion) ise 1/3500 olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, proje sahasında toplam 2.842 adet kazık imal edilmiş olup, farklı bölgelerde gözlenen zemin koşulları ve gerçekleştirilen kazık yükleme testlerinden elde edilen veriler esas alınarak kazık tasarımı optimize edilmiştir. Tasarım çalışmaları kapsamında hem taşıma gücü analizleri hem de oturma analizleri gerçekleştirilmiş, kazıkların nihai taşıma kapasiteleri ve servis yükleri altındaki performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kazık temellerinin proje gerekliliklerini karşılayacak şekilde güvenli ve ekonomik olarak tasarlandığı belirlenmiştir.

5. KAZIK İMALATI UYGULAMASI

Proje kapsamında fore kazık imalatları; aplikasyon, delgi operasyonu, donatı kafesi imalatı ve montajı, tremi borusu kullanılarak beton dökümü ve muhafaza borusunun çekilmesi aşamalarını içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm uygulamalar, onaylı proje

dokümanları ile teknik şartname ve standartlara uygun olarak yürütülmüştür. İmalatlar sırasında, ağır ekipmanların güvenli çalışmasını sağlayacak özelliklerde, yeterli taşıma kapasitesine sahip, sıkıştırılmış, kuru ve stabil bir çalışma platformu kullanılmıştır.



Şekil 6. Hidrolik rotary fore kazık makinesi ile delgi çalışması

Donatı kafesleri, saha içerisinde belirlenen demir bağlama alanında, onaylı projesine uygun olarak imal edilmiştir.

Hazırlanan donatı kafesleri, kazık imalat noktasına taşınma sırasında herhangi bir deformasyona maruz kalmayacak düzeyde yeterli rijitliğe sahip olmalıdır. Taşıma ve kaldırma işlemleri, servis vinçleri kullanılarak; kafes uzunluğuna uygun sayıda ve uygun konumlarda belirlenen kaldırma noktalarından, yeterli kapasitede kaldırma ekipmanları ve kaldırma kirişi yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Kafesin kuyu başına taşınması sırasında vinç ve delgi makinesi koordinasyonu

Betonlama öncesinde kuyu temizliği ve bentonit kontrolleri yapılarak şartname kriterlerinin sağlandığı doğrulanmış, ardından donatı kafesi kuyu merkezine yerleştirilip proje kotunda askıya alınmıştır. Su veya destek sıvısı bulunan kuyularda betonlama tremi yöntemiyle gerçekleştirilmiş, ilk betonun destek sıvısıyla karışmasını önlemek amacıyla ayırıcı tıpa kullanılarak betonun tabandan yukarıya kontrollü şekilde yerleşmesi sağlanmıştır.

6. UYGULAMANIN BIM MODELİNE ENTEGRASYONU VE MODEL ÜZERİNDEN TAKİBİNİN SAĞLANMASI

Bu proje kapsamında saha uygulamalarının BIM ortamına entegre edilmesi ve imalat süreçlerinin model tabanlı olarak takip edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, temel altı fore kazıkların üç boyutlu modellenmesinde Autodesk Revit ve Dynamo yazılımlarından yararlanılmıştır.

