





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Heyelan Meydana Gelmiş Bir Parkta Göçme Mekanizmasının Araştırılması ve Heyelan Önleme Tedbirleri

 Selman AYDIN^a,  Mustafa ÖZER^{b,*}

^a Fen İşleri Dairesi Başkanlığı, Büyükşehir Belediyesi, Ankara, TÜRKİYE

^b İnşaat Müh. Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ozerm@gazi.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.1060649

ÖZ

Bu çalışmada, Ankara ilinin Çubuk ilçesi sınırları içerisinde bulunan Adnan Menderes Parkında meydana gelen bir heyelan incelenmiş ve bu heyelanı durdurmak için yapılabilecek iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır. Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Sanat Yapıları Proje Şube Müdürlüğünden temin edilen zemin etüt verileri kullanılarak idealize zemin kesiti çıkartılmış ve bu kesit üzerinde kısa dönem ve uzun dönem duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Şev duraylılık analizleri limit denge yöntemlerini esas alan Slide 8.0 kullanılarak yapılmıştır. İnklinometre verileri ve arazi gözlemlerine dayanarak belirlenen yenilme düzlemi kullanılarak geri analizler yapılmış ve heyelan etmiş zemin yüzeyini temsil eden uzun dönem reziduel zemin parametreleri bulunmuştur. Yapılan analizler neticesinde, yatay drenler ile YASS'nin düşürülmesi, kazı yapılarak şevin düzenlenmesi ve 120 cm çapında 300 cm ara ile çift sıra fore kazık ve bunları birbirine bağlayan 1 m kalınlığında başlık kirişi yapılması ve yol kotuna kadar toprakarme duvar yapılmasıyla heyelanın durdurulabileceği tespit edilmiştir. Bu tedbirler uygulanarak yapılan duraylılık analizleri sonucunda şevin güvenlik katsayısı 1,6 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şev duraylılığı, Şev iyileştirmesi, Geri analiz, Kısa dönem duraylılık, Uzun dönem duraylılık

Investigation of Failure Mechanism and Landslide Prevention Measures in a Park Where Landslide Has Occurred

ABSTRACT

In this study, a landslide that occurred in Adnan Menderes Park, located within the borders of Çubuk district of Ankara province, was examined and remediation methods that could be done for the rehabilitation of this landslide were investigated. Using the soil investigation data obtained from Ankara Metropolitan Municipality Department of Science Affairs, Department of Engineering Structures, the idealized soil section was extracted and short-term and long-term stability analyzes were carried out on this section. Slope stability analyzes were performed using Slide 8.0, which is based on limit equilibrium methods. Back analyzes were made using the failure plane determined based on inclinometer data and field observations, and long-term residual soil parameters representing the landslide soil surface were found. As a result of the analyses made, it was determined that the landslide can be rehabilitated by lowering the YASS with horizontal drains, arranging the slope by excavation, constructing a double-row of bored piles with a diameter of 120 cm with 300 cm intervals and a 1 m thick head beam connecting them, and building an earth retaining wall up to the road level. As a result of the stability analyses made by applying these measures, the safety factor of the slope was calculated as 1.6.

Keywords: Slope stability, Slope rehabilitation, Back analysis, Short term stability, Long term stability

I. GİRİŞ

Heyelan, eğimli arazilerde kaya veya toprak birimlerin çeşitli nedenlerle kayma dayanımının aşılması sonucunda yer çekiminin etkisi ile eğim aşağı doğru hareket ederek şekil ve konumlarını değiştirmesidir. Heyelanların meydana geldiği doğal eğimli yüzeyler “yamaç”, insan eliyle mühendislik amaçlarına yönelik olarak yapılmış olan eğimli yüzeyler ise “şev” olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle heyelan teriminin yanı sıra “şev duraysızlığı, şev kayması, yamaç duraylılığı” gibi terimler de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Türkiye'nin iklimi, jeomorfolojik ve jeolojik özellikleri heyelanların oluşması için uygun koşullara sahiptir. Türkiye, kurak ve yarı kurak bir iklim bölgesinde bulunmaktadır. Bu iklim tipinin özelliği çok yağışsız geçen bir dönemi, bol yağışlı geçen bir dönemin izlemesidir. Bu durum, heyelanların meydana gelmesinde önemli bir nedendir. Bununla birlikte, Ülkemizde uzun süreli ve bol yağışın görüldüğü nemli iklime sahip Karadeniz bölgesi de heyelanların çok sık görüldüğü bir bölgedir. Kıyı şeridi ve vadi tabanlarındaki sınırlı düzlükler dışında bölgenin hemen her kesiminin dik ve sarp eğimli alanlardan oluşması da heyelanları tetikleyen önemli bir etkidir. Nitekim bu bölgede 1929, 1950, 1952, 1985, 1988, 1990 yıllarında büyük ölçüde can ve mal kaybına neden olan çok büyük heyelanlar meydana gelmiştir. Tortum, Geyve, Ayancık, Sinop, Of, Sürmene, Sera/Trabzon ve Maçka/Çatak heyelanları bu tarihlerde yaşanan heyelanlardan bazılarıdır [1].

Heyelanların yol açtığı can ve mal kayıplarına bakıldığında, geoteknik mühendisliğinin üzerinde önemle durulması gereken başlıca konulardan birisi olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin 21 Haziran 1990 Günü şiddetli yağışa bağlı olarak Maçka/Çatak kesiminde görülen heyelanda 65 kişi yaşamını yitirmiş ve trilyonlara varan maddi kayıplar ortaya çıkmıştır. 13 Temmuz 1995 günü Senirkent'te (Isparta) yaşanan çamur akıntısı sonucunda 74 kişi hayatını kaybetmiş, yüzlerce konut akan çamurun altında kalmıştır. Türkiye genelinde 1970 –1995 yılları arasında, çamur akmaları da dâhil olmak üzere meydana gelen heyelanlar nedeniyle 236 vatandaşımız hayatını kaybetmiştir. 1971-1989 tarihleri arası 1960 bina ya kısmen hasar görmüş veya tamamen yıkılmıştır. 1958 yılı haziran ayında, şiddetli yağmur sonucunda ortaya çıkan heyelan nedeniyle, Erzurum-Artvin kara yolu üç gün trafiğe kapalı kalmıştır [1]. 17 Mart 2005'te Sivas'ın Koyulhisar ilçesi yakınlarında meydana gelen Kuzulu heyelanında 15 kişi yaşamını yitirmiş, yaklaşık 30 ev moloz altında kalarak hasar görmüştür [2].

Dünya genelinde de heyelanların can ve mal kayıplarına yol açtığı çok sayıda vaka mevcuttur. Örneğin 1960 yılında İngiltere'nin Galler Bölgesi'ndeki Aberfan madencilik kasabasında pasa yığınlarının yerleşim yerine doğru kaymasıyla meydana gelen bir heyelanda bir okuldaki 116 öğrenci yaşamını yitirmiştir [3].

Heyelanların/şev kaymalarının meydana gelmesine yol açan etkenleri, doğal etkenler ve insandan kaynaklanan etkenler olmak üzere iki başlıkta toplamak mümkündür. Doğal etkenler: akarsu, göl veya deniz tarafından şevin (yamacın) topuğunun aşındırılması, sismik etkiler (deprem), volkanik aktiviteler, aşırı yağışlar ve/veya karın ani erimesi sonucunda yüzey sularının şevin içine sızması nedeniyle gözenek suyu basıncındaki artışlar, bozunma nedeniyle şevi oluşturan malzemelerin veya süreksizliklerin makaslama dayanımının azalması, şevdeki gerilme durumunun değişmesi olarak sıralanabilir. İnsandan kaynaklanan etkenler ise; şev üstüne dolgu yığılması, yapı inşa edilmesi, yol yapılması (trafik yükleri), şev topuğunda kazı yapılması, şevin içinden geçen temiz/pis su borularındaki sızıntılar, bitki örtüsünün tahrip edilmesi, şev yakınlarında patlatma yapılması şeklinde sıralanabilir [2]. Bu etkenlerden bazıları, yamacı veya şevi oluşturan malzemenin kaymaya karşı direnç gösteren makaslama dayanımını azaltırken, bazıları ise kaymaya neden olan kuvvetlerin artmasına yol açarak duraysızlığı tetiklerler [3].

Şevlerin duraylılığı limit denge yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleri ile belirlenebilmektedir. Limit denge yöntemlerinde kaymanın belli bir yüzey boyunca olduğu kabul edilir ve kayan kütle düşey yönde dilimlere ayrılarak, kayma yüzeyi boyunca kaymaya neden olan gerilmeler ile zeminin kayma

mukavemeti karşılaştırılır. Zeminin kayma mukavemetinin kaymaya neden olan gerilmelere oranına güvenlik katsayısı denir (Eş.1).

$$G. K. = \frac{\text{Zeminin kayma dayanımı}}{\text{Kaymaya neden olan gerilmeler (kayma gerilmesi)}} \quad (1)$$

Güvenlik katsayısının 1 olması şevin denge sınırında olduğunu gösterir. Belli bir emniyet katsayısı da gözetilerek şevin güvenli olabilmesi için güvenlik katsayısının statik koşullarda 1,5'dan, dinamik koşullarda ise 1,1'den büyük olması istenir. Çeşitli varsayımlara dayanarak şevin güvenlik katsayısını hesaplayan çok sayıda limit denge yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları Fellenius (İsveç dilim yöntemi), Bishop, Janbu, Lowe ve Karafiath, Spencer, Sarma, Morgenstern-Price yöntemleridir.

Bu yöntemlerin bazıları dilimlere etkileyen kuvvetlerin, bazıları momentlerin, bazıları ise her ikisinin dengesini birlikte dikkate alarak güvenlik katsayısı hesaplamaktadır. Yöntemler arasındaki bu farklılıklar birçok araştırmacının ilgisini çekmiş olup bu yöntemlerle hesaplanan güvenlik katsayıları çok sayıda araştırmacı tarafından karşılaştırılmıştır (Ör. [4], [5], [6], [7]).

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislikte karşılaşılan diferansiyel denklemlerin veya sınır değer problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir tekniktir. Sonlu elemanlar yöntemlerinin limit denge yöntemlerine göre üstünlüklerinden birisi analizlerde kritik kayma dairesinin şekli veya yeri için herhangi bir varsayıma ihtiyaç duyulmamasıdır. Bununla birlikte, sonlu elemanlar yöntemleriyle şevde oluşan gerilmeler, yer değiştirmeler, gözenek suyu basınçları, sızıntıdan kaynaklanan göçmeler ve ardışık gelişen göçmeler de hesaplanabilmektedir [8].

Şev duraylılık analizlerinin en önemli adımlarından birisi de yerindeki zemini temsil eden mukavemet parametrelerinin belirlenmesidir. Bunun için gerekli olan en önemli zemin parametreleri araziden alınan örselenmemiş (UD) numuneler üzerinde gerçekleştirilecek olan kısa dönem ve uzun dönem (drenajlı ve drenajsız) kesme kutusu deneyleri ile bulunan kohezyon (c_u , c') ve içsel sürtünme açısı (ϕ_u , ϕ') değerleridir.

Heyelan etmiş bir şevin/yamacın iyileştirilmesi ve duraylı hale getirilmesi için uygulanabilecek çok sayıda yöntem bulunmakta olup bunlardan başlıcaları; yük kaldırma, topuk dolgusu, drenaj, fore kazık, ankraj, zemin çivisi, geosentetiklerle ve/veya çelik şeritlerle güçlendirilmiş toprakarme duvar yapılması ve bitkilendirme gibi uygulamalardır.

