

Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarının Yamaç Şevlerinin Duraylılığı ve Sahaların Geçirimsizliği

¹Sercan DOĞAN ^{2*}Aşkın ÖZOCAK ²Ertan BOL ²Sedat SERT

¹Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Öğrencisi, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Özet:

Bu bildirinin amacı; katı atık düzenli depolama sahalarının inşası sırasında oluşturulacak olan yamaç şevlerin duraylılığının incelenmesi ve taban geçirimsizliğine etki eden parametrelerin araştırılmasıdır. Bildiride, halen kullanılmakta olan katı atık düzenli depolama sahasında mevcut atık depolama sahasının yanında inşa edilecek 2. Lot sahası için yürütülen çalışmalar değerlendirilmekte olup burada yapılmış uygulama projeleri ve proje raporundan faydalanılmıştır. Ayrıca, literatür çalışması ile birlikte, katı atık düzenli depolama sahası tasarlanırken yürütülmüş olan arazi gözlemleri, laboratuvar deneyleri ve duraylılık analizleri değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Katı atık depolama, şev stabilitesi, geçirimsizlik

Permeability and Stability of Solid Waste Regular Storage Areas

¹Sercan DOĞAN ^{2*}Aşkın ÖZOCAK ²Ertan BOL ²Sedat SERT

¹Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Graduate Student, Sakarya, Turkey

²Sakarya University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Sakarya, Turkey

Abstract:

The aim of this study is to investigate the stability of slopes of solid waste sanitary landfill areas and investigate the parameters which affect the base impermeability. Second lot area will be built next to the existing waste storage area of solid waste sanitary landfill. In this study, application projects and project report of second lot area have been utilized. In addition, during the design of solid waste sanitary landfill area, field observations, laboratory experiments and stability analyzes have been utilized, as well as the studies have been done previously by researchers who worked in this area. In this paper, previous studies for this solid waste landfill area and its components, field studies, laboratory experiments and stability analyses of the slopes have been evaluated.

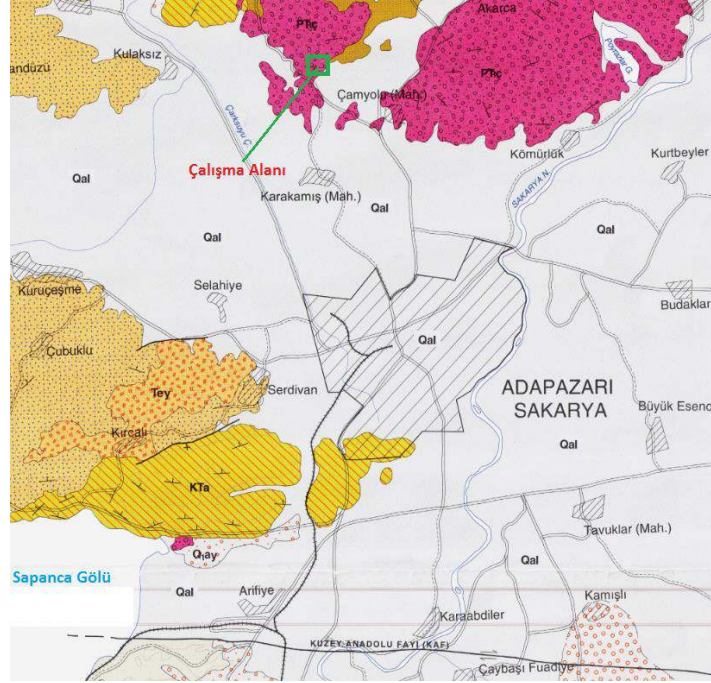
Key words: Waste storage, slope stability, permeability

1. Giriş

Adapazarı'nın 6 km kuzeyinde Taşkısığı mevki dolayındaki Çakraz Formasyonu (PTRç) yüzeylenmeleri üzerinde Adapazarı Büyükşehir Belediyesi tarafından inşa edilmiş katı atık depolama alanı bulunmaktadır (LOT-1). Söz konusu çöp depolama alanı kuzey doğu istikametine

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: aozocak@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955737

doğru LOT-2 ve LOT-3 alanları şeklinde genişletilecektir. Çalışma alanında rastlanılan kırmızı renkli kumtaşları Çakraz Formasyonuna (PTRç) ait olup bu kumtaşları Adapazarı ovasının kuzeybatı ve kuzey kesimindeki yükseltileri oluşturmaktadır (Şekil 1). Çalışma alanını temsilen çekilmiş fotoğraflarda kırmızı kumtaşlarının özellikle üst kesimlerinin çok parçalı - ayrışmış olduğu izlenmektedir (Şekil 2) [1].



