



Geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde iki boyutlu sonlu elemanlar çözümlemesi yazılımının kullanımı: ADONIS

Using of a two dimensional finite element analysis software for solving geotechnical engineering problems: ADONIS

Betül Keseroğlu^{1,*} , Muhammet Dingil² , Murat Örnek³ 

^{1,2,3} İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay, Türkiye

Öz

Geoteknik mühendisliğinde şev duraylılığı, iksa uygulaması, derin kazılar, zemin dayanma yapısı, tünel tasarımı gibi çeşitli araştırma alanları; iki boyutlu şekilde modellenerek, sayısal çözümleme teknikleri yoluyla değerlendirilebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ise geoteknik mühendisliğinde en yaygın kullanılan sayısal çözümleme tekniklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemi esas alan, herhangi bir arayüzü olmayan serbest kod blokları ile konsol uygulamaları ve bir kullanıcı arayüzüne sahip ticari, akademik, açık kaynak türü bilgisayar yazılımları yer almaktadır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar çözümlemesini esas alan ve iki boyutlu sayısal modelleme yapılabilen ADONIS geoteknik yazılımı ele alınmıştır. Bu yazılım, içerisinde doğrusal ve doğrusal olmayan zemin bünye modelleri ve yapısal elemanlar barındıran, serbest kullanım lisansına sahip bir sonlu elemanlar analiz programıdır. ADONIS geoteknik yazılımında, program doğrulama başarımını ölçmek için, seçilen çeşitli şev duraylılığı problemleri; mukavemet azaltma yöntemiyle çözümlenmiştir. Farklı geometrik ve geoteknik tasarıma sahip şev yapılarının, gömülü kodlama diliyle bu program içerisinde duraylılık güvenlik sayıları hesaplanarak farklı geoteknik yazılımlarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, ADONIS yazılımının geoteknik mühendisliğindeki iki boyutlu problemlerin çözümünde önemli bir seçenek olabileceği öngörülmektedir.

Anahtar kelimeler: ADONIS, Geoteknik yazılım, Sonlu elemanlar yöntemi, Şev duraylılığı, Mukavemet azaltma yöntemi, Düzlem gerinimi

1 Giriş

Geoteknik mühendisliğinde yer alan derin kazılar, iksa yapıları, şevler, yüzeysel ve derin temeller, dayanma yapıları, dolgular, gömülü yapılar, tüneller gibi uygulamalarda gerilme-şekil değiştirme, duraylılık, güvenlik sayısı, sızma ve su akışı, taşıma gücü gibi konular geoteknik problemler olarak tanımlanmaktadır. Bu tip karmaşık ve özgül geoteknik problemlerinin çözümü için, sonlu elemanlar yöntemi (FEM), sonlu farklar yöntemi (FDM), sonlu hacim yöntemi (FVM), sınır elemanlar yöntemi (BEM), ayrık elemanlar yöntemi (DEM), malzeme nokta

Abstract

Various research areas in geotechnical engineering such as slope stability, shoring application, deep excavations, ground support structure, tunnel design; It can be modeled in two dimensions and evaluated through numerical analysis techniques. Finite element method stands out as one of the most widely used numerical analysis techniques in geotechnical engineering. Based on this method, there are free code blocks without any interface, console applications and commercial, academic, and open source computer software with a user interface. In this study, ADONIS geotechnical software, which is based on finite element analysis and allows two-dimensional numerical modeling, is discussed. This software is a finite element analysis program with a free use license that includes linear and non-linear soil structure models and structural elements. In ADONIS geotechnical software, various slope stability problems selected to measure program verification performance were solved by the strength reduction method. The safety factors of slope stability with different geometric and geotechnical designs were calculated with the scripting language in this program and compared with different geotechnical software. As a result, it is predicted that ADONIS software may be an important option in solving two-dimensional problems in geotechnical engineering.

Keywords: ADONIS, Geotechnical software, Finite element method, Slope stability, Strength reduction method, Plain strain

yöntemi (MPM), düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) ve süresiz biçimsizleşme çözümlemesi (DDA) gibi birçok sayısal yöntem kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi; eliptik kısmi diferansiyel denklem içeren problemler için, söz konusu alanı belirli bir sayıda daha küçük parçalara bölerek ve bu bölünmüş parçalara sınır koşullarını uygulayarak yaklaşık bir çözüm elde etmenin amaçlandığı sayısal bir tekniktir [1]. Bu yöntemin esası, fiziksel sürekli bir sistemin matematiksel olarak temsil edilmesine dayanmaktadır ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: keseroglubetul98@gmail.com (B. Keseroğlu)

Geliş / Received: 14.03.2025 Kabul / Accepted: 04.07.2025 Yayınlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1658166

parçacığa bölünerek, ayrı parçacıkların çözümlemesi biçiminde gerçekleştirilmesidir [2]. Yüksek miktarda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşan çözüm bölgesindeki elemanların tamamında birtakım varsayımlar kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerinin tanımlanması sonucu sonlu elemanlar yönteminde, yaklaşık sonuçlar hesap edilmektedir [3].