Bu çalışma kapsamında, Ankara ilinin Çubuk ilçesi sınırları içerisinde bulunan Adnan Menderes Parkında meydana gelen bir heyelan incelenmiş ve heyelanı durdurmak için yapılabilecek önleme/iyileştirme yöntemleri üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan sondaj logları, arazi ve laboratuvar deney sonuçları, vaziyet planı ve idealize zemin profilini gösteren şev kesiti Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Sanat Yapıları Proje Şube Müdürlüğünden temin edilmiştir. Şev duraylılık analizleri limit denge yöntemlerini esas alan Slide 8.0 kullanılarak yapılmıştır.

II. ÇALIŞMA SAHASI VE HEYELANIN TARİHÇESİ

Heyelan sahası Ankara ilinin Çubuk ilçesi sınırları içerisinde bulunan Adnan Menderes Parkı olup, uydu görüntüsü Şekil 1'de sunulmuştur. Arazinin geçmişini bilen bölge sakinleriyle yapılan görüşmeler neticesinde heyelan sahasının eskiden dolgu alanı olarak kullanıldığı, zamanla yeşillendirilerek park haline getirildiği öğrenilmiştir. Park düzenleme çalışmaları 2012 yılında başlamış olup, 2013 senesinde tamamlanarak hizmete açılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında Adnan Menderes Bulvarını genişletmek amacıyla parkın üst kotuna istinat duvarları yapılmıştır.

2016 yılında parkın 225 metrelik bir kesiminde heyelan meydana gelmiştir. Bu heyelan sonucunda istinat duvarının bir kısmının temeli açığa çıkmış (Şekil 2a), istinat perdelerinde deformasyonlar (Şekil 2b), şevin taş kısmında bulunan Adnan Menderes Bulvarında oturmalar (Şekil 2c), topuk kısmında bulunan Alparslan Türkeş caddesinde ise kabarmalar meydana gelmiştir (Şekil 2d). Bunun üzerine Adnan Menderes Bulvarı beton bariyerler vasıtasıyla daraltılmış, Alparslan Türkeş Bulvarı ise trafiğe kapatılarak geçici güvenlik önlemleri alınmıştır. Heyelanın durdurulması amacıyla 2017 yılında Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Sanat Yapıları Proje Şube Müdürlüğünden tarafından iyileştirme projesi hazırlanarak 2020 yılında projenin ihalesi yapılmış, aynı yıl imalatlar tamamlanmıştır.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Heyelan sahasının uydu görüntüsü (görüntü 2018 senesinde alınmıştır)

III. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Arazi çalışmaları kapsamında, 5 tanesi heyelanın tepe bölgesinde (SK-1 - SK-5), 3 tanesi ise topuk bölgesinde (SK-6 - SK-8) olmak üzere toplam 8 adet geoteknik sondaj kuyusu açılmıştır. Sondaj kuyularının toplam uzunluğu 200 metredir. Zeminin mühendislik özelliklerinin yerinde belirlenmesi amacıyla SK-3 hariç diğer sondaj kuyularında her 1,5 m'de bir SPT deneyleri yapılmıştır. Ayrıca heyelanın mevcut kayma düzleminin belirlenebilmesi amacıyla açılan her sondaj kuyusunda inklinometre ölçümleri alınmıştır. Arazi çalışmaları özel bir firma tarafından gerçekleştirilmiş olup, sondaj kuyularının yerlerini gösteren vaziyet planı Şekil 3'te, sondaj çalışmalarına ait bazı görüntüler ise Şekil 4'te sunulmuştur.

Açılan sondajlarda çeşitli derinliklerden UD tüpleriyle 7 adet örselenmemiş numune ve SPT yardımıyla 38 adet örselenmiş numune alınmıştır. Sondajlar TSM750-AUGER-ROTARY tipi makine kullanılarak yapılmıştır. Sondaj loglarında ve geoteknik etüt raporunda SPT makinasının enerji oranı belirtilmediğinden, fotoğraflara ve sondaj makinasının modeline bakılarak otomatik düşürmeli şahmerdan mekanizmasına sahip olduğu anlaşılan bu makinanın SPT enerji oranı, E_r %73 olarak tahmin edilmiştir.

Sondaj çalışmaları tamamlandıktan sonra her sondaj kuyusunda yeraltı su seviyesinin derinliği ölçülmüş olup, sonuçları Tablo 1'de sondajların kot ve derinlikleri ile birlikte sunulmuştur.

Ham SPT sayıları (SPT- N), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) [9] (TBDY-2018)'de verilen bağıntılar kullanılarak %60 enerji oranına göre düzeltilmiştir. Heyelan sahasındaki zeminler genellikle killi (kohezyonlu) zeminler olduğu için ham SPT sayılarına jeolojik (efektif) gerilme düzeltmesi uygulanmamıştır. Düzeltilmiş SPT sayıları (N_{60}) Tablo 2'de sunulmuştur.



(a)



(b)

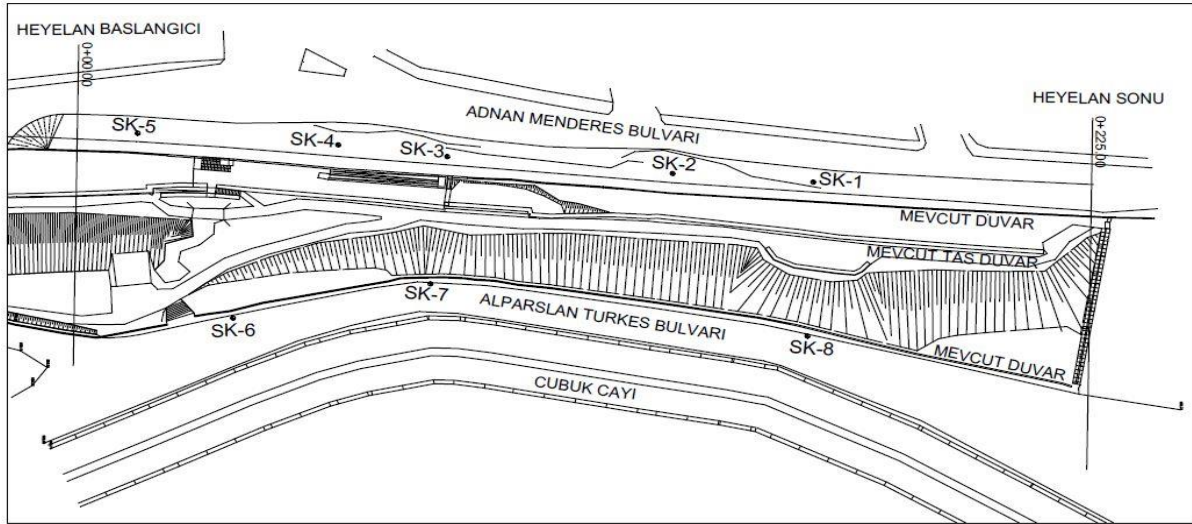


(c)



(d)

Şekil 2. Heyelan sonucunda; **a)** açığa çıkan istinat yapısının temellerinden bir görünüm, **b)** istinat yapısı perdelerinde meydana gelen deformasyonlardan bir görünüm, **c)** şevin taç kısmında meydana gelen oturmalarından bir görünüm, **d)** şevin topuk kısmında meydana gelen kabarmalardan bir görünüm.



Şekil 3. Heyelan sahasında sondaj yerlerini gösteren vaziyet planı

Tablo 1. Sondajların kot, derinlikleri ve Y.A.S.S. derinliği

| Sondaj No | Koordinatlar | | Kot (m) | Sondaj derinliği (m) | YASS derinliği (m) |
|-----------|--------------|----------|------------|----------------------------|--------------------------|
| | X (kuzey) | Y (doğu) | | | |
| SK-1 | 502239 | 4455427 | 1042,3 | 30,5 | 10 |
| SK-2 | 502208 | 4455429 | 1042,3 | 40,0 | 10 |
| SK-3 | 502158 | 4455433 | 1042,2 | 30,0 | 10 |
| SK-4 | 502134 | 4455436 | 1041,9 | 20,0 | 7 |
| SK-5 | 502089 | 4455439 | 1041,3 | 15,0 | 8 |
| SK-6 | 502110 | 4455393 | 1025,7 | 20,0 | 1.5 |
| SK-7 | 502154 | 4455401 | 1027,7 | 25,0 | 1 |
| SK-8 | 502238 | 4455388 | 1027,1 | 20,0 | 1 |

Tablo 2. Düzeltilmiş SPT darbe sayıları (N_{60})

| Derinlik (m) | Düzeltilmiş SPT darbe sayıları (N_{60}) | | | | | | |
|-----------------|---|------|------|------|------|------|------|
| | SK-1 | SK-2 | SK-4 | SK-5 | SK-6 | SK-7 | SK-8 |
| 1,50-1,95 | 8 | 5 | 10 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| 3,00-3,45 | 9 | 10 | 6 | 7 | 7 | 9 | 8 |
| 4,50-4,95 | 10 | 12 | 12 | 12 | 11 | 10 | 11 |
| 6,00-6,45 | 16 | 14 | R | 14 | 28 | 12 | 15 |
| 7,50-7,95 | 23 | 24 | R | 30 | 32 | 28 | 24 |
| 9,00-9,45 | 32 | 37 | R | 34 | 37 | 32 | 27 |
| 10,50-10,95 | 37 | 39 | 52 | 39 | 35 | 27 | 34 |
| 12,00-12,45 | 43 | 75 | 52 | 46 | 38 | 37 | 38 |
| 13,50-13,95 | 44 | 75 | 69 | 56 | 40 | 40 | 43 |
| 15,00-15,45 | 56 | 58 | 62 | 61 | 50 | 43 | 45 |

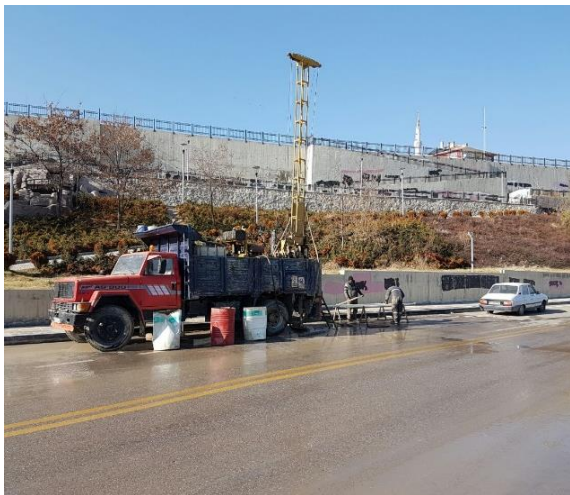
| | | | | | | |
|-------------|----|----|----|----|----|----|
| 16,50-16,95 | 64 | 50 | 67 | 49 | 46 | 45 |
| 18,00-18,45 | 51 | 64 | 63 | 43 | 41 | 49 |
| 19,50-19,95 | 64 | 55 | 73 | 47 | 44 | 52 |
| 21,00-21,45 | 66 | 51 | | | 46 | |
| 22,50-22,95 | 71 | 69 | | | 49 | |
| 24,00-24,45 | 69 | 79 | | | 51 | |
| 25,50-25,95 | 68 | 68 | | | | |
| 27,00-27,45 | 64 | 73 | | | | |
| 28,50-28,95 | 68 | 78 | | | | |
| 30,00-30,45 | 74 | 74 | | | | |
| 31,50-31,95 | | 79 | | | | |
| 33,00-33,45 | | 78 | | | | |
| 34,50-34,95 | | 79 | | | | |
| 36,00-36,45 | | 86 | | | | |
| 37,50-37,95 | | 86 | | | | |
| 39,00-39,45 | | 86 | | | | |



(a)



(b)



(c)



(d)

