

JET GROUT KOLONLARIN ZEMİN ISLAHINDA KULLANIMI VE KALİTE KONTROL YÖNTEMLERİ – BİR VAKA ANALİZİ

USE OF JET GROUT COLUMNS AS A SOIL IMPROVEMENT TECHNIQUE AND QUALITY CONTROL TESTS – A CASE STUDY

**Berkay KOÇAK¹ H. Turan DURGUNOĞLU²
Fatih KULAÇ³ Numan VELİOĞLU⁴**

ABSTRACT

Waterfront City Center Shopping Mall is one of the most important shopping mall project in Dbayeh Marina district, Beirut, Lebanon. As a soil improvement system, jet grouting technique has been utilized and various quality control tests were carried out to satisfy the project criteria. During the design and calculation stage, three dimensional finite element software was used to check the settlements and liquefaction analyses were done separately. Within the scope of quality control tests, 3 zone and 14 uniaxial column loading tests were done. In addition to this 18 pieces of edge coring on 9 columns and 155 pieces of sample on 38 columns were done and recovered to check the diameter and elasticity modulus with allowable sectional capacity. The results of these tests were involved in the back calculation using three dimensional FEM software and the performance of jet grout improvement technique has been proved using in-situ tests and calculations.

Keywords: Jet grout, quality control, zone loading test, Beirut, 3D FEM, back calculation

ÖZET

Lübnan, Beyrut, Dbayeh Marina bölgesinin en önemli alışveriş merkezlerinden biri olan “Waterfront City Center Shopping Mall” projesinin zemin iyileştirmesinde jet grout tekniği kullanılmış ve çeşitli kalite kontrol testleri yapılmıştır. Dizayn ve geri hesap aşamasında üç boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılmış, sıvılaşma analizleri ayrı olarak gerçekleştirilmiştir. Kalite kontrol testleri kapsamında, 3 adet alan yükleme testi, 14 adet adet tekil kolon yükleme testi, 9 adet kolon üzerinden alınan 18 adet köşe karot, 38 adet kolon üzerinden alınan 155 numune üzerinde elastisite modülü ve kesit kapasitesinin tayinine yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerin sonucu, üç boyutlu geri hesap analizlerinde kullanılmış ve jet grout ıslah tekniğinin performansı hem fiziki yollar ile hem de çeşitli hesap metotları ile ispat edilmiştir.

Anahtar Kelime: Jet grout, kalite kontrol, alan yükleme testi, Beyrut, 3B FEM, geri hesap

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, berkay.kocak@zetas.com.tr

² Prof. Dr., durgunoglut@zetas.com.tr

³ İnşaat Yüksek Mühendisi, kulacfatih@zetas.com.tr

⁴ İnşaat Yüksek Mühendisi, numan.velioglu@zetas.com.tr

1. GİRİŞ

Geçirdiği iç savaş sonrası yeniden yapılanmaya giden Lübnan, Beyrut’ da “Waterfront City Center Shopping Mall” projesi kapsamında, ikisi bodrum olmak üzere toplam dört kata ve 46100 m² kapalı alana sahip olacak bir alışveriş merkezi inşa edilmesi düşünülmektedir. Yapının bodrum üzerindeki katlarında çeşitli mağazalara yer verilmesi planlanırken; açık teras ve çatı kısmında sinema ve restoran gibi faaliyetler yer bulacaktır. Proje genel lokasyonu Şekil 1’ de gösterilmiştir.



Şekil 1. Proje Lokasyonu

2. PROJEYE İLİŞKİN GENEL BİLGİLER

Proje, “Base Scheme”, “Option 1” ve “Option 2” olarak adlandırılan 2 farklı arsa ve arsaların arasından geçen mevcut bir yol üzerine oturmaktadır. Yapı inşaatına “Base Scheme” lokasyonundan başlanması düşünülmekte ve sırası ile “Option 1” ve “Option 2” kısımlarının tamamlanması planlanmaktadır. Projeye ilişkin farklı kısımlar Şekil 2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. Projeye İlişkin Farklı Kısımlar

