

## PAPER DETAILS

TITLE: Sev Stabilitesinin Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemleriyle İncelenmesi

AUTHORS: Ercan Egemen Basar

PAGES: 9-17

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3661749>

# Şev Stabilitesinin Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemleriyle İncelenmesi

Ercan Egemen BAŞAR<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8175-6923), basarercan1@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 15.01.2024 ve Kabul Tarihi 26.01.2024)

(DOI: 10.35354/tbed.1420219)

**ATIF/REFERENCE:** Başar, E., E. (2024). Şev Stabilitesinin Analitik Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemleriyle İncelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 14 (1), 9-17.

## Öz

Geoteknik mühendisliğinin en önemli problemlerinden biri olarak şev stabilitesine bağlı duraysızlık sonucu oluşan can ve mal kayıplarıdır. Şev stabilite problemleri barajlar, yollar, şehirler veya dağ yamaçlarında görülmektedir. Şev duraysızlıklarına bağlı problemler ve kırılma mekanizmaları iyi anlaşılmalı ve buna göre çözümler geliştirilmelidir. Bu çalışmada kum zeminde bir şev geometrisine ait güvenlik katsayısı ve güvenlik katsayısına bağlı kırılma zonu analizi 9 farklı analitik yöntem (Ordinary/Fellenius, Bishop, Janbu, Janbu corrected, Spencer, Corps of Engineers, Corps of Engineers 2, Lowe-Karafiath, GLE/Morgenstern Price) ve Plaxis 2D programı ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek güvenlik katsayısını veren analitik yöntem Janbu corrected ile 1.647 olmuştur. Çalışmada sonlu elemanlar analizi Plaxis 2D ile bulunan güvenlik katsayısı sonucu ise diğer analitik yöntemlerden daha yüksek olarak 1.665 olarak tespit edilmiştir. Gelişim halinde olan analitik yöntemler birim deformasyona bağlı sonlu elemanlar analizleri ile birlikte şev duraylılığını daha fazla parametre ile temsil ederek daha hassas ve ekonomik sonuç veren yeni bir formül geliştirilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Şev Stabilitesi, Limit Denge Analizleri, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Güvenlik Katsayısı

## Investigation of Slope Stability Using Analytical Methods and Finite Element Method

### Abstract

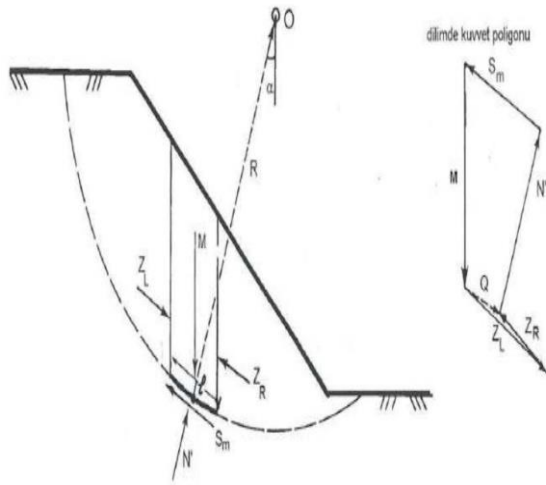
One of the most important problems of geotechnical engineering is the loss of life and property resulting from instability due to slope failure. Slope stability problems are seen in dams, roads, cities or in mountain conditions. Problems and fracture mechanisms related to slope instabilities should be well understood and solutions should be developed accordingly. In this study, factor of safety of a slope geometry in sandy soil, and the fracture zone analysis done with 9 different analytical methods (Ordinary/Fellenius, Bishop, Janbu, Janbu corrected, Spencer, Corps of Engineers, Corps of Engineers 2, Lowe-Karafiath, GLE/ Morgenstern Price) and Plaxis 2D finite element program. According to the analysis results, the analytical method that gave the highest safety coefficient was 1.647 with Janbu corrected. In the study, the safety coefficient result found with finite element analysis Plaxis 2D was determined as 1.665, which is higher than other analytical methods. Analytical methods that are under development, together with finite element analyzes based on unit deformation, can represent the slope stability with more parameters and a new formula can be developed that gives more precise and economical results.

**Keywords:** Slope Stability, Limit equilibrium Methods, Finite Element Method, Factor of Safety

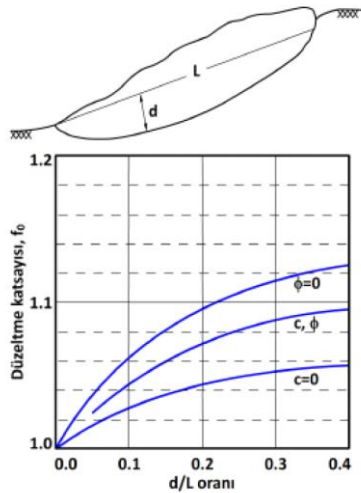
# 1. Giriş

Şev, zemin kütlelerinin yatayla yapmış olduğu açıdan ileri gelen zeminin tutunma durumu olarak tanımlanmaktadır. Eğimsiz koşullarda zeminin tutunma durumu ile yatayla yapmış olduğu açıda tutunma durumu aynı güvenlikte olamamaktadır. İşte bu tutunma durumunu kütleli veya deformasyon yönünden inceleyen ve güvenlik yönünden değerlendiren yöntem veya analizler şev stabilitesi yöntemleri olarak tanımlanmaktadır [1, 3, 4, 6, 7]. Şev stabilitesi yöntemlerinin özel olarak değerlendirilmesi veya bu konu üzerinde detaylıca çalışılmasının temel sebebi şev stabilitesinin bertaraf olması durumunda can ve mal kaybına neden olmasıdır. Şevler doğal yollarla veya yapay olarak yol dolguları, barajlar v.b. mühendislik yapılarında bulunmaktadır. Şev stabilitesinin bozulması sel, deprem, rüzgar

