

ŞAM-BEYRUT OTOYOLU, BAĞLANTI YOLU İNŞAATI SIRASINDA TETİKLENEN HEYELANIN STABİLİZASYONU

STABILIZATION OF THE LANDSLIDE TRIGGERED DURING CONSTRUCTION OF DAMASCUS - BEIRUT HIGHWAY, LINK ROAD

Burhan AVCI¹, Caner R. CAVLAZ², Orhan ŞİMŞEK³, Tamer Y. DUMAN⁴, Çağrı AŞIKOĞLU⁵

ÖZET

Lübnan'ı Suriye'ye bağlayacak Şam-Beyrut otoyolunun Bouerej yerleşim yerindeki bağlantı yolu inşaatı sırasında süreksizlik kontrollü derin bir heyelan meydana gelmiştir. Bağlantı yolu platformuna kadar tekil bir kütle olarak hareket eden Bouerej heyelanı, topuğundaki betonarme binayı etkilemiş ve ciddi yapısal hasara neden olmuştur. Ayrıntılı jeolojik haritalama ve inklinometre ölçümleriyle geometrisi ortaya koyulan heyelan, derin dairesel bir kayma tipinde gelişmiştir. Mekanizması ve boyutları belirlenen heyelanın rijit kazıklı destek sistemi ile kontrol altına alınabileceği öngörülmüştür. Bu doğrultuda yapılan sonlu eleman analizleri neticesinde, Ø120cm çapında kademeli çift sıra fore kazıklardan oluşturulan destek sistemiyle heyelan stabilizasyonunun sağlanabileceği görülmüştür. Önerilen destek sistemine ait uygulama projesi hazırlanmış ve sahada imalatı tamamlanmıştır. Gözlem projesi kapsamında kazıkların içerisine tesis edilen inklinometre boruları yardımıyla, imalat sırasında ve sonrasında destek sisteminin yatay deformasyonları ölçülmüş ve analizler sonucunda elde edilen davranışla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, heyelan stabilizasyonu, heyelan destek sistemleri

ABSTRACT

During the construction of the link road of the Damascus-Beirut highway, which will connect Lebanon to Syria, a discontinuity-controlled deep landslide triggered at Bouerej. The Bouerej landslide moved as a single mass up to the link road platform, affected a reinforced concrete building located at the heel and caused serious structural damage. The landslide, whose geometry was revealed by detailed geological mapping and inclinometer measurements, developed in a deep circular slide type. After determination of the

¹ Yüksek Mühendis, burhanavci1@gmail.com (Sorumlu yazar)

² Yüksek Mühendis, Geomark Mühendislik, ccavlaz@geomark.com.tr

³ Dr., Fugro-Sial, o.simsek@fugro.com

⁴ Doç. Dr., Fugro-Sial, t.duman@fugro.com

⁵ Yüksek Mühendis, Yüksel Proje, c.asikoglu@yukselproje.com.tr

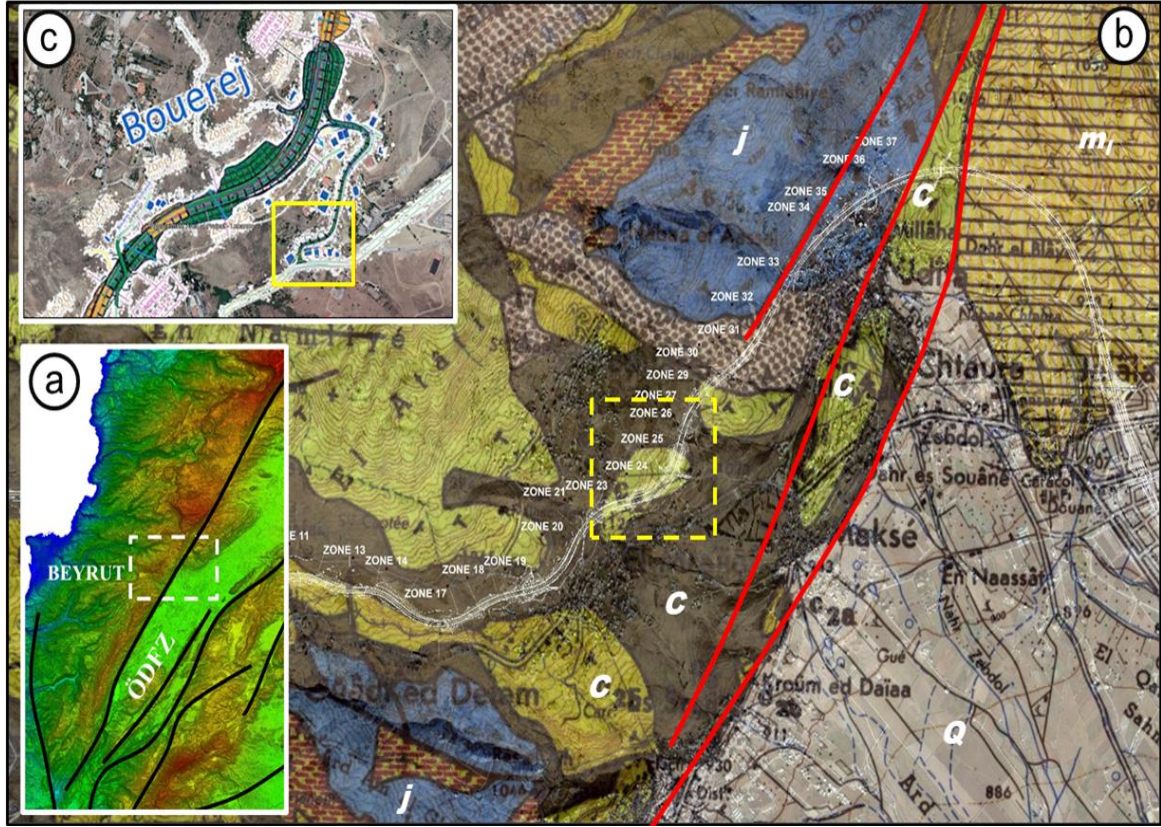
mechanism and dimensions of the landslide, it was proposed that the landslide could be stabilized by a rigid pile support system. The results of the accordingly conducted finite element analyses have shown that the stability of the slide can be achieved with a support system consisting of two-rows of Ø120cm bored piles. Detailed landslide stabilization design was completed and executed on the site. During and after the execution phase, the behaviour of the support system was observed via inclinometers placed in the bored piles. The measured lateral deformations were compared with expected quantities based on the results of analyses.