Şekil 1. İnceleme alanı ve çevresine ait jeolojik harita (MTA)



Şekil 2. Çalışma alanında kırmızı kumtaşları

2. İnceleme Alanının Jeolojisi

Birimin üzerinde gelişmiş olan ayrıışmış toprak örtüsünün kalınlığı bitkisel örtünün yaygın olduğu alanlarda 0.5-1.5 metre arasında değişmektedir. Kumtaşları, kırmızı, mor sarımsı gri renkli, orta tane boylu, orta-kötü boylanmalı, ince-kalın katmanlanmalıdır. Kumtaşı düzeyleri çok kırıklıdır. Kumtaşları ile ardalananan çamurtaşları, kırmızı-kahve-mor renkli, ince katmanlı, yaprağımsı mika pullu yarılım düzeylidir. Çamurtaşları Söğütlü yakın güneyinde, tanımlanmış lamelli, branj fosilli kireçtaşı merccekleri içermektedir. Çakraz Formasyonu, Karasu güneyinde yaklaşık 1500 m kalınlığa ulaşmakta olup, karasal ortamda çökeltmiştir. Permiyen-Triyas yaşta olan formasyon, Yılanlı Formasyonu üzerine açısız uyumsuz olarak oturmaktadır. Akyol ve diğerleri (1974) [2] tarafından Cide-Kurucaşile dolaylarında adlanmış olan birim, tabanda gri renkli, genellikle dolomit, şeyl ve kırmızı renkli kumtaşı ile yeniden kristallenmeli kireçtaşı gereçli çakıltaşı ile başlamaktadır. Çakıltaşı düzeyleri, üste doğru, kırmızı renkli kumtaşı, siltli çamurtaşı ardalanmalı düzeylere dönüşmektedir.

Birim Adapazarı ovasının kuzey kesiminde Taşlı Geçit ve Akgölköy arasındaki antiklinalin kenarındaki ve Söğütlü Kurudil arasındaki antiklinalin güney kenarındaki yüzeylenmelerin büyük bir bölümünü oluşturur. İlk alanda, Yılanlı Formasyonu'na ait masif kireçtaşları üzerinde açısız uyumsuzlukla yer alan Çakraz Formasyonu'na ait kaba kırıntılı kayalar kireç taşlarının düzensiz paleotopoğrafyasını doldurmuş, kireçtaşlarına ait eski karstik boşlukların içine girmiştir. Birimin, doğrudan kireçtaşları üzerine geldiği kesimlerde yer yer eski lateritik düzeyler ve kırmızı toprak oluşumları gözlenebilir. Söğütlü doğusundaki alanlarda Çakraz Formasyonu'na ait birimler Soğuksu ve Karadere Formasyonları'nın üzerine açısız uyumsuzlukla gelmektedir.

Çakraz Formasyonu, istifin çok güzel görüldüğü Çamdağı kuzeybatısında bir taban çakıltaşı ile başlar. Çakıl taşları iri-orta taneli, kötü boylanmalı, kalın ve kötü tabakalanmalı, çoğun mercceksidir. Çakıllar genellikle iyi yuvarlaklanmış, daha az köşeli, bazen yassılanmış olup çakılların büyük bir bölümü Çamdağ grubuna ait düşük dereceli metamorfizmalı silttaşları, kuvarsitler ve dolomitik kireçtaşlarından oluşmaktadır. Üste doğru birim kırmızı-pembe-kirlisarı-mor renkli kumtaşları ile ardalananan kırmızı-mor renkli çamurtaşlarından oluşur. Seyrek olarak ince taneli çakıltaşı merccekleri ve bantları içerir.

Birimi oluşturan kumtaşları değişken tane boylu, yarı yuvarlak-yarı köşeli, değişken tabaka kalınlıklı, kötü derecelenmeli, büyük ölçekli çapraz katmanlı, sert köşeli kırıklanmalı litik arenitlerdir. Mikroskop altında kumtaşları kötü boylanmalı, kötü yıkanmalı olup egemen kırıntılarını feldispatlar oluşturmaktadır.