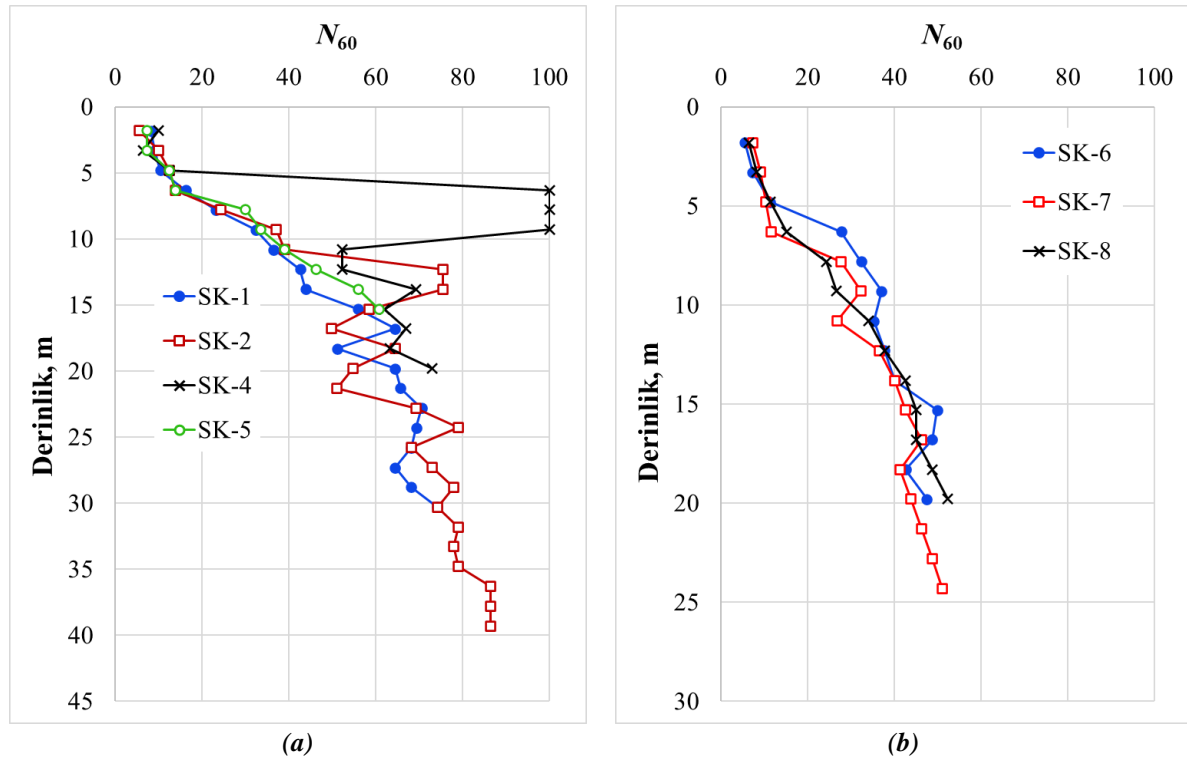
Şekil 4. Sondaj çalışmalarından görünüm; **a) ve b)** Adnan Menderes Bulvarı üzerinde yapılan sondajlar; **c) ve d)** Alparslan Türkeş Caddesi üzerinde yapılan sondajlar

%60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT sayılarının derinlikle birlikte değişimini gösteren grafikler Şekil 5’de sunulmuştur. Heyelanın üst (tepe) ve alt (topuk) noktasında yaklaşık 16 m kot farkı olduğundan zeminin özelliklerinin makul bir doğrulukla belirlenebilmesi amacıyla heyelanın üst bölgesinde yapılan sondajlar ile alt bölgesinde yapılan sondajlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. SK-4 kuyusunda 6,00 m ile 10,50 m arasındaki SPT sonuçları beton tabakaya rastladığından refü vermiş olup zemin özelliklerinin belirlenmesinde dikkate alınmamıştır.

IV. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla arazide açılan sondajlarda 3 adet 2,50 – 3,00 m seviyesinden, 2 adet 5,50 – 6,0 m seviyesinden ve 1 adet 7,0 – 7,5 m seviyesinden UD numunesi alınmış ve bu numunelere konsolidasyonsuz drenajsız (UU) direk kesme, doğal birim hacim ağırlık ve doğal su muhtevası deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3’te sunulmuştur. Laboratuvar deneyleri özel bir kuruluşa ait laboratuvarında yapılmıştır.

Tablo 3’te sunulan sonuçlar incelendiğinde zeminin drenajsız kesme dayanımının ortalama $c_u = 57$ kPa, içsel sürtünme açısının ise ortalama $\phi_u = 9^\circ$ olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre kısa dönem şev stabilite analizlerinde en üstten 7,5 m’ye kadar olan dolgu zemin tabakasını temsilen $c_u = 57$ kPa, $\phi_u = 9^\circ$ değerlerinin kullanılabilceği değerlendirilmiştir.

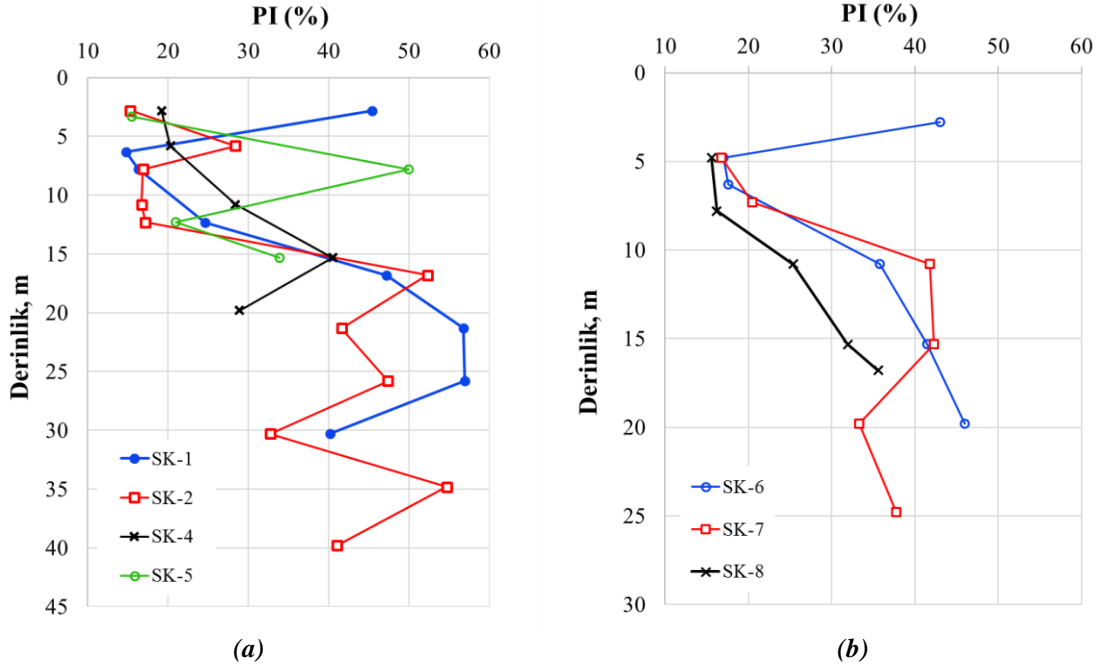


Şekil 5. Düzeltilmiş SPT sayılarının derinlikle birlikte değişimi; **a)** heyelanın tepe noktasında açılan sondajlar (SK-1 ila SK-5), **b)** topuk noktasında açılan sondajlar (SK-6 ila SK-8). (SK-4 kuyusunda 6.00-10.50 m arasındaki SPT deneyleri beton tabakaya rastladığından refü vermiştir)

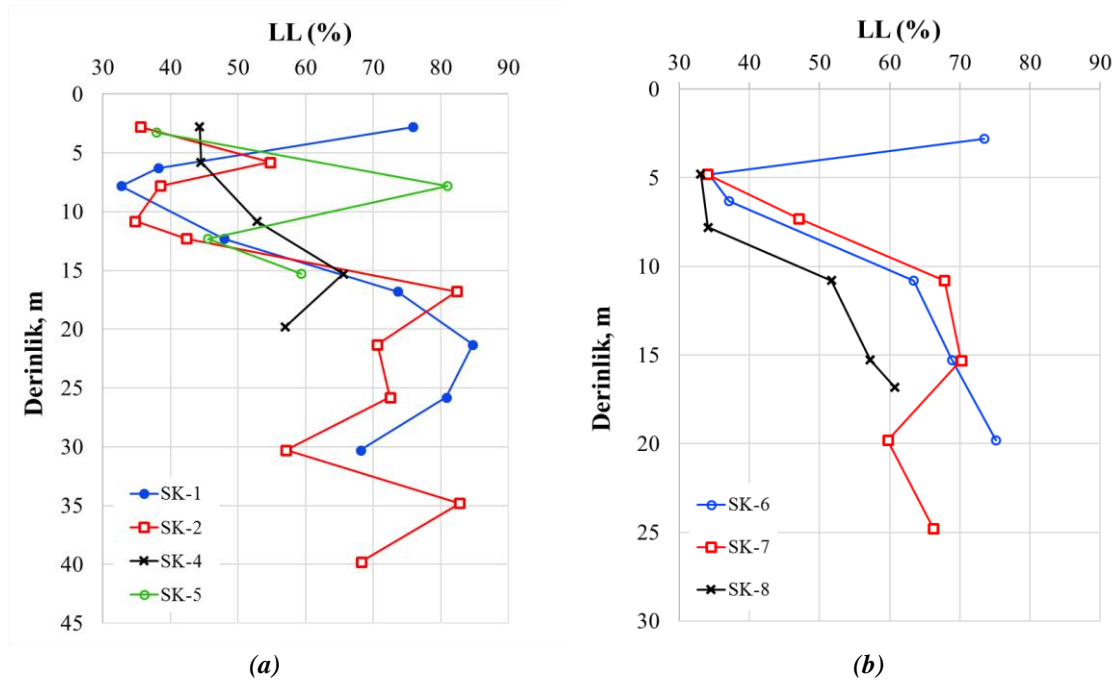
Tablo 3. Örselememiş (UD) numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları

| Sondaj No | Numune alınan derinlik (m) | Doğal birim hacim ağırlık, γ_n (kN/m ³) | Kohezyon, c_u (kPa) | İçsel sürtünme açısı, ϕ_u (°) |
|-----------|----------------------------|--|-----------------------|------------------------------------|
| SK-1 | 2.50 – 3.00 | 18,2 | 61 | 10 |
| SK-2 | 5.50 – 6.00 | 18,3 | 55 | 9 |
| SK-4 | 2.50 – 3.00 | 18,1 | 51 | 8 |
| SK-4 | 5.50 – 6.00 | 18,2 | 57 | 9 |
| SK-6 | 2.50 – 3.00 | 18,2 | 61 | 9 |
| SK-7 | 7.00 – 7.50 | 18,2 | 55 | 9 |

Zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SPT ile örselenmiş numuneler alınmış ve bu numuneler üzerinde Atterberg limitleri ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre likit limit değerlerinin %33 ile %85, plastik limit değerlerinin %16 ile %31, plastisite indisi değerlerinin %15 ile %57, tane boyutu olarak 0,075 mm elekten geçen malzeme yüzdesinin %20 ile %97 arasında değiştiği ve USCS'ye göre zemin sınıfının CL, CH ve SC olduğu görülmüştür. Korelasyonlar vasıtasıyla zeminin mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan plastisite indisi değerlerinin derinlikle birlikte değişimini gösteren grafikler Şekil 6'da sunulmuştur. Zeminin likit limit, plastik limit ve doğal su muhtevası değerlerinin derinlikle birlikte değişimini gösteren grafikler ise sırasıyla Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur.