Yapının oturduğu saha, çevresindeki yollardan 6.0-9.0m daha aşağıda olmakta ve saha genel kotları +0.2m ile +1.5m arasında değişmektedir. Yapı temelinin -0.5m’ e oturtulması

düşünülmekte ve bu kapsamda 0.7m-2.0m arasında değişken derinlikte kazı yapılması öngörülmektedir. Bina giriş seviyesi ise çevre yollarla aynı seviyede (yaklaşık +9.0 kotu) olacak şekilde planlanmıştır. Bu doğrultuda bodrum katları, mevcut arazi kısmi olarak kazıldıktan sonra inşa edilecek ve bodrum katları ile mevcut çevre yol arasındaki kısım geri doldurulacaktır.

2.1. Zemin Yapısına İlişkin Bilgiler

Yapı oturma alanı, genel zemin yapısı itibari ile deniz dolgu sahasıdır. 1980'li yılların ortasında dalgakıran yapısı içerisinde kalan tüm Waterfront Marina sahası yaklaşık +1.0 kotuna kadar doldurulmuş ve doldurulan zemin üzerinde daha önceden vibro/dinamik kompaksiyon gibi çeşitli zemin ıslah teknikleri uygulanmıştır. Sahanın 1980' lerde ve günümüzde alınmış hava/uydu fotoğrafları Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Sahanın 1980' lerdeki ve Günümüzdeki Durumu

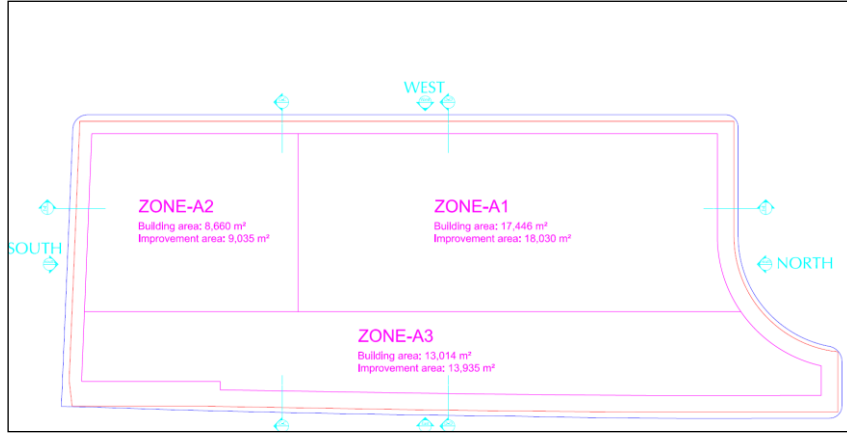
Bu kapsamda “Base Scheme” olarak adlandırılan bölgede, daha önce vibro/dinamik kompaksiyon uygulanmış, sahanın geri kalan “Option 1 & 2” kısımlarında ise herhangi bir zemin iyileştirme tekniği uygulanmamıştır. Sahada daha önceden uygulanan kısmi iyileştirmeler Şekil 4' de gösterilmiştir.



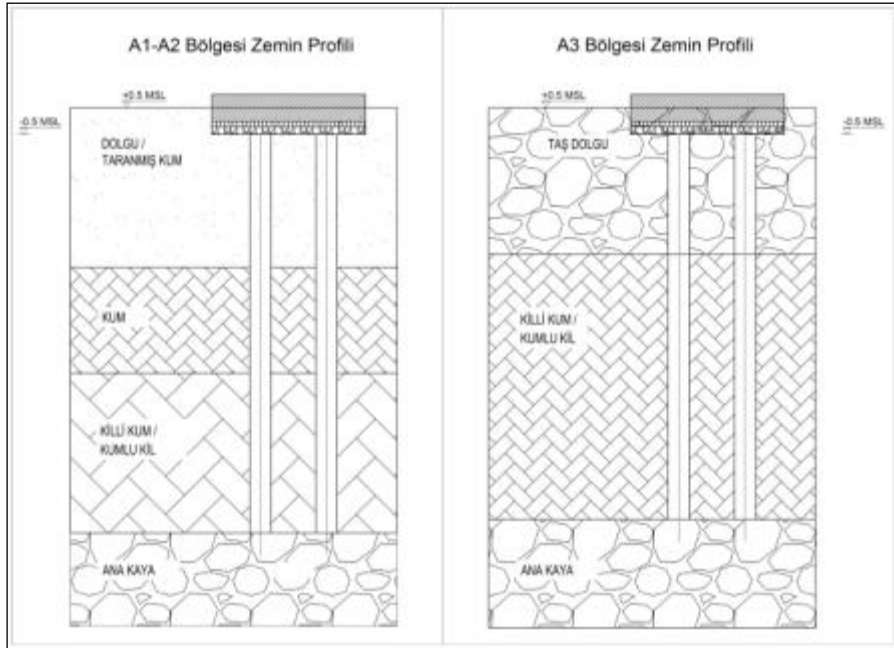
Şekil 4. Sahada Daha Önceden Uygulanan İyileştirmeler