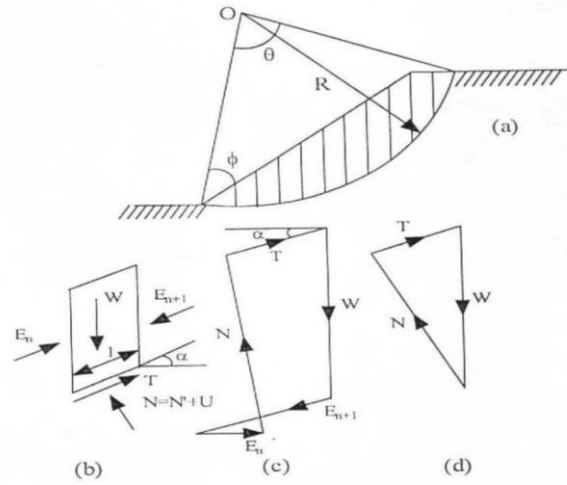
v.b. doğal afetler nedeniyle olabilmektedir[5, 9, 10, 12]. Söz konusu şevin stabilitesinin sağlanabilmesi veya kendinden stabilitenin var olduğunu anlayabilmek için şevin güvenlik katsayısının hesaplanması ve yetersizse çeşitli şev iyileştirme yöntemleriyle bu katsayının sağlanması gerekir[5]. Şev stabilitesinin güvenlik katsayısını hesaplayan veya bu analizleri yapabilen çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler arasında limit denge, sonlu elemanlar, sonlu farklar v.b. yöntemler bulunmaktadır. Elastik teori yöntemine dayanan şevlerin kendi ağırlıkları, uygulanan yüklere karşı ağırlıkları veya şevin servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği yüklere karşı analiz eden ve güvenlik katsayılarını hesaplayan limit denge yöntemleri arasında İsveç dilim, Bishop, Janbu, Morgenstern ve Price, Spencer v.b. yöntemler yer almaktadır[5, 13, 15, 19]. Tablo 1’de söz konusu yöntemler yer ve kısaca özeti yer almaktadır.



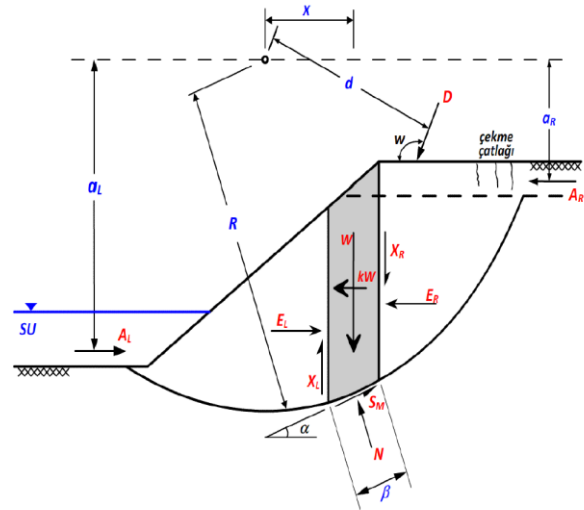
### a)Fellenius Yöntemi



### c)Janbu Yönteminde Düzeltme Sayısı



### b) Bishop Yöntemi



#### d)GLE Yönteminde Kayma Dairesinde Dilime Etkiyen Kuvvetler

*Şekil 1. Fellenius, Bishop, Janbu, Gle Yöntemlerinde Kullanılan Şev Stabilitesi Etkileyen Geometri ve Oluşan Kuvvetler[10]*

Analitik yöntemlerden olan Fellenius, Bishop, Janbu ve Gle yöntemlerinin Şekil 1’de oluşan geometrisine ve dilimlere etki eden parametrelerine bağlı gösterimi yer almaktadır. Buna göre Şekil 1 ve Tablo 1’de yer alan yöntemlerden, Fellenius yönteminde düşey yönde kayma dairesi dilimlere ayrılarak incelenir. Dilimlere ayırma yönteminin kullanıldığı ilk yöntemdir. Yenilme yüzeyi ya da şev kırılma zarfı, belli bir çapa bağlıdır. Bu yöntemde dilimler arası kayma kuvvetleri ihmal edilir. Dilimler

*e-ISSN: 2146-2119*

arası moment dengesinden güvenlik sayısı hesaplanır. Bishop Yöntemi, Fellenius yönteminin ilk defa geliştirildiği metottur. Bu yöntemde Fellenius yönteminde ihmal edilen, dilimler arası normal kuvvet hesaplandığı için güvenlik katsayısı değeri artar. Dolayısı ile Fellenius yöntemine göre daha ekonomik bir çözümleme olması söz konusudur. Janbu yöntemi, Bishop yönteminden temelde, ihmal edilen dilimler arası kesme kuvvetinin oluşturulan ampirik katsayı çarpanıyla sev

