



Siirt Aktaş heyelanının sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile analizi

*Analysis of Siirt Aktaş landslide finite element method and limit equilibrium method*M.Hayrullah AKYILDIZ¹, Sema NASIROĞLU^{2*}, M.Salih KESKİN³¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hayrullah.akyildiz@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7239-3518>² Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, semanasiroglu@gmail.comORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4423-5528>³ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mkseskin@dicle.edu.trORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-4437>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 29.04.2024
Revizyon 26.07.2024
Kabul 14.08.2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Şev stabilitesi, sonlu elemanlar yöntemi, limit denge yöntemi, heyelan

ÖZ

Bu çalışma ile, yapım çalışmaları Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yürütülen Siirt İli'ne bağlı Aktaş Köyü mevkiinde karayolu inşaatı çalışmaları sırasında, dolgu kesiminde meydana gelen stabilite problemlerinin limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve depremlili durum analizlerinin yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri bakımından kıyası yapılmıştır. Çalışma alanında yüksek yarma ve dolgu kesitlerine rastlanmaktadır, bu sebeple bu kesim kritik bir öneme sahiptir. Heyelanın meydana geldiği kesimlerde gerekli arazi çalışmaları yapılmış ve elde edilen zemin ve kaya numuneleri ile laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Arazi incelemeleri, laboratuvar ve literatür verileri ışığında analizler için gerekli kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Stabilite problemlerinde kayma yüzeyinin yerini ve şeklini belirlemek zordur. Mevcut durumu yansıtan model üzerinde, sonlu eleman yönteminin yansıtıldığı Plaxis V20 2D ile limit denge yöntemine dayanan Slide V.6 yazılımlarından yararlanılmış, şevin göçme yüzeyi tespit edilmeye çalışılmış ve güvenlik analizi hesapları yapılmıştır. Güvenlik sayıları yönünden iki yöntem uyumlu görünse de sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları daha düşük çıkmıştır. Ayrıca zemindeki yenilme bölgelerinin yerlerinin belirlenmesi ve gerilme deformasyon eğrilerinin elde edilmesi açısından sonlu elemanlar yönteminin daha olumlu ve güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2024
Received in revised form 26 July 2024
Accepted 14 August 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Slope stability, finite element method, limit equilibrium method, landslide

ABSTRACT

In this study, during the highway construction works in Aktaş Village of Siirt Province, the construction works of which are carried out by the 9th Regional Directorate of Highways, the stability problems occurring in the embankment section were analyzed by limit balance and finite element methods, and the safety numbers and collapse surfaces were determined. High cut and fill sections are encountered in the study area, therefore this section is of critical importance. In the light of field investigations, laboratory and literature data, the necessary shear strength parameters for analyzes were obtained. In stability problems, it is difficult to determine the location and shape of the sliding surface. On the model reflecting the current situation, collapse surfaces were tried to be detected and safety analysis calculations were made with Plaxis V20 2D, which is based on the finite element method, and Slide V6.0, which is based on the limit equilibrium method. Although the two methods seem compatible in terms of safety numbers, the safety numbers obtained with the finite element method are lower. In addition, it has been determined that the finite element method gives more positive and reliable results in terms of determining the locations of failure zones in the soil and obtaining stress deformation curves.

Doi: [10.24012/dumf.1475382](https://doi.org/10.24012/dumf.1475382)

* Sorumlu Yazar

Giriş

Şevler, belirli bir potansiyel kayma yüzeyi üzerinde dengeyi tesis etmek için gerekli olan kayma gerilmeleri mevcut kayma direncine ulaştığında ya da ötesine geçtiği zaman stabilitesini yitirir [1]. Şevlerin stabilitesi disiplinler arası bir konu olsa da meydana gelen şev hareketinin nedenleri, etkileri ve olayın sayısal olarak açıklanması açısından diğerlerinden farklılıklar göstermiş ve geoteknik mühendisliğinin temel problemlerinden biri haline gelmiştir. Şiddetli yağışlar sonucunda yeterli drenaj sağlanmaması durumunda doğal drenajın bozularak yüzey ve yağmur sularının oluşturduğu boşluk suyu basınçlarındaki artış, yol genişletmeleri sırasında yapılan dikkatsiz kazılar, eğimli arazi üzerinde yük oluşturan malzemenin yığılması, deprem ve volkanik olaylar gibi etkiler eğimli arazilerin yapısını bozarak stabilite problemi oluşturan en önemli faktörlerdir. Ülkemizde ve dünyada hem yeryüzünü biçimlendiren doğa olayları olması açısından hem de uygun önlemler alınmadığı için heyelanlar geçmişten günümüze süregelmiş ve ciddi can ve mal kayıpları ile tarımsal hasarlara sebep olabilmektedir. Tarihteki ilk güvenilir heyelan kaydı 1219 yılında Romance nehir vadisinde oluşan heyelandır ve heyelan kitlesi nehir önünde bir baraj oluşturmuş, akabinde barajın çökmesiyle binlerce insanın ölümüne sebep olduğu belirlenmiştir [2]. Bir madencilik kazısı sonrası, 1960 yılında İngiltere'nin Galler Bölgesi'nde pasa yığınlarının yerleşim yerlerine kaymasıyla bir okuldaki 116 öğrenci yaşamını yitirmiştir [3]. Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğal Kaynaklı Afet İstatistikleri 2018 raporuna bakıldığında ülkemizde 1980-2017 yılları arasında doğal afetler içerisinde heyelanların depremlerden sonra ikinci sırada geldiği belirlenmiştir [4]. Ülkemizde karayollarında meydana gelen heyelanların sebeplerine bakılırsa, morfolojik yapıya bağlı olarak dağlık alanlar ile geçit noktaları içermesi, aktif deprem kuşakları içerisinde yer alması, yüksek yamaç eğimlerine ve olumsuz jeolojik koşullara sahip olması ana sebepler olarak sıralanmaktadır.

Heyelanlar, bir zemin mekaniği problemi olarak ele alındığında yüzey ile yeraltı sularına ve zeminin kayma mukavemeti parametrelerine dikkat edilmelidir. Bu parametrelerin bilinmesi göçme mekanizmasının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Zeminin kayma mukavemeti parametreleri ile yapılan analizlere şev stabilite analizleri denilmektedir [5].

Şev stabilite analizleri, ilk defa Coulomb'un 1773 tarihinde kayma mukavemeti açısı ve kohezyon parametreleri üzerinde durmasıyla ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda Coulomb'un zemin kütleindeki kayma kaması içerisindeki kuvvetlerin denge durumu geliştirilmesi ile detaylı irdelenmiştir [6]. Bir şevin stabilitesi bozulduğu zaman, şevin güvenlik sayısı bir (1.0) olarak kabul görmektedir. Araştırmacılar tarafından bir çok yöntem içerisinden en yaygın kullanılan iki analiz yöntemi sonlu elemanlar ve limit denge yöntemidir. Limit denge yöntemlerinde, eğimli bir yüzey olarak potansiyel bir kayma yüzeyi tanımlanır ve "Coulomb" göçme kriterine göre kayma yüzeyi üzerinde bulunan zemin kütlelerine etkiyen kuvvet ve momentlerin denge durumu göz önüne alınarak zemin kayma mukavemeti hesaplanır [1]. Sonlu elemanlar yöntemi ise, zeminin gerilme

ve şekil değiştirme davranışının dikkate alındığı bir yöntemdir. Bu yöntem, zemin geometrisi ve sınır koşulların dikkate alınarak hesap yapılması gerçeğe en yakın sonuçlar vermesine imkan verir. Literatür incelediğinde, şev stabilitesi problemlerinde sonlu elemanlar ile limit denge yöntemlerinin en çok kullanılan analiz yöntemleri olduğu görülmektedir.