Genel yapısı itibari ile sahanın batı kısmındaki zemin profili yüzeyden itibaren, 0.0 m-6.0 m arası gevşek/sıkı gri kumdan oluşan geri dolgu malzemesi, 6.0 m-10.0 m arası açık kahve gevşek/sıkı kum, 10.0 m-15.0 m arası ise yumuşak/orta katı kumlu siltli kil tabakası ve altında Marl/Kireçtaşı anakaya tabakası şeklindedir. Sahanın doğusunda ise zemin profili yüzeyden itibaren, 0.0m-5.6m kumlu ve iri bloklardan oluşan dolgu malzemesi, 5.6m-15.5m arası killi kum / kumlu kil tabakası ve altında Marl/Kireçtaşı kaya tabakası şeklindedir (Turba, 2012). Sahada daha önce uygulanan zemin ıslah tekniklerine ve zemin

sıklığına bağlı olarak, inşaat alanı zemin profili açısından A1, A2 ve A3 bölgelerine ayrılmıştır. A1 ve A2 sahanın batı kısmını temsil ederken, A3 bölgesi genel olarak sahanın doğu bölgesini temsil etmektedir. Yeraltı su seviyesi ise saha genelinde yüzeyden itibaren yaklaşık olarak 0.50m aşağıdadır (+0.50m kotundadır). A1, A2 ve A3 bölgelerinin sahadaki yerleşimleri ve kesitleri Şekil 5 ve Şekil 6’ da verilmiştir. İdealize zemin profilleri ve zemin mekanik özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2’ de özetlenmiştir.



Şekil 5. Zemin Profiline Göre Gruplandırılan Bölgeler



Şekil 6. Sahada Gözlemlenen Farklı Zemin Gruplarına İlişkin Kesitler

Tablo 1. A1/A2 Bölgesi İdealize Zemin Profili

| Tabaka No | Tabaka İsmi | Tabaka Kalınlığı (m) | Düzeltilmiş SPT-N Sayısı | Es (kPa) |
|-----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-------------|
| 1 | Kum Dolgu / Taranmış Kum | 6.5 | 15 | 15000/19000 |
| 2 | Kum | 3.5 | 27 | 20000/20750 |
| 3 | Killi Kum / Kumlu Kil | 6.0 | 25 | 32000 |

Tablo 2. A3 Bölgesi İdealize Zemin Profili

| Tabaka No | Tabaka İsmi | Tabaka Kalınlığı (m) | Düzeltilmiş SPT-N Sayısı | Es (kPa) |
|-----------|-------------|----------------------|--------------------------|----------|
| 1 | Taş Dolgu | 5.6 | >50 | 75000 |
| 2 | Kil/Kum | 6.0 | 25 | 32000 |
| 3 | Kum | 4.0 | 20 | 17500 |