stabilitesine dahil edilmesi ile farklılaşır. Bishop yöntemine göre geliştirilen Janbu yöntemi daha hassas çözümleme sağlayabilmektedir. Ancak daha sonra yöntemin el ile çözümlemesi uzun süre aldığı için sadeleştirilmiş Janbu yöntemi adını almıştır. Spencer yöntemi hem yatay yöndeki kuvvetler hemde moment ve tüm kayma yüzeyleri için uygulanabilen daha gelişkin bir geometri sistemi ile güvenlik katsayısı çözümlemesini sağlar. Yöntemde dilimler arası kesme kuvvetini normal kuvvetlere oranını sabit kabul eder. Ve dilimler arası bu oranın iteratif yaklaşımıyla kayma kaması kaç dilime bölündüyse birbirleri arasında söz konusu oranda yük aktarım ilkesi ile çözüm yapar. Spencer yönteminde kısaca dilimler arası kayma kuvvetleri dikkate alınır, hem kuvvet hem de moment dengesini hesaplarda göz önüne alır, analizlerde sağlam tabakanın çok derinde bulunduğu kabul edilir. Lowe ve Karafiath yönteminde, kuvvet dengesi eşitliği ile çözüm yapılır. Dilimler arası kuvvetlerin yönü göz önünde bulundurulmakta ve her dilim için değişen eğimle birlikte denge şartı için daha doğru çözümleme yapılmaktadır. Morgenstern-Price yönteminde ise Spencer yönteminden farklı olarak dilimler arası kuvvetlerin oranı sabit değildir. Morgenstern Price dilimler arası kayma kuvvet ve fonksiyonlarını değişen eğime göre tarif etmiştir. Her dilimin söz konusu değişen eğimle birbirine kayma kuvveti olarak etki ettiği bu yöntemde modifiye edilmiş bir Newton-Raphson sayısal çözümleme yöntemiyle yaklaşık çözüm elde edilir. Bu yöntemde dilimler arası normal ve kesme kuvvetleri çözümde yer almaktadır. Kuvvet ve moment eşitliklerine ait denklemler çözümde yer almaktadır. Sarma yönteminde diğer yöntemlere göre şevin stabilitesinin dağılmasına ait yatay ivme değerinin tespit edilmesinin hesaplara katılması ile ilgilidir. Bu yöntemde deprem ya da ivme katsayısı şevin geometrisi, şeve ait kayma yüzeyi ve yerel zemin koşulları ile ilgili güvenlik katsayısını etkileyen yeni parametreler eklenmiştir. Genelleştirilmiş limit denge yönteminde, bahsedilen tüm yöntemlerin dilimler arası kayma kuvveti, dilimlere etkileyen normal kuvvet kayma kamasının geometrik kapsamı v.b. parametreleri içermesi sağlanarak literatürde[11, 16, 17, 18] ki analitik yöntemlerin tüm eksikliklerini kapsaması için geliştirilmiştir. Çalışmada daha önce bahsedilen yöntemlerde güvenlik katsayısı hesabını düşey yönde, yatay yönde kuvvet ve moment değerlerini dilimler arası izostatik hale getirerek ve bazı parametreleri ihmal ederek çözümler yapmak zorunda kalmıştı. Bunlar arasında Bishop dilimler arası kayma kuvvetini ihmal etmiş, Spencer ise dilimler arası kayma kuvvetini kayma kamasının geometrik değişimine bağlı değil de sabit bir katsayı ile çözümlemiştir. Bahsedilen yöntemler arasında şev kayma düzlemi güvenlik katsayısı hesabında bazı parametreler eksik kaldığı için diğer yöntemler bunları geliştirmiştir. Genelleştirilmiş limit denge yönteminde, şu kabullere dayanan güvenlik sayısı hesabı yapılmaktadır. Şev kayma kamasında yer alan dilimdeki düşey kuvvetlerin toplamı dilim tabanındaki normal kuvvetle denge halindedir. Münferit dilimdeki yatay kuvvetlerin birleşimi dilimler arası normal kuvvete eşittir. Bütün dilimlerde dönme noktası üzerinde moment değerleri toplanır, bu toplam değer momente bağlı güvenlik katsayısında kullanılır. Tüm bu geliştirilmiş kabullere rağmen genelleştirilmiş yöntemde statikçe belirsiz bazı durumlar söz

konusudur. Bunlar arasında bileşke normal ve yatay kuvvet v.b. parametrelerin yönü ve açısı ile ilgili kabule ihtiyaç vardır. Bu sebeple Morgenstern-Price yönteminde olduğu gibi dilimler arası kuvvet fonksiyonu tanımlanmaktadır. Tablo 1’de geliştirilen şev analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgi ve bir diğer yöntemin geliştirilmesine sebep eksiklik ya da ihmal ettiği parametreler hakkında genel bir bilgi verilmiştir[1, 3, 5, 10, 13].

Mısırlı [12], yapmış olduğu çalışmada literatürde[16, 17] yer alan analitik yöntemler ile sonlu elemanlar yöntemini şev stabilitesi durumu için güvenlik katsayısı yönünden incelemiştir. Buna göre yapılan çalışmada analitik yöntem olarak seçilen, Bishop, Fellenius, Spencer, Janbu, Morgenstern-Price ve Plaxis 2D analizlerinin karşılaştırması sonucu analitik yöntemler ile Plaxis sonuçları arasında % 25’e varan rakamsal farklılıklar ortaya çıkmıştır. Özellikle bu farkın Plaxis analizlerinde yer alabilen, iksa yapısı veya zeminin deformasyonuna bağlı her birim deformasyonda güncellenmesiyle arttığı tespit edilmiştir. Diğer yandan söz konusu birim deformasyonla güncellenen Plaxis analizlerinde şevin kayma kaması geometrisinin de bu durumdan etkilendiği tespit edilmiştir. Analitik çözümlerde gerek parametre eksikliği gerek performans halindeki şev stabilitesini etkileyen birim deformasyonların çözülmemesi nedeniyle analitik yöntemlerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Taşkıran ve ark. [18], yapmış olduğu çalışmada, limit denge yöntemleri ile 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi güvenlik katsayısı sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada sonuç olarak, 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinde en yüksek güvenlik katsayısı değerinin diğer yöntemlere göre çıktığını tespit etmişlerdir. Buna göre söz konusu şev stabilitesi güvenlik katsayısı değeri problemin çözümüne en çok parametre ve performans halinde modellenebilmesiyle birim deformasyona bağlı 3 boyutlu sonlu elemanlar yönteminde elde edilmiştir.

Polat [13], yapmış olduğu çalışmada analitik yöntemler ile sonlu elemanlar analizlerini karşılaştırmıştır. Buna göre çalışmada karayolundan ötürü şevin maruz kalacağı araç yükü dinamik yükler v.b. parametrelerin sonlu eleman analizlerinde yapılabileceğinden sonlu eleman analizleri ile bulunan güvenlik katsayısı değerlerinin daha ekonomik bir şev tasarımına yol açacağını belirtmiştir.

Cevher [5], yapmış olduğu çalışmada limit denge analizleri yapabilen GEO5 programı ile deformasyon bazlı analizler yapan Plaxis 2D programını karşılaştırmıştır. Buna göre çalışmada, Plaxis ile yapılan analizlerin daha gerçekçi ve ekonomik güvenlik katsayısı sonucu verdiği belirtilmiştir.

Ulah ve ark. [19], yapmış olduğu çalışmada şev stabilitesi analizlerinde kullanılan 5 farklı metodu birbirleri ile kıyaslamıştır. Bu metodlar sırayla limit denge yöntemi, nümerik metod, yapay sinir ağları yöntemi, limit analiz yöntemi ve vektörel yöntem olarak sıralanmıştır. Bu metodların içinden en eski olanı limit denge yöntemi olduğu belirtilmiş ve diğer yöntemlere göre nümerik yöntem veya sonlu elemanlar yönteminin en gerçekçi sonuçlar verebildiğini sonuç olarak çalışmada belirtmiştir.