Kayada kırıntılı olarak bol miktarda muskovit, ayrıışmış biyotit, hematitleşmiş opak mineraller yanında kuvars arenit, metamorfik kayaç parçaları, granitik kayaç ve dolomit gibi kaya kırıntılarını yer alır. Çimento çok az olup kilden oluşmaktadır. Kumtaşları ile ardalananan çamurtaşları, kırmızı-mor renkli, kumlu ve killi, bol mikalı ve ince tabakalıdır. Tabakaların sürekliliği yoktur. Mikroskop altında kayada kil-silt boyunda çimento ile çimentolanmış ince taneli feldispat, kuvars ve mikalar gözlenir.

Birimin içinde, alt bölümde çamur taşları ile birlikte yer alan ve seyrek olarak gözlenen açık

renkli kiltaşlarında Çamdağ batısında Üst permien yaşı veren polenler saptanmıştır. Birimin üst bölümündeki gölsel kayalarda ise (Başköy Formasyonu) birimin tip yerinde Üst Trias yaşı veren spor ve polenler yer alır. Genelde birimin alt bölümünün kanal dolgusu ve taşkın ovası, orta bölümünün eolien, üst bölümünün ise gölsel ortamda çökeldiği belirlenmiştir. İncelenen alanda gözlenen birimler ise akarsu ve delta önü (delta front) ortamını yansıtmaktadır.

Çakraz Formasyonu'na ait kayaçlar incelenen alan ve yakın çevresinde Üst Kretase paleosen yaşlı Yemişliçay Formasyonu'na ait kayaçlarla açısal uyumsuz olarak örtülür. Uyumsuzluk incelenen alanda Taşlıgeçit köyü batısında ve Kurudil köyü kuzeyinde gözlenebilmektedir.

3. Katı Atık Alanı Kaya Kütle Değerlendirmesi

Çalışma alanı Çakraz Formasyonu'na ait kayalık bir birimden oluşmaktadır. Kaya mühendislik yapılarına ait tasarım çalışmalarında iki farklı yaklaşım söz konusudur. Bunlar görgül ve sayısal tasarım yaklaşımlarıdır. Sayısal yaklaşımlar, genel olarak kaya malzemesinin mekanik özelliklerini (E , v , c , ϕ , σ_c gibi) geliştirilen matematiksel yaklaşımlarda kullanarak tahkimatsız ve tahkimatlı koşullar altında duraylılık çözümlenmeleri yapabilmektedir. Görgül yaklaşımlar ise mühendislik tecrübeleri, gözlemleri ve sezgileriyle geliştirilen kılavuz abaklar yardımıyla tahkimat önerilerinde bulunabilmektedir. Her iki yaklaşım için gerekli girdi parametreleri sahada karşılaşılan kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen kaya mekaniği ve geoteknik çalışmalarla belirlenmektedir. Kaya kütle parametrelerini sayısal bir formda ifade eden bütüncü yaklaşımına kaya kütle sınıflama sistemleri tanımı yapılmaktadır. Kaya kütle sınıflama sistemleri 1950'li yıllardan sonra geliştirilmeye başlanmış olup bugün yaklaşık 30 adet sınıflama sistemi mevcuttur. Bu sistemler için gerekli girdi parametreleri genel olarak sahada yapılan sondaj çalışmalarından belirlemektedir. Yaygın olarak kullanılan RMR (Bieniawski, 1973) [3] ve Q (Barton ve diğ., 1974) [4] sınıflandırma sistemleri daha çok tünel, maden ve yeraltı boşluklarında gerekli tahkimatın projelendirilmesine yönelik olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte Hoek ve Brown (1997) [5] tarafından önerilen Jeolojik Dayanım İndisi-GSI kaya kütlelerini genel mühendislik problemleri için sınıflandırabilmektedir. Hoek ve Brown'un bu çalışması 2002 yılında revize edilmiş (Hoek ve diğ., 2002) [6] ve bu çalışma sırasında yeni kriterler uygulanarak çözüme gidilmiştir. Bu çalışmada da GSI sistemine göre çalışma alanındaki kaya kitlesinin sınıflandırılması yapılmış ve şev geometrisinin projelendirmesinde kullanılabilecek olan ön parametrelerin çıkartılması amaçlanmıştır.