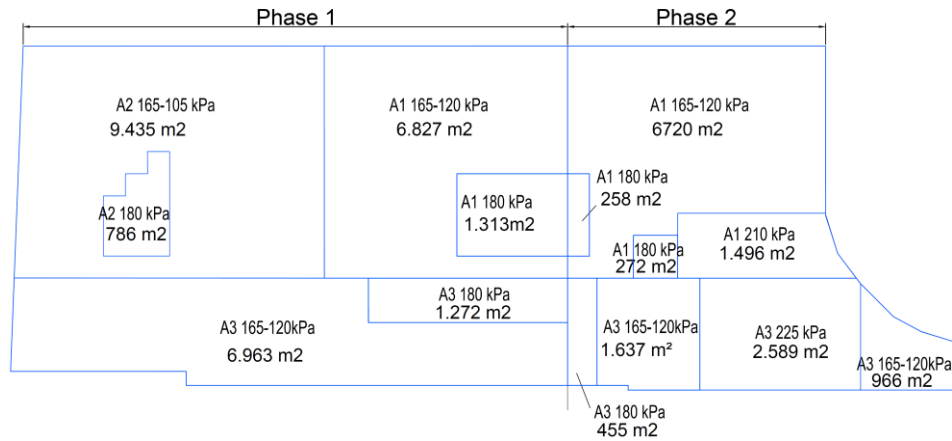
2.2. Proje Kriterleri ve Zemin İyileştirme Metodunun Seçimi

İhale aşamasında, radye performans kriterleri gereğince yapı oturmalarına işveren ve müşavir firma tarafından bazı kısıtlamalar getirilmiştir (Laceco ve MAF, 2013). Toplam oturma 40mm, farklı oturma 2L/1000 (2x kolon arasındaki mesafe /1000 =16.8mm) ile ve düşey yatak katsayısı 500ton/m³ ile sınırlandırılmıştır. Bu kapsamda, sıvılaşma analizleri için de maksimum yatay ivme oranının (a_{max}/g) =0.25, deprem magnitudunun 7.0 olarak kullanılması müşavir firma tarafından önerilmiştir. Sahadaki sıvılaşma potansiyeli ile sıkı performans limitleri dikkate alındığında, bu kapsam için uygun ve ekonomik metot olan jet grouting tekniğinin kullanılmasında karar kılınmıştır. Bu bağlamda uygulama süreci, dizayn, imalat öncesi, imalat süresince kalite kontrol, imalat sonrası olmak üzere farklı etaplara ayrılmıştır.

3. DİZAYN VE İMALAT SÜRECİ

3.1. Dizayn Aşaması ve İmalat Öncesi Deneme Kolonlarının Teşkili

Dizayn sürecinde saha, üst yapıdan gelen temel taban gerilmeleri ve A1, A2, A3 olarak adlandırılan farklı zemin bölgeleri dikkate alınarak 14 farklı bölüme ayrılmıştır. İlgili bölgelerin mevcut yerleşimleri Şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Farklı Zemin Profilleri ve Taban Gerilmelerine Göre Gruplandırma

Her bir bölge için, zemin profilleri idealize edilmiş, sıvılaşma potansiyelleri incelenmiş ve proje kriterlerini de dikkate alarak 60-70cm çapında 1.9m~2.3m arasında değişen ara mesafeler ile jet grout kolonları yerleştirilmiştir. Jetgrout elastisite modulleri kumlu tabakalarda ortalama 1000 MPa, killi tabakalarda ise ortalama 500 MPa olarak öngörülmüştür. Kesit kapasitesinin ise minimum olarak 2.5 MPa dayanımı sağlaması gerektiği düşünülmüştür. Bu kapsamda saha genelinde derinliği anakaya tabakasına kadar ulaşan 8278 adet jet grout kolonunun uygulaması planlanmıştır.

Oturma analizleri üç boyutlu sonlu elemanlar programı olan Plaxis 3D kullanılarak analiz edilmiştir. Plaxis 3D' ile gerçekleştirilen üç boyutlu analizin örnek çıktısı Şekil 8' de verilmiştir.



