

Zayıf Kumtaşı Biriminde Açılan Bir Şevin Deterministik ve Güvenilirlik Analizleri ile İncelenmesi

S. Şehnaz AKTAŞ ARI^{1*}

M. Şükrü ÖZÇOBAN²

Mehmet M. BERİLGİN³

ÖZ

Bu makalede zayıf kayada açılan şevlerinin güvenilirliğinin incelenmesi ve kaya şevi tasarımlarına ışık tutulması amaçlanmıştır. Bunun için bir otoyol güzergâhında, Trakya Formasyonunda açılmış bir yarma şevi deterministik ve güvenilirlik analizleri ile incelenmiştir. İncelenen otoyol şevinin olası kaymasının proje kapsamında yapılan mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği verilerine dayalı olarak kama şeklinde gelişeceği varsayımı ile farklı örselenme durumları için Hoek-Brown ve Mohr-Coulomb kırılma kriterleri ile Janbu ve Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi kullanılarak deterministik duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Güvenilirlik analizlerinde ise dikkate alınan olası kayma kaması için Birinci Mertebe Güvenilirlik Yöntemi, Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi ve Monte Carlo Simülasyonu ile duraylılık analizleri yapılmıştır. Python programlama dili ile geliştirilen bir algoritma aracılığıyla gerçekleştirilen bu analizler kapsamında kullanılan olasılık ve güvenilirlik fonksiyonları açık kaynaklı OpenTURNS kütüphanesinden alınmıştır. Dikkate alınan kaya şevinin güvenilirlik değerlendirmesi için kayma dayanımı parametreleri, çatlak suyu derinlik oranı ve yatay deprem ivmesi stokastik değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Kayma dayanımı parametrelerinin olasılıksal özellikleri, Trakya Formasyonuna ait saha ve laboratuvar verilerine dayalı olarak elde edilmiştir. Yapılan deterministik analizler, kaya kütle özelliklerinin ve hesaplama yaklaşımlarının şev duraylılığı üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu göstermiştir.

Yapılan olasılıksal duraylılık analizleri, göçme olasılığı veya güvenilirlik indeksi gibi tasarım ve değerlendirme amaçları için gerekli sonuçları sağlamıştır.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 17 Nisan 2025 günü ulaşımıştır. 13 Haziran 2025 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- xx xxxxx xxxxxx gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
sevincsehnaz@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-7440-082X>

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
ozcoban@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3521-0633>

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
berilgen@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-6544-011X>

* Sorumlu yazar

Anahtar Kelimeler: Kaya şevleri, zayıf kaya, Trakya Formasyonu, güvenilirlik analizi, olasılıksal yaklaşım.

ABSTRACT

Investigation of a Cutting Slope in a Weak Sandstone Using Deterministic and Reliability Analysis

This article aims to investigate the reliability of slopes opened in weak rocks and to provide insight into the design of rock slopes. For this purpose, a cut slope opened in the Thrace Formation on a highway route was examined with deterministic and reliability analyses. Based on the engineering geology and rock mechanics data obtained within the scope of the project, assuming that the probable slip of the highway slope examined would develop in the form of a wedge, deterministic stability analyses were performed using the Hoek-Brown and Mohr-Coulomb failure criteria and Janbu and Generalized Limit Equilibrium Method for different disturbance conditions. In the reliability analyses, stability analyses were performed with the First Order Reliability Method, First Order Second Moment Method, and Monte Carlo Simulation for the probable slip wedge considered. The probability and reliability functions used in these analyses, which were performed using an algorithm developed in Python, were obtained from the open-source OpenTURNS library. For the reliability assessment of the considered rock slope, shear strength parameters, crack water depth ratio, and horizontal earthquake acceleration were considered as stochastic variables. Probabilistic properties of shear strength parameters were obtained based on field and laboratory data of the Thrace Formation. Deterministic analyses have demonstrated that rock mass properties and calculation approaches have a significant impact on slope stability. Probabilistic stability analyses provided necessary results for design and evaluation purposes, such as failure probability or reliability index.

Keywords: Rock slope stability, weak rock, Thrace Formation, reliability-based analysis, probabilistic design approach.

1. GİRİŞ

Kaya şevleri, karayolu, demiryolu, baraj, tünel ve açık ocak madenciliği gibi birçok mühendislik uygulamasında karşılaşılan önemli geoteknik problemlerdendir. Her ne kadar kaya ortamlar, zeminlere kıyasla daha yüksek dayanım özelliklerine sahip gibi görünse de doğal heterojen yapıları, süreksizlik sistemleri, ayrışma dereceleri ve zemin suyu koşulları gibi faktörler nedeniyle karmaşık bir davranış sergilerler. Bu durum, kaya kütlelerinde meydana gelen şev göçmelerinin hem mühendislik hem de çevresel riskler açısından ciddi sonuçlar doğurmasına neden olur. Özellikle zayıf kaya birimlerinde açılan yarmalar ve eğimli arazilerdeki kazılar, stabilite açısından daha kırılgan bir yapıya sahiptir. Kaya şevlerinin stabilite değerlendirmeleri genellikle deterministik analizler ile yapılmakta olup, bu analizlerde şevin güvenliği tek bir güvenlik katsayısı ile ifade edilmektedir.

Ancak bu yaklaşımda kullanılan kaya dayanım parametrelerinin sabit kabul edilmesi dolayısı ile doğada var olan değişkenlik göz ardı edilmektedir. Nitekim geoteknik mühendisliğinde

gözlenen belirsizlikler yalnızca fiziksel parametrelerden değil; modelleme yaklaşımı, ölçüm hataları ve mühendislik yorumlarından da kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle deterministik analizler, mühendislik kararlarında yetersiz kalabilmekte ve ekonomik olmayan tasarımlara yol açabilmektedir (Duncan, 2000) [5]. Deterministik analizlerin, kaya kütle parametrelerindeki belirsizlikleri yeterince yansıtamaması nedeniyle geliştirilen olasılıksal analiz yöntemleri, bu parametrelerin olasılık dağılımlarıyla modellenmesini esas alır. Bu yaklaşımlarda güvenlik katsayısı tekil bir değer olarak değil, bir dağılım fonksiyonu şeklinde ele alınmakta; böylece şevin göçme olasılığı istatistiksel yöntemler aracılığıyla nicel olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde yer alan birçok çalışma, bu yöntemlerin mühendislik kararlarında daha gerçekçi sonuçlar sunduğunu göstermektedir (Low ve Tang, 2007; Park vd., 2006; Jimenez-Rodriguez ve Sitar, 2007) [6], [7], [8]. Özellikle Birinci Mertebe Güvenilirlik Yöntemi (FORM), Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (FOSM) ve Monte Carlo Simülasyonu gibi yöntemler, kaya şev analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda yapay zekâ tabanlı yöntemler, Latin hiperküp örnekleme ve uzamsal stokastik modellemeler, analizlerin etkinliğini artırmak adına literatürde öne çıkmıştır (Bozkurt ve Akbaş, 2023; Zhang vd., 2023) [9], [10]. Zayıf kaya ortamlarında, özellikle ayrılmış kumtaşı, kiltası ve tuf gibi birimlerde süreksizliklerin süreklilik durumu, boşluk suyu basıncı ve deprem ivmesi gibi parametreler şev duraylılığını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004) [11], [12]. Ancak bu tür kayaçlar gerek yapısal süreksizliklerin düzensiz dağılımı gerekse mühendislik parametrelerinin yüksek belirsizlik içermesi nedeniyle, deterministik yöntemlerle yapılan analizlerde çoğunlukla yeterince temsil edilememektedir. Literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı, bu tip birimlerde yürütülen analizlerin deterministik yaklaşımlarla sınırlı kaldığını ve güvenilirlik temelli, çok değişkenli olasılıksal analizlerin sınırlı sayıda uygulandığını ortaya koymaktadır (Baecher & Christian, 2003; Einstein & Baecher, 1983) [13], [14]. Bu durum, zayıf kayaçlarda şev stabilitesi çalışmalarında olasılıksal yaklaşımların daha yaygın kullanılmasına duyulan ihtiyacı ve bu alandaki bilimsel boşluğun hâlen güncelliğini koruduğunu göstermektedir (Duncan, 2000; El-Ramly et al., 2002) [15], [16].

Bu makalede zayıf kayada açılan şevlerinin güvenilirliğinin incelenmesi ve güvenilirliğe dayalı kaya şevi tasarımlarına ışık tutulması amaçlanmıştır. Bunun için bir otoyol güzergâhında, Trakya Formasyonunda açılmış bir yarma şevi deterministik ve güvenilirlik analizleri ile incelenmiştir. İncelenen otoyol şevinin olası kaymasının proje kapsamında yapılan mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği verilerine dayalı olarak kama şeklinde gelişeceği varsayımı ile farklı örselenme durumları için Hoek-Brown (2002) [1] ve Mohr-Coulomb (Terzaghi et al., 1996) [2] kırılma kriterleri ile Janbu ve Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi kullanılarak deterministik duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Güvenilirlik analizlerinde ise dikkate alınan olası kayma kaması için Birinci Mertebe Güvenilirlik Yöntemi (FORM), Birinci Mertebe İkinci Moment Yöntemi (FOSM) ve Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ile duraylılık analizleri yapılmıştır.