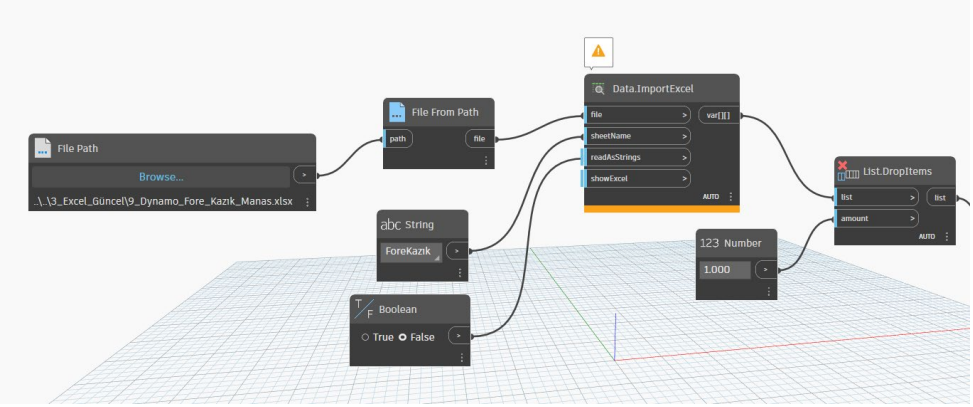
Modelleme çalışmalarının ilk aşamasında, kazık elemanlarına ait geometrik ve teknik özellikleri içeren parametrik bir Revit Family oluşturulmuştur. Revit ortamındaki family yapıları, benzer özelliklere sahip yapı elemanlarının standartlaştırılmış ve tekrar kullanılabilir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede kazıklara ait çap, uzunluk, kot ve eleman kodu gibi bilgiler parametrik olarak tanımlanmış, model içerisindeki veri yönetimi daha etkin ve sürdürülebilir hale getirilmiştir (Autodesk Inc., 2024).

Çok sayıda kazık içeren projelerde her bir elemanın manuel olarak modellenmesi hem zaman kaybına hem de hata riskinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle modelleme sürecinin hızlandırılması ve standardize edilmesi amacıyla Dynamo tabanlı bir otomasyon altyapısı geliştirilmiştir. Dynamo, Revit ile entegre çalışan görsel programlama platformu olup tekrarlayan işlemlerin otomatikleştirilmesine ve farklı veri kaynaklarının BIM modeline aktarılmasına olanak sağlamaktadır (Autodesk Inc., 2024).

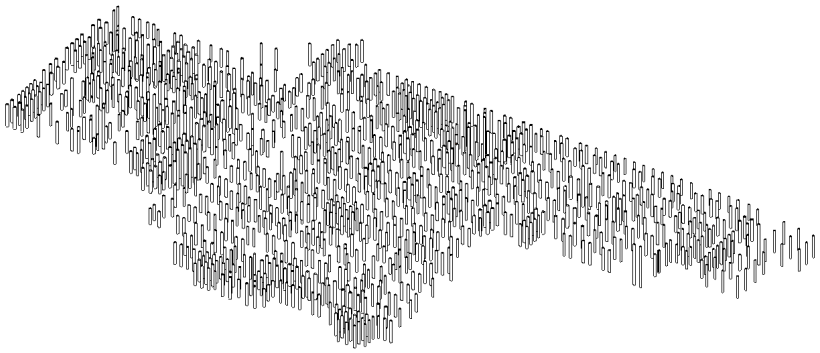
Çalışma kapsamında hazırlanan Excel veri tabloları Dynamo iş akışına aktarılmış, oluşturulan algoritmalar yardımıyla kazıkların koordinatları, boyutları ve diğer parametrik bilgileri otomatik olarak BIM modeline işlenmiştir. Böylece yüzlerce kazığın kısa sürede ve tutarlı bir şekilde modellenmesi mümkün olmuş, modelleme süresinde önemli ölçüde verimlilik sağlanmıştır.

Sürecin ilerleyen aşamalarında yalnızca görsel programlama tabanlı çözümlerle yetinilmemiş, Dynamo içerisinde Python destekli uygulamalar da geliştirilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde farklı proje gereksinimlerine uyum sağlayabilen, esnek ve sürdürülebilir bir modelleme altyapısı oluşturulmuştur. Otomasyon araçlarının kullanılması, hem modelleme süresini azaltmış hem de veri girişinden kaynaklanabilecek hataların en aza indirilmesine katkı sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar, BIM teknolojilerinin parametrik modelleme ve otomasyon araçlarıyla birlikte kullanılmasının, büyük ölçekli geoteknik ve altyapı projelerinde verimliliği artırdığını, veri yönetimini kolaylaştırdığını ve proje süreçlerinin daha etkin şekilde takip edilmesine olanak sağladığını göstermektedir.