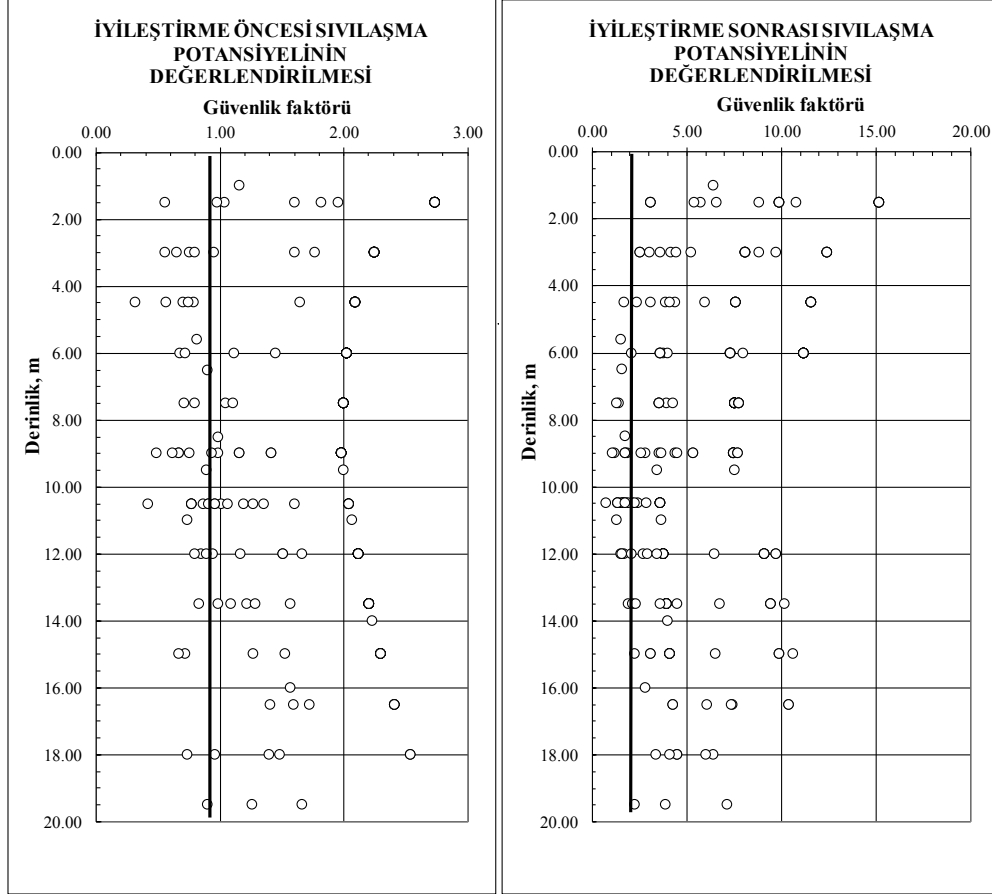
Şekil 8. Üç Boyutlu Analiz Sonucunda Düşey Deplasmanlar

Bu bağlamda, minimum oturma 27mm, maksimum oturma 35mm, maksimum farklı oturma ise 7mm olarak hesaplanmıştır. İki metot ile elde edilen oturma değerleri Tablo 3' de özetlenmiştir.

Tablo 3. Farklı Yöntemler ile Hesap Edilen Oturma Miktarlarının Sonuçları

| Bölüm | Kısım | Ortalama Yükler (kPa) | Basitleştirilmiş Metot ile | 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar ile | | |
|-------------|------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | | Oturma Değeri (mm) | Min. Oturma Değerleri (mm) | Maks. Oturma Değerleri (mm) | Farklı Oturma Değerleri (mm) |
| Base Scheme | A2-180 | 180 | 32 | 26 | 31 | 5 |
| | A2 165-105 | 140 | 32 | 23 | 27 | 4 |
| | A1 165-120 | 150 | 30 | 24 | 27 | 3 |
| | A1 180 | 180 | 32 | 27 | 30 | 3 |
| | A3 165-120 | 150 | 28 | 23 | 29 | 6 |
| | A3 180 | 180 | 30 | 27 | 29 | 2 |
| Option 1 | A1 165-120 | 150 | 30 | 23 | 29 | 6 |
| | A1 180 | 180 | 32 | 25 | 30 | 5 |
| | A1 210 | 210 | 32 | 28 | 35 | 7 |
| | A3 165-120 | 150 | 28 | 24 | 27 | 3 |
| | A3 180 | 180 | 30 | 25 | 30 | 5 |
| | A3 225 | 225 | 33 | 30 | 36 | 6 |

Youd ve Idriss (1997) tarafından tariflenen yöntemler ile sahadaki iyileştirme öncesi ve sonrası sıvılaşma potansiyelleri tahkik edilmiş ve proje kriterlerinde bahsedildiği üzere iyileştirme sonrasında sıvılaşma potansiyeline karşı güvenlik katsayısının saha genelinde 1.3 kat sayısından büyük olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 9’ da özetlenmiştir.