Tablo 1. Analitik Yöntemlerin Özet Anlatımı[2]

| Method            | Kayma Tipi | Eksiklikler                                                                                                                | Çözüm Aracı | Denge Şartı |
|-------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| Dilim Yöntemi     | Dairesel   | Kayma kuvvetleri ihmal edilir                                                                                              | Geleneksel  | Moment      |
| Bishop            | Dairesel   | Kayma kaması kuvvetleri yataydır, kesme kuvveti yönünde oluşmaz                                                            | Geleneksel  | Moment      |
| Janbu             | Her Yönden | Dilimler arası kuvvetler yataydır, ampirik düzeltme katsayısı dilimler arası kayma kuvvetlerinin oluşması için kullanılır. | Geleneksel  | Düşey       |
| Spencer           | Her Yönden | Dilimler arası kuvvetler eğim değişimine bağlı olmaksızın sabit eğimdedir.                                                 | Bilgisayar  | Tümü        |
| Clough            | Her Yönden | Spencer yönteminden farklı olarak, dilimler arası kuvvetler değişik açı gösterir                                           | Bilgisayar  | Tümü        |
| Morgenstern-Price | Her Yönden | Dilimler arası kuvvetlerin yönleri ihtiyari olarak tanımlanır.                                                             | Bilgisayar  | Tümü        |
| Lowe ve Karafiath | Her Yönden | Dilimler arası kuvvetlerin yönü şevin değişen stabilitesine bağlı değildir.                                                | Bilgisayar  | Tümü        |
| Sarma             | Her Yönden | Dilimler arası kayma kuvveti yanlardan ve dilimin altından etkililir, dilimin her yüzeyinden değildir.                     | Bilgisayar  | Tümü        |

Tablo 1’de belirtilen Limit denge yöntemi olarak geleneksel metot, şev stabilite durumunu güvenlik katsayısına göre hesap etmekte ve güvenlik katsayısı değerine şevin o anki durumuna göre yalnızca bu değerle açıklayabilmektedir. Bu yöntemlere katkı olarak araştırmacılar sonlu elemanlar yöntemini şev stabilitesinin analiz edilmesinde geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemde şevin stabilitesi yalnızca güvenlik katsayısına bağlı olarak hesaplanmamış aynı zamanda şevin servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği yükler ve mevcut kütsel hareketi veya deformasyonun olabilecek alternatif yüklere karşı güvenlik katsayısı durumu daha kompleks bir bakış açısıyla çözümlenebilmekte, yine sonlu elemanlar yönteminde şevin güvenlik katsayısı değerini arttırmak için gerekli iyileştirme yöntemleri bu yöntemde uygulanabilmekte ve analitik yöntemlerden daha ekonomik bir çözüm çerçevesinde her şev özel olarak çözüm veya şevin güvenlik katsayısını iyileştirme yöntemleri uygulanabilmektedir. Tüm yaklaşımların temel amacı kritik kayma yüzeyi veya kayma kamasını oluşturarak kayma

yüzeyine karşı ve kayma yüzeyine paralel olan kütleyi birbirine oranlayarak söz konusu güvenlik katsayısını tespit edilmesi amaçlanmaktadır[8, 14].

Bu çalışmada, Slide programı ile kum zeminde oluşturulan bir şev probleminin 9 farklı analitik yöntemle ve Plaxis 2D programında deformasyon odaklı analizi yapılarak analitik yöntemlerin gelişim süreci ve nedenleri söz konusu problemin sonlu elemanlar analiziyle kıyaslaması yapılmıştır.

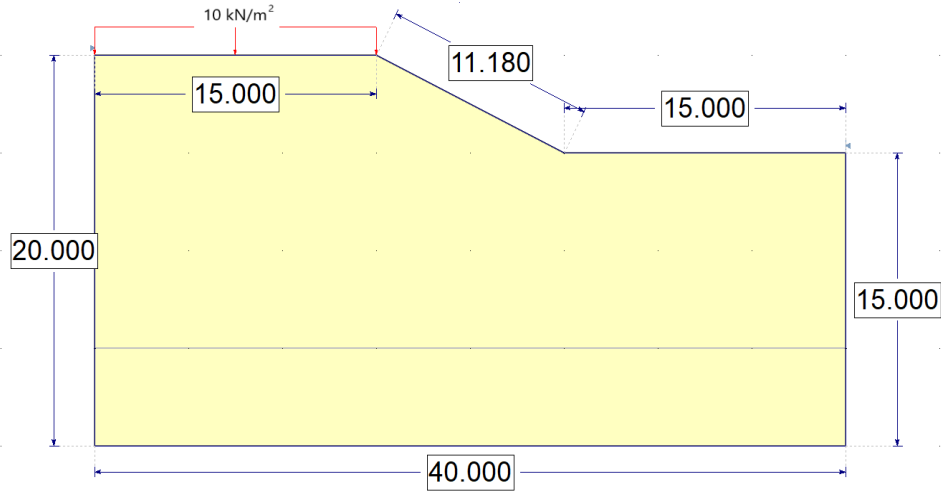
## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Slide programı kullanılarak oluşturulan Şekil 2’de yer alan şev geometrisine 10 kN/m<sup>2</sup> yayılı yük etkililerek, literatürde[11, 16, 17, 18] yer alan 9 farklı şev stabilitesi yöntemiyle güvenlik katsayısı hesaplanmıştır. Tablo 2’de yer alan mukavemet özelliklerine sahip zemin analizler için kullanılmıştır.

Tablo 2. Şev Probleminde Tanımlanan Zeminin Özellikleri

| Malzeme Modeli            | MC    |
|---------------------------|-------|
| $\gamma_n(\text{kN/m}^3)$ | 20    |
| $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$ | 20    |
| $\phi(^{\circ})$          | 35    |
| $c(\text{kPa})$           | 1     |
| $E(\text{kPa})$           | 30000 |
| $\psi(^{\circ})$          | 20    |
| $G(\text{kPa})$           | 11540 |
| $\nu$                     | 0.3   |





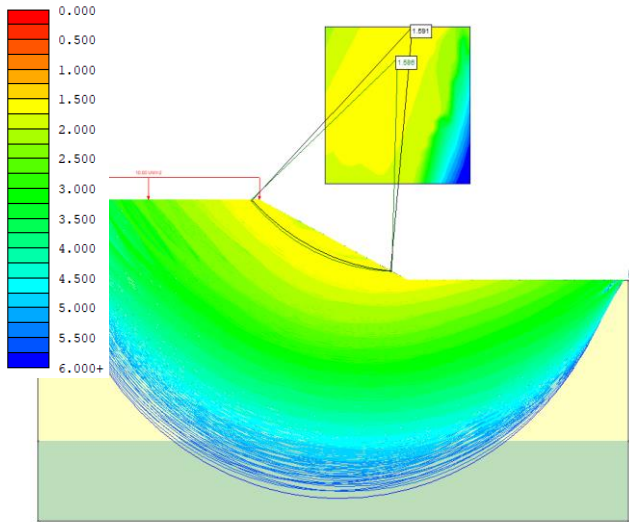
Şekil 2. Oluşturulan Şev Geometrisi

Şekil 2’de slide ve Plaxis 2D programı için oluşturulan şev geometrisi yer almaktadır.