Keywords: *Landslide, landslide stabilization, landslide support systems*

1. GİRİŞ

İnşaatı devam eden Pan-Arap otoyolu Suriye ile Lübnan arasındaki karayolu bağlantısını sağlayacak ve ulaşım kalitesini arttıracaktır. Otoyol, Lübnan sınırları içinde Bekaa Vadisi'ni geçerek Lübnan Dağları'nın doğu yamaçlarına tırmanmakta ve Beyrut'a ulaşmaktadır.

Lübnan Dağları Akdeniz kıyılarına koşut, Arabistan-Afrika levhaları arasında şekillenmiştir. Bakımsız bir antiklinal yapısı sunan dağların genişliği 10 ile 55 km aralığında değişir ve en yüksek zirvesi 3 bin metreyi aşar. Dolayısıyla, otoyol ve bağlantı yolunun bulunduğu kıvrımın doğu kanatları batıya göre daha dar ve diktir. Diğer taraftan bu yamaçlar Ölü Deniz Fay (ÖDF) zonu tarafından dilimlenmiştir. Arabistan ile Afrika levhaları arasında yılda yaklaşık 4 mm kaymayı karşılayan (Reilinger vd., 2006) ÖDF, sol yanal doğrultu atımlı kıta içi bir transform faydır. ÖDF, bölgede büyük bir sıkışmalı büküm yapısıyla geniş bir deformasyon zonu oluşturur (Girdler, 1990; Garfunkel vd., 2014). Bekaa bu zon içinde aktif fay kontrollü şekillenmiş olan tektonik bir vadidir. Lübnan Dağları Erken Jura – Geç Kretase ve bunlar üzerinde çökelen Miyosen kayalarından oluşur (Şekil 1). Jura kalın platform karbonatları, Kretase akarsu delta ortamı ve Miyosen denizel karbonat ve kırıntılardan oluşur (Dubertret, 1945, 1955; Walley, 1997; Nader, 2000).



Şekil 1. a, Sayısal yükseklik modeli üzerinde çalışma bölgesinin morfolojisi. Model, 90m çözünürlüklü SRTM verilerinden alınmıştır (Jarvis, Reuter, Nelson ve Guevara, 2008). Beyaz kutu ve siyah düz çizgiler sırasıyla çalışma alanı ve Ölü Deniz Fay (ÖDF) zonunu göstermektedir. b, Lübnan Dağları doğu yamaçlarında Şam-Beyrut otoyolu boyunca geçilecek kaya birimleri (Dubertret, 1945). Beyaz çizgi otoyolu, kırmızı çizgi ise ÖDF zonunu (Girdler, 1990; Garfunkel vd., 2014) işaret etmektedir. Haritadaki C, Kretase kırıntılı (kahverengi) ve karbonatlı (yeşil); J, Jura dolomittik ve masif platform karbonatlar; m1, Miyosen kırıntılı ve karbonatları; Q, Kuvaterner yelpaze çökellerini göstermektedir. c, Bouerej yöresi ve sarı kutuda gösterilen çalışma alanı.

Pan-Arap Otoyolunun Bekaa Vadisi'nden Lübnan Dağı eteklerine tırmandığı Bouerej yerleşim yerinde 6. Bağlantı Yolu inşaatı sırasında bir heyelan tetiklenmiş ve topuğunda konumlanmış betonarme yapıda yapısal hasara neden olmuştur.

Bouerej heyelanının alansal dağılımını ortaya koymak amacıyla detaylı haritalama çalışması yapılmış, sahada ek araştırma çalışması önerilen noktalar belirlenmiş, önerilen bölgelerde 5 adet araştırma sondajı yapılmış ve sondaj kuyuları içerisine inklinometre boruları tesis edilmiştir. Yapılan periyodik ölçümler ile kısa sürede heyelanın derinliği tespit edilebilmiştir.