2. GÜVENİRLİĞE DAYALI TASARIM

Güvenilirlik analizlerinin temel amacı şevin göçme olasılığını sayısal olarak tahmin etmektir. Bu bağlamda, göçme olasılığı (P_f), şev duraylılığı güvenliği açısından kritik bir ölçüt olup,

belirlenen limit durum fonksiyonuna göre sistemin göçmeye ulaşma olasılığını temsil eder. Güvenilirlik analizi süreci genel olarak beş temel adımdan oluşur:

1. *Analitik modelin tanımlanması*: Bu adımda, şev sistemine ilişkin güvenlik katsayısını veya performans ölçütünü hesaplayacak bir model oluşturulur. Bu model basit bir matematiksel ifade olabileceği gibi, detaylı bir sayısal analiz süreci de olabilir. Gerekirse, modeldeki sistematik önyargı ve hesap hataları da güvenilirlik hesaplarına dahil edilebilir. Örneğin, yaygın taşıma gücü formüllerinin genellikle muhafazakâr olduğu ve sistematik sapma içerdiği bilinmektedir (Baecher & Christian, 2003) [13].
2. *Parametrelerin istatistiksel tanımlarının yapılması*: Güvenilirlik analizinde yalnızca zemin özellikleri değil, yükleme koşulları ve geometri gibi diğer etkenler de rastgele değişkenler olarak tanımlanır. Bu değişkenlerin ortalama değerleri (μ), standart sapmaları (σ), kovaryansları ve dağılım şekilleri (örneğin normal, log-normal, Beta vb) dikkate alınır. Ayrıca mekânsal korelasyonlar veya çarpıklık gibi ileri düzey istatistiksel bilgiler de analizlere entegre edilebilir.
3. *Performans fonksiyonunun istatistiksel özelliklerinin hesaplanması*: Performans fonksiyonu, çoğu zaman güvenlik katsayısını referans alan bir limit durum fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu fonksiyonun ortalaması ve varyansı, sistem davranışının olasılıksal değerlendirmesine temel oluşturur. Kohezyonlu bir zeminde dik şev gibi ideal durumlarda performans fonksiyonu doğrudan çözülebilirken, çoğu gerçek mühendislik uygulamasında yaklaşıklık yöntemlerine ihtiyaç duyulur.
4. *Güvenilirlik indeksinin (β) hesaplanması*: Güvenilirlik analizi, çoğunlukla performans fonksiyonunun basitleştirilmiş bir ifadesi ile yürütülür. Hasofer–Lind (1974) [17] yöntemi gibi bazı yaklaşımlar, bu adımı 3. adım ile birleştirerek performans yüzeyinin standart normal uzayda analizini yapar.
5. *Göçme olasılığının hesaplanması*: Eğer limit durum fonksiyonu için normal gibi iyi tanımlanmış bir dağılım varsayımı geçerliyse, göçme olasılığı doğrudan hesaplanabilir. Ancak çoğu mühendislik probleminde dağılımın şekli net olmayabilir veya limit durum fonksiyonu karmaşık bir yapı gösterebilir. Bu durumda, farklı yaklaşım ve nümerik yöntemlerin kullanılması gerekebilir.

Göçme olasılığı (P_f), aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$P_f = P(g(x) < 0) \quad [1]$$

Burada $g(x)$, limit durum fonksiyonunu temsil eder ve genellikle şu şekilde tanımlanır:

$$g(x) = F_s - 1 \quad [2]$$

F_s : Güvenlik katsayısı (Safety Factor).

Bu durumda:

- $g(x) > 0$: Sistem güvenli,
- $g(x) = 0$: Sistem kritik durumda,
- $g(x) < 0$: Sistem göçmüş kabul edilir.

Göçme olasılığı, performans fonksiyonu ile rastgele değişkenlerin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonunun kesişim alanında alınan integrale hesaplanır:

$$P_f = \int_{g(x) < 0} f_x(x) dx \quad [3]$$

Bu integralin çözümü için farklı yöntemler kullanılmaktadır:

- **Monte Carlo Simülasyonu:** Rastgele örnekleme yöntemiyle $g(x) < 0$ koşulunu sağlayan örneklerin oranı doğrudan belirlenir.
- **FORM (First Order Reliability Method):** Performans fonksiyonu standart normal uzaya taşınır, ardından güvenilirlik indeksi β hesaplanır. Göçme olasılığı şu şekilde ifade edilir:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad [4]$$

Burada Φ , standart normal dağılımın kümülatif yoğunluk fonksiyonudur.

- **FORM (First Order Second Moment):** Performans fonksiyonunun birinci mertebeye Taylor açılımı üzerinden ortalama ve varyansı hesaplanır ve yine β üzerinden göçme olasılığı tahmin edilir.

Göçme olasılığı $P_f \ll 1$ olduğunda, sistemin yeterli güvenlikte olduğu kabul edilir. Her bir yöntemin kendine özgü varsayımları ve doğruluk dereceleri vardır; bu nedenle mühendislik uygulamalarında birden fazla yöntemle analiz yapılarak karşılaştırma yapılması önerilmektedir (Baecher & Christian, 2003) [13].

2.1. FORM-Hasofer Lind Yöntemi

Birinci Mertebe Güvenilirlik Yöntemi (FORM), mühendislik uygulamalarında sistem güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan deterministik olmayan bir yöntemdir. Bu yöntem, limit durum yüzeyi (Limit State Surface – LSS) ile sistemin güvenli bölgesi arasındaki mesafeyi güvenilirlik indeksi (β) cinsinden tanımlar. Güvenilirlik indeksi, sistemin göçme olasılığına karşı ne kadar güvenli bir bölgede yer aldığını gösteren nicel bir ölçüttür (Hasofer & Lind, 1974; Ditlevsen & Madsen, 1996) [17], [18].

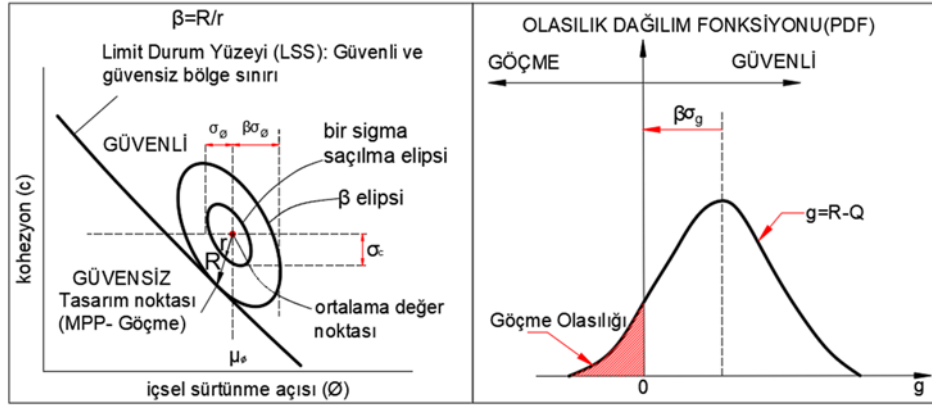
FORM analizinde amaç, olasılık yoğunluk fonksiyonu sabit olan (yani kontur şeklinde) güvenli bölge sınırının, limit durum yüzeyi ile teğet olduğu noktayı – yani tasarım noktasını (Most Probable Point, MPP) – bulmaktır. Bu nokta, sistemin geçmeye en yakın olduğu konumu temsil eder. Güvenilirlik indeksi (β), bu tasarım noktası ile ortalama parametre değerlerinin oluşturduğu nokta arasındaki mesafenin standart sapma birimleri cinsinden ölçüsüdür ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\beta = \sigma/R \quad [5]$$

Burada R = tasarım noktasından ortalama noktaya olan mesafe ve σ = standart sapmadır. Limit durum yüzeyi (LSS), parametre değerlerinin güvenli kombinasyonlarını, güvensiz olanlardan ayıran kritik bir sınır olarak tanımlanır. Şekil 1’de kayma mukavemeti açısı ve kohezyon değişimleri ve limit durum yüzeyi ile göçme olasılığı dağılım fonksiyonu gösterilmiştir.

2.2. FOSM

Birinci Derece ve İkinci Moment Yaklaşımı (FOSM), bir sistemin güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılan temel olasılıksal yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, sistemin davranışı, rastgele değişkenlerin birinci (ortalama, μ) ve ikinci (varyans, σ^2) momentlerine dayanarak analiz edilir. FOSM yöntemi, doğrusal olmayan limit durum fonksiyonlarını, birinci dereceden Taylor serisi açılımı kullanarak doğrusal biçimde temsil eder (Benjamin & Cornell, 1970; Baecher & Christian, 2003) [20], [13].



Şekil 1 - (a) $c - \phi$ düzleminde c ile negatif korelasyonlu güvenilirlik endeksi β 'nin gösterimi (b)Güvenilirlik indeksi ve başarısızlık olasılığının grafiksel gösterimi (Cornell, 1969'dan uyarlanmıştır) [19]

Bu yöntemde, sistemin güvenliğini belirleyen limit durum fonksiyonu $g(X)=0$ şeklinde tanımlanır. Burada X , sistemin rastgele parametrelerini temsil eden vektördür. Limit durum fonksiyonu, göçmenin gerçekleştiği sınırı tanımlar. FOSM yaklaşımında temel analiz adımları şunlardır:

- Limit durum fonksiyonunun tanımlanması: $g(X)=0$, göçme/yenilme durumunu tanımlayan bir limit durum fonksiyonudur.
- Parametrelerin istatistiksel tanımlarının yapılması: Rastgele değişkenler (x_i) için ortalama (μ_i) ve standart sapma (σ_i) değerleri hesaplanır.
- Güvenilirlik İndeksi (β): Limit durum fonksiyonu $g(X)$ 'nin doğrusal yaklaşık modeli üzerinden güvenilirlik indeksi, aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\beta = \mu_g / \sigma_g \quad [6]$$

Burada μ_g , limit durum fonksiyonunun ortalama değeri; σ_g ise varyansdır. Bu değer, daha sonra normal dağılım varsayımı altında göçme olasılığını hesaplamak için kullanılır:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad [7]$$

FOSM, özellikle sistemin limit durum fonksiyonunun açık biçimde ifade edilebildiği ve parametrelerin normal dağıldığı varsayımının kabul edilebilir olduğu mühendislik uygulamalarında oldukça yaygın bir yöntemdir.