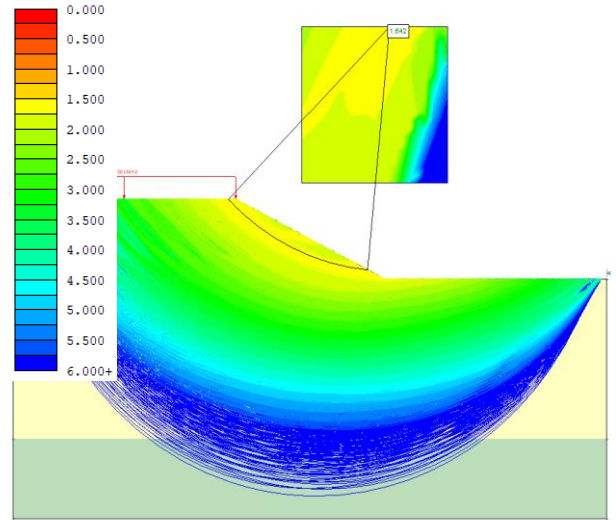
### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışmada limit eşitlik yöntemlerine bağlı 9 farklı analitik yöntem (Ordinary/Fellenius, Bishop, Janbu, Janbu corrected, Spencer, Corps of Engineers, Corps of Engineers 2, Lowe-

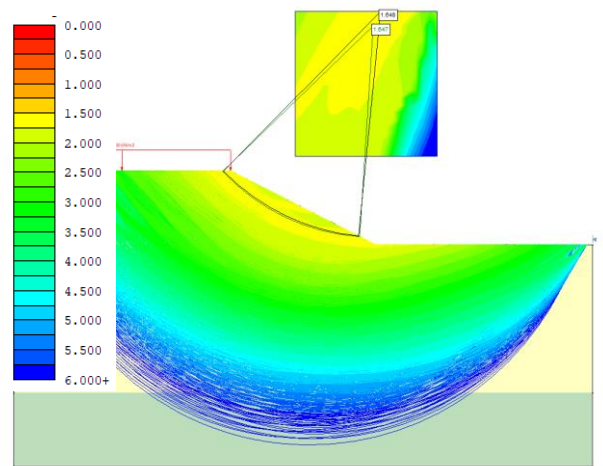
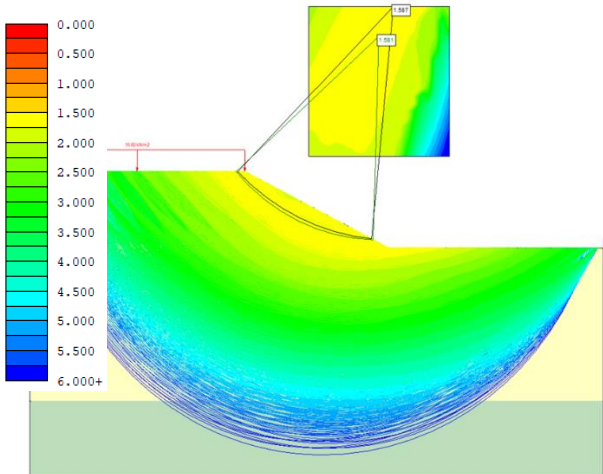
Karafiath, GLE/Morgenstern Price) Şekil 2 ve Tablo 2’de yer alan geometri ve kum zemin özellikleri için Slide Programında analiz edilmiştir. Daha sonra Analitik yöntemleri sonlu elemanlar analizi ile kıyas etmek amacı ile aynı geometri ve malzeme özellikleri Plaxis 2D programında analiz edilmiştir.