Şekil 2'den izleneceği üzere ortamdaki kayaçların özellikle yüzeye yakın kısımlarının çok bloklu olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte blokların çok yüzeyli ve en az 4 adet çatlak sistemi olduğu düşünülmektedir. Bu bakımdan; GSI sınıflamasında ilk adım olan kaya kitlesinin yapısal özellik niteliği Şekil 3'e göre çok bloklu (*very blocky*) olarak alınabilir. Çatlaklar düzgün yüzeyli - düze yakın, hafif orta - çok derecede altere olmuş yüzeylere sahip olduğundan yine Şekil 3'e göre orta yüzey kalitesi orta (*fair*) alınabilir. Buna göre kaya kitlesinin GSI puanı 40 alınabilir.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
<p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80					
<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70					
<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60					
<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50					
<p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	40					
	30					
	20					
	10					
	N/A					
	N/A					

Şekil 3. Aks alanını temsil eden birimlerin GSI sınıflaması

GSI ile kaya kitlesinin mühendislik parametrelerinin ortaya çıkartılabilmesi için; serbest basma dayanımı (σ_c) ve sürtünmeye bağlı, kırılmızs kaya için malzeme sabiti olan m_i 'nin ölçümü veya tahmini gerekmektedir. Hoek m_i sabitinin çeşitli kayalardaki değerlerini belirleyebilmek için sunmuş olduğu çizelgede şeyllerde 6 ± 2 ve kumtaşlarında 17 ± 4 alınabileceğini belirtmiştir. Buna göre çalışma alanındaki birimleri temsilen kırmızı kumtaşlarından oluşan birimin ortalama $m_i = 15$ alınabilir.

Eklemlı kaya kütleleri için Hoek-Brown [5] genel yenilme kriterinde büyük ve küçük asal gerilmeler arasındaki ilişki

$$\sigma_1^l = \sigma_3^l + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right) \quad (1)$$

şeklinde verilmiştir.

Burada σ_1^l ve σ_3^l yenilme anındaki maksimum ve minimum efektif gerilmelerdir. m_b kaya kütesinin Hoek-Brown sabitidir. Burada m_b kırılmızs kaya için malzeme sabiti olan m_i 'nin

azaltılmış değeridir. Söz konusu sabit

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2)$$

formülü ile bulunabilir [6]. Burada D örselenme faktörüdür, bu çalışmada yapılacak şev kazısı sırasında geometri patlatma yerine kazılarak oluşturulacağından D=0.70 alınmış ve bu suretle $m_b=2.85$ bulunmuştur. s ve a kaya kütlelerinin karakteristik özelliklerine bağlı sabitlerdir. Bunlar

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3)$$

formülleri ile hesaplanabilir [3]. Bu durumda $s=0.0002$ ve $a=0.512$ olarak hesaplanmıştır. σ_{ci} sağlam kayanın tek eksenli basma dayanımıdır. Çalışma alanından numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı sonuçları Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Kırmızı Kumtaşları Üzerinde Gerçekleştirilen Serbest Basma Deney Sonuçları

Örnek No	Renk	Çap (cm)	Boy (cm)	M (gr)	ρ_n (kN/m ³)	P (kN)	σ_c (MPa)
1	Kızıl Kahve	4.82	9.11	431.31	22.45	77.63	42.55
2	Kızıl Kahve	4.80	9.54	462.38	26.28	55.53	30.69
3	Kızıl Kahve	4.81	9.23	437.03	25.56	29.61	16.29
4	Kızıl Kahve	4.82	9.64	471.03	26.27	30.97	16.97

Buradan güvenli tarafta kalınarak en düşük basma dayanımı $\sigma_{ci}=16$ MPa olarak seçilmiştir. Kaya kütlelerinin tek eksenli basma dayanımı σ'_3 sifıra eşitlenerek aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (4)$$

Buna göre kaya kütlelerinin tek eksenli basma dayanımı $\sigma_c=0.187$ MPa olarak hesaplanmıştır. Çekme dayanımı (σ'_t) da şu şekildedir;

$$\sigma'_t = -\frac{s \sigma_{ci}}{m^b} \quad (5)$$

Böylelikle kaya kütlelerinin çekme dayanımı $\sigma'_{tm}=-0.005$ MPa’dır. Bununla birlikte durum üç boyutlu olarak düşünüldüğünde çevre basıncının etkisi ile yukarıda hesaplanan σ_c değeri tüm kayanın dayanımını (σ_{cm}) ortaya koymak için aşağıdaki formül kullanılarak $\sigma_{cm}=1.506$ MPa olarak hesaplanır.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (6)$$

Hoek-Brown yenilme kriteri kaya kitlesinin deformasyon modülünün aşağıdaki şekilde hesaplanmasına olanak verir [5].