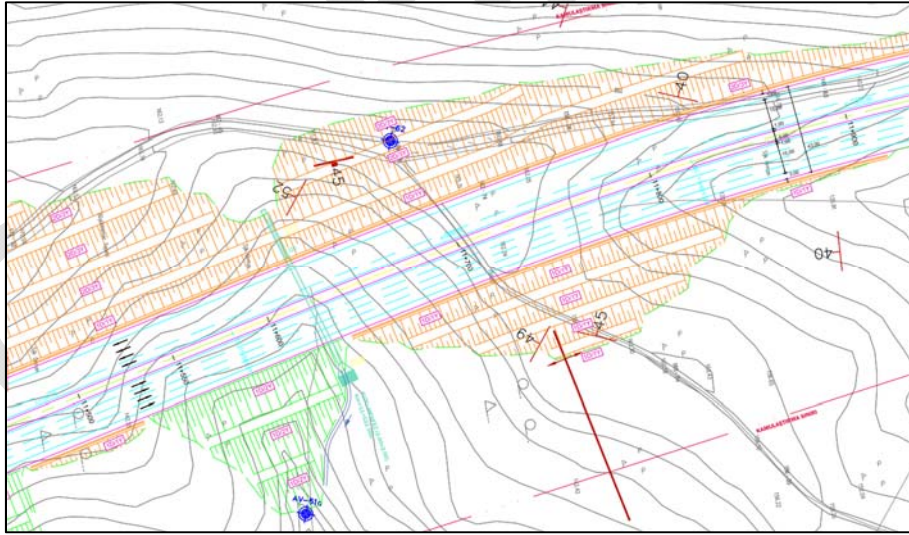
Ancak doğrusal yaklaşımların yeterli olmadığı durumlarda FORM gibi yöntemlere göre daha sınırlı kalabilmektedir (Ang & Tang, 1984; Ditlevsen & Madsen, 1996) [21], [22].

3. GÜVENİLİRLİK ANALİZLERİNE ÖRNEK: BİR OTOYOL KAYA ŞEVİ

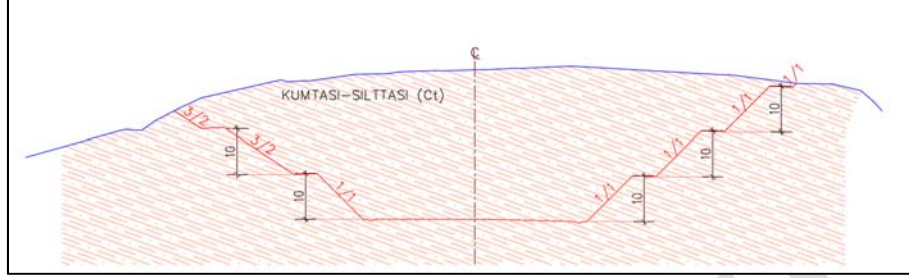
Bu makalede amaçlanan kaya şevlerinin güvenilirlik analizleri ile incelenmesi için İstanbul ili, Avrupa yakasında yer alan bir otoyol güzergahı kapsamında açılan bir sandık yarma örnek olarak seçilmiştir. Trakya formasyonunda açılan bu yarma kesitine ait mühendislik jeolojisi bulguları ile kaya kütleleri özelliklerine dayalı olarak gerçekleştirilen deterministik ve olasılıksal analizlerin detayları aşağıda verilmiştir.

3.1. Saha Jeolojisi

Güzergâhta genel olarak İstanbul paleozoyik istifinin Kambriyen yaşlı Trakya formasyonunun kumtaşı, silttaşı, ara seviye olarak kiltası ile şeyl kaya birimleri ile bu birimleri uyumsuzlukla örten genelde katı-sert kıvamlı ince malzemeler ile sıkı nitelikte kum, çakıl boyu malzemelerden oluşan Miyosen çökelleri yer almaktadır. Bu birimlerin de üzerine farklı kalınlıklarda ve aralıklarda yapay dolgu ve gevşek tutturulmuş alüvyon birimlerine rastlanmıştır. Şekil 2, 3 ve Fotoğraf 1’de yarmanın bulunduğu kesime ait plan görünüşü, jeolojik modeli işlenmiş enkesit, uydu fotoğrafı ve saha fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 2 - İncelenen örnek kaya yarmasına ait plan görünüşü



Şekil 3 - İncelenen şevin yer aldığı yarmanın enkesiti



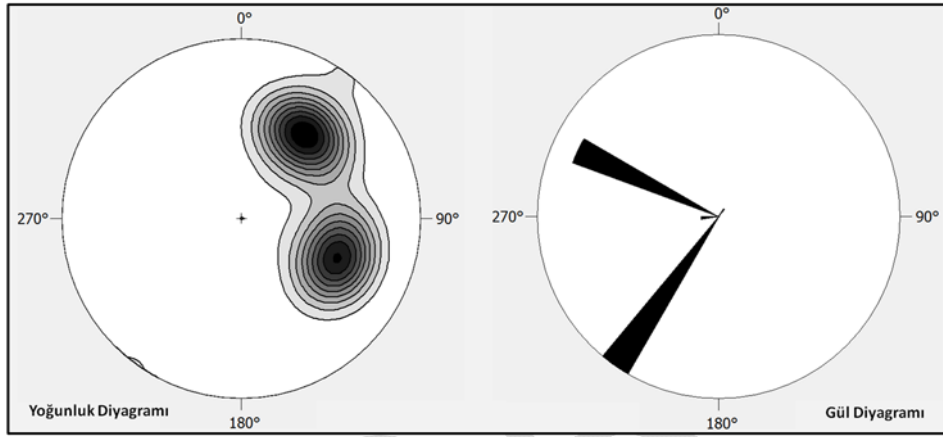
Fotoğraf 1 - İnceleme alanı a) uydu fotoğrafı b) görüntüsü

3.2. Kaya Mekaniği Çalışmaları

Kaya yarmasının açıldığı güzergâh kesimi yaklaşık 10 km uzunluğunda olup Kumtaşı-Silttaşı birimleri içerisinde yer almaktadır. Yarmasının açılacağı bölgede süreksizlik ölçüm çalışmaları yoğunluk haritasına işlenmiş, **yoğunluk (density)** ve **gül (rose)** diyagramları ile analiz edilmiş ve ana süreksizlik düzlemleri belirlenmiştir (Şekil 4). Gül diyagramı, baskın süreksizlik yönelimlerini grafiksel olarak göstermekte; yoğunluk haritası ise belirli yönlere göre süreksizlik sıklığını görsel olarak vurgulamaktadır. Bu analiz, kinematik stabilite değerlendirmelerinde kullanılacak süreksizlik setlerinin yönelimlerini belirlemek amacıyla hazırlanmıştır.

Ölçüm sonuçlarına göre baskın süreksizlik düzlemleri 217/49 (tabaka konumu) ve 293/45 (tabaka konumu) doğrultu/ eğim değerlerine sahip olup, şevin konumu 261/45 olarak hesaplanmıştır. Süreksizlik yüzeylerine ait içsel sürtünme açısı 35° olarak belirlenmiş ve bu parametre kinematik analizde temel girdi olarak kullanılmıştır. Kinematik analizler, süreksizlik setlerinin şev stabilitesi üzerindeki olası etkilerini stereonet üzerinde grafiksel

olarak göstermektedir. (Şekil 5). Kinematik analizler sonucunda düzlemsel kayma ve devrilme tipi duraysızlıkların oluşmayacağı belirlenmiştir. Ancak kıvrımlı tabakalanma yapısına sahip kumtaşı birimlerinde yapılan ölçümler doğrultusunda kama tipi kayma potansiyeli gözlemlenmiş ve bu durum kaya şevinin stabilite senaryosunda dikkate alınmıştır. Süreksizliklerin süreksizliği ve kısa devamlılıkları göz önüne alındığında, bu kaymaların büyük ölçekli blok hareketlerinden çok, lokal küçük kopmalar şeklinde gelişebileceği şeklinde değerlendirilmiştir.

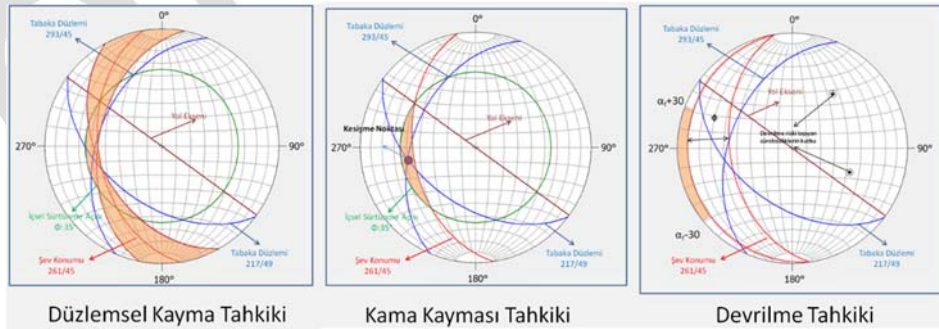


Şekil 4 - Kumtaşı biriminde alınan ölçümlere ait yoğunluk ve gül diyagramı

Yarma şevleri için yapılan sondajda Kumtaşı birimi için alınan karot numuneleri üzerinde yapılan nokta yükleme deneyi sonuçlarından $I_{s50}=0,55$ MPa, 0,46 MPa, 0,62 MPa değerleri elde edilmiştir. Nokta yükleme deney sonucu ortalama 0,54 MPa olarak hesaplanmış, ardından bu değer kullanılarak tek eksenli basınç dayanımı (UCS) aşağıdaki amprik denklemden belirlenmiştir.

$$\sigma_c = k \cdot I_{s50}$$

[8]



Şekil 5 - armanın kinematik analiz sonuçları

Burada; σ_c kayanın tek eksenli basınç dayanımı (MPa), I_{s50} Nokta yükleme indeksi (MPa), k ise kaya türüne göre alınan ampirik katsayıdır. Zayıf kumtaşı için projedeki tek eksenli basınç dayanımı değerleri incelenerek ve literatüre uygun şekilde $k=12$ olarak alınmıştır (ISRM, 2007) [23]. Buna göre yarma şevinin yer aldığı kaya ortamın serbest basınç dayanımı

$$\sigma_c = 12 \times 0,54 = 6,48 \text{ MPa} \approx 7,0 \text{ MPa} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Bu değer, analizlerde kullanılan serbest basınç dayanımı olarak alınmıştır. Şevin yer aldığı zemin koşullarını yansıtan RMR (Rock Mass Rating) değeri, beş ana parametrenin puanlanması ile belirlenmiştir. Değerlendirme Tablo 1'de verildiği şekilde yapılmıştır.