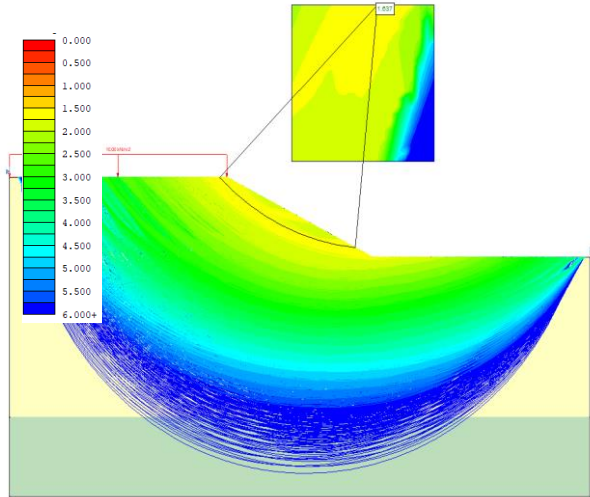
a) Ordinary/Fellenius G.S. 1.586



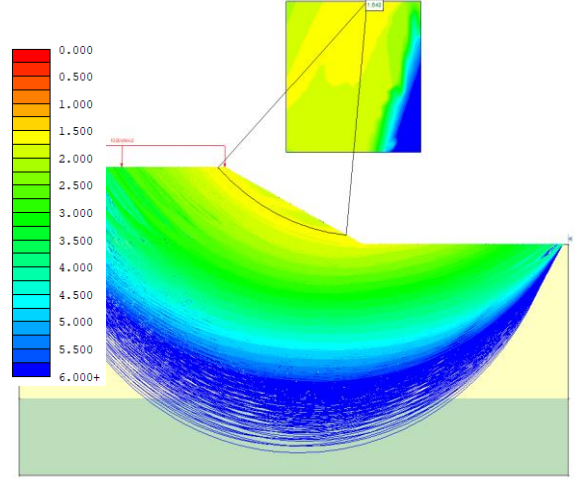
b) Bishop G.S. 1.642



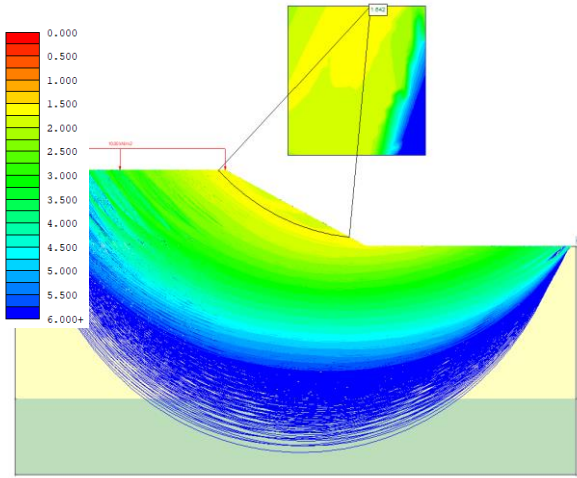
c)Janbu G.S. 1.581



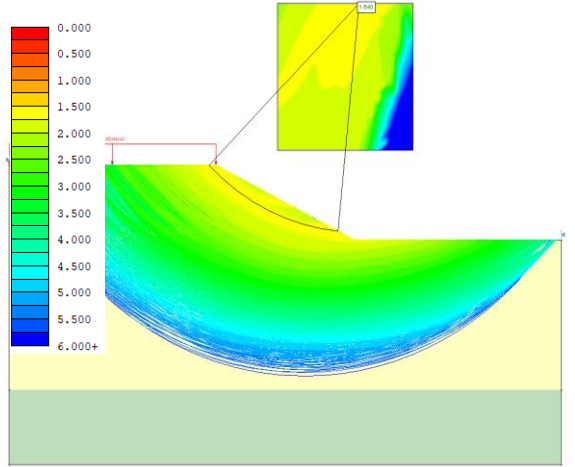
d)Janbu corrected G.S. 1.647



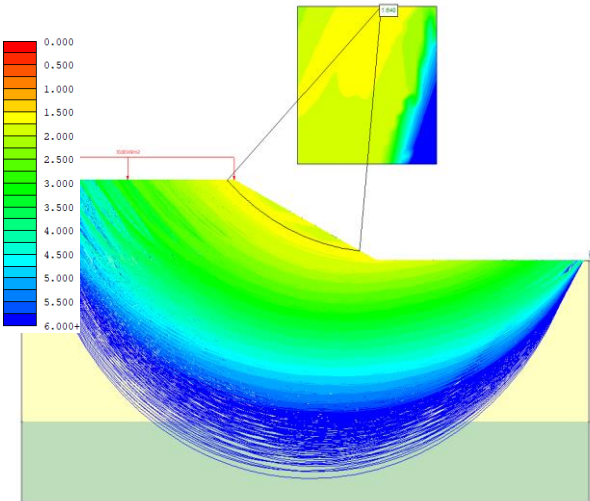
e)Spencer G.S. 1.637



f)Corps of Engineers G.S. 1.640



g)Corps of Engineers G.S. 1.642



h)Lowe-Karafiath G.S. 1.640

i)GLE/Morgenstern Price G.S. 1.640

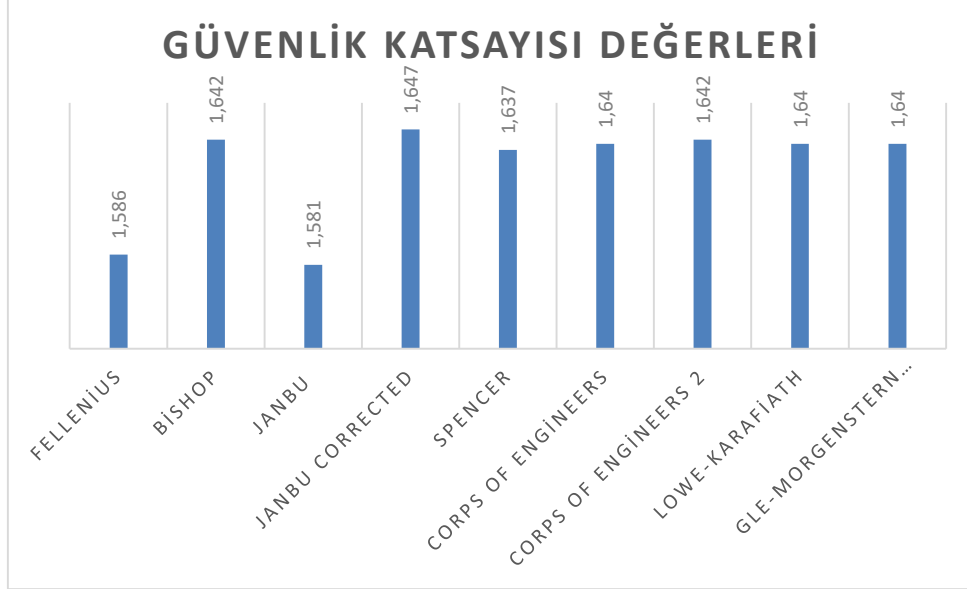
Şekil 3. Şev Analizinin 9 Farklı Yöntemle Oluşan Geometrisi ve Güvenlik Katsayısı Değerleri

Şekil 3'te 9 farklı analitik yöntemle çözümlenen şev stabilitesi sonuçları yer almaktadır. Buna göre şev stabilitesinin duraylılık hesabı için oluşturulan geometriye bağlı her bir yöntemin şev stabilitesi için kullandığı parametre ve davranış farklı olarak sonuçlanmaktadır. Bunlar arasından Fellenius yöntemi ilk şev duraylılığının yapıldığı analiz yöntemi olarak yer almakta ancak bu yöntemde Şekil 3'te görüldüğü üzere şevin

kayma zonunda bulunan dilimler arası etkileşim parametreleri olan kayma kuvveti, normal kuvvet v.b. yer almadığından şevin güvenlik sayısı hesabında kullanılan kritik alanı için diğer yöntemlere göre farklı bir geometri oluşmuştur. Söz konusu yöntemler arasında dilimler arası kesme kuvveti, kayma veya dilimler arası herhangi bir etkileşim gerek ampirik katsayılarla gerek matematiksel nümerik analizlerle temsil edilmeye çalışılmış

ve çalışmada da bahsedildiği eksiklikleri kapatılarak her yeni analitik yöntem bir önceki ile ardıl nitelik taşımaktadır. Ancak bunlar arasından Lowe ve karafiath yöntemi kuvvet dengesi eşitliği ile çözüm yapmakta ve dilimler arası kuvvetlerin yönü göz önünde bulundurulmakta ve her dilim için değişen eğimle birlikte denge şartı için çözümleme yapmaktadır. Buna göre oluşturulan bu modelde söz konusu şev duraylılığı için oluşan kayma geometrisi sınır koşulları olarak daha derin bir geometride