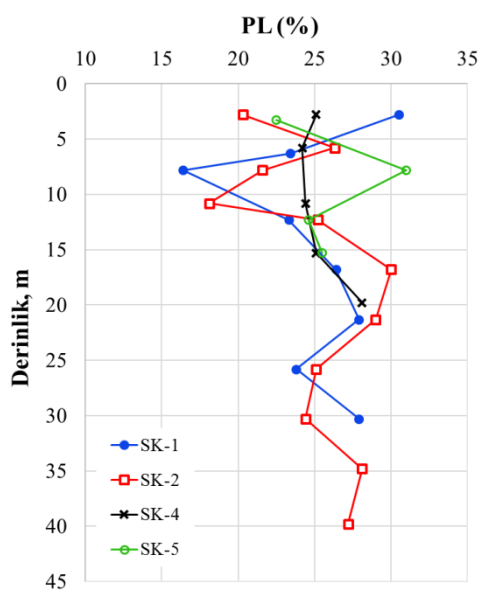
Şekil 6. Plastisite indisi değerlerinin derinlikle birlikte değişimi; **a)** heyelanın tepe noktasında açılan sondajlar, **b)** heyelanın topuk noktasında açılan sondajlar.



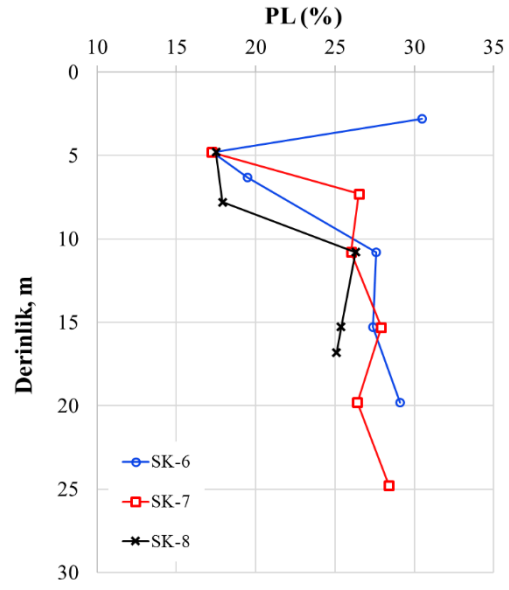
Şekil 7. Likit limit değerlerinin derinlikle birlikte değişimi; a) heyelanın tepe noktasında açılan sondajlar, b) heyelanın topuk noktasında açılan sondajlar.

V. ANALİZE ESAS ZEMİN PARAMETRELERİNİN VE İDEALİZE ZEMİN KESİTİNİN BELİRLENMESİ

Tablo 3 incelendiğinde arazi çalışmaları esnasında UD numunelerinin genellikle dolgu zemin tabakasından alındığı, muhtemel kayma dairesinin geçtiği daha derinlerdeki tabii zemin tabakalarından UD alınmadığı görülmektedir. Ayrıca uzun dönem duraylılık analizleri için gerekli olan drenajlı dayanım parametrelerinin elde edilmesi için konsolidasyonlu-drenajlı direk kesme deneylerinin yapılmadığı, pik ve rezidüel parametrelerin elde edilmediği görülmektedir. Bu nedenle duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere gerekli olan drenajlı ve drenajsız (kısa ve uzun dönem) zemin parametreleri, arazi deneylerine dayalı olarak literatürde genel kabul görmüş korelasyonlar yarımıyla elde edilmiştir.

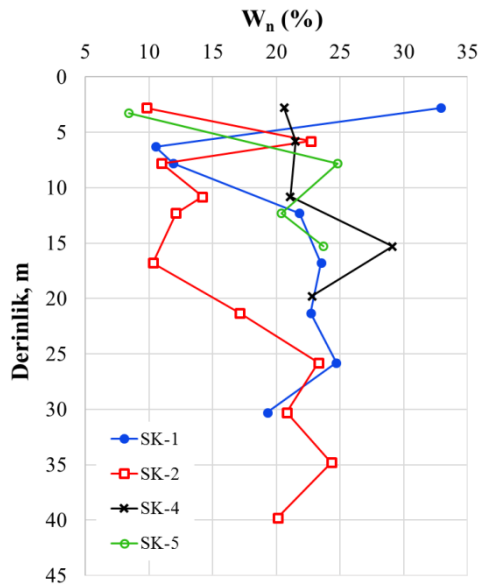


(a)

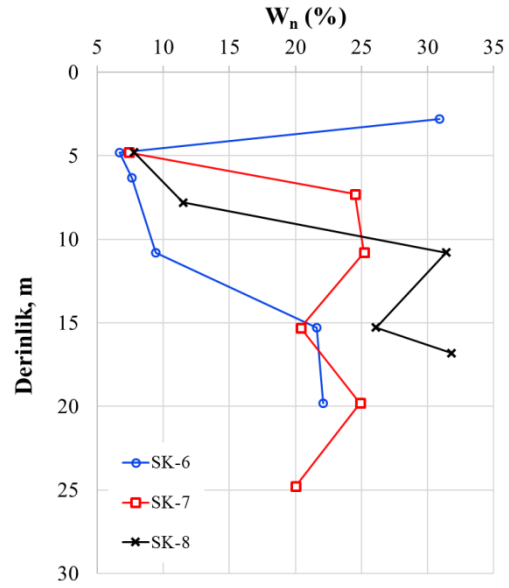


(b)

Şekil 8. Plastik limit değerlerinin derinlikle birlikte değişimi; **a)** heyelanın tepe noktasında açılan sondajlar, **b)** heyelanın topuk noktasında açılan sondajlar.



(a)



(b)

Şekil 9. Doğal su muhtevası değerlerinin derinlikle birlikte değişimi; **a)** heyelanın tepe noktasında açılan sondajlar, **b)** heyelanın topuk noktasında açılan sondajlar.

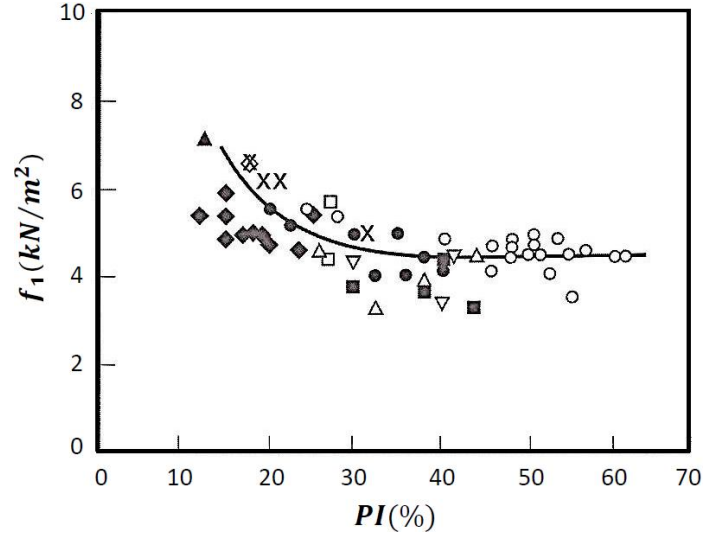
Literatürde, kohezyonlu zeminler için SPT deneylerinden zeminin drenajsız kayma dayanımının (c_u) elde edilmesine yönelik çok sayıda eşitlik geliştirilmiş olup, bunlardan en yaygın olanlarından birisi Stroud [10] tarafından geliştirilen eşitliktir.

Stroud [10] kohezyonsuz zeminlerde SPT deneylerinden zeminin drenajsız kayma dayanımının (c_u) elde edilebilmesi için aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$c_u = f_1 \times N_{60} \quad (2)$$

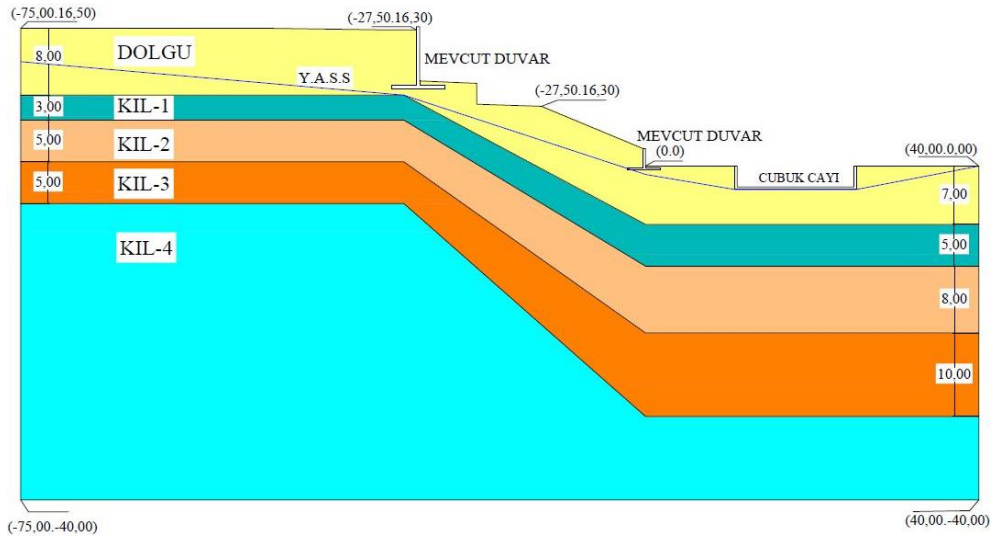
Bu bağıntıda; c_u zeminin drenajsız kayma dayanımı olup, f_1 katsayısı Şekil 10'da verilen grafikten elde edilmektedir. N_{60} ise efektif gerilme düzeltmesi yapılmamış, %60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT sayısıdır.

Şekil 10'da verilen f_1 katsayısının zeminin plastisite indisine (PI) bağlı olduğu görülmektedir. Gerek SPT verileri gerek laboratuvar verileri incelendiğinde zeminin SPT sayılarının ve PI değerlerinin derinlikle birlikte değiştiği görülmektedir.



Şekil 10. f_1 katsayısının plastisite indisine göre değişimini gösteren grafik [10]

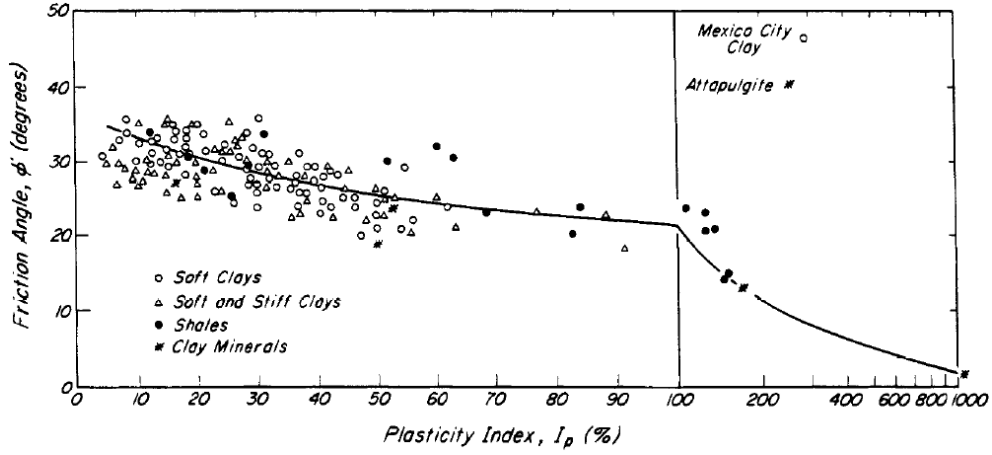
Duraylılık analizlerinde zemini mümkün olan en iyi şekilde karakterize edebilmek için SPT verileri esas alınarak (Şekil 5) heyelan bölgesindeki zemin 5 tabakaya bölünmüştür. Şevin tepe bölgesindeki tabaka kalınlıkları ile topuk bölgesindeki tabaka kalınlıklarının birbirlerine düz bir çizgi ile bağlandığı kabul edilerek şevin içindeki tabakalar oluşturulmuştur. Bu yaklaşıma dayalı olarak oluşturulan idealleştirilmiş zemin kesiti ve kurgusal zemin tabakaları Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere oluşturulan idealize zemin kesiti

Şekil 11'de görülen her bir tabakayı temsil eden SPT ve PI değerleri sırasıyla Şekil 5 ve 6 üzerinden yaklaşık olarak alınmış ve Eş.2 yardımıyla zeminlerin drenajsız kayma dayanımı bulunmuştur.