Tablo 1 - RMR puanlama tablosu

Özellik	Değer	Puan	
Tek eksenli basınç dayanımı (UCS)	5–25 MPa	2	
RQD (Rock Quality Designation)	<%25	3	
Süreksizlik	Aralık	<60 mm	5
	Uzunluk	1-3mm	4
	Açıklık	0,1-1mm	4
	Pürüzlülük	Az	3
	Dolgu malzemesi	Sert(<5mm)	2
Yeraltı suyu durumu	Kuru	15	
Ayrışma derecesi	Orta	3	
$\Sigma RMR =$		41	

Duraylılık analizlerinde şev yüksekliği 30 m alınarak Hoek–Brown (HB) kriteri için kayma mukavemeti parametreleri şu şekilde belirlenmiştir:

- Serbest basınç dayanımı: $\sigma_c = 7 \text{ MPa}$
- $GSI = RMR - 5 = 41 - 5 = 36$
- HB malzeme sabiti: $m_i = 17$

Hoek Brown kriteri için belirlenen bu malzeme parametreleri ile farklı bozulma dereceleri (D) için Tablo 2'de verilen eşdeğer Mohr–Coulomb (MC) parametreleri bulunmuştur.

Kazı sonrası kaya kütlelerinde meydana gelebilecek yapısal bozulmayı temsil etmek amacıyla farklı Hoek-Brown Göçme kriteri'nin D (bozulma derecesi) parametresi dikkate alınmıştır (Tablo 2). D parametresi, kütledeki gevşeme düzeyine bağlı olarak 0 (hiç bozulmamış) ile 1 (tamamen bozulmuş) arasında değer almaktadır. Makale kapsamında $D = 0, 0,3, 0,7$ ve $1,0$ olmak üzere dört farklı bozulma durumunu temsil eden değerler dikkate alınmıştır. Böylece, kazı sonrası kaya kütlelerinin dayanım parametrelerinde oluşabilecek değişimlerin analizlere etkisi değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle zayıf kaya ortamlarında kazı sonrası oluşabilecek gevşemenin stabilite üzerindeki etkisini ortaya koymak açısından önemlidir.

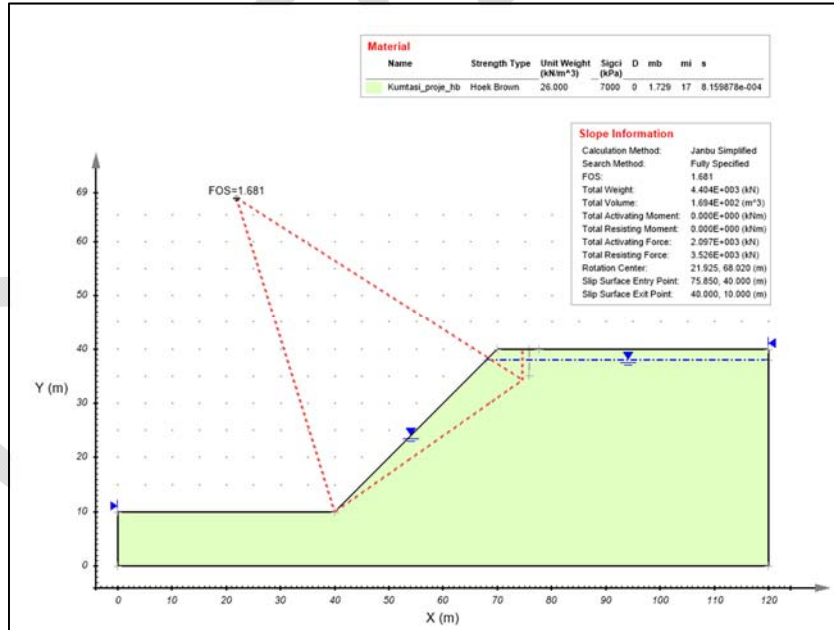
Tablo 2 - Örnek yarma şevi için kaya mekaniği çalışmaları sonucu elde edilen dayanım parametreleri (farklı bozunma derecelerine (D) göre)

D	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
0	157	40	26
0.3	135	36.5	26
0.7	99	29.5	26
1	66	22	26

3.3. Deterministik Şev Duraylılık Analizleri

Kumtaşı birimde açılan 30m'lik yarma şevinin stabilitesi limit denge analizleri ile incelenmiştir. Şekil 4'te verilen kaya şevi üç palyeli olarak tasarlanıp uygulanmış olmakla birlikte bu çalışmada ekonomik bir tasarım için palyesiz durumun göçme olasılığının gösterilmesi gerektiği dikkate alınarak analizler tek eğimli bir şev üzerinde gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan bu yaklaşım ile kurulan algoritmanın literatürdeki çalışmalar ile doğrulanması mümkün olmuştur (Low, 2007 [24]).

Limit denge analizleri Plaxis LE [3] ticari yazılım paketi ile yapılmıştır. Yapılan bu deterministik analizlerde olası kayma yüzeyleri dairesel olmadığı kabul edilerek kayma yüzeyini düzlemsel olarak dikkate alabilen Janbu ve GLE (Generalized Limit Equilibrium) yöntemleri tercih olunmuştur.



Şekil 6 - Kaya şevi kesiti ve hesaplanan olası kayma düzlemi

Deprem durumu için yarmanın bulunduğu kesimde oluşması beklenen en yüksek yatay ivme değerinin $a_h=0,1g$ olacağı belirlenmiştir. Statik ve deprem durumları için yapılan düzlemsel şev stabilite analizlerinde Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown göçme kriterleri dikkate alarak çözümler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu analizlerde dikkate anılan şev modeli ve bir analiz sonucu örneği Şekil 6'da gösterilmiştir.

MC ve HB göçme kriterleri dikkate alınarak yapılan stabilite analizlerinden elde olunan güvenlik sayıları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 - Örnek kaya şevi deterministik şev duraylılık analizleri sonuçları

D	HB [$q_u=7$ MPa, $G=36$, $m=17$, $H=30$ m]				MC [Eşdeğer c ve ϕ]			
	JANBU		GLE		JANBU		GLE	
	Fs	Fs($a_h=0.1g$)	Fs	Fs($a_h=0.1g$)	Fs	Fs($a_h=0.1g$)	Fs	Fs($a_h=0.1g$)
0	1.681	1.322	1.696	1.322	3.151	2.69	3.151	2.689
0.3	1.477	1.158	1.489	1.176	2.724	2.323	2.724	2.323
0.7	1.152	0.902	1.161	0.917	2.012	1.715	2.012	1.715
1	0.84	0.659	0.848	0.671	1.354	1.152	1.354	1.152

Tablo 3'ten de görüldüğü üzere, Janbu ve GLE yöntemleri kullanılarak yapılan şev duraylılık analizlerinde, Hoek-Brown Göçme Kriteri'ne göre elde edilen güvenlik katsayıları genellikle Mohr-Coulomb eşdeğer parametrelerine göre daha düşüktür. Bu durum, HB kriterinde, MC kriterinden farklı olarak, göçme düzleminde normal gerilme kayma gerilmesi ilişkisini gösteren kırılma zarfının doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır.

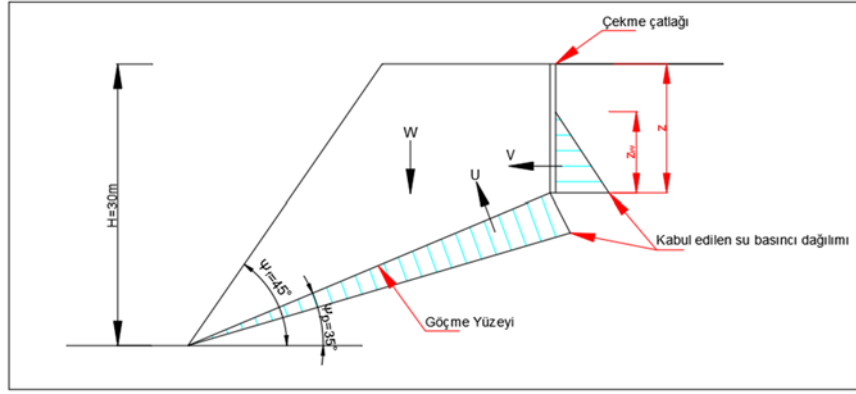
Her iki dilim yöntemi benzer eğilimler göstermesine rağmen, Janbu yöntemi GLE yöntemine kıyasla sistematik olarak biraz daha düşük güvenlik sayısı vermektedir. GLE yöntemi, moment ve kuvvet dengesini birlikte dikkate alarak daha genel bir çözüm yaklaşımı sunduğundan, güvenlik katsayısını nispeten yüksek hesaplamaktadır. Analiz sonuçları, kaya kütle özellikleri ve kullanılan yöntemlerin şev güvenliği üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu, bu nedenle yöntem seçiminin ve varsayımların nihai değerlendirmelerde önemli belirsizlik kaynaklarından biri olduğunu ortaya koymaktadır.