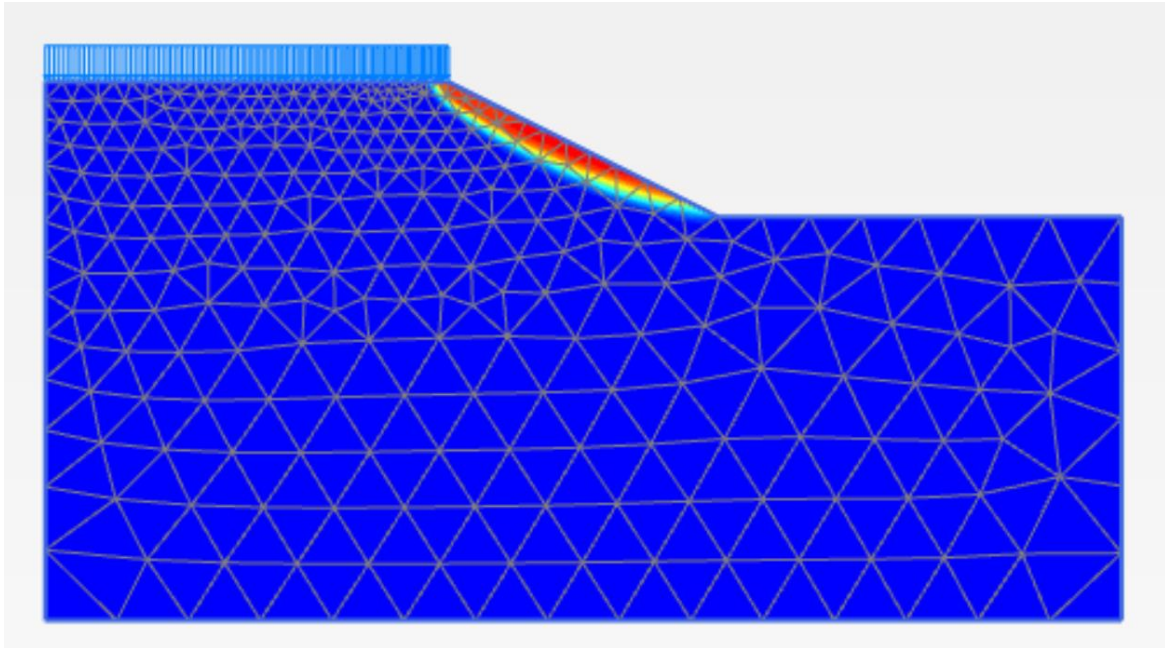
dilimlenmeyip şev kırılma alanına yakın olması söz konusudur. Oluşan bu geometri Şekil 3h'ta görülmektedir. Diğer bir deyişle şev stabilitesinin en doğru çözümü şev geometrisine ve şev duraylılığını bozan veya yardım eden kuvvetlerin en iyi şekilde temsil edilmesi ile ilgilidir. Literatürde [1], en ilkel halinden günümüze kadar katkı konularak gelen bu kuvvetleri temsil eden analitik yöntemler gelişim halindedir.



Şekil 4. Analitik Yöntemlerle Analiz Sonucu Bulunan Güvenlik Katsayısı Değerleri

Şekil 4'te yer alan grafikte oluşturulan şev geometrisinin güvenlik katsayıları ile yapılan duraylılık analizlerinde 9 farklı yöntemin aynı geometri ve aynı zemin değerleri için güvenlik katsayısı değerleri yer almaktadır. Buna göre söz konusu yöntemler arasında % 5'e varan güvenlik katsayısında fark ortaya çıkmıştır. Şev duraysızlığının ve ya şev stabilitesinin olası yüklere karşı bozulabilmesi durumuna göre sahada ön tasarım aşamasında

hızlı ve kolay olması sebebiyle günümüzde sıklıkla kullanılan çalışmada bahsedilen analitik yöntemler, değişen geometri ve zemin koşullarına bağlı birbirleri arasında farklı güvenlik katsayısı değerlerine sahip olmaktadır. Zeminin performans halindeki koşulları ve söz konusu şevin duraylılığını sağlayabilecek yapı elemanlarının şevde oluşmasıyla birlikte tüm bu etkenleri temsil edememektedir.



Şekil 5. Plaxis 2D programında Deformasyona Bağlı Oluşan Şev Kritik Düzlemi,



Şekil 5'te şev probleminin Plaxis 2D programı ile çözümü yer almakta ve söz konusu kayma kaması görülmektedir. Buna göre sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapılan şev duraylılığı çözümleri birim deformasyona bağlı olarak çözüm yapabilmekte ve her birim deformasyonda performans halinde bulunan zemini veya sahada inşa aşamaları süren yapı malzemesi değişimlerini analizlerde temsil edebilmektedir. Buna göre çalışmada bahsedilen 9 analitik yöntemle göre şev duraylılığında ki güvenlik katsayısı değeri en yüksek bu analizde 1.665 olarak sonuçlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi analitik yöntemlerin

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, kum zeminde oluşturulan bir şev geometrisinde, şev stabilitesine bağlı güvenlik katsayısı analizi 9 farklı analitik yöntem olan Ordinary/Fellenius, Bishop, Janbu, Janbu corrected, Spencer, Corps of Engineers, Corps of Engineers 2, Lowe-Karafiath, GLE/Morgenstern Price ve Plaxis 2D sonlu elemanlar programıyla yapılmıştır. Buna göre çalışmada ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir.