Keskin ve Laman (2007) şev stabilitesi problemlerinde sonlu elemanlar yöntemi ile deplasman ve gerilme durumlarının elde ediliyor olmasını tespit etmiş ve bu yöntemin limit denge yöntemlerine göre avantajlarını belirtmiştir [7].

Moudabel, (2013) bir şev vakasını sonlu elemanlar e limit denge yöntemi ile ele almış ve elde edilen güvenlik sayısının limit denge yönteminden daha yüksek çıktığı sonucuna varmıştır [8]. Bol ve ark. (2017) aşırı yağışlar sonucu dengesini yitiren bir karayolu şevinin güvenliğinin sağlanması için limit denge ve sonlu elemanlar yöntemin kullanmış ve uygun çözüm önerileri geliştirmiştir [9].

Huvaj ve Oğuz (2018) Norveç'te meydana gelen bir heyelan vakasını ele alarak limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri ile deterministik ve olasılıksal yaklaşımlarla güvenlik ve göçme yüzeyi faktörlerini karşılaştırmıştır [10].

Büyükağmıcı ve Işık (2019), üç şev vakasında stabilite analizi üzerinde çalışmış; analizlerde TS 8853, Eurocode 7 ve BS 8006 standartlarının başarı durumları mukayese etmiştir. Yapılan analizlerde sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri kullanılmış ve çalışmanın neticesinde stabilite analizleri için TS 8853 ile limit denge yönteminin Eurocode 7'ye göre daha güvenilir olduğu belirlenmiştir [11].

Gör (2021) Van ilinde karayolunda meydana gelen bir şev stabilitesi problemini limit denge yöntemleriyle ele alarak statik ve deprem durumu analizleri ile uygun çözüm önerileri geliştirmiştir [12].

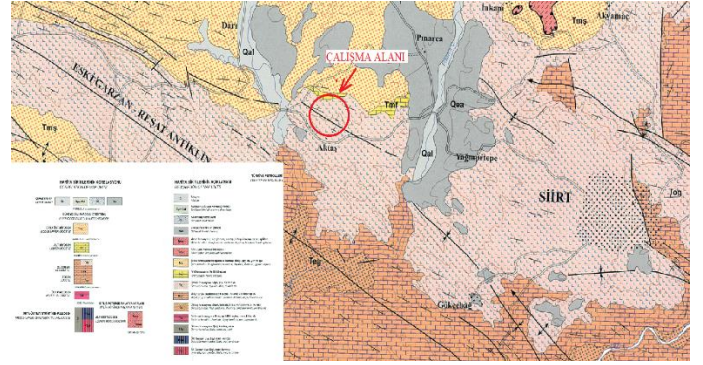
Mburu ve ark. (2022) yağış sızmasına bağlı iki heyelan vakası üzerinde çalışmış ve doygun olmayan şevlerin stabilitesinde sonlu elemanlar ve limit denge yöntemlerini içeren yazılımlar ile kayma yüzeyi arama yöntemi ile hata payları açısından farklı çıktı sonuçları elde etmişlerdir [13]. Ulah ve ark (2020) sonlu elemanlar metodu, limit denge yöntemi, yapay sinir ağları yöntemi, limit analiz ve vektörel yöntem olmak üzere beş yöntem ile şev stabilite analizi araştırması yapmıştır. Çalışmaya göre, en gerçekçi sonucu sonlu elemanlar yönteminin verdiği belirlenmiştir [14].

Bu çalışma ile ise yapım çalışmaları Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yürütülen Siirt İli'ne bağlı Aktaş Köyü mevkiinde karayolu inşaatı çalışmaları sırasında, yarma ve dolguda meydana gelen stabilite problemlerinin sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile statik ve depremlilik durumu analizleri yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri açısından kıyası yapılmıştır.

Materyal ve Metot

Çalışma Sahası ve Jeoloji

Siirt İli, Kurtalan İlçesi Aktaş Köyü Mevki'nde 2019 yılında karayolu çalışmaları sırasında yarma ve dolgu şevinde hareketlilik gözlenmiş ve yol çalışmaları durdurulmuştur. Jeolojik birimlerin zayıflığı, hava koşulları ve yağışlar heyelanı tetiklemiş ve Siirt-Kurtalan Yolu'nun Km:13+600-14+600 kesiminde 2021 yılında tekrar hareket gözlenmiştir. İnceleme alanı Şekil 1.'de gösterildiği üzere Siirt ili sınırları dahilinde olup Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü ağındadır.



Şekil 2. İnceleme alanının genel jeoloji haritası [16]

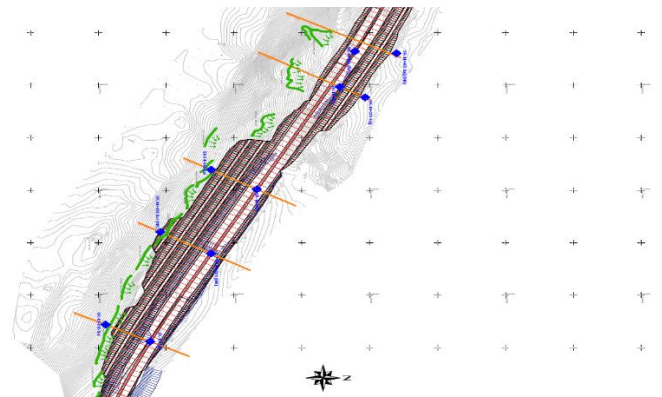


Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası [15]

Çalışma alanı ile çevresinde Genç Eosen-Oligosen yaşlı Germik Formasyonu gözlenmektedir. İnceleme alanı ve yakın çevresi için hazırlanan 1/500.000 ölçekli genel jeoloji haritası Şekil 2.'de verilmiştir. Şev stabilitesinin bozulduğu alanın üst kotlarında gözlenen rezidüel zemin, açık kahve – kahve renkli, grimsi – grimsi yeşil, bej renkli, çok sıkı – sert, katı – çok katı, orta – yüksek plastisiteli, nemli yapıdaki killi çakıl – siltli kil biriminden oluşmaktadır. Kaya birimleri ise; açık kahve – kahve, grimsi yeşil, grimsi beyaz renkli, genelde orta derecede – çok ayrılmış, yer yer tamamen ayrılmış, zayıf, çok zayıf dayanımlı yer yer aşırı derecede zayıf dayanımlı, yer yer de sağlam – orta derecede sağlam dayanımlı, genelde çok çatlaklı kırıklı – kırıklı, yer yer parçalanmış, kırıklar kil dolgululu, eklem yüzeyleri genellikle kaygan yer yer pürüzlü, yer yer ufalanabilir – dağınık yapıda, çatlaklar kil-jips dolgululu yapıdaki Şeyl – Anhidrit-Jips biriminden oluşmaktadır.

Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

İnceleme alanındaki birimlerin jeolojik-jeoteknik açıdan detaylandırılması, yer altı suyu seviyesinin tespiti, proje sahasında izlenen birimlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ile mevcut ve olası jeoteknik problemlerin irdelenmesi amacıyla yönelik olarak; dört tanesi inklinometreli kuyu olmak üzere Şekil 3.'te gösterildiği üzere on lokasyonda toplam 267.00 m araştırma sondajı açılmış ve arazide gözlemler yapılmıştır (Şekil 4.). Sondaj kuyularının açılması sırasında; ilerlemeye paralel olarak, SPT yerinde deneyi yapılarak, örşelenmiş numuneler, örşelenmemiş numuneler (UD) ve karotiyer ile ilerlenerek, karot numuneler (RC) alınmıştır. Yapılan sondaj çalışmaları sonucunda yeraltı suyuna rastlanmıştır olup yeraltı suyu seviyelerine ait özet tablo Tablo 1.'de verilmiştir. Yeraltı suyu zeminin kayma dayanımı değerlerinde değişiklikler meydana getirir bu sebeple şev stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Zemin ve kaya numuneleri, ilgili standartlar, TS 1900-2/T1[17], ISRM [18], TS EN ISO 17892-1 [19], TS EN ISO 17892-2 [20], TS EN ISO 17892-8 [21], ASTM D2487 [22], AASHTO T88 [23], AASHTO T89 [24], AASHTO T90 [25] ile önerilen yöntemlere göre, yapılmıştır.



Şekil 3. Sondaj Planı

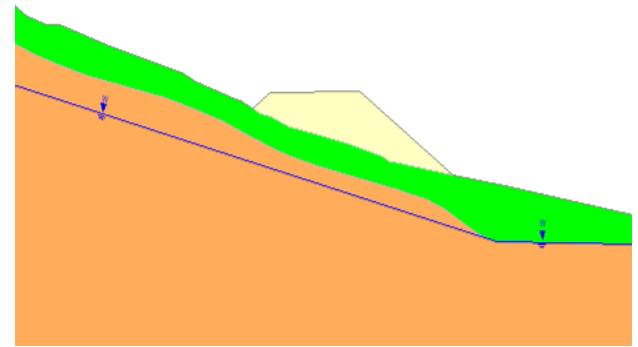
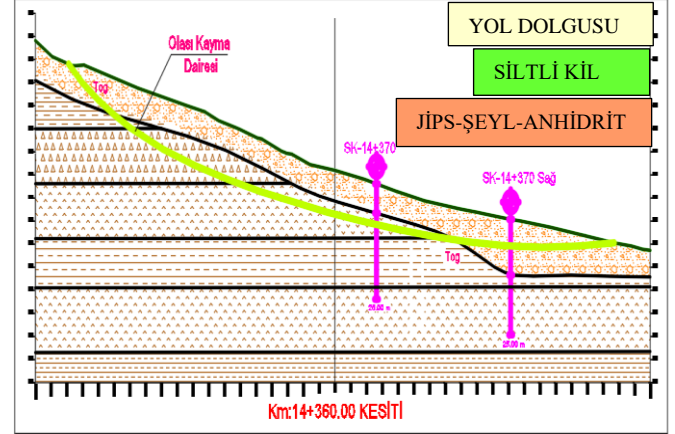


Şekil 4. Çalışma alanı (dolgu tabanının oturacağı kesim) ve çevresinin görünümü

Tablo 1. Yeraltı suyu seviyesi özet tablosu

SK NO	DERİNLİK (m)	YASS (m)	KOT (m)
SK- 13+810	21,00	2,00	631,17
SK- 13+810 Sol	35,00	Kuru	659,57
SK- 14+000 (İNK)	21,00	1,90	626,79
SK- 14+000 Sol (İNK)	39,00	1,00	659,90
SK- 14+140	18,00	1,70	620,26
SK- 14+140 Sol	35,00	2,00	649,00
SK- 14+370	25,00	8,0	698,06
SK- 14+370 Sağ	25,00	2,5	690,37
SK- 14+440 (İNK)	24,00	2,00	695,24
SK- 14+460 Sağ (İNK)	24,00	1,5	584,45

Yapılan çalışmaların neticesinde, zeminin yeraltı suyu durumu ve bölgenin mevcut zemin tabakaları değerlendirilmiştir. Yol güzergahında bulunan dolgu kesimindeki stabilite problemini çözmek için kritik dolgu kesiti belirlenmiştir. K.G.M Araştırma Mühendislik Teknik Şartnamesi'ne göre dolgu yüksekliği $h \geq 8$ m olduğu durumlarda şev oranlarının güvenli olarak belirlenmesi amacıyla şev stabilite analizlerinin yapılması gerekmektedir [26]. Bu durumda 14,38 m yüksekliğe sahip dolgu kesiti, kritik kesit olarak belirlenmiştir. Şekil 5. ve Şekil 6'da belirtildiği üzere Km:14+360 kesiti için SK-14+370 ve SK-14+370 Sağ sondaj verilerinden yararlanılmıştır.



Şekil 5. Kritik Jeolojik Dolgu Kesiti ($h=14,38$ m)



Şekil 6. UD ve karot numunelerinin alındığı sandıklar

Literatür, arazi ve laboratuvar verileri kullanılarak zemin, kaya kütle ve yeni yol dolgusu için analizlerde kullanılmak üzere, parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, Tablo 2.'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Analizlerde kullanılacak zemin ve kaya malzemesine ait mühendislik parametreleri

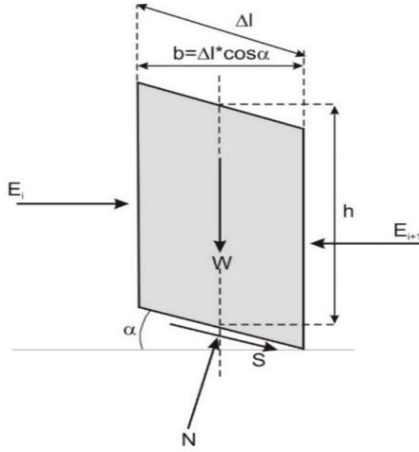
Parametre	Sembol	1. Siltli Kil (Tog)	2. Jips-Şeylit Anhidrit (Tog)	3. Yeni oluşturulacak yol dolgusu
Malzeme Modeli		Mohr-Coulomb	Hoek-Brown	Mohr-Coulomb
Malzeme Davranışı	Tip	Drenajlı		
Kuru BHA	γ_{dry} (kN/m ³)	17	22	20