Uzun dönem duraylılık analizlerinde kullanılmak üzere gerekli olan drenajlı (CD) içsel sürtünme açısı (ϕ') değerleri ise zemin katmanlarını temsil eden PI değerleri kullanılarak Terzaghi vd [11] tarafından önerilen abak (Şekil 12) yardımıyla bulunmuştur.



Şekil 12. Plastisite indisi ile efektif kayma direnci arasındaki ilişki [11]

Kil zeminlerin uzun dönem drenajlı koşullarda kohezyon değerinin kuramsal olarak sıfır olması beklenir. Ancak laboratuvar tecrübelerine dayanılarak aşırı konsolide olmuş ve bir miktar çimentolanma etkisinin bulunduğu zeminlerde drenajlı koşullarda da bir miktar kohezyon tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada zeminlerin drenajlı koşullardaki uzun dönem drenajlı (CD) efektif kohezyon değerleri (c') Senneset vd. [12] tarafından önerilen Eş. 3 kullanılarak elde edilmiştir.

$$c' = a \tan \phi' \quad (3)$$

Eş. 3'deki a katsayısı zemin cinsine göre Tablo 4'ten alınabilmektedir [12].

Tablo 4. Çeşitli zemin türlerine göre a katsayısının olası değerleri [12]

| Zemin Cinsi | a | $\tan \phi'$ |
|----------------|-------|--------------|
| Yumuşak kil | 5-10 | 0,35-0,45 |
| Orta katı kil | 10-20 | 0,40-0,55 |
| Katı kil | 20-50 | 0,50-0,60 |
| Yumuşak silt | 0-5 | 0,50-0,60 |
| Orta katı silt | 5-15 | 0,55-0,65 |
| Katı silt | 15-30 | 0,60-0,70 |

Kurgusal zemin tabakalarını temsil eden SPT ve PI değerleri, bu değerler kullanılarak Stroud [10] tarafından önerilen abak yardımıyla belirlenen f_1 katsayıları, Eş. 2 ile hesaplanan drenajsız kayma dayanımı değerleri (c_v), Terzaghi vd [11] tarafından önerilen abak (Şekil 12) yardımıyla bulunan drenajlı içsel sürtünme açısı değerleri (ϕ'), Senneset vd. [12] tarafından önerilen a katsayıları ve bu katsayılar kullanılarak Eş. 3 ile hesaplanan efektif kohezyon değerleri (c') toplu halde Tablo 5'de sunulmuştur.

VI. ŞEV DURAYLILIK ANALİZLERİ

Şev duraylılık analizlerinde limit denge yöntemlerini esas alan “Slide 8.0” programı kullanılmıştır. Slide programı, dairesel ve dairesel olmayan kayma yüzeylerinde güvenlik sayısı hesabı yapabilen, harici yüklemeye, yeraltı suyu ve destek yapıları gibi çeşitli unsurları modellemeye olanak veren iki boyutlu şev duraylılık analiz programıdır [13].

Tablo 5. İdealize zemin tabakaları ve mühendislik özellikleri

| Tabaka No | Tabaka Tanımı | Tabaka Kalınlığı (m) | γ_n (kN/m^3) | SPT- N_{60} | PI | f_1 | a | c_u (kPa) | ϕ' ($^\circ$) | c' (kPa) |
|-----------|---------------|----------------------|-------------------------|---------------|----|-------|-----|-------------|----------------------|------------|
| 1 | Dolgu | 0-8 | 18 | 10 | 20 | 5,5 | 9 | 55 | 30 | 5 |
| 2 | Kil-1 | 8-11 | 18 | 30 | 25 | 5,0 | 10 | 150 | 29 | 5 |
| 3 | Kil-2 | 11-16 | 18 | 40 | 30 | 4,5 | 20 | 180 | 28 | 10 |
| 4 | Kil-3 | 16-21 | 19 | 60 | 45 | 4,2 | 30 | 252 | 26 | 15 |
| 5 | Kil-4 | 21-30 | 19 | 70 | 50 | 4,2 | 43 | 294 | 25 | 20 |

Bu çalışmada şev duraylılık analizleri dairesel ve dairesel olmayan kayma yüzeyleri için kuvvet ve moment dengesine göre çözüm yapabilen Spencer yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şev duraylılık analizlerinde Şekil 11’de verilen zemin kesiti ve Tablo 5’te verilen zemin parametreleri kullanılmıştır.

Analizler üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle şevin mevcut durumu analiz edilmiş, daha sonra ise arazide gerçekleşen mevcut kayma dairesi modellenerek geri analiz yapılmıştır. Daha sonra ise şev iyileştirme analizleri yapılmıştır.

A. ŞEVİN MEVCUT DURUMUNUN ANALİZİ

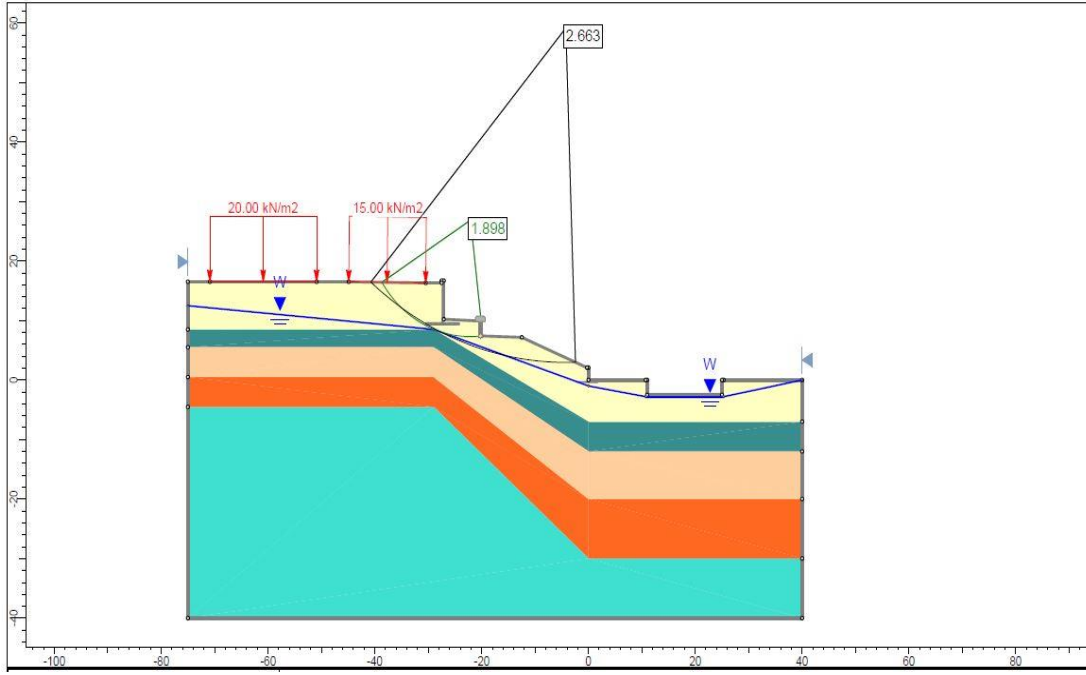
Şevin tepe bölgesindeki Adnan Menderes Bulvarı trafiğe açık olduğundan, duraylılık analizlerinde trafik yüklerini temsilen 15 kPa yayılı yük, yolun gerisindeki tek/iki katlı hafif yığma yapı yüklerini temsilen 20 kPa yayılı yük dikkate alınmıştır. İstinat duvarları ve kanal kaplamaları birim hacim ağırlığı 24 kN/m³ olan rijit elemanlar olarak modellenmiştir. Analizlerde zemin yenilme modeli olarak Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kullanılmıştır.

Slide 8.0 ile gerçekleştirilen kısa ve uzun dönem duraylılık analizlerinin sonucunda elde edilen kritik kayma dairesi ve güvenlik katsayısı sırasıyla Şekil 13 ve 14’de sunulmuştur.

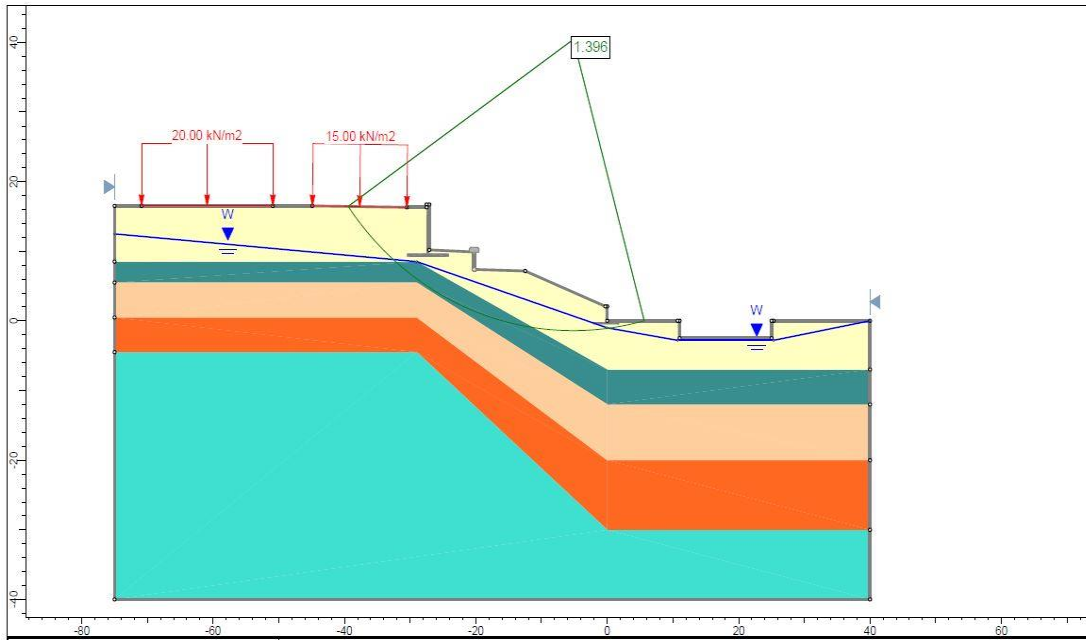
Yapılan bu analizlerin sonucunda park alanındaki şevlerin kısa dönemde duraylı olduğu (GK>1,5), ancak uzun dönemde heyelan edebilme potansiyeline sahip olduğu (GK<1,5) görülmüştür (Şekil 13 ve 14). Nitekim uzun dönem duraylılık analizlerinin sonucunda elde edilen en kritik kayma dairesinin araziyle uyumlu olduğu, kayma dairesinin yüzeye bulunduğu noktaların arazide gözlemlenen şevin tepe bölgesindeki gerilme çatlakları ve topuk bölgesinde gözlemlenen kabarmalar ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

B. GERİ ANALİZ YÖNTEMİYLE ZEMİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Geri hesap yönteminde herhangi bir şev için güvenlik katsayısını 1 olarak verecek sonsuz sayıda kohezyon ve içsel sürtünme açısı çifti söz konusu olsa da, bu çiftlerin her biri kritik kayma yüzeyi için farklı yerler verecektir. Ancak inklonometre okumaları ile kayma yüzeyinin yeri belirlenebildiğinde güvenlik katsayısını yaklaşık 1 olarak verecek uzun dönem kayma parametreleri çifti ($c'-\phi'$) elde edilebilmektedir. Bu noktada şayet söz konusu kayma uzun dönemde gerçekleşmiş ise yenilme düzleminde efektif gerilmenin hâkim olduğu değerlendirilerek c' yaklaşık sıfır kabul edilip kayma anındaki ϕ' değeri elde edilebilmektedir.