Alansal dağılımı ve derinliği tespit edilen Bouerej heyelanının stabilizasyonunu sağlamak için farklı çözüm önerileri değerlendirilmiş ve yapılan analizler neticesinde, kamulaştırma problemi de dikkate alınarak Ø120cm çapında kademeli çift sıra fore kazıklardan oluşan destek sistemi önerilmiştir.

2. BOUEREJ HEYELANI

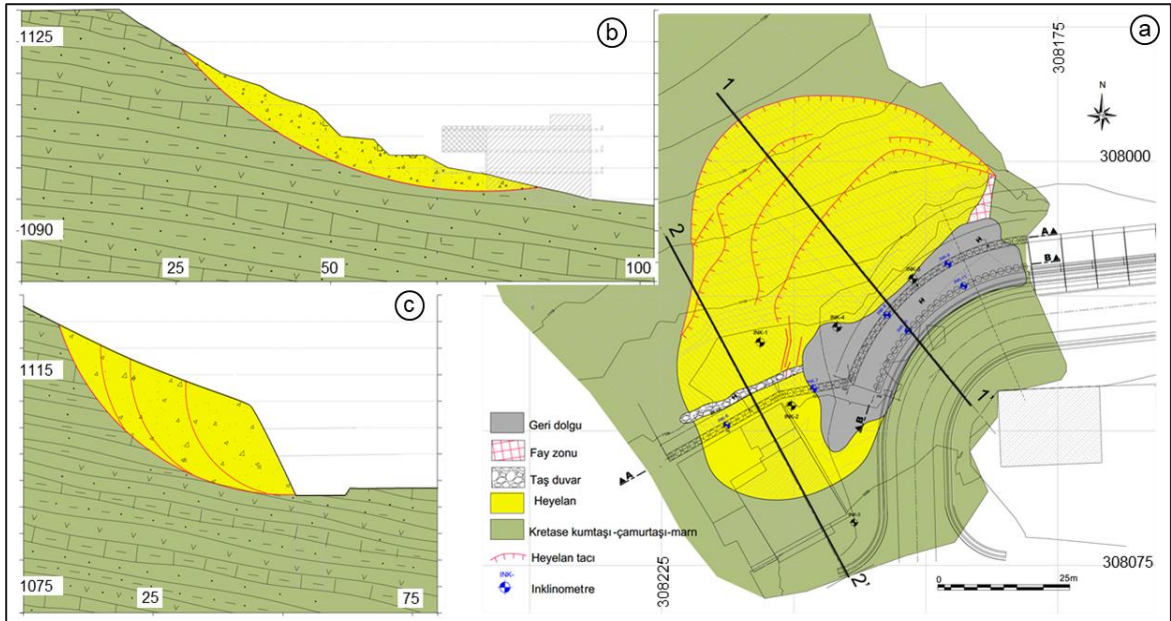
Heyelan 25-26 Temmuz 2019 tarihleri arasında gerçekleştirilen saha incelemesinde ayrıntılı incelenmiş, veriler toplanmıştır ve alansal dağılımı 1:250 ölçeğinde haritalanmıştır. Heyelanın kayma derinliğini ve altındaki ana kayanın fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla araştırma sondajları yapılmıştır. Bu sondajlar sırasında yerinde, sondajlardan alınan örnekler üzerinde ise laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sondaj kuyuları içerisinde inklinometre boruları teşkil edilmiş ve periyodik ölçümler alınmıştır.