Doygun BHA	γ_{sat} (kN/m ³)	18	22	20
Ort. SPT-N ₃₀ min/ort/m ak	-	6 / 28 / R	-	-
Ort. PI min/ort/m ak	%	20 / 28 / 35	-	-
I _{s50} min/ort/m ak	MPa	-	0.03 / 0.49 / 3.97	-
RQD ort	%	-	28	-
Elastisite modülü	E (kN/m ²)	49600	207010	100000
Poisson oranı	-	0.35	0.25	0.30
Kohezyon	c (kPa)	7	187	5
Sürtünme Açısı	ϕ (°)	30	37	35
Dilatansi Açısı (ϕ -30)	Ψ (°)	0	7	5
m	-	-	1.03	-
s	-	-	0.0002	-
a	-	-	0.531	-

Sayısal Modelleme

Çalışmanın bu bölümünde, stabilite problemine en yakın çözümü ortaya koymak adına şev stabilize analizleri deterministik yöntemler olan sonlu elemanlar ve limit denge yöntemi ile incelenmiştir. Limit denge yönteminin amacı, varsayılan kritik kayma yüzeyinde statik ya da sismik denge koşullarının bir güvenlik sayısı ile belirlenmesidir. Limit denge yöntemi, zeminlerde ve zemin özelliği gösteren ayrışmış kayalarda uygulanabilir olması ve bir şevin göçüyormuş kabulü ile kayma yüzeyi boyunca kayma gerilmelerinin belirlenebilmesi sebebiyle şev stabilize analizlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Limit denge yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde, kayan bir kütleyle

dilimlere ayırarak her biri için denge denklemleri yazabilen dairesel kayma yüzeyinin dengesini ele alan Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi kullanılmıştır. Dairesel kayma dilimleri arasındaki kesme gerilmelerinin sıfır varsayıldığı ve normal gerilme ile ağırlığın ise dilimin ortasına etki etmesi kabulüne dayanan bu yöntem, ilk kez genel şekliyle Bishop tarafından geliştirilmiştir [27]. Şekil 7.'deki bir dilimin düşey yöndeki kuvvetleri bileşenlerine ayrıldığında, bir güvenlik katsayısının belirlenmesine katkı sağlar ve toplam gerilmeler cinsinden aşağıdaki bağıntı (1) elde edilir. Güvenlik sayısı, bir şevin stabil olup olmaması durumu ya da ne derece stabil olduğu hakkında bilgi vermektedir.

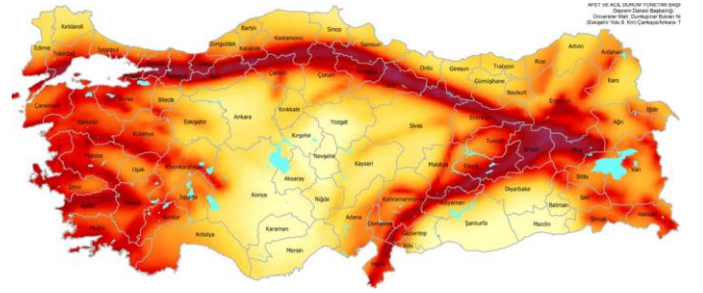


Şekil 7. Basitleştirilmiş Bishop Yöntemine göre dilime etki eden kuvvetler

$$F = \frac{\sum [c \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha + W \cdot \tan \Phi]}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

Zeminlerin davranışını incelemek için geliştirilen yöntemlerden biri de sonlu elemanlar yöntemidir. Güvenlik sayısı faktörünün yanı sıra; ötelenme, boşluk suyu basıncındaki değişim ile zemindeki yenilme bölgelerinin yerlerinin belirlenmesi gibi bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir durumda zeminin gerilme-deformasyon analizinin de yapılması gerekmektedir. Yamaç ve şev ortamında bu hesaplamalar, sayısal yöntemle iki veya üç boyutta sürekli ortam varsayımı ile sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Sonlu elemanlar yönteminde en önemli özellik, zeminin gerilme-deformasyon özelliklerinin laboratuvarında gerçekleştirilen deney sonuçlarından çıkararak doğrusal-elastik, hiperbolik-elastik ve elasto-plastik gibi modellerle temsil edilebilmesidir [2]. Bu yöntem, Zeinkiewicz (1977) tarafından sürekli bir sistemi matematiksel olarak modelleyip çözümlen bir yöntem olarak tarif edilmiştir [28]. Toplam gerilme, zemin mekaniği problemlerinde boşluk suyu basıncı ve efektif gerilmeye ayrıldığı için malzeme davranışı efektif gerilme olarak ifade edilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile düşey ve yanıl hareketler, gerilmeler, boşluk suyu basıncı ve suyun akış durumu tespit edilebilmektedir.

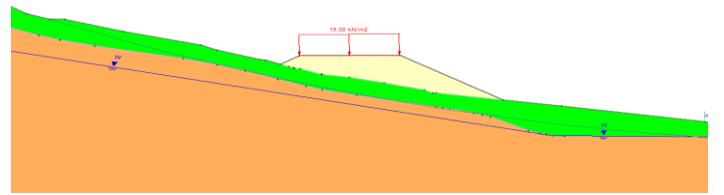
Limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar metodu için birçok yazılım geliştirilmiş olsa da bu çalışmada, limit denge yöntemi için Slide V.6 programı, sonlu elemanlar metodu için ise Plaxis V20 2D yazılımı kullanılmış ve hem statik hem de sismik durum için stabilite analizleri yapılmıştır. Şekil 8.'de gösterilen Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre proje güzergahı, yer ivmesi değerleri "AFAD, 2018, Türkiye Deprem Tehlike Haritası"ndan yararlanılarak yer ivme katsayısı; Siirt - Kurtalan Bölünmüş Yolu (Aktaş Varyantı) Km: 13+700 - 14+600 arası kesime ait yer ivmesi değeri 0.237 g olarak belirlenmiştir. Ancak yarı statik katsayının artırıcı veya azaltıcı etkilerini de kapsayacak şekilde yer ivmesi değeri, maksimum yer ivmesi değerinin (0.237 g) yarısı 0.1185 g olarak alınmıştır [29].



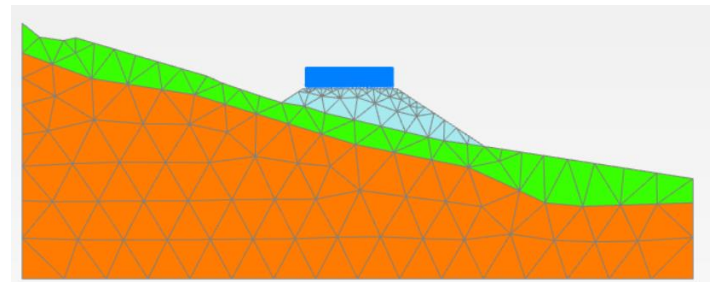
Şekil 8. İnceleme alanının deprem tehlike haritası [30]

Yerel Zemin Sınıfı ZD ve Deprem Yer Hareketi Düzeyi DD-2 olarak belirlenmiştir. Kritik kesit olarak belirlenen Km:14+360 kesiti için şeve ait model oluşturulmuş ve yol yapısı üzerindeki yükler Şekil 9. ve Şekil.10.'da belirtildiği üzere 15 kPa olarak düzgün yayılı yük şeklinde hesaba dahil edilmiştir.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	UCS (kPa)	m	s	a	Water Surface	Hu Type	Hu
1-Yeni Yol Dolgu		20	Mohr-Coulomb	5	35					Water Surface	Custom	1
4-Residüel Zemin		18	Mohr-Coulomb	7	30					Water Surface	Custom	1
5-İPS		22	Generalized Hoek-Brown			12950	1.03	0.0002	0.531	Water Surface	Custom	1