Şekil 8. Dynamo Ağı Örneği



Şekil 9. Revit 3D Kazık Modellemesi

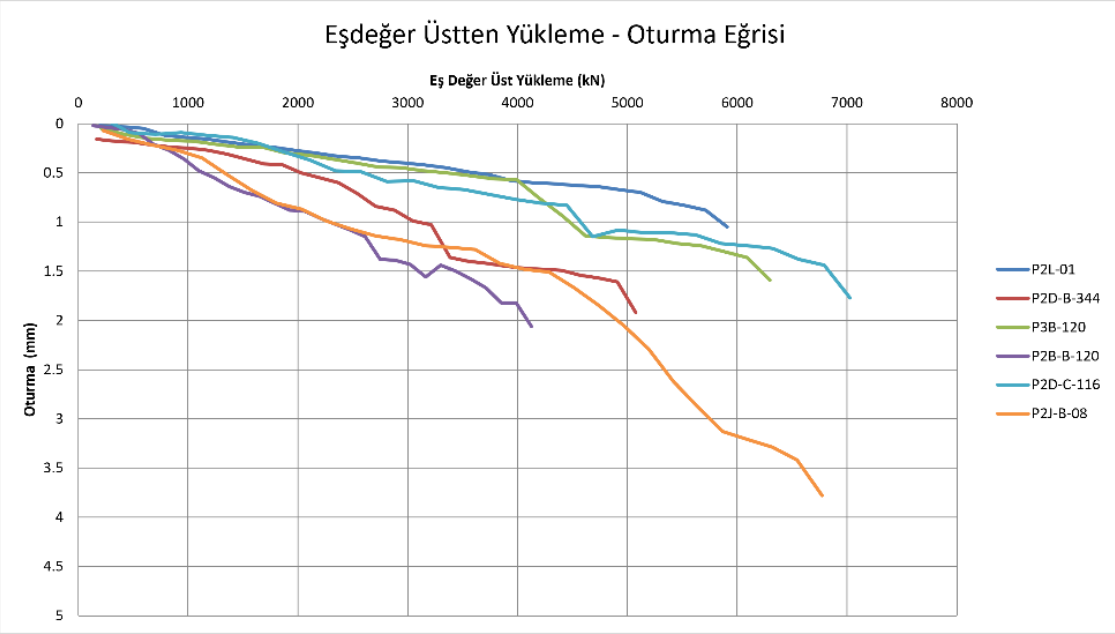
7. KALİTE KONTROL DENEYLERİ

Kazık imalatlarının tamamlanmasının ardından, hem üretim kalitesinin hem de tasarımda kabul edilen parametrelerin doğrulanması amacıyla kalite kontrol çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kazık bütünlüğünün değerlendirilmesi için PIT ve CSL deneyleri, taşıma kapasitesinin doğrulanması için ise dinamik kazık yükleme deneyleri ile çift yönlü statik yükleme deneyleri (BDSLT) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kazıkların yapısal bütünlüğünü ve taşıma performansını ortaya koyarken, tasarım parametrelerinin saha koşullarıyla uyumlu olduğunu göstermiştir. Gerçekleştirilen testlere ilişkin bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

- **Kazık Süreklilik Testi (PIT)** *(ASTM D5882 - Kazık Bütünlük Testi için Standart Deney Yöntemi)*: Tüm kazıklarda uygulanarak kazık sürekliliği ile olası imalat kusurları kontrol edilmiştir.
- **Ultrasonik Çapraz Kuyu Testi (CSL)** *(ASTM D6760 - Ultrasonik Çapraz Kuyu Yöntemi ile Beton Derin Temellerin Bütünlük Testi için Standart Deney Yöntemi)*: Çapı **1000 mm ve üzerindeki kazıkların %10'unda** uygulanarak kazık iç bütünlüğü ve beton kalitesi değerlendirilmiştir.