2.1. Tip, boyut ve özellikleri

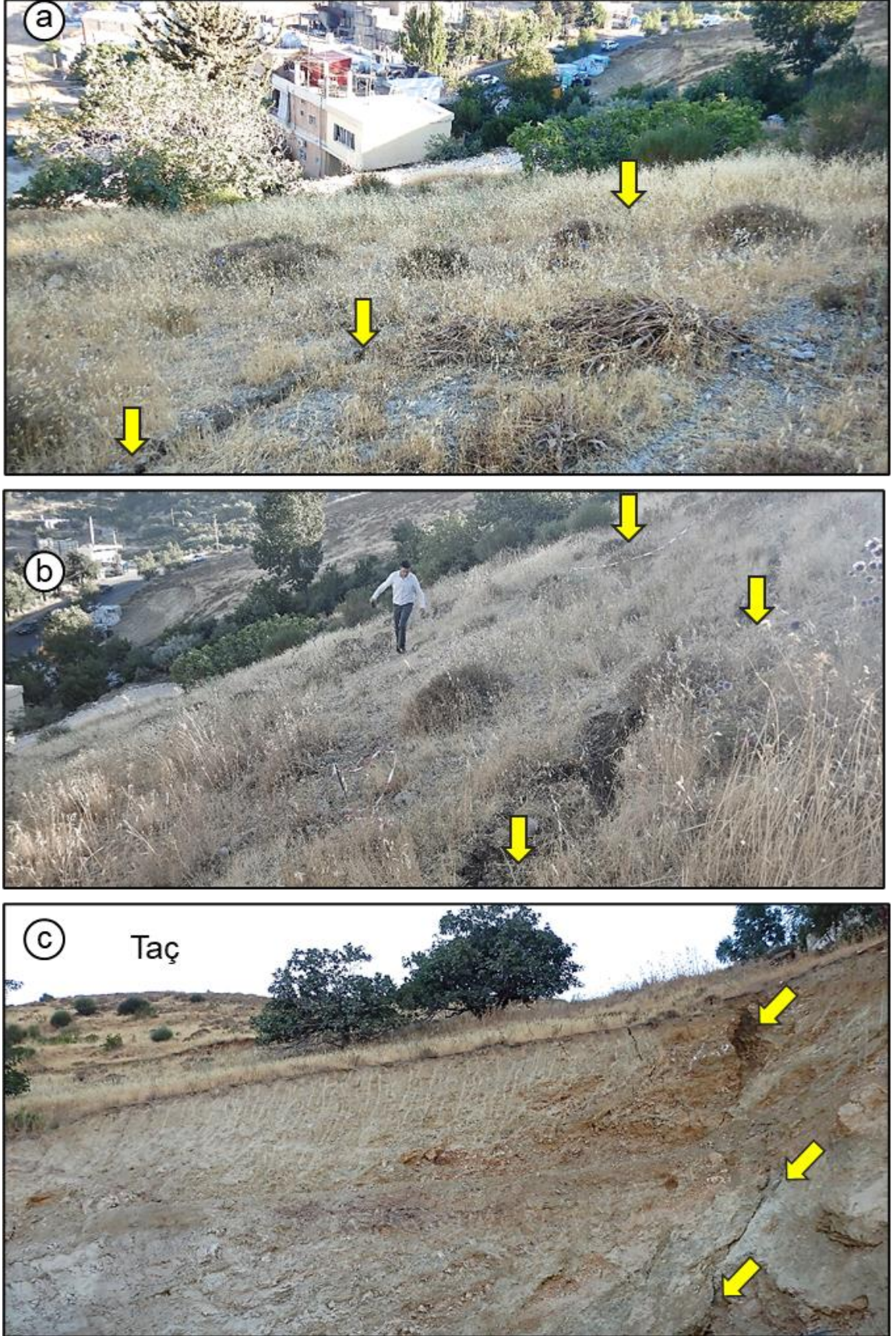
Bouerej heyelanının alansal dağılımını sınırlayan taç kısmında gerilme çatlakları ve yan sınırları açıkça izlenmiş (Şekil 3) ve 1:250 ölçeğinde haritalanmıştır (Şekil 2). Hareket yönü mevcut devlet karayolu ve yerleşim alanına doğru ilerleyen heyelan plan üzerinde 72 m uzunlukta ve 55 m genişliktedir (Şekil 2). Yarma şevinde açıkça izlenen kayma yüzeyi yer yer tabaka düzlemine karşılık gelmektedir. Heyelanın sol tarafında KB-GD doğrultulu belirgin bir fay zone açığa çıkarılmıştır (Şekil 3c).

Ana heyelan kütlesi içerisinde ve taca koşut belirgin ikincil gerilme çatlakları geliştiği izlenmiştir (Şekil 3a, b). Bu çatlaklar ana kaymaya eşlik eden ve kayma nedeniyle önü açılan gerilme alanında kama şeklinde meydana gelen dilim sınırlarında gelişmiştir. Taç bölgesinde daha düşey geometride ancak kayma yüzeyine bağlanan bu çatlaklar düzlemsel kayma tipinin baskın olduğuna işaret etmektedir. Bu bilgilere göre Bouerej heyelanı derin, daha çok dairesel bir kaya kayması tipinde meydana gelmiştir (Şekil 2).

Genelde kuru durumda olan kayma yüzeyinde ve heyelan alanında sadece heyelanın sağ sınırında bir sızıntı gözlenmiştir.



Şekil 2. a, Bouerej heyelanının jeoloji haritası ve kesitleri. Harita üzerinde heyelan gerilme çatlakları kırmızı, kesit yerleri siyah çizgi ile gösterilmiştir. b, 2-2'; c, 1-1' jeolojik kesitleridir.



Şekil 3. **a**, heyelanın taç kısmından topuğa, Bouerej yerleşimine bakış; **b**, taç kısmında gerilme çatlakları, güneye bakış; **c**, yol yarmasında yüzeylenen kayma sol sınırını denetleyen fay zone.

Kaymanın derinliği beş inklinometre (Şekil 4) ile araştırılmıştır. İnklinometre ölçümlerinden elde edilen ve en ve boy kesitlerin hazırlanmasında kullanılan bu grafiklere göre kaymanın 10 metreye ulaşan bir derinliği olduğu anlaşılmıştır (Şekil 3a, b, ve c).