Şekil 9. Analizlerde kullanılan Km:14+360 dolgu kesiti şev modeli (Slide V6) [31]



Şekil 10. 15 düğümlü sonlu elemanlar ağı (Plaxis V20 2D)

[32]

Tasarım hesaplarında zemin davranış modeli olarak, rezidüel zemin olarak belirtilen siltli-kil birimi için Mohr-Coulomb Modeli, Jips-Şeyl-Anhidrit birimi için ise Generalised Hoek Brown zemin davranış modeli kullanılmıştır. Hem Plaxis hem de Slide programında standart sınır koşullar kabul edilmiştir. Varsayılan sınır koşulları; zemin kesitinin en alt kısmında tüm deplasmanlar sınırlandırılmıştır. Sağ ve sol sınırdaki yanal deplasmanlar sınırlandırılmıştır. Sonlu elemanlar ağında en uygun ağ yapısı araştırılmış ve orta (mesh) seçilerek analiz edilmiştir.

Araştırma Bulguları

Km:14+360 dolgu kesiti için analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumdaki ve dolgu+trafik yükünün ilave edildiği durumdaki şevin güvenlik sayısı faktörü ve deformasyon analizleri yapılmıştır.

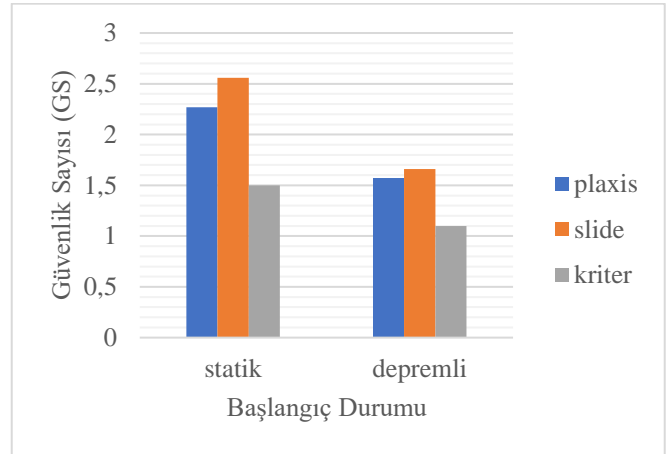
Güvenlik Sayısı Analizi

Plaxis ile yapılan güvenlik sayısı analizlerinde mukavemet azaltma yöntemi ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu yöntem ile kayma mukavemet parametreleri olan kohezyon ve sürtünme açısı, şevde göçme meydana gelene kadar aşamalı bir şekilde azaltılır ve göçme anındaki güvenlik sayısı belirlenir. Model geometrisi yatay şekilde olmadığı için, Plaxis'te analize başlamadan ilk aşamada "Ağırlık Yükleme" hesabı yapılmıştır. Tablo.3'te belirtildiği üzere sonlu elemanlar ve limit denge metodu ile şev stabilite analizi yapılmış ve güvenlik sayısı elde edilmiştir.

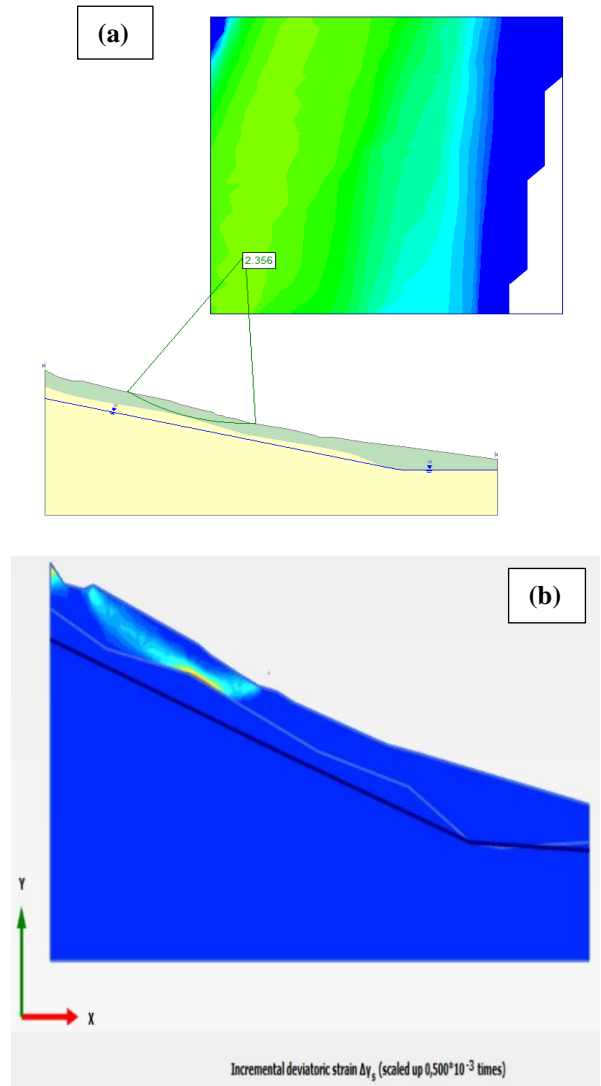
Tablo 3. Km:14+360 Dolgu kesiti güvenlik sayısı analiz sonuçları

Yöntem	Koşullar	Başlangıç Durumu	Dolu+Trafik Yüklü Durum	Şartname Kriteri
Sonlu Elemanlar Metodu (Plaxis V20)	Statik	2,268	1,346	1,5
	Depremlili	1,572	1,064	1,1
Limit Denge Yöntemi (Slide 6)	Statik	2,560	1,479	1,5
	Depremlili	1,660	1,167	1,1

Şekil 11.'de belirtildiği üzere, başlangıç durumunda hem statik hem de depremlili durum için herhangi bir stabilite problemi gözlenmemektedir. Sonlu elemanlar ile limit denge analiz sonuçları benzerlik gösterse de güvenlik faktörü açısından sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis) sonuçları daha düşük çıkmış ve tasarım duyurumu için daha güvenli tarafta kalmıştır. Km:14+360 kesiti için yapılan güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma düzlemi, Statik durum için Şekil 12.'de depremlili durum için ise Şekil 13'te gösterilmiştir.