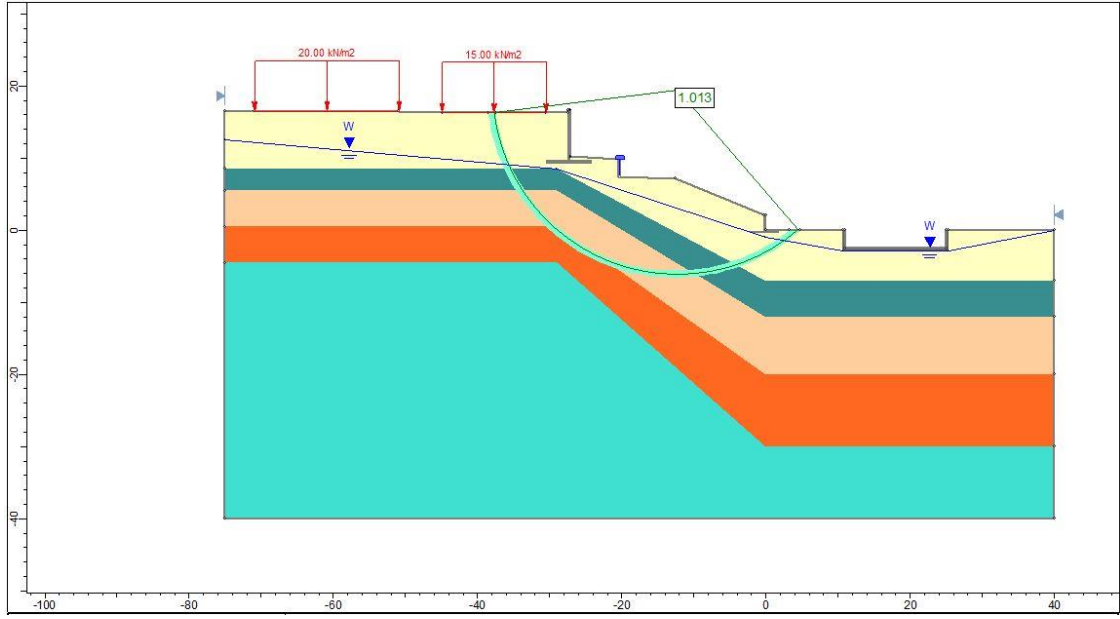
Şekil 13. Kısa dönem duraylılık analizinin sonucu



Şekil 14. Uzun dönem duraylılık analizinin sonucu

Heyelan alanı vaziyet planında görüldüğü gibi şevin taç kısmında 5 adet, topuk kısmında ise 3 adet olmak üzere toplam 200 m uzunluğunda 8 adet sondaj kuyusu açılmış ve her kuyudan belirli tarihlerde inklinometre okumaları alınmıştır. Şevin taç kısmındaki 5 adet inklinometre okuması ile topuk kısmındaki 3 adet inklinometre okuması birlikte değerlendirilerek sahadaki gözlemler ışığında 1 m genişliğinde bir kayma dairesi oluşturulabilmiştir (İnklinometre okumalarının derinlikle değişimini gösteren grafikler Ek-1’de verilmiştir). Söz konusu kayma uzun dönemde gerçekleşmiş olduğundan yenilme düzleminde efektif gerilmenin hâkim olduğu değerlendirilerek c' için sıfıra yakın bir değer seçilmiş ve kayma anındaki ϕ' değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu varsayımlar çerçevesinde limit denge analizleri yapılarak geri analiz yöntemiyle güvenlik katsayısını 1.0 veren $(c' - \phi')$ çifti aranmıştır.

Analizlerde Mohr-Coulomb yenilme kriteri dikkate alınmış ve Spencer yöntemi kullanılmıştır. Bu analizlerin sonucunda yenilme anındaki (güvenlik katsayısını 1 yapan) içsel sürtünme açısı $\phi'=20^\circ$ olarak elde edilmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Spencer yöntemiyle gerçekleştirilen geri analiz sonucu.

C. ŞEV İYİLEŞTİRME ANALİZLERİ

Yapılan analizler sonucunda mevcut şevin duraylılığının yeterli güvenlikte olmadığı anlaşıldığından ve ayrıca saha incelemeleri sonucunda mevcut şevde yer yer kaymalar olduğu tespit edildiğinden mevcut şevlerin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çeşitli şev iyileştirme yöntemleri bulunmakla birlikte bu yöntemleri; şevde hareketi tetikleyen etkenlerin azaltılmasına yönelik tedbirler (aktif yöntemler) ve zeminin kayma dayanımının artırılmasına yönelik tedbirler (pasif yöntemler) olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirmek mümkündür. Bu tedbirler ayrı ayrı uygulanabileceği gibi birlikte de uygulanabilmektedir.

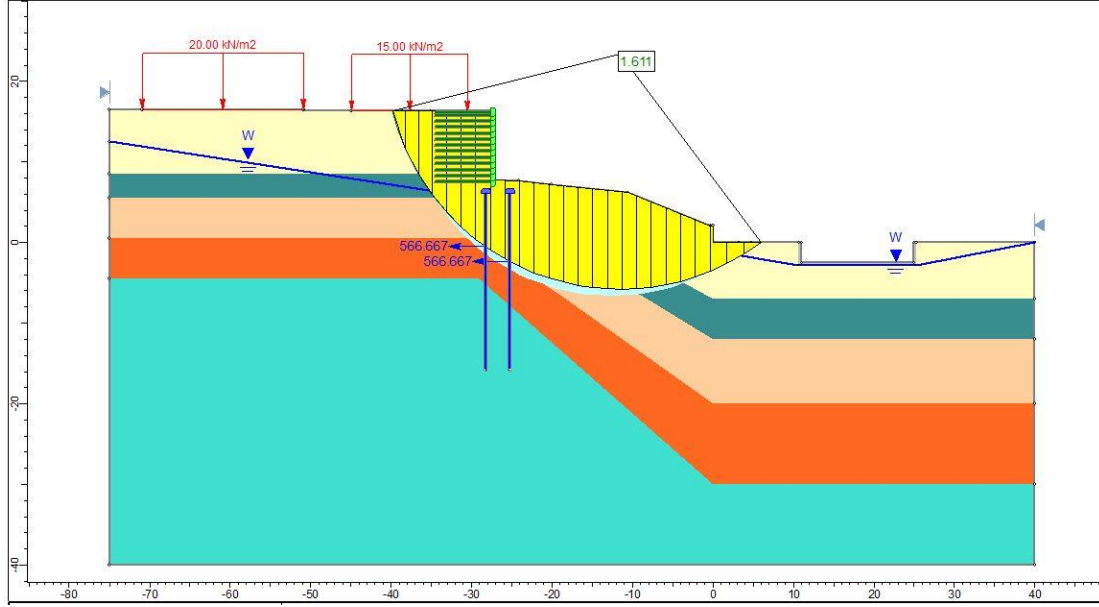
Şev iyileştirme/heyelan önleme yöntemlerinin seçiminde, potansiyel yenilme biçiminin şekli, olası yenilme sonuçları, imar sınırı, mevcut yapıların durumu, maliyet ve gerekli zaman gibi faktörler göz önünde bulundurularak uygun bir iyileştirme yöntemine karar verilmektedir.

Bu çalışmada, heyelanı önlemek için birçok analiz yapılmış ve farklı alternatifler değerlendirilmiştir. Heyelan alanının park olması nedeniyle yukarıda açıklanan hususlar da göz önünde bulundurularak heyelanı önlemek için alınacak tedbirler aşağıdaki gibi planlanmıştır:

- Yatay drenler ile yeraltı su seviyesinin düşürülmesi ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncının azaltılması,
- Şevin tepe kısmından 10 m kazı yapılarak 22 m boyunda 120 cm çapında 300 cm ara ile çift sıra fore kazık yapılması,
- Kazıkların 5 m eninde, 1 m kalınlığındaki bir başlık kirişiyle bağlanması,
- Başlık kirişi üzerine yol kotuna kadar 9 m yüksekliğinde çelik şerit ile güçlendirilmiş toprakarme bir duvar yapılması.

Planlanan bu iyileştirme çalışmaları dikkate alınarak iyileştirilmiş şev modelinin limit denge analizi yapılmış ve güvenlik katsayısı 1,6 olarak bulunmuştur (Şekil 16). Böylece heyelanın durdurulması için planlanan uygulamaların etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Projeye esas imalatlar 2020 yılında tamamlandıktan sonra Mart 2022’de çalışma sahasına gidilerek yerinde gözlemler yapılmış ve herhangi bir kayma/deformasyon belirtisine rastlanmamıştır. Kazık imatları sırasında (Temmuz 2020’de) çekilmiş bir foto Şekil 17’de, imalatlar tamamlandıktan ve park/yol hizmete açıldıktan sonra (Mart 2021) çekilmiş bir foto ise Şekil 18’de sunulmuştur. İmalat sonrası inklinometre ölçümleri alınmadığından kayma olup olmadığına dair ölçüme dayalı herhangi bir veri elde edilememiştir.



Şekil 16. İyileştirilmiş şevin Spencer yöntemiyle gerçekleştirilen limit denge analiz sonucu.



Şekil 17. Kazık imatları sırasında (Temmuz 2020’de) çekilmiş bir foto.



Şekil 18. İmalatlar tamamlandıktan sonra (Mart 2021) çekilmiş bir foto.

VII. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada heyelan meydana gelmiş bir şevin duraylı hale getirilmesi ve heyelanın durdurulmasına yönelik bir çalışma ortaya konulmuştur. Duraylılık analizleri limit denge yöntemlerini esas alan Slide 8.0 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uzun dönem ve kısa dönem duraylılık koşullarına göre mevcut durumun analiz edilmiş ve kritik durumun uzun dönem parametrelerin kullanılmasıyla meydana geldiği görülmüştür.

Arazi deneyleri ve saha gözlemleri ile kayma dairesi tahmin edilerek limit denge yöntemi ile geri analiz yapılarak artık (rezidüel) parametreler belirlenmiştir.