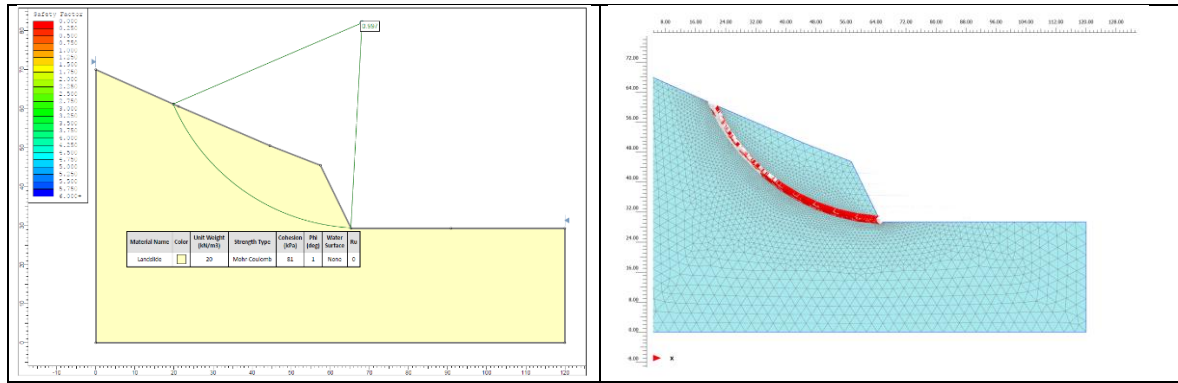
Şekil 4. Bouerej heyelanı inklinometre yerleri ve ölçüm grafikleri.

3. ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Bouerej heyelanının stabilizasyonu ve bağlantı yolu ile yerleşim alanı güvenliğinin sağlanmasına yönelik olarak farklı çözümler araştırılmıştır. Tasarım aşamasında devam etmekte olan kaymanın topuğunda istinat duvarı inşası için kazılan alanda geçici dolgular ile geçici destekleme sağlanmıştır. Heyelanın stabilizasyonu için en uygun destek sistemi tasarımına yönelik analizler, kaymayı temsil eden iki kritik kesit üzerinde yürütülmüştür. İlk kesit (Şekil 2’de 1-1 kesiti) ana heyelan bölgesinde bağlantı yolu kenarında istinat duvarı inşa edilecek alandan geçmektedir. Diğer kesitte (Şekil 2’de 2-2 kesiti) ise kaymanın hasara neden olduğu binanın arkasında öngörülen destek sistemi tasarımına yönelik analizler yapılmıştır.

3.1. Geri Analiz

Limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri ile, öncelikle geri analizler yapılarak kayma yüzeyine ait dayanım parametreleri araştırılmıştır. Geri analizler kritik kesit üzerinde yapılmış olup analiz sonuçları aşağıdaki şekilde verilmektedir.



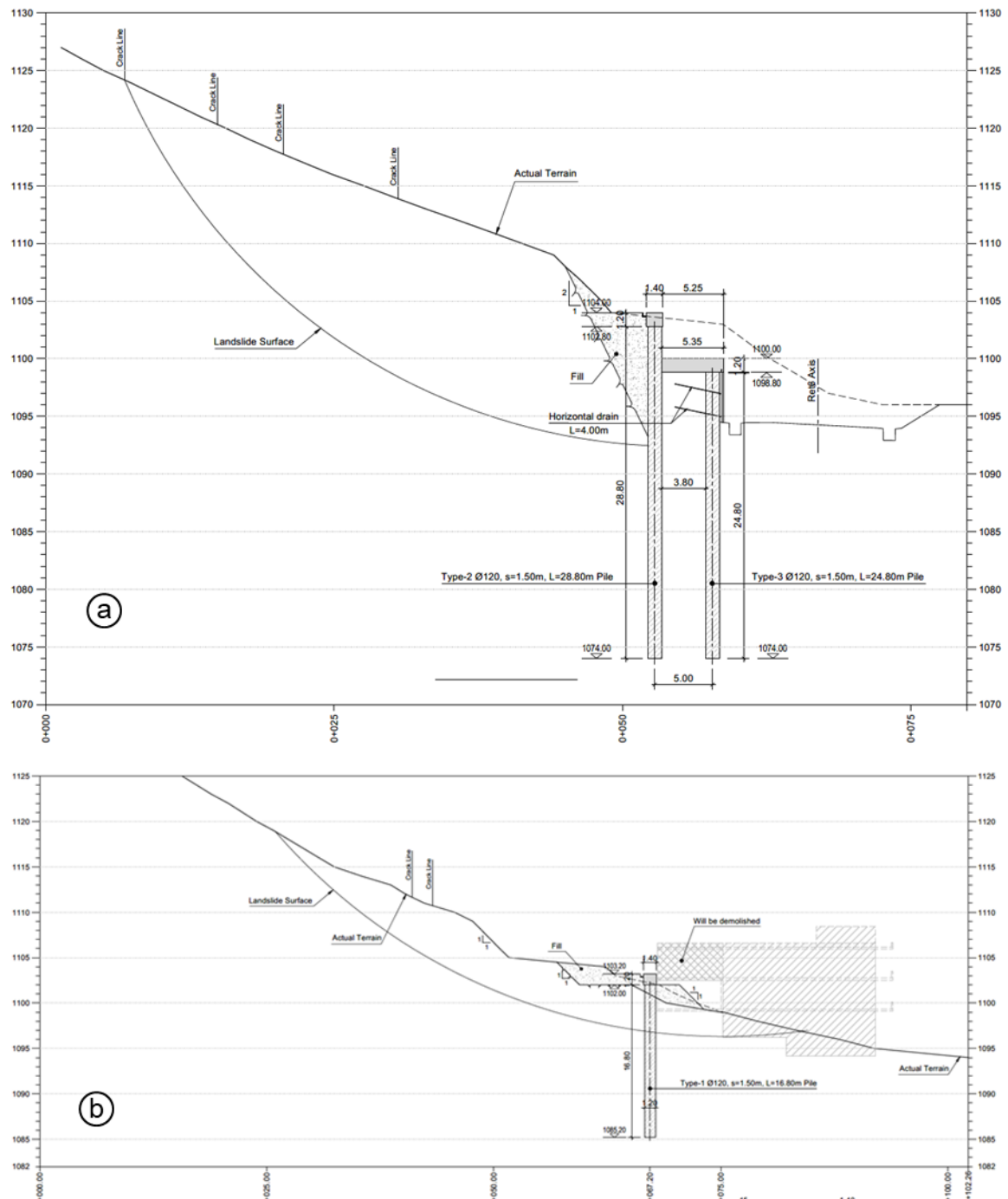
Şekil 5. Limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleriyle yapılan geri analizler