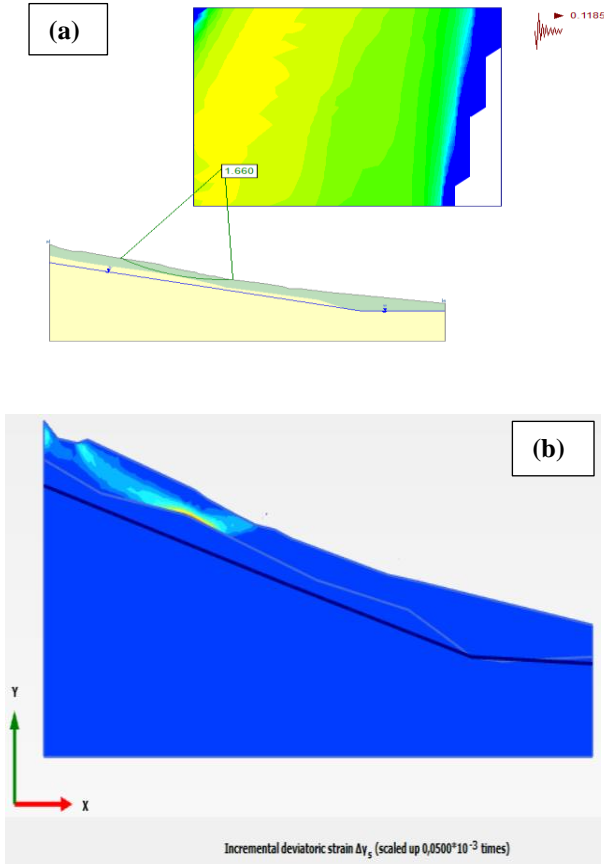


Şekil 11. Başlangıç durumundaki güvenlik sayısı analizi



Şekil 12. Başlangıç durumunda statik güvenlik sayısı analizinden elde edilmiş kayma düzlemi görünümü

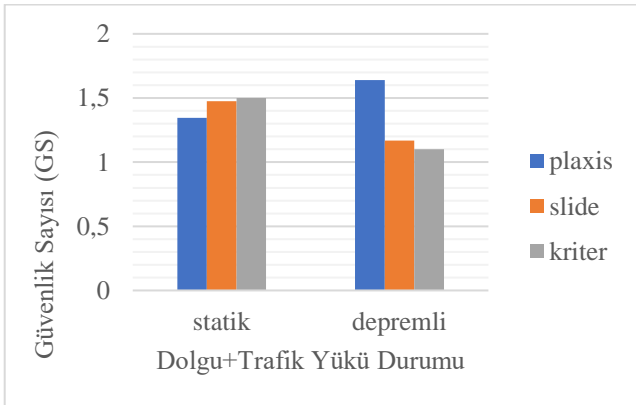
(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)



Şekil 13. Başlangıç durumunda depremlı güvenlik sayısı analizinden elde edilmiş kayma düzlemi görünümü

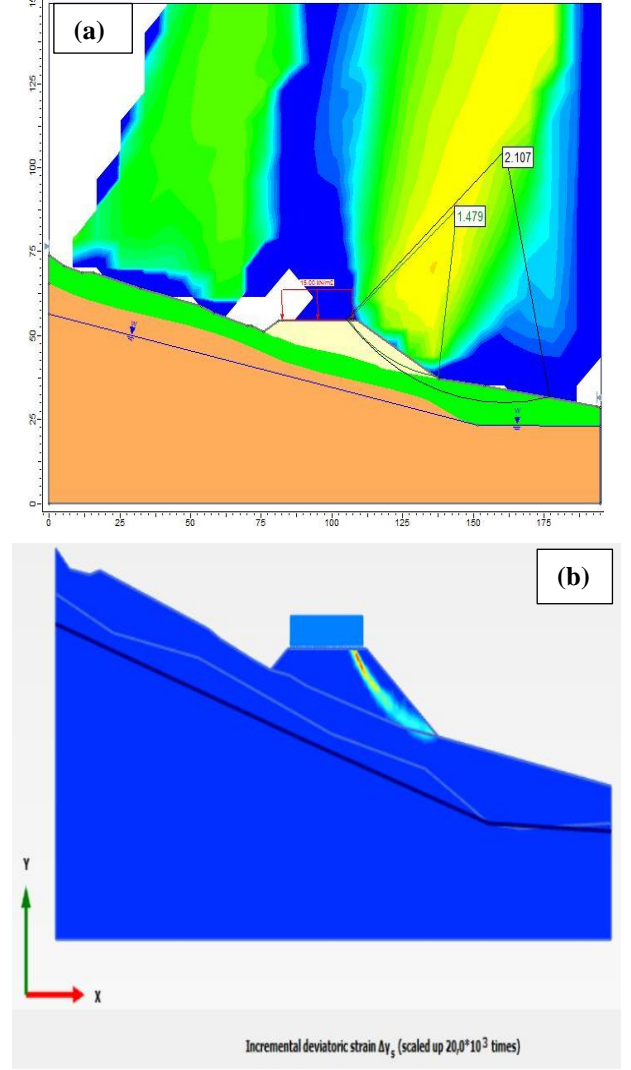
(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

Yol güzergahının geçtiği kesimde, zemin kotu düşük olduğu için bu kesimde dolgu ile geçilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Yol, uygun dolgu malzemesi ile teşkil edildiği halde dolgu ve trafik yükünden sonra hem statik hem de depremlı durumlarda stabilite probleminin yaşandığı ve güvenlik sayısının şartname kriterinin altında kaldığı tespit edilmiştir. Şekil 14.'te ki grafikte de gösterildiği üzere her iki yöntem güvenlik sayısı bakımından kıyaslandığında sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanan güvenlik sayısı (GS) değeri daha düşük çıkmıştır.



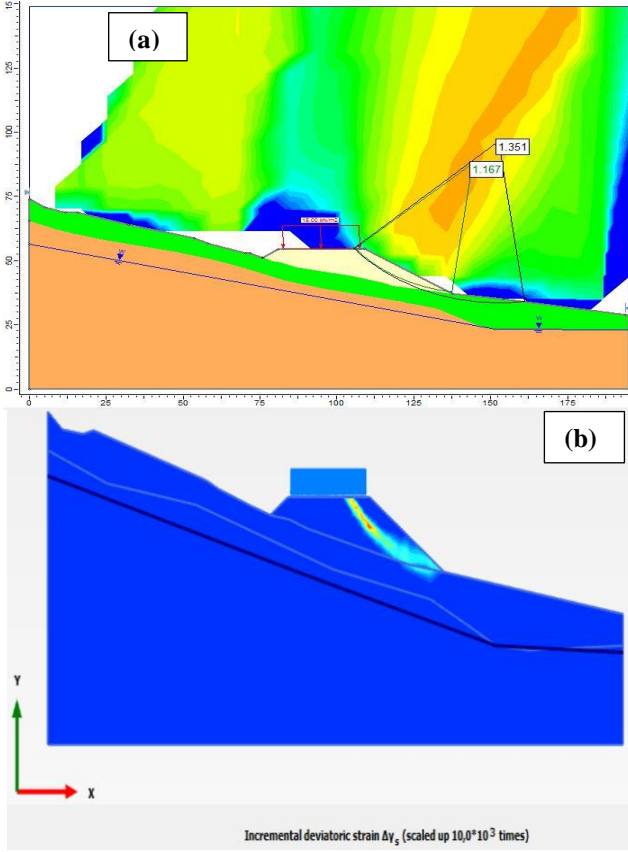
Şekil 14. Dolgu+ trafik yükü durumundaki güvenlik sayısı analizi