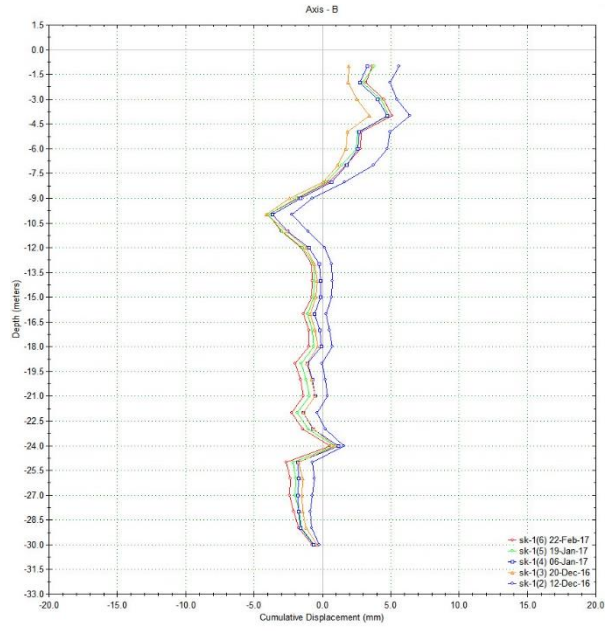
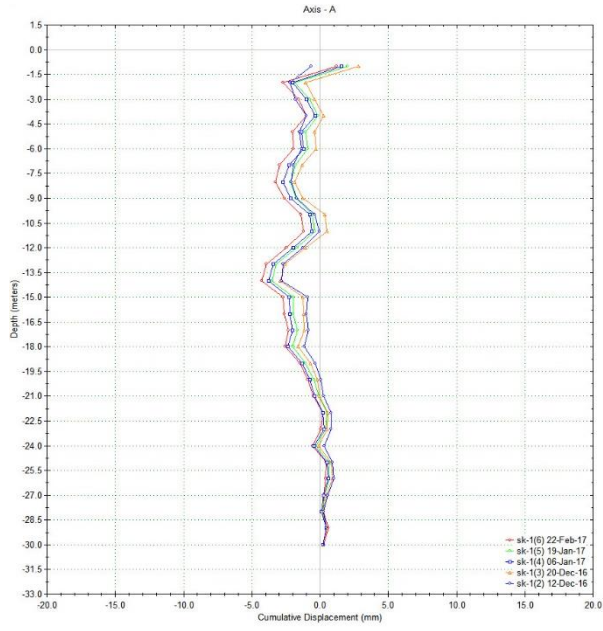
Şevin tepe bölgesinden geçen yolun güvenlik durumu ve ekonomik unsurlar dikkate alınarak şevi duraylı hale getirecek iyileştirme modeli tasarlanmıştır. Bu model, yatay drenler ile YASS'nin düşürülmesi, kazı yapılarak şevin düzenlenmesi ve 120 cm çapında 300 cm ara ile çift sıra fore kazık ve bunları birbirine bağlayan 1 m kalınlığındaki başlık kirişi yapılması ve yol kotuna kadar toprakarme duvar yapılması şeklinde planlanmıştır. Artık parametreler kullanılarak Slide 8.0 programı ile iyileştirilmiş şev modelinin duraylılık analizleri yapılmış ve güvenlik sayısı 1,6 olarak elde edilmiştir. Elde edilen güvenlik katsayısı 1,50 değerinden fazla olduğundan iyileştirilmiş modelin uygun olduğuna karar verilmiştir.

TEŞEKKÜR: Çalışmada kullanılan arazi ve laboratuvar verilerini bizimle paylaşan Ankara Büyükşehir Belediyesi Fen İşleri Dairesi Başkanlığı Sanat Yapıları Proje Şube Müdürlüğü personeline teşekkür ederiz.

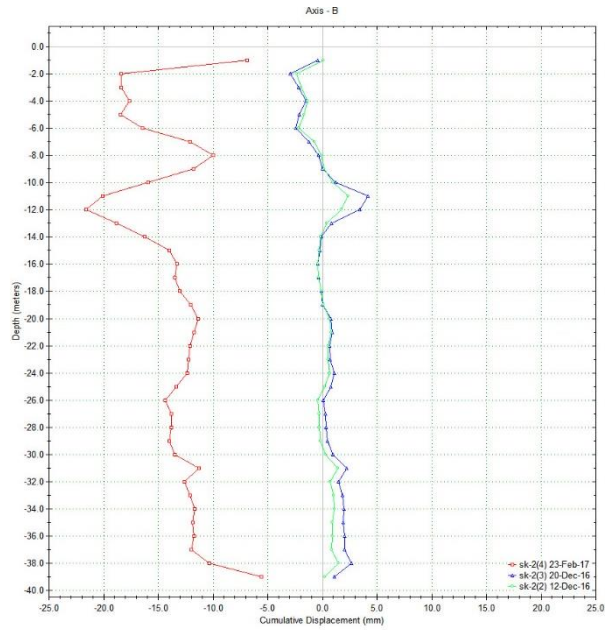
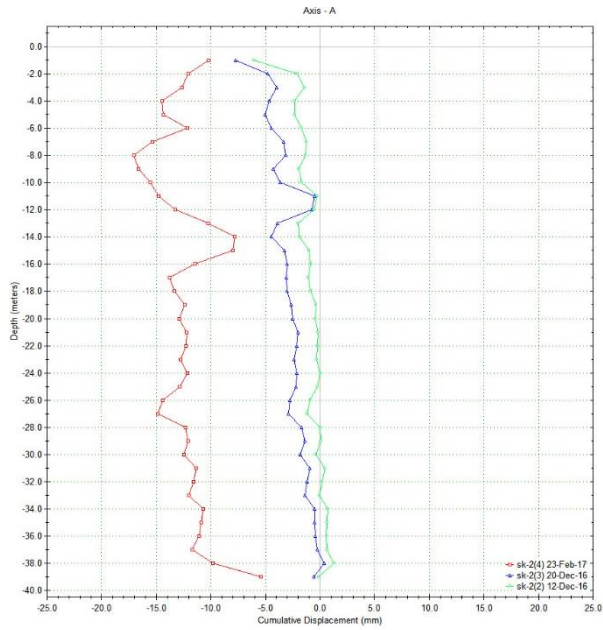
VIII. KAYNAKLAR

- [1] K. Öztürk, "Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri," *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 22, s. 2, ss, 35-50, 2002.

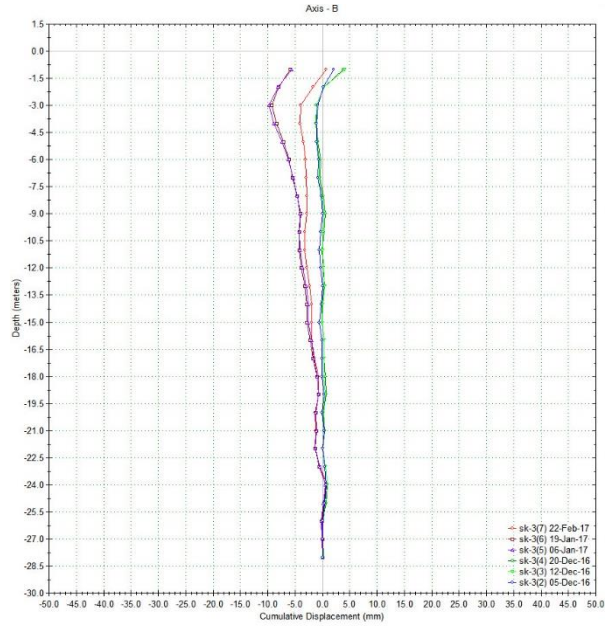
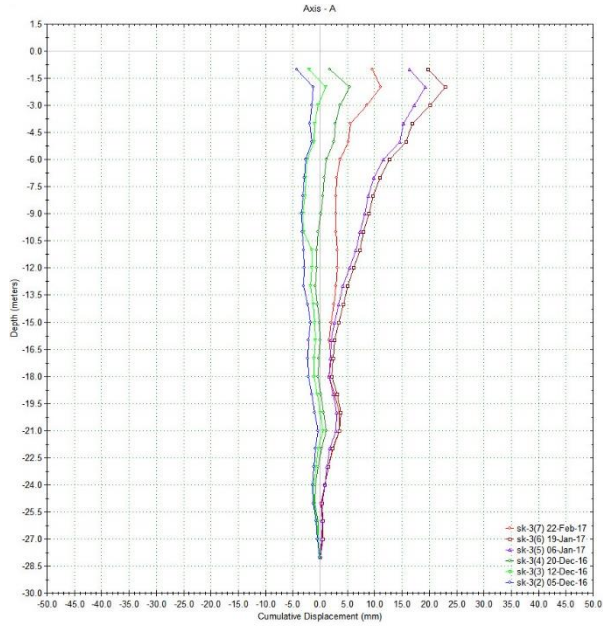
- [2] R. Ulusay, Ö. Aydan, R. Kılıç, “Geotechnical assessment of the 2005 Kuzulu landslide (Turkey),” *Engineering Geology*, vol. 89, no. 1-2, pp. 112-128, 2007.
- [3] Ulusay, R., “Heyelanlar ve Mühendislik Şevlerindeki Duraysızlıklar: Türleri, Etkileri ve Zararların Azaltılması,” *Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu*, Türkiye, 2007, ss. 28-29.
- [4] D.G. Fredlund, and J. Krahn, , “Comparison of slope stability methods of analysis,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 14, no 3, pp. 429-439, 1977.
- [5] J.M. Duncan, and S.G. Wrigth, “The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis,” *Engineering Geology*, vol. 16, no. 1-2, pp. 5-17, 1980.
- [6] D.G. Fredlund, J. Krahn, and D.E. Pufahl, “The Relationship Between Limit Equilibrium Slope Stability Methods,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol. 3, 1981, pp. 409-416.
- [7] I.M. Morrison, and J.R. Greenwood, “Assumptions in simplified slope stability analysis by the method of slices,” *Geotechnique*, vol. 39, no. 3, pp. 503-509, 1989.
- [8] N.A. Hammouri, A. I. H. Malkawi, and M.M.A. Yamin, “Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach,” *Bulletin of Engineering Geology*, vol. 67, pp. 471-478, 2008.
- [9] TBDY-2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2018.
- [10] M.A. Stroud, “The standard penetration test in insensitive clays and softrock,” in *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, Stockholm, Sweden, vol. 2, no. 2, June 5-7, 1974, pp. 366-375.
- [11] K. Terzaghi, R.B. Peck and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 4rd ed., New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp. 151-152.
- [12] K. Senneset, R. Sandven ve N. Janbu, “Evaluation of soil parameters from piezocone tests,” *Transportation Research Record*, no. 1235, 1989, pp. 24-37.
- [13] Rocscience Inc., *Slide 2D*, v.2018, limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes, Bilgisayar programı, Bentley Systems, Incorporated, USA, 2018.



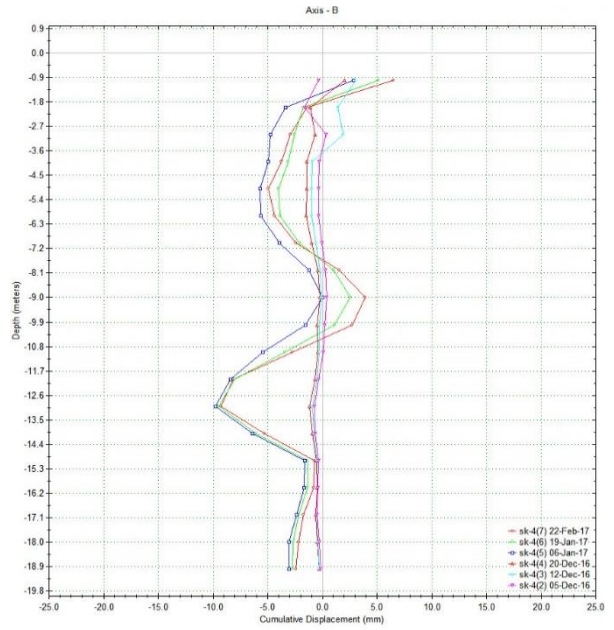
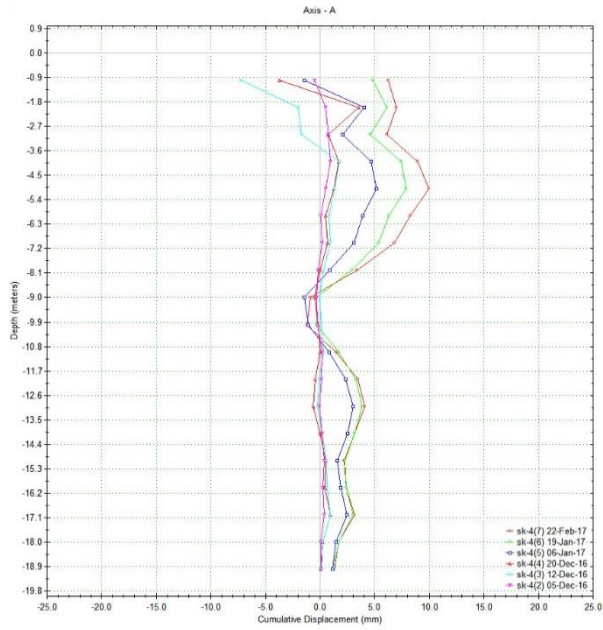
Ek Şekil 1. SK-1'de yapılan inklinometre ölçüm sonuçları.