- **Çift Yönlü Statik Eksenel Basınç Yükleme Deneyi (BDSLT)** *(ASTM D8169/D8169M-18 - Çift Yönlü Statik Eksenel Basınç Yükü Altındaki Derin Temeller için Standart Deney Yöntemi)*: Kazık taşıma kapasitesinin doğrulanması amacıyla kazıkların **%1'inde** gerçekleştirilmiştir.
- **Dinamik Kazık Yükleme Deneyi (HSDT)** *(ASTM D4945 - Kazıklarda Dinamik Deney için Standart Deney Yöntemi)*: Kazıkların **%5'inde** uygulanarak taşıma kapasitesi ve performans özellikleri değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen dinamik kazık yükleme deneyi değerlendirmeleri neticesinde, test edilen kazığın basınç yükleri altında talep edilen yük kapasitesini güvenle karşıladığı, meydana gelen oturmaların yukarıdaki örneği verilen grafikte belirtilen limit değerleri aşmadığı ve proje teknik şartnamesi kriterlerine uygun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. BDSLT sonucu Yük-Oturma Grafiği

Çift yönlü statik yükleme deneyi gerçekleştirilen tüm test kazıkları için hesaplanan oturma değerlerinin, hem çalışma yükü (%100 SWL) hem de test yükü (%150 SWL) seviyelerinde ilgili izin verilebilir sınırların altında kaldığı belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler, tüm test kazıklarının güvenli oturma kriterlerini sağladığını ve kabul kriterlerine uygun performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, rapor kapsamında sunulan yük-oturma grafiklerinde de açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak, çift yönlü statik yükleme deneylerinden elde edilen verilerin yeterli ve kabul edilebilir olduğu, test edilen tüm kazıkların tasarım kriterlerini sağladığı değerlendirilmiştir.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada Suudi Arabistan'da inşa edilen bir karma ticari alan projesi kapsamında inşa edilmiş fore kazıklara yönelik proje aşamaları ve saha deneyleri özetlenmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Uygulama öncesinde gerçekleştirilen çift yönlü statik yükleme deneyleri (BDSLT) ile tasarımda kullanılan taşıma gücü parametreleri doğrulanmıştır.
- Kazık tasarımında kullanılan geoteknik parametreler, saha deneyleri ve geri analiz sonuçları doğrultusunda optimize edilmiştir. Plaxis 3D analizleri sonucunda hesaplanan oturmaların proje kriterlerini sağladığı belirlenmiştir.
- BIM, Revit ve Dynamo entegrasyonu sayesinde kazıkların parametrik modellenmesi ve imalat takibi etkin şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Gerçekleştirilen PIT, CSL, HSDT ve BDSLT kalite kontrol deneyleri, kazıkların imalat bütünlüğünü ve taşıma kapasitesini doğrulamıştır.

Sonuç olarak, tasarım doğrulama çalışmaları, geoteknik analizler, BIM tabanlı dijital süreç yönetimi ve kapsamlı kalite kontrol deneyleri sayesinde fore kazık sistemi başarıyla uygulanabilmiştir.

REFERANSLAR

ASTM D4945. (2023). *Derin Temellerde Dinamik Deney İçin Standart Deney Yöntemi*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D5882. (2021). *Derin Temellerde Bütünlük Testi İçin Standart Deney Yöntemi*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D6760. (2022). *Beton Derin Temellerde Ultrasonik Çapraz Kuyu Yön. ile Bütünlük Testi İçin Standart Deney Yöntemi*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D8169/D8169M-18. (2018). *Çift Yönlü Statik Eksenel Basınç Yükü Altındaki Derin Temeller İçin Standart Deney Yöntemi*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Autodesk Inc. (2024). *Autodesk Revit Kullanım Kılavuzu*. Autodesk, San Rafael, CA

Autodesk Inc. (2024). *Revit için Dynamo: Görsel Prog. Kılav.*. Autodesk, San Rafael, CA

Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S. ve Swolfs, W.M. (2024). *PLAXIS 3D Referans El Kitabı*. Bentley Systems, Delft, Hollanda.

Kulhawy, F.H. ve Phoon, K.K. (1993). "Kil Zemin ve Kaya Ortamında Fore Kazıkların Çevre Sürtünme Direnci", *Derin Temellerin Tasarımı ve Performansı: Zemin ve Yumuşak Kayada Kazıklar ve Ayak Temelleri*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 38, s. 172-183.

Tomlinson, M.J. ve Woodward, J. (2015). *Kazik Tasa Rimi ve Yapım Gunamalar* (6. Baskı). CRC Press, Boca Raton, Florida.