3.4. Olasılıksal Şev Stabilite Analizleri

İnceleme konusu yarma şevleri, otoyolun 10 km'lik güzergâhı boyunca yaklaşık 400 m uzunluğundadır (Şekil 2 ve Fotoğraf 1). Bu denli uzun şevlerin stabilite durumunun yalnızca bir veya birkaç kesitte yapılan deterministik analizlerle değerlendirilmesi, geoteknik ve jeolojik belirsizliklerin tüm güzergâh boyunca yeterince temsil edilememesi riskini beraberinde getirmektedir. Her ne kadar tasarım güvenlik katsayıları bu belirsizlikleri kısmen karşılayabilse de uzun ve heterojen bir kaya şevinin tek bir güvenlik katsayısı ile temsil edilmesi mühendislik açıdan yetersiz kalabilir. Statik ve sismik durumlar için en olumsuz koşullar göz önünde bulundurularak yapılan tasarımlar, şevin daha düşük eğimle inşa

edilmesine yol açacağından ekonomik açıdan maliyetli sonuçlar doğurabilir. Ayrıca, deterministik analizlerle elde edilen güvenlik katsayısı yönetmeliklerin asgari şartlarını sağlasa bile, bu değer doğrudan bir göçme olasılığı bilgisi sunmamaktadır. Bu nedenle, geoteknik ve jeolojik parametrelerin zamansal ve mekânsal olarak değişkenlik gösterdiği bu tür sahalarda, güvenilirliğe dayalı tasarım yöntemlerinin uygulanması, hem daha gerçekçi bir risk değerlendirmesi sunmakta hem de parametre belirsizliklerinin nicel olarak modellenmesini sağlayarak daha ekonomik ve güvenli mühendislik çözümleri üretmektedir.

Bu çalışmada, yarma şevinde olası bir düzlemsel kama tipi kayma senaryosu dikkate alınarak analiz yapılmıştır (Şekil 7). Şev yüksekliği $H=30$ m, şev açısı $\Psi_f=45^\circ$, potansiyel kayma düzlemi açısı ise kinematik analizlerden $\Psi_p=35^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu geometriye göre, limit denge yaklaşımı ile güvenlik katsayısı hesaplarında kullanılan eşitlikler kama ağırlığı, su basıncı, kayma düzlemindeki kuvvetler ve çekme çatlaklığı yüksekliği gibi parametrelere dayalı olarak oluşturulmuştur (Eşitlikler 9-14).



Şekil 7 - Şev duraylılık analizlerinde dikkate alınan düzlemsel kayma kaması

Şekil 8'de gösterilen ortamdaki su basınçları ve atalet kuvvetleri dikkate alınarak kamanın kaymaya karşı stabilitesini veren güvenlik faktörü kaymaya zorlayan kuvvetler ve karşı koyan kuvvetlerin limit dengesi dikkate alınarak aşağıdaki eşitlik

$$F_s = \frac{cA + N \tan \phi}{W(\sin \Psi_f + a \cos \Psi_p) + V \cos \Psi_p - T \sin \theta} \quad [9]$$

Yazılabilir. Bu eşitlikte çekme çatlaklığı yüksekliği;

$$z = H(1 - \sqrt{\cot \Psi_f \tan \Psi_p}) \quad [10]$$

Ekleme tabakası alanı;

$$A = (H - z) / \sin \Psi_p \quad [11]$$

Kayma düzlemindeki bileşke kuvvet;

$$N' = W(\cos\Psi_p + \alpha\sin\Psi_p) - U - V\sin\Psi_p \quad [12]$$

Kama ağırlığı;

$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left\{ \left[1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right] \cot\Psi_p - \cot\Psi_f \right\} \quad [13]$$

Su basınçları;

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w z_w A, \quad V = \frac{1}{2}\gamma_w z_w^2 \quad [14]$$

Eşitliklerinden bulunmaktadır. α yatay doğrultudaki deprem ivmesini göstermektedir.

Düzlemsel kama ile c , ϕ , z_w/z ve α parametrelerinin en olası değerler dikkate alınarak en olası durum için güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Bu analiz için dikkate alınan parametreler ve bunların standart sapmaları ile olasılıksal stabilite analizlerinde dikkate alınan olasılık dağılım fonksiyonları Ek 'te açıklaması verilen Trakya Formasyonu Veri Tabanı'nda elde olunmuştur. Buna göre şev duraylılık analizlerinde kullanılan stokastik parametreler Tablo 4'te verilmiştir ($D=0,7$ için). Tüm analizlerde birim hacim ağırlık değeri olarak 26.0 kN/m^3 değeri kullanılmıştır. Bu değer, Trakya Formasyonu'na ait saha ve laboratuvar verilerindeki ortalama birim hacim ağırlık değerine karşılık gelmektedir. Bu parametrenin varyasyonunun düşük olması ve güvenlik katsayısı üzerindeki etkisinin sınırlı kalması nedeniyle analizlerde sabit bir değer kullanılması tercih olunmuştur.

Tablo 4 - Şev duraylılık analizlerinde kullanılan stokastik parametreler

Parametre	μ	σ	$P(f)$
c [kPa]	144	66,3	GEV
ϕ [°]	34	9,06	GEV
z_w/z	0,5	0,263	Kırpılmış Üstel
α	0,1	0,042	Kırpılmış Üstel

μ =En olası değer, σ =Standart sapma, P_f =Olasılık dağılım fonksiyonu

Tablo 4'te verilen değişken parametrelerin en olası değerleri kullanılarak yapılan deterministik şev stabilite analizinde;

Eklem tabakası alanı $A = 43,77 \text{ m}^2/\text{m}$

Kayma düzlemindeki bileşke kuvvet $N' = 2924,04 \text{ kN/m}$

Kama ağırlığı $W = 4564,20 \text{ kN/m}$

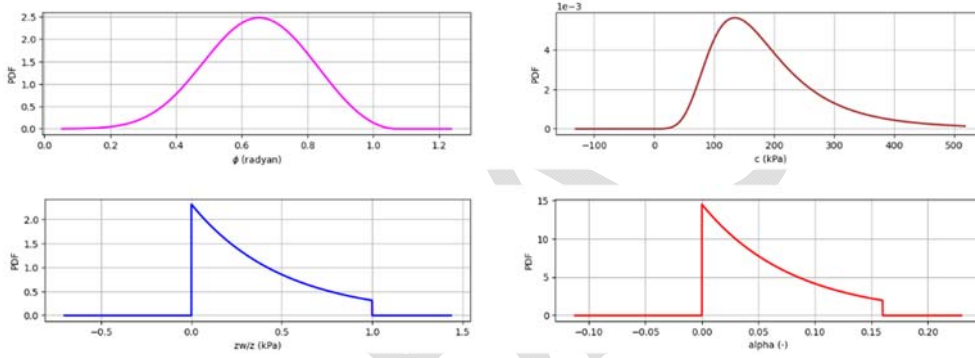
Su basınçları $U = 535,76 \text{ kN/m}$, $V = 29,97 \text{ kN/m}$ olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda verilen büyüklükler (8) eşitliğinde yerine yazılarak en olası güvenlik sayısı değeri $(F_s)_{EOD} = 2,743$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer dikkate alınan düzlemsel kayma kamasının

stabilitesinin yeterli güvenlikte olduğunu göstermekle birlikte MC kriterine göre aynı malzeme ve deprem parametreleri ile Janbu ve GLE yöntemlerinden hesaplanan değerlerle uyumludur.

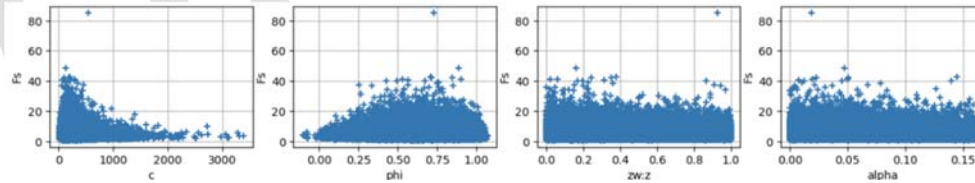
Olasılıksal şev duraylılık analizleri Python programlama dilinde yazılan ve OpenTurns kütüphanesini [4] kullanan bir kod ile gerçekleştirilmiştir. Kama tipi kayma için deterministik ve olasılıksal şev duraylılık analizleri yapan bu kod FORM, FOSM ve Monte Carlo yöntemleri ile göçme olasılığını hesaplayabilmekte, hassasiyet analizi yapabilmekte ve sonuçları grafiksel olarak sunabilmektedir. Kodun dökümü Ek 2’de verilmiştir.