Şekil 15.'te dolgu ve trafik yükü geldikten sonra statik durumda limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kayma düzlemleri, Şekil 16.'da ise depremlı durumda oluşan kayma düzlemi gösterilmiştir. Başlangıç durumu ile kıyaslandığında her iki yöntemle belirlenen kayma düzlemi şevin tepesinden değil de dolgu şevinin olduğu kesimde oluşmaktadır. Bu da meydana gelen stabilite probleminin dolgu ve trafik yükünden kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 15. Dolgu+Trafik yüklü statik durumu güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma dairesi görünümü

(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

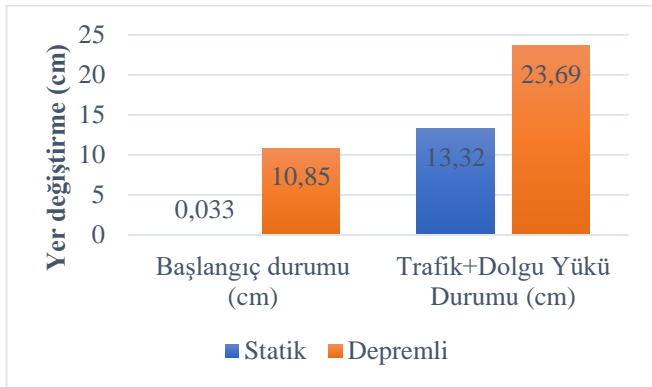


Şekil 16. Dolgu+Trafik yüklü depremlı durumda güvenlik sayısı analizinden elde edilen kayma düzlemi görünümü

(a) Limit denge yöntemi (Slide V6) (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (Plaxis V20)

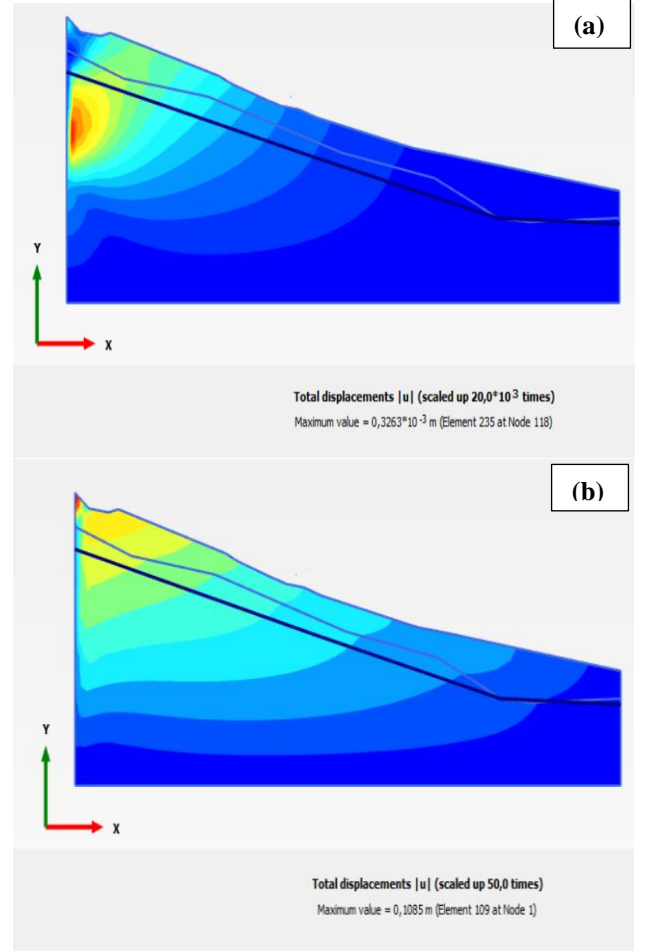
Deformasyon Analizi

Bir kütle hareketi sırasında zeminde düşeyde ve yatayda yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Çalışmada ele alınan Km:14+360'deki şev kesitinin ne kadar yer değiştirdiğini tespit etmek ve performans limitleri ile kıyasını yapabilmek için sonlu elemanlar yöntemi ile deformasyon analizi yapıldı. Bu analizler Plaxis 2D 20 programı kullanılarak yapıldı. Şekil 17.'de başlangıç ve dolgu+ trafik yükünün geldiği durumdaki toplam yer değiştirme değerleri statik ve depremlı durumda belirtilmiştir.



Şekil 17. Km:14+360 şev kesitinde oluşan toplam deplasmanlar

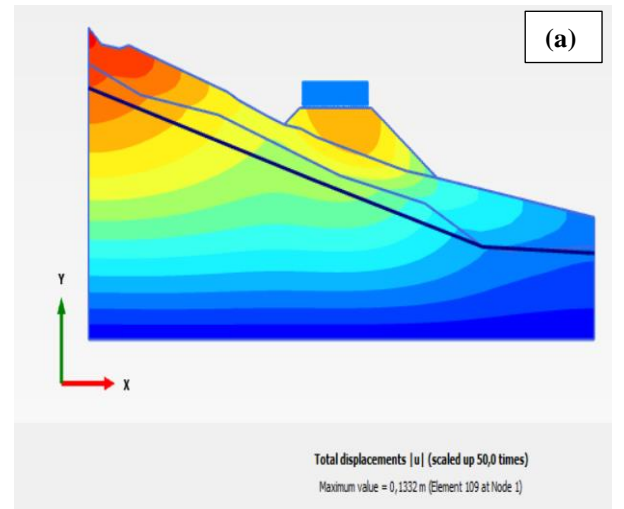
Mevcut durumda kayma düzleminde oluşan deformasyonlar Şekil 18.'de statik (a) ve depremlı (b) durum için gösterilmiştir.

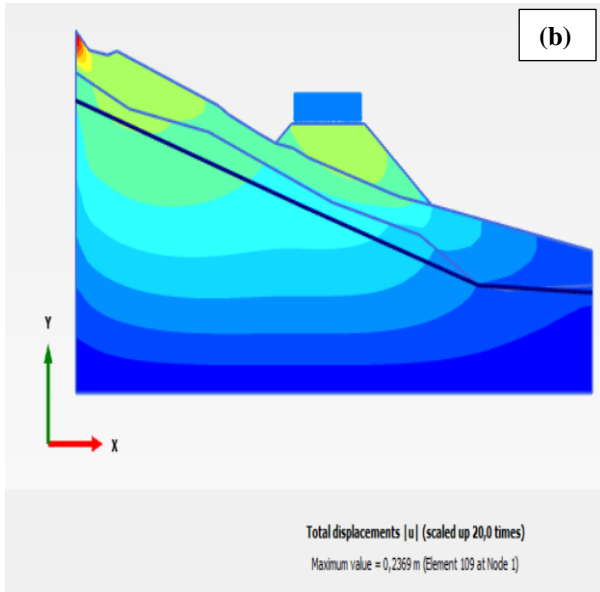


Şekil 18. Sonlu elemanlar yöntemi ile başlangıç durumunda toplam yer değiştirmelerin görünümü

(a) Statik durumda (b) Depremlı durumda

Dolgu ve trafik yükünden sonra kayma düzleminde oluşan deformasyonlar Şekil 19.'da statik (a) ve depremlı (b) durum için gösterilmiştir.