Şekil 9. İyileştirme Öncesi ve Sonrası Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

İmalat safhasına geçilmeden önce, tasarım aşamasında öngörülen çap, elastisite modülü ve kesit kapasitesinin tutturulabilmesi amacı ile, seçilen farklı parametrelerle dört adet deneme kolonu imal edilmiştir. Deneme kolonlarında süreklilik testi teşkil edildikten sonra, merkezden 10cm uzakta olacak şekilde karotlar alınmış ve her karot üzerinde seçilen 4 farklı bölgede elastisite modülü ile kesit kapasitesinin belirlenmesine yönelik testler yapılmıştır. Karot alınımından sonra, kolonların etrafı 3.0-4.0m açılarak görsel çap kontrolü yapılmış ve tekrar geri dolgu yapıldıktan sonra, çap kontrolünün sağlanması amacı ile kolon merkezinden 20cm uzakta olacak şekilde 6.0m uzunluğunda karotlar alınmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, 425bar, 2.2 nozzle çapı, 450kg/m³ dozunda çimento ve 63cm/dak çekme hızı ile imalata geçme kararı alınmıştır.

3.2. İmalat Safhası ve Kalite Kontrol Testleri

İmalat esnasında kalite kontrolün sağlanması ve uygulama performansının değerlendirilmesi amacı ile, imalat süresince “recorder” sistemi kullanılarak imalat kayıt altına alınmıştır. Kolonlar üzerinde 14 adet tekil kolon yükleme testi, 3 adet alan yükleme testi yapılmıştır. 38 adet kolondan alınan 155 adet karot numunesi üzerinde tek eksenli basınç testi ve elastisite modülünün tayini, 9 kolondan alınan çift taraflı tam boy köşe karotları ile çap kontrolü gibi testler gerçekleştirilmiştir (bknz. Şekil 10).



Şekil 10. Kalite Kontrol Testleri: Merkez ve Köşe Karotlar

Gerçekleştirilen 14 adet tekil kolon yükleme testinin, ikisi ölü ağırlıkla %100 servis yüküne kadar (66ton) yüklenirken, geri kalan 12 adet test ankrajlı reaksiyon sistemi kullanılarak %150 servis yüküne kadar test edilmiştir (99~109ton). Bu bağlamda testlerden elde edilen oturma değerlerinin 1.6-12.2mm arasında değiştiği görülmüştür. Yapılan testlere ilişkin fotoğraflar Şekil 11’ de verilmiştir.



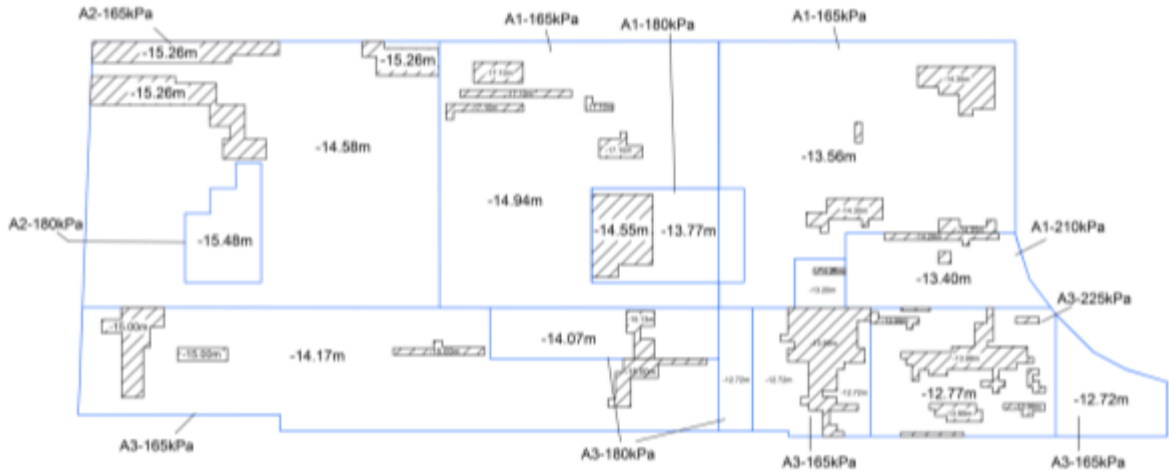
Şekil 11. Ankrajlı ve Ölü Yük ile Teşkil Edilen Jet Grout Kolon Yükleme Testleri