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)} \quad (7)$$

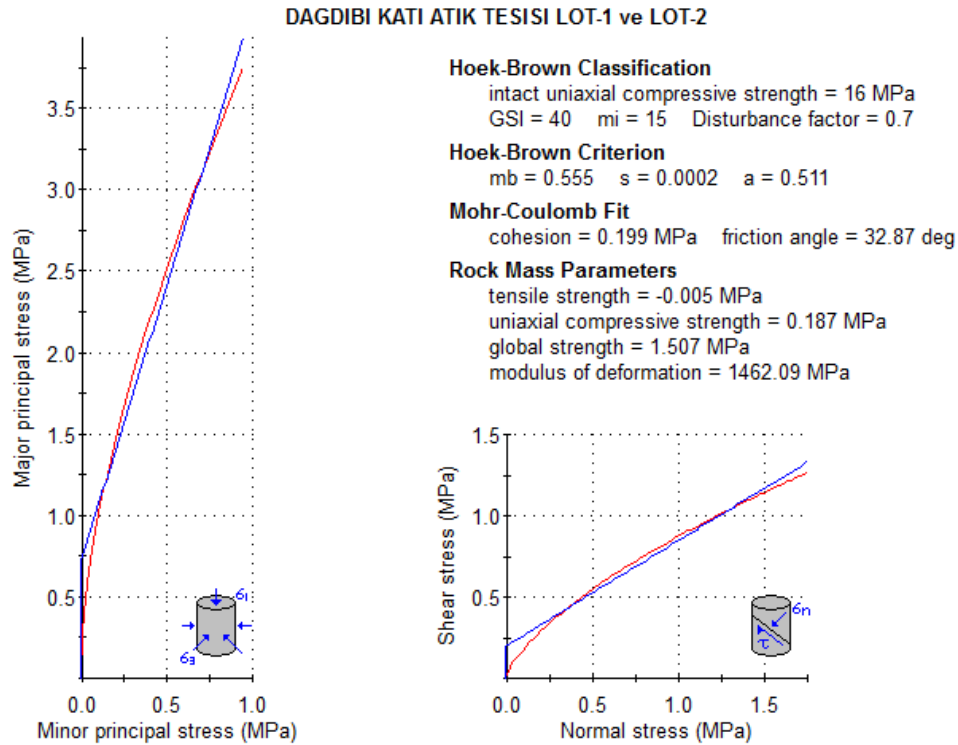
Buradan $E_m=1.462$ GPa olarak bulunmuştur.

Söz konusu parametrelerin hesabı için Excel sayfası oluşturulmuş ve buna göre elde edilen hesap sonuç özeti Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Hoek-Brown (2002) Kriterine göre Kaya Kitlesi Özellikleri

GSI	σ_d (MPa)	m_i	D	m_b	s	a	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	σ_{tm} (MPa)	E_m (MPa)
50	26.62	17	0.7	0.555	0.0002	0.512	0.187	1.506	-0.005	1.462