Şekil 19. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu+trafik yüklü durumda toplam yer değiştirmelerin görünümü

(a) Statik durumda (b) Depremlı durumda

Deprem durumunda bir dolgunun stabilize analizi yapıldığında, Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliğine göre, düşey ve yanal yer değiştirmelerin performans kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır [33]. Tablo 4.'te dolgu+trafik yüklü durumda dolguda oluşan düşey ve yatay yer değiştirmeler, Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri ile Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği'ndeki şartname kriterleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 4. Depremlı durumda trafik+dolgu yükü durumunda oluşan yanal ve düşey yer değiştirmeler

Şekil değiştirme türü	Yanal yer değiştirme ΔL (cm)	Düşey yer değiştirme ΔV (cm)
Trafik+Dolgu Yükü Durumu	8	23,69
Şartname Kriteri	2,5	7,5

Tablo 4. incelendiğinde yanal ve düşey yer değiştirmelerin şartname kriterini aştığı gözlenmektedir. Deprem durumundaki duraysızlık kaynaklı şekil değiştirmeler için şartname kriterleri altında kalacak şekilde tasarım yapılması gerekmektedir.

Sonuçlar

Hazırlanan bu çalışma ile limit denge analizi ve sonlu elemanlar metodu uygulanarak karayolunda kazı çalışmaları sırasında meydana gelen kütle hareketinin statik ve depremlı analizleri yapılarak güvenlik sayıları ve göçme yüzeyleri açısından kıyası yapılmıştır. Başlangıç durumunda hem statik hem de depremlı durum için herhangi bir stabilite problemi gözlenmemektedir. Ancak Km:14+300-14+600

arası dolgu tabanının oturacağı kesim olması nedeniyle trafik yükü de ilave edilince dolgu şevinde stabilite problemi görülmektedir. Her iki yöntemle de yapılan güvenlik sayısı analizinde statik durumda şartname kriteri sağlanamamaktadır. Depremlı durumda ise sonlu elemanlar ile elde edilen güvenlik sayısı şartname kriterini sağlayamamaktadır. Sonlu elemanlar ile limit denge analizlerinden elde edilen sonuçlarda güvenlik sayısı değerleri birbirine yakın değerler gösterse de güvenlik faktörü açısından sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis) sonuçları daha düşük çıkmış ve tasarım durumu için daha güvenli tarafta kalmıştır denilebilir. İki yöntemle de yapılan analizlerde şevdeki kayma düzlemi aynı bölgeden geçtiği söylenebilir. Ayrıca şevdeki yanal ve düşey yer değiştirmeleri belirlemek ve gerilme-deformasyon grafiğinin elde edilmesi sonlu elemanlar yöntemi ile mümkündür. Bu sebeple, şevin güvenlik katsayısını etkileyen birim deformasyona bağlı olan sonlu elemanlar yöntemini limit denge yöntemlerinden üstün kılmaktadır denilebilir.

Teşekkür

Proje Numarası MÜHENDİSLİK.23.010 olan bu çalışma, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Koordinatörlüğünce desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması

Bu makale Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı programında yürütülen doktora tezinden üretilmiş olup, çıkar çatışması içermemektedir.

Etik Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] Kramer, S.L., (1996), Geotechnical Earthquake Engineering , 466.
- [2] Önalp, A. & Arel, E. (2004). Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği, Birsen Yayınevi .
- [3] Schuster R.L., Highland L.M. (2007) The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66 pp 1-27.
- [4] www.afad.gov.tr , Türkiye'de Afet Yönetimi ve Doğal Kaynaklı Afet İstatistikleri, 2017
- [5] Das, B.M (1994). Principles of Geotechnical Engineering, Boston: Cengage Learning. Boston: Cengage Learning
- [6] Tekin, A. (2011), Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizi,(Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi
- [7] Keskin M.S., Laman, M. (2007) Sonlu Elemanlar Yönteminin Şev Stabilitesi Problemlerinin Analizinde Kullanılması, Çukurova Üniversitesi Müh. Ve Mim. Fakültesi Dergisi, Cilt:22 Sayı:1.

- [8] Moudabel O.A., (2013) Slope Stability Case Study By Limit Equilibrium And Numerical Methods, Doctoral Dissertation, Oklahoma State University, Libya.
- [9] Bol E., Sert S., Özocak A., (2017) Kazıklı İksa Sistemi ile Şev Duraylılığının Sağlanması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(5), 860-870.
- [10] Huvaj, N., and Oğuz, E. A., (2018) "Probabilistic slope stability analysis: a case study", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(5), 1458-1465.
- [11] Büyükağmcı, C.Z., ve Işık, N. S., "Şev Duraylılığı Analizlerinde Limit Denge Yöntemleri, Eurocode 7 ve BS 8006 Standartlarıyla Hesaplanan Başarı Oranlarının Karşılaştırılması" TÜBAV Bilim Dergisi, 12(2), 18-29, 2019.
- [12] Gör M., (2021) Limit Denge Analizi (Bishop Metodu) İle Kütle Hareketinin Mekanizması ve Önlem Yapısının Analizi: Van İli Örneği, GÜFBED, 11(2): 597-608.
- [13] J.W. Mburu, A.J. Li, H.D. Lin, C.W. Lu, "Investigations of Unsaturated Slopes Subjected to Rainfall Infiltration Using Numerical Approaches—A Parametric Study and Comparative Review", Sustainability, 14, 14465,(2022) <https://doi.org/10.3390/su142114465>
- [14] S . Ullah, M. U. Khan, G. Rehman, "A Brief Review Of The Slope Stability Analysis Methods". Geological Behavior, 4, 73-77, (2020).
- [15] <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionImages/KGMImages/Haritalar/b9.jpg>
- [16] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/500bas>
- [17] TS 1900-2. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 15-51.
- [18] ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981, In: Brown E.T., editor. ISRM suggested method: rock characterization, testing and monitoring, London: Pergamon Pres, 211pp.
- [19] TS EN ISO 17892-1 (2014), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Su içeriğinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [20] TS EN ISO 17892-2 (2014), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Birim hacim kütleinin belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [21] TS EN ISO 17892- 8 (2018), Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 8: Konsolidasyonsuz ve drenajsız Üç Eksenli Deney.
- [22] ASTM D2487 (2020), Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- [23] AASHTO T88 (2020), Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils
- [24] AASHTO T89 (2022), Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils
- [25] AASHTO T90 (2020), Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils
- [26] Karayolları Genel Müdürlüğü. "Araştırma Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi". 2005.
- [27] Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1), 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- [28] Zienkiewicz, O.C., 1977. The Finite-Element Method. 3rd Ed., New York, Mcgraw-Hill Book Co., 787p.
- [29] Marcuson, W.F., III (1981). Moderator's report for session on earth dams and stability of slopes under dynamic loads, Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Vol.3 p.1175.
- [30] <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>
- [31] Rocscience Inc. (2024). Slide v. 06 Software, 31 Balsam Ave., Toronto, Canada, <https://www.rocscience.com>
- [32] PLAXIS, 2020. User Manual. 2D V.20.02, Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands
- [33] Türkiye Karayolları ve Demiryolları Tünelleri İle Diğer Zemin Yapıları Deprem Yönetmeliği, 2020. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/10/20201006_M1-2-1.pdf