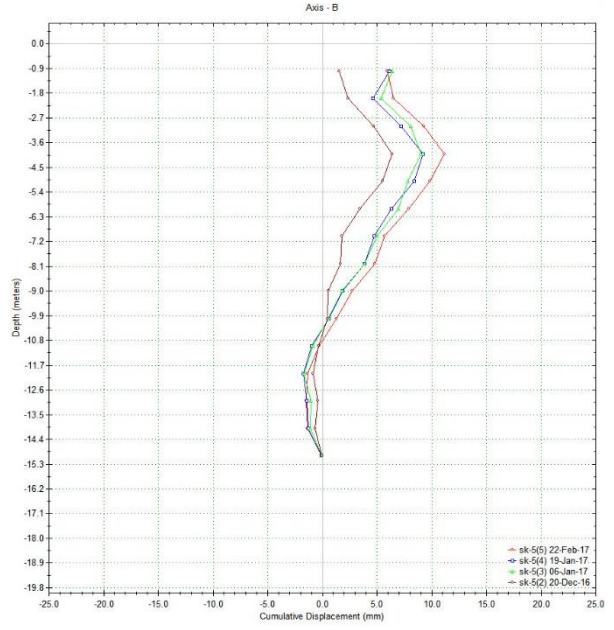
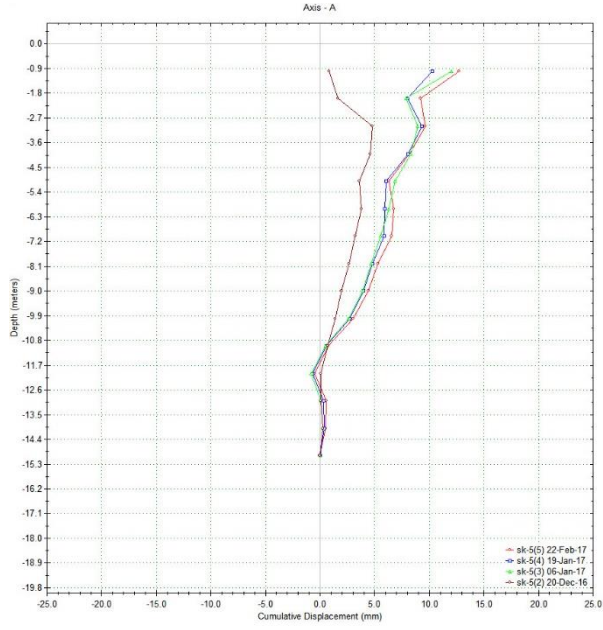
Ek Şekil 2. SK-2'de yapılan inklinometre ölçüm sonuçları.



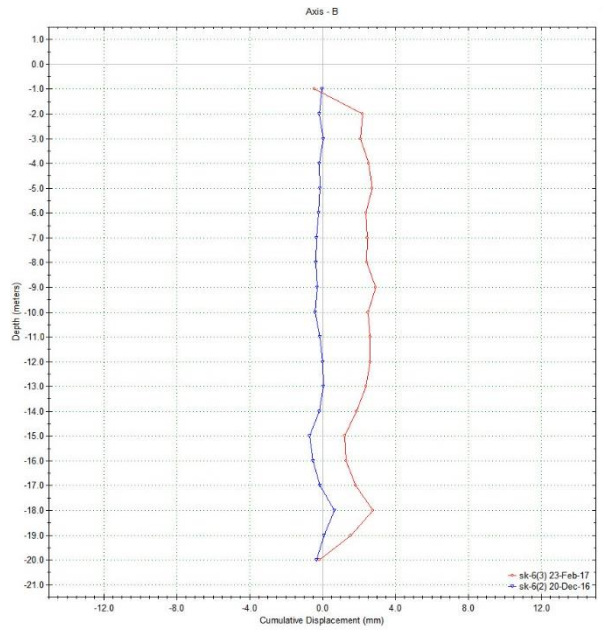
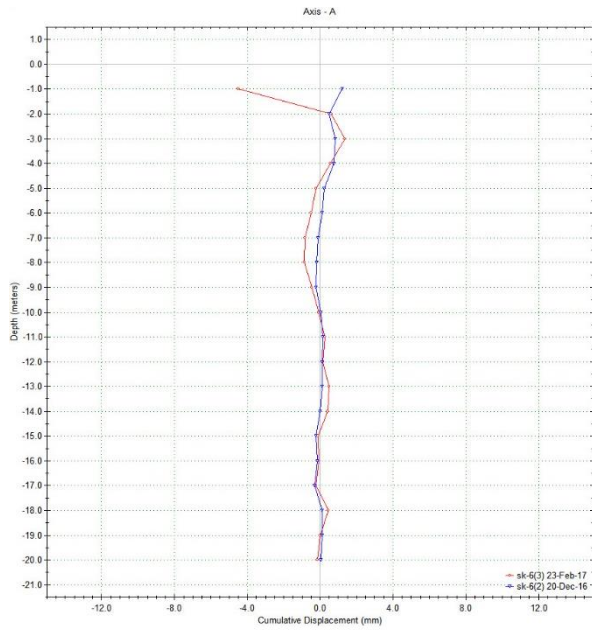
Ek Şekil 3. SK-3 'de yapılan inklinometre ölçüm sonuçları.



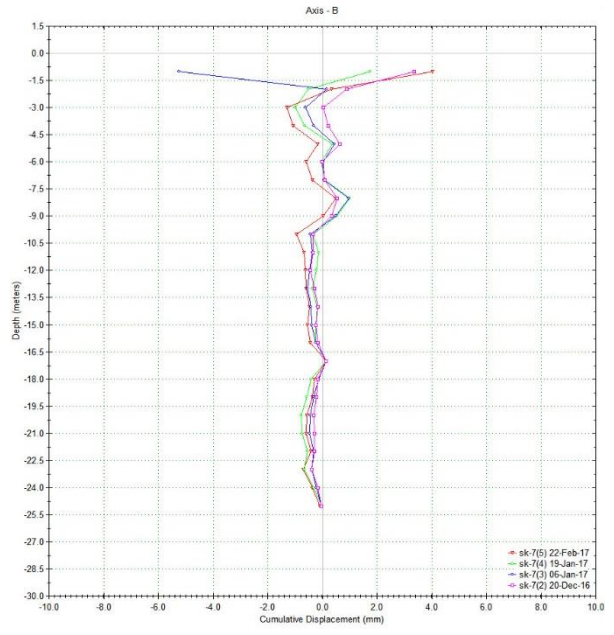
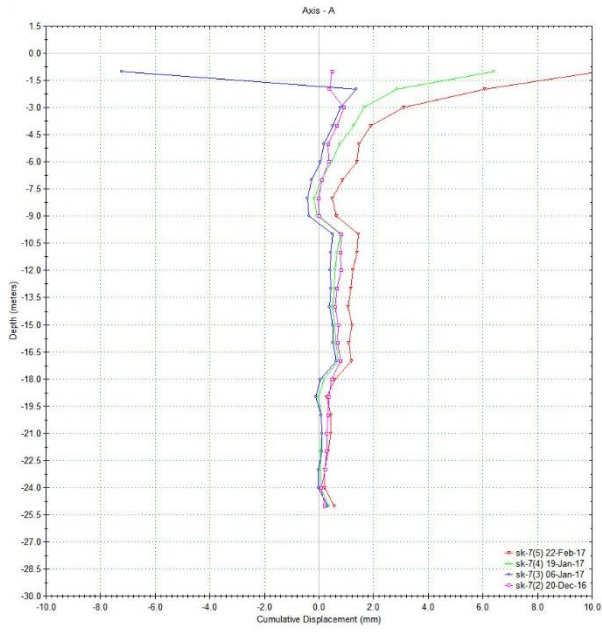
Ek Şekil 4. SK-4 'de yapılan inklinometre ölçüm sonuçları.



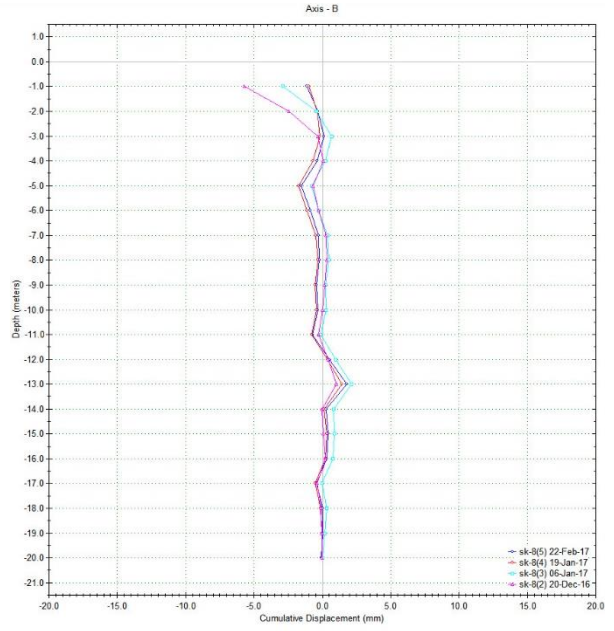
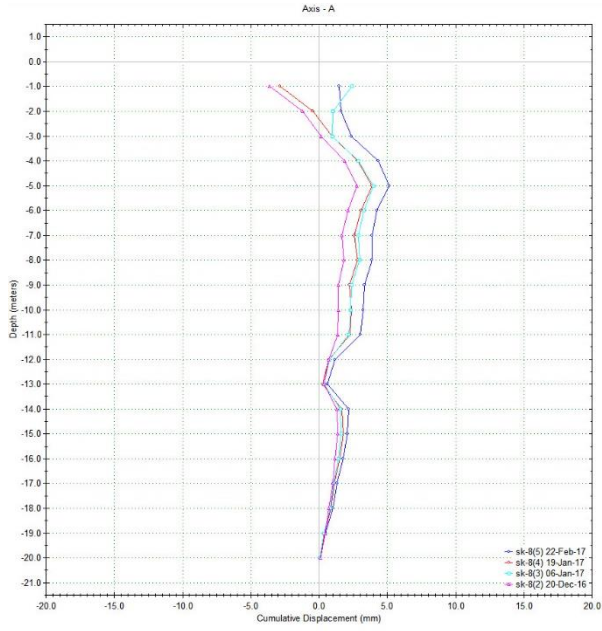
Ek Şekil 5. SK-5'de yapılan inclinometre ölçüm sonuçları.



Ek Şekil 6. SK-6'da yapılan inclinometre ölçüm sonuçları.



Ek Şekil 7. SK-7'de yapılan inclinometre ölçüm sonuçları.



Ek Şekil 8. SK-8'de yapılan inclinometre ölçüm sonuçları.