Her iki yöntemle yapılan geri analiz sonuçlarında, kayma yüzeyine ait dayanım parametreleri $c'=81$ kPa ve $\phi'=1^\circ$ olarak belirlenmiştir. Geri analizlerde kayma yüzeyi sürtünme direnci temel olarak kohezyon değeri ile temsil edilmiş olup, içsel sürtünme açısı $\phi'=1^\circ$ kabul edilmiştir.

3.2. Öneri Destek Sistemleri

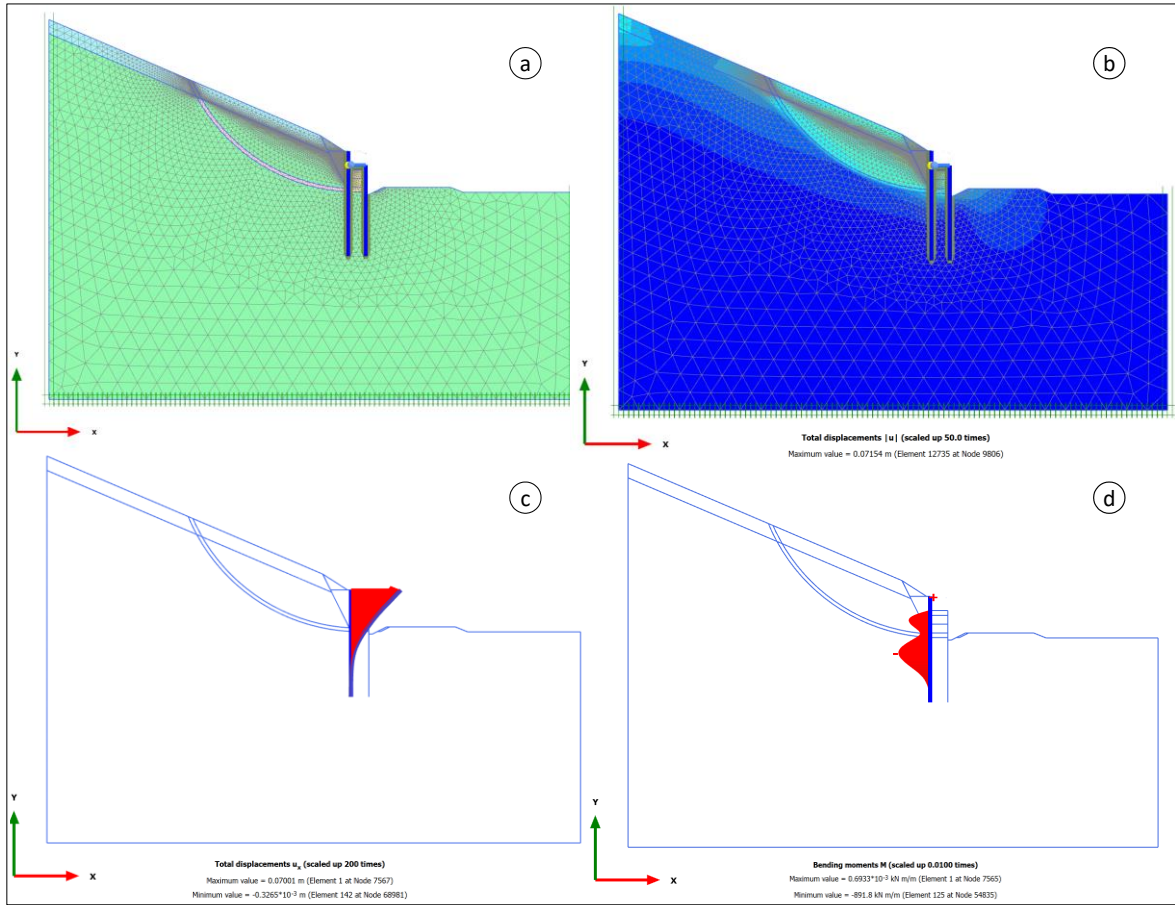
Heyelan mekanizması, kaymanın yol ve binalarla olan ilişkisi ve kamulaştırma problemi dikkate alınarak, Bouerej heyelanının duraylılığının sağlanması için rijit destek sistemi önerilmiştir. İki farklı kısımdan oluşturulan destek sisteminin, ilk kısmı ile (Şekil 3, 1-1 kesiti) mevcut yarma kazısı sırasında yüzeylenen kayma topuğunda duraylılığı sağlamak, ikinci kısım ile ise (Şekil 3, 2-2 kesiti) topuk bölgesinde yer alan binayı koruyarak daha fazla hasar almasını önlemek amaçlanmıştır. Bu yaklaşımla yapılan çalışmalarda, çok sayıda alternatif yöntem analiz edilmiş olup, bu analizler neticesinde; ilk kesim için aksları 5 m aralıklarla ayrılmış ve betonarme döşeme ile bağlanmış iki sıra fore kazık, ikinci kesimde ise tek sıra fore kazıktan oluşturulacak sistemin hedeflenen amaçları karşılayabilecek çözümler olacağı anlaşılmıştır.