Olasılıksal şev duraylılık analizlerinde Tablo 4’te verilen c , ϕ , $z_w:z$ ve α parametrelerinin en olası değerleri (ortalama) ve standart sapma değerleri ile belirtilen olasılık dağılım fonksiyonları (ODF) kullanılarak rastgele parametreler üretilmiştir. OpenTurns kütüphanesi yardımı ile üretilen olasılık dağılım fonksiyonlarının grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8 - Olasılıksal şev stabilite analizlerinde dikkate alınan dağılım fonksiyonları

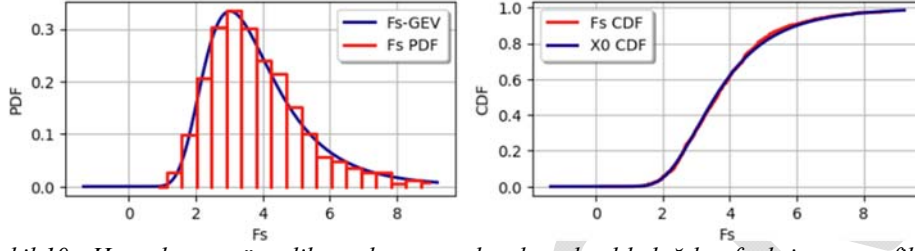
Bu değişkenlerin her biri dağılımlarından rastgele örneklenerek bir set değer oluşturulmuştur. Örnekleme sayısı 100.000 olarak dikkate alınarak her bir set için kama tipi göçme hesabı yapılarak güvenlik sayıları hesaplanmıştır. $GS < 1$ olan durumların oranı göçme olasılığı olarak belirlenmiştir. Her bir parametrenin güvenlik sayısı F_s üzerindeki etkisi Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9 - Stokastik parametrelerin güvenlik sayısı F_s ile ilişkileri

c , ϕ , $z_w:z$ ve α parametrelerin her bir rastgele değeri için elde olunan güvenlik sayılarının ortalama değeri $F_s=3,895$ ve standart sapması 1,760 çıkmıştır. Maksimum ve minimum güvenlik sayısı değerleri 85,420 ve 0,531’dir. Güvenlik sayılarının dağılımı ve bu dağılım

için uydurulan olasılık dağılım fonksiyonu grafiği ile bunların kümülatif dağılım grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Güvenlik sayılarının dağılımına OpenTurns kütüphanesinde yer alan GEV “Generalized Extreme Value Factory” olasılık dağılım fonksiyonu en (www.openturns.github.io) iyi uyan dağılım fonksiyonu olmuştur. Bu fonksiyondan yararlanarak $F_s \leq 1$ olan alanın integrasyonundan FOSM (Birinci Mertebe İkinci Moment) yöntemine göre göçme olasılığı $P_f=0,00019$ olarak bulunmuştur.



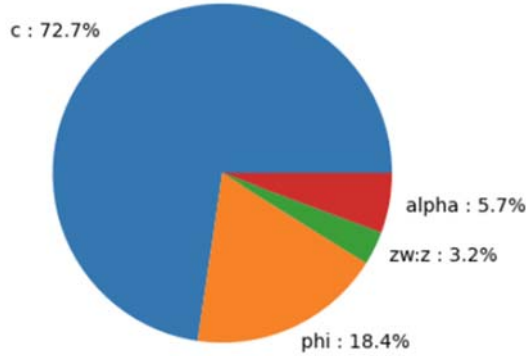
Şekil 10 - Hesaplanan güvenlik sayıları ve uydurulan olasılık dağılım fonksiyonu grafikleri

Güvenilirlik hesabının FORM - Hasofer-Lind Yöntemi ile yapılması durumunda göçme olasılığı $P_f=0,00347$ ve Hasofer güvenilirlik indeksi $\beta=3,392$ olarak bulunmuştur. Güvenilirlik indeksini veren stokastik parametrelerin değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5 - Güvenilirlik indeksini veren stokastik parametreler

c	ϕ	z_w/z	α
38,639	23,717	0,497	0,092

FORM yöntemi kapsamında yapılan hassaslık analizi ile dikkate alınan stokastik parametrelerin sonucu etkileme oranları elde olunmuştur. Bu oranlar Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11 - FORM Yönteminde stokastik parametrelerin sonucu etkileme oranları

Şekil 11'den görüldüğü gibi incelenen kaya şevinin duraylılığına en çok etki eden parametre kohezyon en azı ise çatlak suyu derinliğidir.

Dikkate alınan şevin göçme olasılığı Monte Carlo simülasyonu ile belirlenmesi için OpenTurns'te Monte Carlo Experiment fonksiyonunda yararlanılmıştır. Bu yöntemde rastgele noktalar dağılımın ortalamasından bağımsız üretilerek düğümler $[(x_i)_{i=1, \dots, n}]$ hesaplanır. Noktalarla ilişkili ağırlıkların hepsi w_i , bire bölünen örnekleme sayısı (n) 'na eşittir ($w_i = 1/n$, OpenTURNS, 2024 [4]).

Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ile göçme olasılığı $P_f=0,000384$ olarak bulunmuştur. Bu değer Tablo 6'da FOSM ve FORM yöntemlerinden bulunan göçme olasılığı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 6 - FOSM, FORM ve Monte Carlo Simülasyonu (MCS) yöntemleri ile elde edilen göçme olasılığı (P_f) ve güvenlik indeksi (β) değerleri

Yöntem	P_f
FOSM	0,000190
FORM	0,000347
Monte Carlo Simülasyonu	0,000384

Tablo 6'dan görüldüğü gibi analiz sonuçları birbirleri ile uyumludur. FORM ve MCS ile bulunan göçme olasılığı değerleri birbirlerine FOSM'den bulunana göre daha yakındır. Analizlerde FOSM, FORM ve Monte Carlo Simülasyonu yöntemleri incelenen kayma şevinin güvenliğinin ortalamaların üstünde mertebelerde olduğu ve güvenilirlik indeksi ile bulunan göçme olasılığı değerlerinin uyumlu olduğu görülmektedir (US Army Corps of Engineers, 1997) [25].

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu makalede kaya şevlerinin güvenilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için bir otoyol güzergahında yer alan bir yarma şevi deterministik ve güvenilirlik analizleri ile incelenmiştir. İncelenen otoyol şevi Trakya Formasyonunda açılmış olup proje kapsamında yapılan mühendislik jeolojisi ve kaya mekaniği çalışmaları özetlendikten sonra farklı örselenme durumları için Hoek Brown ve Mohr Coulmb göçme kriterlerine göre Plaxis LE ticari paket yazılımı ile limit dengeye dayalı duraylılık analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde olası kayma kaya mekaniği çalışmalarına dayanarak kama şeklinde olacağı varsayımı ile Janbu ve Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Güvenlik analizleri ise FORM, FOSM ve Monte Carlo Simülasyonu ile yapılmıştır. Bu analizlerde stokastik parametre olarak kayma mukavemeti parametreleri (c ve ϕ) ile çatlak suyunun çatlak derinliğine oranı (z_w/z) ve yatay deprem ivmesi (α) dikkate alınmıştır. Kayma mukavemeti parametrelerinin stokastik özellikleri Trakya Formasyonu için toplanan kaya kütle özellikleri verilerinden Ek'te ayrıntısı verildiği şekilde üretilmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalardan şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Bu çalışmada incelenen kaya şevi için yapılan deterministik şev duraylılık analizleri kaya kütle özellikleri ve hesap yaklaşımlarının şev duraylılık analizleri sonuçlarını etkilediğini ve belirsizliklerin söz konusu olduğunu göstermektedir
- Trakya Formasyonu kayma mukavemeti parametreleri sondaj loglarındaki serbest basınç mukavemeti ve Hoek Kaya Kütle Özellikleri (a , m_b ve σ_{3n}) parametrelerinden üretilmiştir.

Daha gerçekçi analizler için üç eksenli deneylerden elde olunan kayma mukavemeti parametreleri sonuçlarına ve arazi çatlak durumunun stokastik özelliklerinin bilinmesine ihtiyaç vardır.

- Çatlak suyu derinliği oranı stokastik özelliklerinin arazi gözlemlerine dayandırılması ile gerçekçi bir analiz yapılacağı açıktır. Buna göre kaya şevlerinde yapılan tasarımlar veya mevcut şevlerin değerlendirmelerinde kullanılacak bu tür parametrelerini arazi gözlemlerinden üretilmelidir.
- Yapılan güvenilirlik analizleri deterministik analizler ile uyumlu olup incelenen oto yol şevinin dikkate alınan olası kama kayması durumu için güvenilirlik durumunun Amerikan Ordu Mühendisliği Birliği'nin önerdiği güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı grafiğine göre ortalamanın üstündedir. Bu tespiti göre dikkate alınan durum için şevin yeterli güvenlikte olduğu söylenebilir.
- Bu araştırma, kaya şevlerinin olasılıksal güvenilirlik analizindeki güçlükleri ve potansiyelleri göstermektedir. Yapılan olasılıksal duraylılık analizleri, göçme olasılığı veya güvenilirlik indeksi gibi tasarım ve değerlendirme amaçları için gerekli sonuçları sağlamıştır. Bunlara ek olarak elde olunan, sözde tasarım noktası ve bu noktayı sağlayan etki katsayıları ile her (rastgele) değişkenin toplam belirsizliğe katkısıdır. Bu bilgiler tasarımcılar için yararlıdır. Bu bilgilerden yola çıkılarak tasarımın iyileştirilmesi veya kaya koşullarındaki belirsizlikleri azaltmak yoluna gidilmesinin gerekliliğine karar verilebilir.

Teşekkür

Yazarlar incelenen otoyol şevine ilişkin verilerin kullanılmasına izin veren EMAY Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik şirketi yetkililerine ve Trakya formasyonu veri tabanının oluşuma katkı sağlayan Yük. Müh. Şenol Adatepe, Dr. Müh. Orhan İnanır ve Yük. Müh. Volkan Peker'e teşekkür eder.

Veri Kullanılabilirliği

Veriler talep üzerine sağlanacaktır.

EK:

E1. TRAKYA FORMASYONU VERİ TABANI

İstanbul genelinde yer alan 14 ilçede (Bağcılar, Başakşehir, Arnavutköy, Eyüp Sultan, Sarıyer, Beykoz, Çekmeköy, Sancaktepe, Pendik, Tuzla, Ataşehir, Beşiktaş, Beyoğlu, Kağıthane) 12 jeolojik formasyona (Aydos, Ballıkaya, Ceylan, Çekmece, Danişment, Demirciler, Erikli, Kurtköy, Ömerli, Sarıyer, Trakya, Yayalar) ait veriler, 35 farklı proje lokasyonunda yapılan 881 sondajdan alınan 4289 numune üzerinde yapılan çeşitli deneyler ve geoteknik araştırma raporları toplanarak bir veri tabanı oluşturulmuştur.