Analitik yöntemlerin en ilkel hali olan Fellenius yönteminden, analizlerde en son gelişmiş analitik metod olan GLE yöntemine kadar 9 farklı yöntem ile şevin güvenlik katsayısına bağlı stabilize değerleri her bir yöntemde farklı değerde sonuçlanmıştır. Güvenlik katsayısı sonuçları 1.581'den 1.647'ye kadar bu analitik yöntemlerde farklılık göstermektedir. Bu yöntemlerin gelişim süreçlerine göre şev duraylılığına etki eden parametreler her birinde geliştirilerek özellikle dilimler arası etkileşimde ön plana çıkan kayma kuvveti v.b. değişkenlerle çözümlerde şevin güvenlik katsayısına bağlı kayma geometrisi her yöntem için farklı oluşmuş ancak Lowe ve karafiath yönteminde kuvvet dengesi eşitliği ve dilimler arası kuvvetin yönünün yöntemde hassaslaştırılması sonucu şev stabilitesine bağlı kayma zonu veya kaması farklı geometride oluşmuştur.

9 farklı yöntemin analizlerde çıkan sonuçlara göre güvenlik katsayısı değeri en fazla yüzde 5 oranında değişmektedir. Bu yöntemler ön tasarım aşamasında hızlı ve kolay bir biçimde şev stabilitesine ait bir güvenlik katsayısı verebilmektedir, ancak şev geometrisi ve zemin koşullarına bağlı olarak şev probleminin kompleksleşmesi ve şev duraylılığı probleminde çözüm olarak uygulanacak gerek iksa yapısı gerekse diğer yapı elemanlarını performans halinde, yekün olarak temsil edememekte, buna göre analitik yöntemler geliştirilmelidir.

Sonlu elemanlar yöntemi Plaxis 2D programı ile aynı geometri ve zemine ait yapılan analizde güvenlik katsayısı değeri çalışmadaki diğer tüm yöntemlerinde üstünde 1.665 çıkmıştır. Söz konusu analizin birim deformasyona bağlı ve her birim deformasyonda kendisini güncelleyerek yeni ağa göre hareket etmesi sonucunda analitik yöntemle göre daha gerçekçi ve ekonomik bir sonuç vermiştir. Şevin stabilitesi ve güvenlik katsayısını etkileyen birim deformasyona bağlı sonlu elemanlar analizleri farklı zemin, yapı ve şev geometrisinde çeşitli kombinasyonlar oluşturularak şev duraylılığı veya şevin güvenlik katsayısını etkileyecek parametreler analitik yöntemlerle kombine edilerek bu problemi çözümleyen yeni bir formül geliştirilebilir.

eksik kaldığı veya çok kritik güvenlik katsayısı değerlerinin söz konusu olduğu şev problemlerinde tasarıma ekonomik bir bakış açısı getirebilmektedir. Diğer yandan sonlu elemanlar yöntemi ile şev duraysızlığı analizlerinin sahada bir vaka analizi veya model testle doğrulanması ile analitik yöntemlerde yer alamayan, eksik parametreler geliştirilerek ön tasarım aşamasında güvenlik katsayısı çözümlemesini veren daha fazla parametre içeren bir analitik yöntem sonlu elemanlar yönteminin desteğiyle geliştirilebilir.

#### Kaynakça

- [1]Cheng, Y. ,M., Lau, C., K. (2014). Slope Stability Analysis and Stabilization: New Methods and Insight, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17015>.
- [2]Chowdhury, R., Flentje, P., Bhattacharya, G., (2010). Geotechnical Slope Analysis, 10.1201/9780203864203.
- [3]Coduto, D., Kitch, W., Yeung, M., (2015). Foundation Design Principles and Practices, Third Edition, Pearson Publication.
- [4]Duncan, M., Wright, S. G., (2005). Soil Strength and Slope Stability. John Wiley Sons, New York.
- [5] Cevher, F., S., M., 2021 Şev Stabilitesi Ve Şevlerin Güvenli Hale Getirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi.
- [6]Huang, A., Yu, H.. (2017). Foundation Engineering Analysis and Design. 10.1201/9781351255400.
- [7]Huang, Y., Xiong, M., Hu, H.,H.(2023), Guidelines for probabilistic performance-based seismic design and assessment of slope engineering. Heidelberg: Springer.
- [8]Juang, H., Z., Gong, W., (2015). Reliability-based Assessment of Stability of Slopes C IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 26, International Symposium on Geohazards and Geomechanics (ISGG2015) 10–11 September 2015, Warwick, UK. 26 012006 DOI 10.1088/1755-1315/26/1/012006.
- [9]Kardoğan, Ö., P., S., Erdağ, A., (2022). Landslide stability based on a limit-equilibrium analysis: a case study. ActaGeotechnica Slovenica , vol.19, no.1, 17-29.
- [10]Keleşoğlu K.,(2017). Slope Stability Analysis and Stabilization. Lecture notes Istanbul University Department of Civil Engineering Geotechnical Eng. Spring Semester/2016-2017.
- [11]Kumar, S., Choudhary, S., S., Burman, A.,(2023). Recent advances in 3D slope stability analysis: a detailed review. Model. Earth Syst. Environ. 9, 1445–1462 <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01597-y>
- [12]Mısır G., (2018), Şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü”, DÜMF MD, c. 9, sy. 1, ss. 429–438,.
- [13]Polat A., (2019). Şev Stabilitesinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması ve Karşılaştırmalı Analiz, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi.
- [14]Salunkhe, M., Chvan, A., Bartakke, M., Kothavale, M., (2017). An Overview on Methods for Slope Stability

Analysis. International Journal of Engineering Research and.  
V6. 10.17577/IJERTV6IS030496.

- [15] Pourkhosravani, A., Kalantari, B., (2011). A Review of Current Methods for Slope Stability Evaluation. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 16.
- [16] Plaxis 3D,(2020) Reference Manuel, Connect Edition, V20.03.
- [17] Slide 2D,(2023) limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes.
- [18] Taşkıran, T., Yavuz, V., S. ve Keskin, M. S., (2015), Şev Stabilitésinin İki Ve Üç Boyutlu Modeller İle İncelenmesi, DÜMF MD, c. 6, sy. 1, ss. 1–8.
- [19] Ullah, S., Khan, M., U., Rehman, G., (2020). A Brief Review Of The Slope Stability Analysis Methods. Geological Behavior. 4. 73-77.10.26480/gbr.02.2020.73.77.