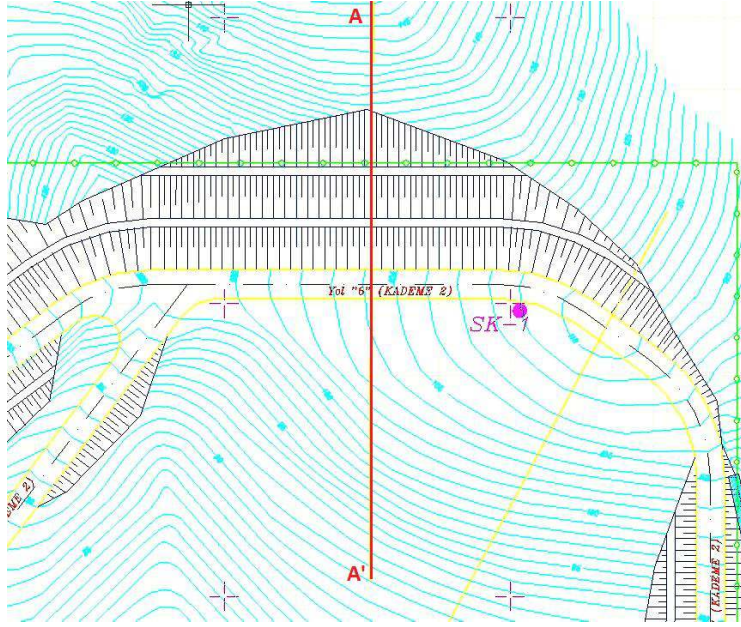
Hoek-Brown kriterinden büyük ve küçük asal gerilmeler ile Mohr zarfı ilişkisini çıkarmak mümkündür. Bu bakımdan hem hesaplamaların doğruluğunu hem de söz konusu Mohr-Coulomb parametrelerinin ortaya çıkarılması ile kullanılan yazılım çıktısı Şekil 4’te gösterilmektedir. Hesap edilen sonuçlar ile yazılım çıktısı aynıdır. Bununla birlikte kaya kitlesinin kohezyonun $c=200$ kPa ve sürtünme açısının da $\phi=32$ derece olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. GSI ile kaya kütlesi özellikleri ve Mohr-Coulomb parametreleri

4. Stabilite Analizleri

Çöp alanında stabilite analizleri en kritik şev durumunda olan LOT-3 kısmının kuzey yarması için yapılmıştır. Burada Şekil 5'te söz konusu kesit hattı (A-A') gösterilmektedir. İdare tarafından temin edilen projede 30 metrelik bir yarma söz konusudur. Bu araştırma kapsamında ise söz konusu yarmanın 40 metre olması durumundaki performansı da ayrıca incelenmiştir.

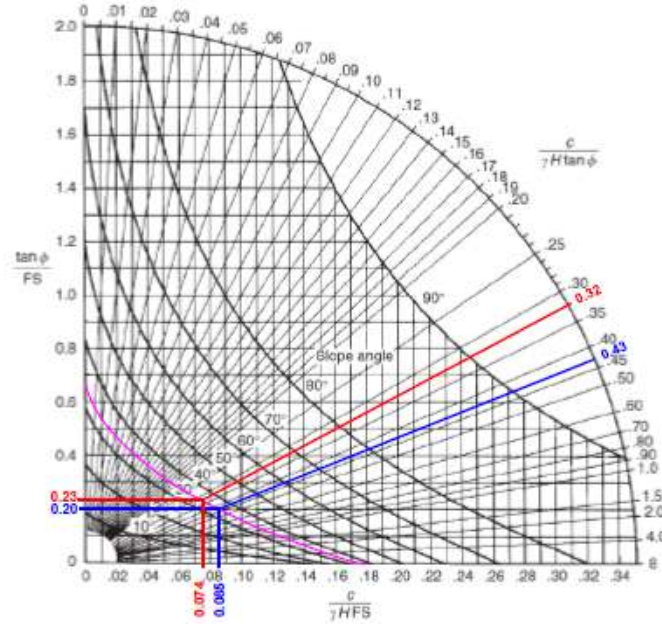


Şekil 5. LOT-4 kısmı A-A' kesiti

4.1. Hoek&Bray stabilite çözümü

Hoek&Bray (1977) tarafından parçalanmış çok çatlaklı kaya şevleri için geliştirmiş olan stabilite abakları yardımı ile oluşturulacak şevlerin güvenliği araştırılmıştır. Sondaj loglarında yeraltı suyu rapor edilmediğinden ortam kuru kabul edilirse Hoek&Bray [7] stabilite abaklarından 1 nolu grafik ile çözüme gidilebilir (Şekil 6).