E1.1. Veri Tabanından Elde Edilen Parametreler

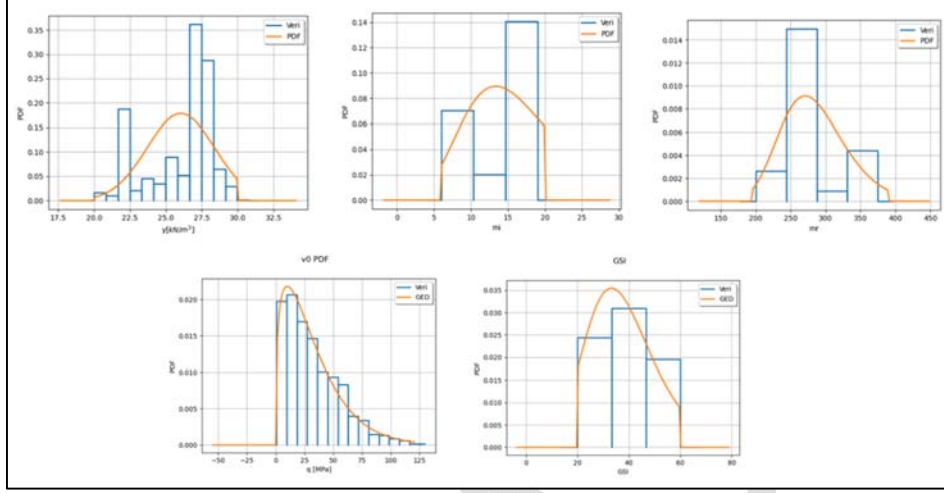
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde kullanılan veritabanı İstanbul genelinde Trakya formasyonuna ait zayıf kumtaşı birimlerinde yapılan sondajlardan alınan veriler ile oluşturulmuştur. Trakya Formasyonu kapsamındaki 285 sondajdan alınan 1639 numune üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş birim hacim ağırlık ve serbest basınç deneyleri sonuçları ile RQD değerlerinden belirlenen Hoek Brown (HB) malzeme parametreleri m_i , m_r ve GSI verileri ile MS Excel hesap tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloda yer alan birim hacim ağırlık, serbest basınç dayanımı, jeolojik dayanım indeksi (GSI), HB sabitleri m_i ve m_r verilerinin maksimum ve minimum değerleri kullanılarak öncelikle bu beş değişken parametreye ait histogram grafikleri çizilmiş ardından histogramlara en uygun istatistiksel dağılımlar (Normal (Gauss) dağılım, Log-Normal dağılım, Exponential (Üstel) dağılım, Gamma dağılımı, Weibull dağılımı, Beta dağılımı, Gumbel dağılımı, Triangular dağılım, Weibull Min dağılım, Weibull Max dağılım, GEV (Generalized Extreme Value dağılımı)) belirlenmiştir. Belirlenen olasılık dağılım fonksiyonuna ait uygun ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo Ek-1'de olasılık dağılım fonksiyonu grafikleri ise Şekil Ek-1'de verilmiştir.

Tablo Ek 1 - Trakya Formasyonu zayıf kumtaşı birimine ait γ , σ_i , GSI, m_i , m_r verilerine ait istatistiksel parametreler

Parametre	Olasılık Dağılım Fonksiyonu	μ	σ	β	α	γ (konum parametresi)	M. Değer	Maks. Değer
γ (kN/m ³)	Normal ¹	26	2,35				20,0	30,8
σ_i (MPa)	GEV ²			34	1,25	0,65	0,7	152
GSI	GEV ³	32	12,30				20	60
m_i	GEV ⁴			6		13,37	6	19
m_r	GEV	265	42,26				200	375

¹ Sınırlandırılmış, ²Weibullmin ile Genelleştirilmiş Aşırı Değerler Dağılımı (GEV), ³Sınırlandırılmış, ⁴ Gumbel ile GEV,

Tablo Ek- 1’de μ : ortalama, σ : standart sapma, β : şekil parametresi, α : ölçek parametresi, γ : konum parametresini göstermektedir.



Şekil Ek 1 - Trakya Formasyonu γ , m_i , m_r , σ_i , GSI verileri ve olasılık dağılım fonksiyonları

Trakya Formasyonu zayıf kumtaşı birimine ait parametrelerin belirlenen olasılık dağılım fonksiyonlarına göre Monte Carlo Simülasyonu yardımı ile 100000 adet rastgele veri üretilmiştir. Trakya Formasyonu için elde edilen bu malzeme verileri aşağıda verilen amprik eşitliklerde yerine konularak kaya kütlesi için Mohr Coulomb (MC) kayma mukavemeti parametreleri ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. MC kayma mukavemeti parametreleri kayma mukavemeti açısı ve kohezyon için Hoek vd. (2002) [1] tarafından önerilen

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad [E.1]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{[6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}]}{(1+a)(2+a)}}} \quad [E.2]$$

eşitlikleri kullanılmıştır. Bu eşitliklerde m_b malzeme sabiti m_i 'nin azaltılmış değeri olup

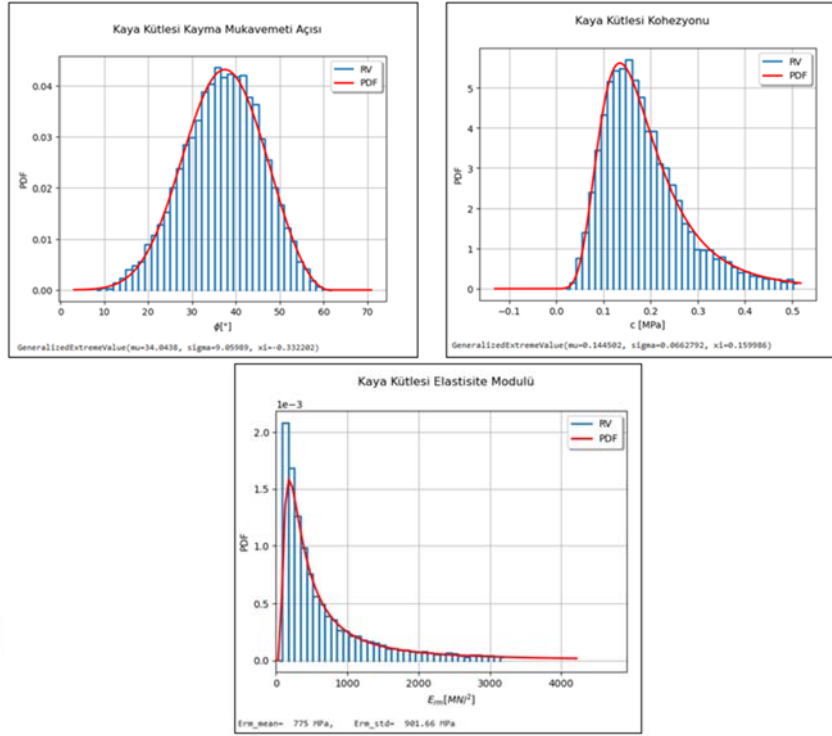
$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad [E.3]$$

eşitliğinden bulunmaktadır. Bu eşitlikte D örselenme faktörü GSI ise jeolojik dayanım indeksidir. σ'_{3n} maksimum çevre basıncı σ'_{3max} 'in örselenmemiş serbest basınç mukavemeti (σ_{ci})ne oranından elde edilmektedir.

Kaya kütlesi elastisite modülü Hoek ve Diederichs (2006) [26] tarafından önerilen

$$E_{rm} = 100,000 \left(\frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right) \quad [E.4]$$

eşitliğinden elde olunmuştur. Veri tabanındaki her bir veri için bu eşitliklerden elde olunan kayma mukavemeti ve elastisite modülü verilerinin istatistiksel dağılımları çizdirilmiştir. Bu grafiklere bakılarak istatistiksel dağılım fonksiyonları üretilmiştir. Bu istatistiksel çalışmalar Python'da Pandas veri tabanı modülü ve OpenTurns açık kaynak istatistik kütüphanesi kullanılarak yazılan bir yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre Trakya Formasyonu için oluşturulan veri tabanından üretilen kaya kütlesi kayma mukavemeti ve elastisite modülü dağılımlarından OpenTurns kullanılarak üretilen olasılık dağılım fonksiyonları Şekil Ek-2'de, istatistiksel parametreleri ise Tablo Ek-2 verilmiştir.



Şekil Ek 2 - Kaya kütlesi kayma mukavemeti açısı, kohezyon ve elastisite modülü istatistiksel dağılımı ve elde edilen olasılık dağılım fonksiyonu

Şekil Ek 2'den görüldüğü gibi kayma mukavemeti açısı ve kohezyon istatistiksel dağılımı için GEV-Genelleştirilmiş Aşırı Değerler Dağılımı en iyi sonucu verirken, elastisite modülünün istatistiksel dağılımı ise en iyi log dağılım fonksiyonu ile modellenmiştir.

Çalışma kapsamında kaya kütesinin farklı bozulma faktörleri için ve GSI, UCS ve mi değerlerinin farklı dağılım fonksiyonlarına göre de parametre hesabı yapılmıştır. Bu değerleri gösterir özet tablo Tablo Ek 3'te verilmektedir.

Zayıf Kumtaşı Biriminde Açılan Bir Şevin Deterministik ve Güvenilirlik Analizleri ile ...