Bu çözümler üzerinde yapılan analizler sonucunda belirlenen destek sistemi tip kesitleri aşağıdaki Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6. **a**, istinat duvarı kazısı ile tetiklenen heyelan topuğunda (bknz. Şekil 3, 1-1 kesiti) duraylılığı sağlayacak çift sıra fore kazıklı destek sistemi; **b**, topukta heyelandan etkilenen binayı (bknz. Şekil 3, 2-2kesiti) koruyacak destek sistemi tip kesitleridir.

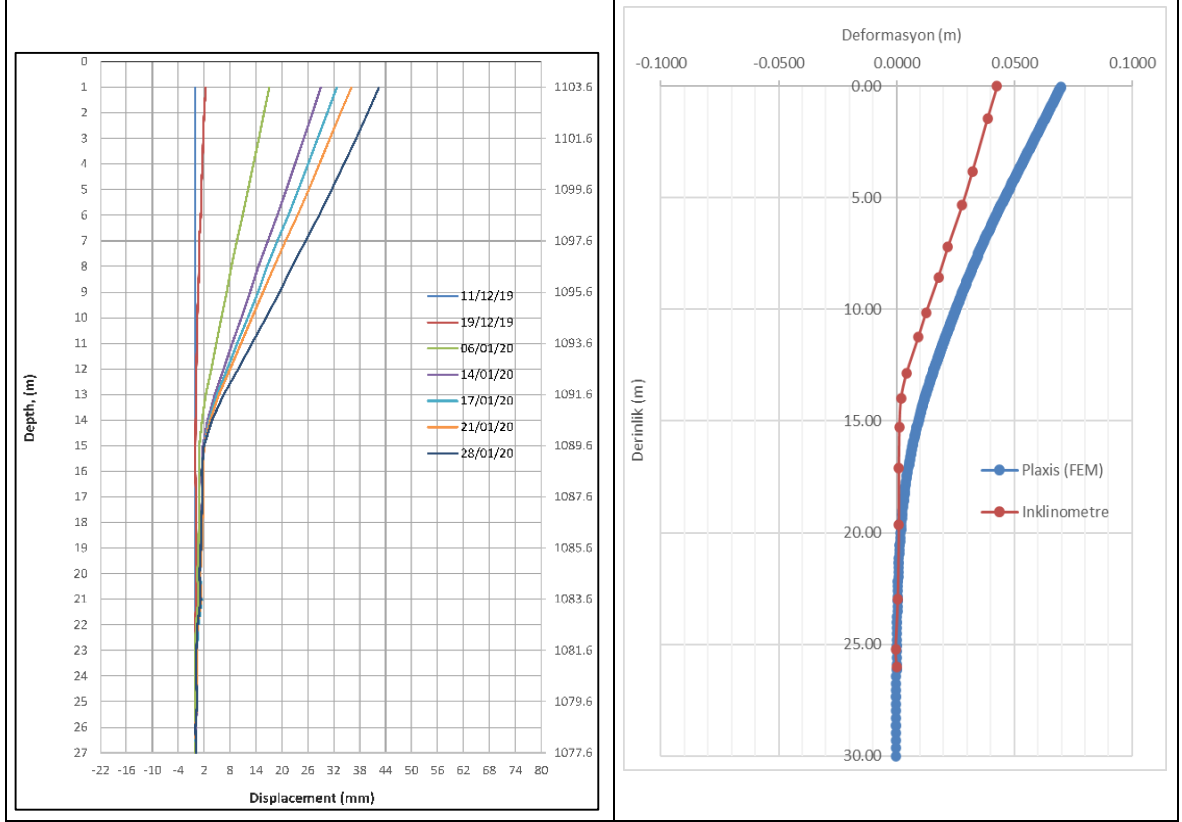
Kayma yüzeyinin derin olduğu kritik 1-1 kesitinde çok sayıda alternatif çalışma neticesinde projelendirilen destek sistemi, farklı seviyelerde inşa edilecek iki sıra $\varnothing 120$ cm çaplı fore kazıklardan oluşturulmuştur. Bu sistemde üst kottan yapılan kazıklar, başlık kirişi dahil $L=30.0$ m uzunluğa, ilk sıra kazıklardan 4.0 m daha aşağıda oluşturulacak platform üzerinden imal edilen ikinci sıra kazıklar ise $L=26.0$ m uzunluğa sahiptir. Bu iki sıra kazık, ikinci sıra kazık başlık kotunda tasarlanan betonarme plak ile birbirine bağlanarak sistemin birlikte çalışması sağlanmıştır. Aynı seviyede inşa edilecek konsol fore kazıklarla veya kalıcı öngermeli ankrajlarla stabilizasyonu mümkün olmayan heyelan, geliştirilen bu yöntem ile başarıyla kontrol altına alınabilmektedir. Şekil 7’de sonlu eleman analiz modeli ve özet sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 7. Sonlu eleman analiz sonuçları. **a**, sonlu eleman ağı; **b**, toplam deformasyon grafiği; **c**, kazık yatay deformasyon diyagramı; **d**, üst sıra kazık moment diyagramı