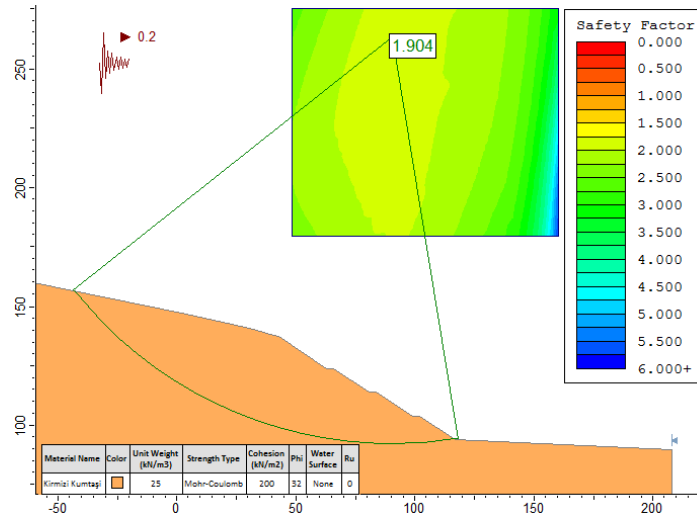
Kaya kitlesinin kohezyonun $c=200$ kPa ve sürtünme açısının da $\phi=32$ derece olarak alınması durumunda; $H=30$ metre şev yüksekliği (H) için 3 yataya 2 düşey eğimde ($\beta \approx 34^\circ$) açılacak bir şev için güvenlik sayısı $GS\phi=3.12$ ve $GSc=3.14$ olarak bulunur. Bununla birlikte $H=40$ metre şev yüksekliği için 3 yataya 2 düşey eğimde güvenlik sayısı $GS\phi=2.72$ ve $GSc=2.70$ olarak bulunur.



Şekil 6. 1 Nolu stabilite abağı (kuru şev)

4.2. Slide analizi

Yukarıdaki analizlere ek olarak bu kısımda planlanan 30 metrelik şevin stabilite analizi SLIDE yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yukarıda kaya kütlesi için bulunan kayma dayanımı parametreleri ($c=200$ kPa ve $\phi=32^\circ$) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde güvenlik sayısı 3.19 olarak hesaplanmıştır ki bu değer [5] yaklaşımı ile bulunan değerlere oldukça yakındır. Bununla birlikte 40 metrelik şevin güvenlik sayısının da yine yukarıdaki stabilite abağından bulunan değere yakın bir şekilde 2.857 olarak değerlendirilmesi dikkate değerdir. Aynı şevin ($H=40$ m) depremli durumda yatay deprem katsayısı $k_h=0.2g$ alınarak yapılan çözümünde ise güvenlik sayısının 1.904 olduğu izlenmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. 40 metrelik şev için stabilite analizi (kuru şev, deprem var, $k_h=0.2g$)

Sonuçlar

Yapılan analizlere göre “1 Yatay / 1 Düşey” oranında gerçekleştirilmesi düşünülen ve yukarıda basamak (palye) yükseklik ve genişlikleri verilen yarmalarda stabilite açısından bir problem görülmemektedir. Dolgular için de “3 Yatay / 2 Düşey” oranında gerçekleştirilecek şev geometrisi için stabilite açısından problem yaşanmayacağı anlaşılmıştır. Sondaj çalışmalarında yeraltı suyu rapor edilmediği için yapılan stabilite analizlerinde YASS modellenmemiştir. Bu sebeple çöp dolgu alanından yapılacak yarma ve dolgulara herhangi bir sızıntı olmaması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

Referanslar

- [1] Sakarya Lot-2 Katı Atık Depolama Sahası Geoteknik Raporu, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2017.
- [2] Akyol Z, Arpat E, Erdoğan B, Göğçer E, Güner Y, Şaroğlu F, Şentürk İ, Tütüncü K, ve Uysal Ş, (1974), “Cide-Kurucaşile dolayının 1:50 000 ölçekli jeoloji haritası ve açıklaması”, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Türkiye büyük ölçekli jeoloji haritaları serisi.
- [3] Bieniawski ZT, (1973). “Engineering classification of jointed rock masses”. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs 15, 335-344.
- [4] Barton FE, Amos HE, Albrecht WJ, Burdick D, (1974). “Treating peanut hulls to improve digestibility for ruminants”. J. Anim. Sci., 38 (4): 860–864
- [5] Hoek E, Brown ET, (1997). “Practical estimates or rock mass strength”. Int. J. Rock Mech. Min.g Sci. & Geomech. Abstr.. 34 (8): 1165-1186.
- [6] Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B, (2002). “Hoek-Brown failure criterion-2002 edition”. In: Proceedings of the 5 th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 1: 267–73.
- [7] Hoek E, Wood D, Shah S, (1992). “A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses”. Proc. rock characterization, symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock ‘92, (ed. J.A. Hudson), 209-214. London: Brit. Geol. Soc.