Tablo Ek 2 - Trakya Formasyonu MC kayma mukavemeti parametreleri ve elastite modülü istatistiksel parametreleri

Parametreler	μ	σ	ODF
ϕ (°)	34	9,05	GEV
c (kPa)	144	66,27	GEV
E(MPa)	775	901,66	Log Normal

Tablo Ek 3 - Trakya Formasyonu kaya kütesinin farklı bozulma faktörleri için HB ve MC kayma mukavemeti parametreleri

D (Bozulma faktörü)	HB- $q_u=32\text{Mpa}$, $G=38$, $m=13$		
	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ²)
0	220	45	26
0.3	192	41	26
0.7	144	34	26
1	100	25	26

E2. ŞEV DURAYLILIK ANALİZLERİ PYTHON KODU

Makale kapsamında yapılan analizlerde kullanılan Python kodu Jupyter Notebook'da yazılmış olup kod dökümü aşağıda Şekil Ek 2.1'de verilmiştir. Yazılan kod Python 3.12 ve OpenTurns 1.23 sürümleri altında koşturulmuştur.

```
import openturns as ot
import openturns.viewer as viewer
from matplotlib import pylab as plt
from math import tan, cos, sin, radians, degrees, log, sqrt
import numpy as np
import pandas as pd
from scipy.stats import norm

# A. Input Data
H=30. # Height
gamma=26 #unit weight of the rock
gamma_w=10.
Pf=45. #Slope angle
Pp=35. #Angle of failure surface
z_w=0.5
#z_w=7 #Groundwater depth
alpha=0.1 #Horizontal earthquake acceleration

c=144. #MVP-average of c
phi=34. #shear strength angle of the rock
T=0.
teta=0
tetar=radians(teta)

Pfr=radians(Pf)
Ppr=radians(Pp)
phir=radians(phi)
```


Deterministik Analiz

```
# B. Kama Kuvvetleri
z=H*(1-(tan(Ppr)/tan(Pfr))**0.5) #critical z for dry slope
zw=zw_z*z
A=(H-z)/sin(Ppr) #area of the sheet joint
W=0.5*gama*H**((1-(z/H)**2)/tan(Ppr)-1/tan(Pfr))
U=0.5*gama*zw**A
V=0.5*gama*zw**2
Np=H*(cos(Ppr)-alpha*sin(Ppr))-U-V*sin(Ppr)+T*cos(tetar)
zw=round(zw_z*z,2)

# C. Duraylılık Analizi
Fs=(c*A+Np*tan(phi_r))/(H*(sin(Ppr)+alpha*cos(Ppr))+V*cos(Ppr)-T*sin(tetar))

# D. Outputlar
print('Sev yüksekligi= ', H, 'm')
print('A= ', round(A,2), 'm')
print('Blok kayma yüksekligi z= ', round(z,2), 'm')
print('Su derinligi(zw)= ', zw, 'm, zw/z= ', zw_z)
print('\u03b2= ', gama, 'kN/m3')
print('\u03b1= ', phi, '°')
print('Kohezyon= ', c, 'kPa')
print('Sev acisi= ',PF, '°')
print('Gocme yuzeyi acisi= ', Pp, '°')
print('Deprem ivme katsayisi= ', alpha)
print('Ankraj Kuvveti= ', T, 'kN')
print('\n','Fs= ', round(Fs,4))
```

Güvenilirlik Analizleri

```
N=10000 # Number of the samples
std_phi=radians(9.06) #Standard deviation of the shear strength angle
std_c=66.3 # Standard deviation of the cohesion
xi_phi=-0.33
xi_c=0.16

# Olasılık dagılım fonksiyonları
phi_d = ot.GeneralizedExtremeValue(phi_r, std_phi, xi_phi)
c_d=ot.GeneralizedExtremeValue(c, std_c, xi_c)
zw_z_d = ot.TruncatedDistribution(ot.Exponential(2.0, 0.), 0.0, 1.)
alpha_d =ot.TruncatedDistribution(ot.Exponential(12.5, 0.), 0.0, 0.16)

zw_z_mean=zw_z_d.getMean()[0]
std_zw_z=zw_z_d.getStandardDeviation()[0]
alpha_mean=alpha_d.getMean()[0]
std_alpha=alpha_d.getStandardDeviation()[0]
print('zw/z_ort= ', round(zw_z_mean,3), ' (zw/z_std= ', round(std_zw_z,3))
print('alpha_ort= ', round(alpha_mean,3), ' alpha_std= ', round(std_alpha,3))

# PDF'lerin Destelenerek Rastgele Vektörün Üretilmesi ve Gocme Durumunun (Fs) Tanımlanması
c_s=c_d.getSample(N)
phi_s=phi_d.getSample(N)
zw_z_s=zw_z_d.getSample(N)
alpha_s=alpha_d.getSample(N)
Fs_distribution = ot.ComposedDistribution([c_d, phi_d, zw_z_d, alpha_d])
Vect = ot.RandomVector(Fs_distribution)
Vect.setDescription(["c", "phi", "zw/z", "alpha"])
FacSaf = ot.CompositeRandomVector(f, Vect)
FacSaf.setDescription(["Fs"])
event = ot.ThresholdEvent(FacSaf, ot.LessOrEqual(), 1.0)
event.setName("Failure")

### FORM Analizi
optimalgo = ot.Cobyla()
optimalgo.setMaximumCallsNumber(N)
optimalgo.setMaximumAbsoluteError(1.0e-10)
optimalgo.setMaximumRelativeError(1.0e-10)
optimalgo.setMaximumResidualError(1.0e-10)
optimalgo.setMaximumConstraintError(1.0e-10)

startingPoint = Fs_distribution.getMean()
algo = ot.FORM(optimalgo, event, startingPoint)
algo.run()
result = algo.getResult()

Pf_FORM = result.getEventProbability()
print("Pf=", round(Pf_FORM,5))
print("Hasofer Reliability Index \u03b2=", round(result.getHasoferReliabilityIndex(),3))

#FORM analizinden tasarım noktalarının alınması
xi = result.getPhysicalSpaceDesignPoint()
xi[1]=degrees(xi[1])
print('xi= ', xi)

### #FORM Analizine gore PDF'leri alınan degtiskenlerin(c, phi, z, zw/z ve alpha) sonucu etkilene oranları (Nassasiyet Sonucları)
g7 = result.drawImportanceFactors()
view = viewer.View(g7)
marginalSensitivity, otherSensitivity = result.drawHasoferReliabilityIndexSensitivity()
marginalSensitivity.setLegends(["c", "phi", "zw/z", "alpha"])
marginalSensitivity.setLegendPosition("bottom")
view = viewer.View(marginalSensitivity)
```

```
### Monte Carlo Simülasyonu
experiment = ot.MonteCarloExperiment()
MC_algo = ot.ProbabilitySimulationAlgorithm(event, experiment)
MC_algo.setMaximumCoefficientOfVariation(0.01)
MC_algo.setMaximumStandardDeviation(0.001)
MC_algo.setMaximumOuterSampling(N)
MC_algo.setBlockSize(1)
MC_algo.setConvergenceStrategy(ot.Compact(N))
MC_algo.run()

result_MC=MC_algo.getResult()
PF_MC = result_MC.getProbabilityEstimate()
print("Göçme olasılığı Pf=", round(PF_MC,6))
```

Şekil E2.1 - Python kodu

Kaynaklar

- [1] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition. Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC), Toronto.
- [2] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- [3] Bentley Systems Inc. (2022). PLAXIS LE – Limit Equilibrium Slope Stability Software [Computer software]. <https://www.bentley.com/software/plaxis-le/>
- [4] OpenTURNS Developers. (2024). OpenTURNS: An open source initiative for the treatment of uncertainties, risks and statistics [Computer software]. GitHub.
- [5] Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307))
- [6] Low, B. K., & Tang, W. H. (2007). Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(12), 1378–1386. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:12\(1378\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:12(1378)).
- [7] Park, H. J., West, T. R., & Lee, J. H. (2006). Development of a slope stability probability classification system: A case study. *Engineering Geology*, 87(1–2), 1–15.
- [8] Jimenez-Rodriguez, R., & Sitar, N. (2007). Seismic analysis and design of slopes using the deterministic–stochastic method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 628–639. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(628\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(628))
- [9] Bozkurt, S., & Akbaş, S. O., (2023). Finite element-based geotechnical risk analysis for anchor-supported deep excavations. *Arabian Journal Of Geosciences*, vol.16, no.8, 470.
- [10] Zhu, W.-Q., Zhang, S.-H., Li, Y.-H., & Liu, J. (2023). Efficient slope reliability analysis based on representative slip surfaces: A comparative study. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1100104. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1100104>.
- [11] Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). Rock slope engineering (3rd ed.). Institution of Mining and Metallurgy.

- [12] Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering: Civil and mining* (4th ed.). Spon Press.
- [13] Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. Wiley.
- [14] Einstein, H. H., & Baecher, G. B. (1983). Probabilistic and statistical methods in engineering geology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16(1), 39–72. <https://doi.org/10.1007/BF01030204>
- [15] Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(4), 307–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307))
- [16] El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. M. (2002). Probabilistic stability analysis of a tailings dam slope: A case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 315–330. <https://doi.org/10.1139/t01-100>
- [17] Hasofer, A. M., & Lind, N. C. (1974). An exact and invariant first-order reliability format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100(1), 111–121.
- [18] Ditlevsen, O., & Madsen, H. O. (1996). *Structural reliability methods*. Wiley.
- [19] Cornell, C. A. (1969). A probability-based structural code. *ACI Journal*, 66(11), 974–985.
- [20] Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. McGraw-Hill.
- [21] Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design: Volume II – Decision, risk and reliability*. John Wiley & Sons.
- [22] Ditlevsen, O., & Madsen, H. O. (1996). *Structural reliability methods*. Wiley.
- [23] ISRM (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Compiled by the ISRM Commission on Testing Methods.
- [24] Low, B. K. (2007). Reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normals. *Engineering Geology*, 94(3–4), 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.02.004>
- [25] US Army Corps of Engineers. (1997). *Engineering and Design - Slope Stability (EM 1110-2-1902)*. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
- [26] Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus and strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>