Alan yükleme testleri ise oldukça büyük bir alanı kapsayacak şekilde boyutlandırılmış ve toplamda 9 adet kolonunun üzerine gelecek şekilde 6.9x6.9m boyutlardaki bir alanın yükleneceği öngörülerek tasarlanmıştır. Bu kapsamda yapılan üç testte, maksimum servis yükünün %120'sine yükleme gerçekleştirilmiş (900~1000ton arasında değişken yüke kadar), yükleme sırasında mevcut yük için gerekli reaksiyon kolon üzerine yerleştirilen 60cm kalınlığındaki beton plağın içinden geçen 14 adet ankraj ile sağlanmıştır (bknz. Şekil 12). İmal edilen ankrajların 5m'si serbest boy, 9m'si kök boyu, toplamda 14m'si kaya içerisinde kalacak şekilde boyutlandırılmıştır. Bu sayede uygulanan yük için gerekli reaksiyon, derinlerdeki kaya tabakalarına aktararak oluşturulmuştur. Oturmaların izlenmesi amacı ile 15m uzunluğunda referans kirişler kullanılmış, referans kirişleri ısıya karşı izole edilmiş ve 8 adet ölçüm saati ile (4 adedi beton plak ortasında, 4 adedi köşede) deformasyonlar kayıt altına alınmıştır. Sonuç olarak maksimum yük altında plak ortasında ortalama 4.7-5.5mm arasında, plak dışında ise ortalama 0.6-1.3mm arasında oturma değerleri elde edilmiştir (Zetas Apex, 2014).



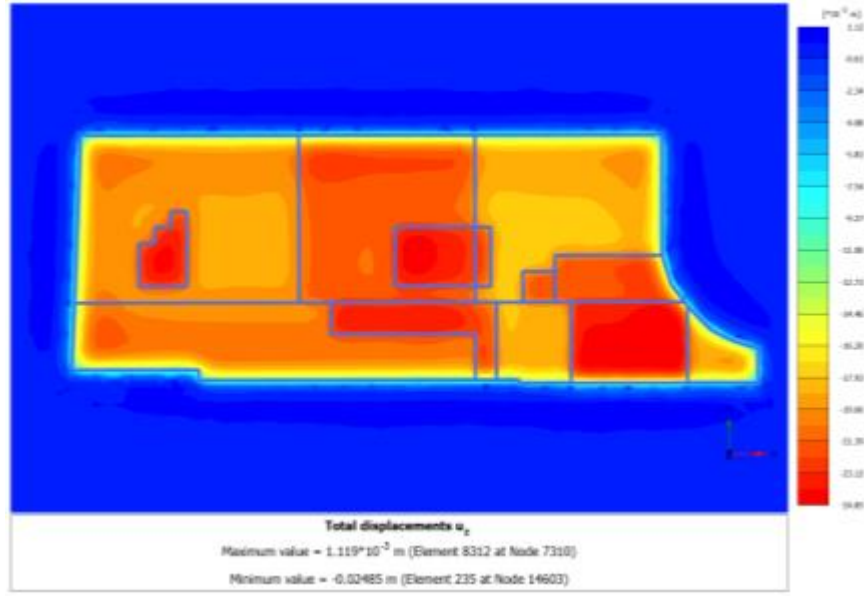
Şekil 12. Alan Yükleme Test Sistemi

Uygulama sonrası, test edilen 155 adet karot numunenin ve performansın değerlendirilmesi amacı ile Plaxis 3D programı ile geri hesap yapılmıştır. “Recorder” kayıt cihazı ile elde edilen kolon derinlikleri, kaya kotlarının belirlenmesinde kullanılmış ve kaya derinlikleri mikro bölgeler bazında Plaxis 3D programına girilmiştir (bkz Şekil 13).