İmalatlar sırasında kazıkların içerisine yerleştirilen inklinometrelerden destek sistemi imalatları ve kazı çalışmaları sırasında periyodik ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde destek sisteminin davranışı net olarak gözlenmiş olup, inklinometre ölçümleri ile belirlenen ve analiz sonuçlarına göre beklenen deformasyonlar aşağıdaki Şekil 8’de karşılaştırılmıştır.

Şekilde görüleceği üzere, destek sistemi önünde yapılan kazılar neticesinde inklinometre profilinde yaklaşık 42 mm yanal deformasyon tespit edilmiştir. Bu deformasyon miktarı, analizler neticesinde beklenen yaklaşık 70 mm deformasyonun altında kalmakta olup destek sistemi izin verilebilir deformasyon limitleri içerisinde başarıyla amacına ulaşmıştır.



Şekil 8. Kazık içi İnklinometre enstrumantasyonu ile elde edilen yanal deformasyonların sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bouerej heyelanı, depremselliği yüksek olan Bekaa vadisinde ve kompleks bir jeolojik yapı içerisinde derin dairesel tipte meydana gelmiştir. Yapılan ayrıntılı jeolojik ve jeomorfolojik çalışmalar, kaymanın Pan-Arap otoyolu bağlantı yolu kenarında inşası planlanan istinat duvarı geçici temel kazılarıyla tetiklendiğini göstermiştir. Kayma ayrıntılı haritalanarak alansal dağılımı, inklinometre araştırmalarıyla derinlik ve hızı ortaya koyulmuştur. Heyelan malzemesi ve altındaki kaya birimlerin fiziksel ve jeomekanik özellikleri laboratuvar ve saha araştırmalarına dayalı olarak belirlenmiştir.

Araştırma verileri ile limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleriyle yapılan geri analiz sonuçları dikkate alınarak geoteknik tasarım parametreleri belirlenmiş, deneyim ve geoteknik analiz sonuçlarına dayalı olarak ortaya koyulan destek sistemi ile Bouerej kaymasının ekonomik ve güvenilir bir çözümle kontrol altına alınmasına olanak sağlanmıştır.

Çalışmalar sonucunda öncelikle geçici dolgular ile heyelanın stabilitesi sağlanmış, sonrasında çok sayıda alternatif üzerinde yapılan analizler neticesinde, farklı seviyelerde inşa edilecek çift sıra fore kazıklı destek sisteminin en uygun ve ekonomik çözüm olduğu sonucuna varılmıştır. Önerilen destek sistemi analizleri tip kesitler üzerinde iki boyutlu sonlu eleman yöntemiyle yapılarak projelendirilmiş ve uygulama projesi hazırlanmıştır.

Projelendirilen destek sistemi sahada başarıyla uygulanmış olup uygulama sırasında kazıkların içerisine yerleştirilen inklinometre boruları yardımıyla, destek sistemi davranışının gözlenmesi imkanı da sağlanmıştır. Uygulama sırasında derlenen inklinometre ölçüm sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçlarının karşılaştırılması neticesinde, destek sisteminin tasarımıyla uyumlu şekilde kabul edilebilir deformasyon limitleri içerisinde görevini başarıyla yerine getirdiği görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- Blake T.F., Hollingsworth R.A., Stewart J.P., (2002), "Recommended Procedures for Implementation of DMG Special Publication 117 Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California", Southern California Earthquake Center, USC.
- Dubertret, L., 1945. Carte Géologique du Liban au 1:50,000e. Feuille de Zahle
- Dubertret, L., 1955. Carte Géologique du Liban au 1:200,000e. Beirut
- Garfunkel Z, Ben-Avraham Z, Kagan E (2014) Dead Sea Transform Fault System-Reviews. Springer Book.
- Girdler, R. W., (1990). The Dead-Sea Transform-Fault System. Tectonophysics 180:1-13. doi:10.1016/0040-1951(90)90367-H
- Reilinger R et al. (2006) GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. Journal of Geophysical Research 111. doi:10.1029/2005jb004051
- Walley, C.D., (1997), "The lithostratigraphy of Lebanon: a Review: Lebanese Scientific", Bulletin, v. 10, p. 81-108

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c'	Kohezyon, kPa	ϕ'	İçsel sürtünme açısı, (°)
γ	Birim ağırlık, kN/m ³		