Şekil 13. “Recorder” Cihazından Elde Edilen Sonuçlara Göre Sıkışabilir Tabaka Derinliklerinin Mikro Bölgeleştirilmesi

Karot sonuçlarından elde edilen elastisite modülü değerleri, kil ve kum olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmış ve farklı kategoriler için ortalama elastisite modülü ile standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Elastisite modülünün belirlenmesinde, yükleme yapı yükleme aralığında bulunan 2.0MPa mertebesindeki E_{sekant} değeri kullanılmıştır. Bu doğrultuda kum tabakalar içerisinde elde edilen ortalama elastisite modülü 1328 MPa, standart sapma 546 MPa; kil tabakalar içerisinde ortalama 1073 MPa, standart sapma 443 MPa olarak hesaplanmıştır. Geri hesap analizlerinde elde edilen ortalama değerler, standart sapmanın $2/3'$ ü kadar azaltılmış (kum için 964MPa, kil için 777MPa) ve bu şekilde kullanılmıştır. 9 kolon üzerinden alınan 18 adet köşe karotlar ile kolon çapı farklı zemin tabakaları içerisinde irdelenmiş, dolguda 60-70cm, kumda 60cm kilde ise 55cm olarak değerlendirilmiş ve geri hesap analizlerine bu şekilde yansıtılmıştır. Sonuç olarak yapılan üç boyutlu analizler ve sıvılaşma analizleri çerçevesinde, maksimum oturma 25mm, maksimum farklı oturma ise 8mm olarak revize edilmiştir. Mikro bölgeleştirme sonrası elde edilen yeni elastisite modüllerinin de dahil edildiği revize üç boyutlu analiz sonucu Şekil 14' de gösterilmiştir.



Şekil 14. Mikro Bölgeleme ve Yeni Kolon Modüllerinin Dahil Edildiği Analiz Çıktısı

4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, Lübnan, Beyrut, Dbayeh Marina bölgesinde yapılması planlanan alışveriş merkezi yapısının temel sistemi jet grout tekniği kullanılarak iyileştirilmiş ve imalat süresi boyunca çeşitli kalite kontrol testleri yapılarak, tasarım kabullerinin imalat aşamasındaki gerçekliği tahkik edilmiştir. Dizayn ve geri hesap aşamasında üç boyutlu sonlu elemanlar programı kullanılarak daha gerçekçi bir analiz yapılmaya çalışılmıştır. Bunun yanı sıra sivilaşma analizleri ayrı olarak ele alınmış ve bölgedeki deprem koşulları dikkate alınarak sonuçlar irdelenmiştir. Kalite kontrol testleri kapsamında, 3 adet alan yükleme testi, 14 adet tekil kolon yükleme testi, 9 adet kolon üzerinden alınan 18 adet köşe karot, 38 adet kolon üzerinden alınan 155 numune üzerinde elastisite modülü ve kesit kapasitesinin tayinine yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üç boyutlu geri hesap analizlerinde kullanılmış ve jet grout ıslah tekniğinin performansı hem sahada hem de kağıt üstünde çeşitli hesap metotları ile ispat edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Laceco ve Majid Al Futtaim. (2013), Enabling Works & Lateral Earth Support System Specifications, Dbayeh, Lebanon
- Turba Construction Solutions. (2012), Interpretive Report Geotechnical Site Investigation, Dbayeh, Lebanon.
- Youd, T. L., ve Idriss, I. M., (1997). Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo.
- Zetas Apex. (2014), Back- Calculation of the Uniaxial and Zone Loading Tests & Evaluation of In-Situ Jetgrout Performance, Dbayeh, Beirut, Lebanon.