Bir sayısal modelleme paradigması olarak, sonlu elemanlar yönteminin kökeni, 1940'ların başlarına kadar uzanmaktadır ve bu yöntem, ilk olarak katı mekaniği ve yapı mühendisliğindeki sorunları çözümleyebilmek için öne çıkmıştır [4-6]. Günümüzde ise matematik-fizik alanında, havacılık ve astronomide, temel bilimlerde, tıp ve diş hekimliğinde, yer bilimlerinde, mühendisliğin birçok dalında yaygın bir çözüm olmuştur. Sonlu elemanlar çözümleme yazılımlarının geliştirilmesi ve ileri eleman tiplerinin modellenmesi sayesinde sonlu elemanlar yöntemi, mühendisliğin çok geniş özel alanlarına ulaşmış durumdadır [1]. İnşaat mühendisliği uygulamalarının modellenmesinde, bu yöntem, zaman geçtikçe daha da popüler olarak güçlü bir analitik araç haline gelmiştir [7]. Geoteknik mühendisliğine özgü çeşitli karmaşık sorunların mevcudiyeti, sonlu elemanlar yöntemini, geoteknik problemlerin çözümlemesinde, sayısal değerlendirme seçeneği olarak yaygınlaştırmıştır [8]. Zeminlerin farklı özellikteki katmanlardan oluşması ve elastik yöntemlerin çözümde yetersiz kalması, bu yaygınlaşmadaki en temel gerekçedir [9].

Sonlu elemanlar yöntemini esas alan; herhangi bir arayüzü olmayan serbest kod blokları ile konsol uygulamaları ve kullanıcı arayüzüne sahip ticari, akademik, serbest, açık kaynak türü çeşitli verimlilikte birçok bilgisayar yazılımı seçeneği yer almaktadır. Yazılım verimliliği; geoteknik mühendisliğinde bilgisayar kullanımının öne çıkan bir tercih olmasındaki önemli etkenlerden biridir ve kullanışlılık, esneklik, erişilebilirlik gibi ölçülerle ifade edilmektedir [10]. Yazılım verimliliğindeki bu görece ve değişken durum nedeniyle geoteknik mühendisliğinde yeni yazılımlar; sürekli olarak üretilmeye ve geliştirilmeye devam etmektedir. Yazılım geliştirme teknolojilerinin ilerleme kaydetmesi sayesinde, geoteknik mühendisliğindeki günümüz yazılımları; kolay kullanılabilir gelişmiş ara yüzlerde, karışık ve birbirini tamamlayan hesaplamalar gerçekleştirebilmekte ve çözüm verilerinden elde edilen çıktılar görselleştirilebilmektedir [11].

Mikola [12] tarafından geliştirilen ADONIS yazılımı, sonlu elemanlar yöntemine dayanarak iki boyutlu modelleme üzerinden geoteknik çözümlemeler yapabilen bir bilgisayar programıdır. Bu yazılım, farklı zemin bünye modelleri ile yapısal eleman türlerini destekleyen, şev duraylılığı, oturma, kazı, tünel gibi geoteknik problemleri çözümleyebilen ve halen uygulama geliştirilmesi devam eden bir geoteknik yazılımdır [13]. Serbest kullanım lisansına sahip olma, hızlı sonlu eleman ağ yapısı kurabilme ve sade bir kullanıcı arayüzüne sahip olma, bu geoteknik yazılımın öne çıkan özellikleridir ve bu sayede kullanımı her geçen gün yaygınlaşarak çoğalmaktadır. Geoteknik mühendisliği çözümlemelerine yönelik geliştirilen uygulamalar için açık kaynak yazılım geliştirme bileşenleri;

tasarımlarda kullanılabilir seçeneklerden biridir [14]. Açık kaynak yazılım geliştirme araçlarından Triangle [15], QCustomPlot [16] ve Gmsh [17] bileşenleri de bu program içerisinde yer almaktadır. Literatürde, ADONIS geoteknik yazılımı kullanılarak farklı araştırmacılar tarafından yapılan, geoteknik problemlerin çözümlemesine yönelik çeşitli bilimsel yayınlar yer almaktadır [18-27].

Bu çalışmada, serbest kullanım lisanslı ve iki boyutlu bir sonlu elemanlar çözümleme programı olan ADONIS yazılımındaki gömülü kodlama dili kullanılarak, farklı geometrik ve geoteknik tasarım esaslarına sahip şev duraylılığı problemleri, mukavemet azaltma yöntemine göre çözümlenerek elde edilen güvenlik sayıları, farklı geoteknik programlardan alınan sonuçlarla mukayese edilmiştir.

2 Yazılım

Bu bölümde, serbest kullanım izinli ve iki boyutlu tasarımcı bir sonlu elemanlar çözümleme yazılımı olan ADONIS [28] hesaplamalı benzetim uygulamasının temel özellikleri ele alınmıştır. Bu programda kullanıcı arayüzü; kapsamlı çizim olanakları, yerleşik malzeme kütüphanesi, sınır koşullarının ve yapısal elemanların kolaylıkla tanımlanması, etkileşimli modelleme ortamı, projelerin erişilebilir yönetimi ve çözümleme sonuçlarının çalışma zamanında izlenmesi gibi öne çıkan özellikleri sunabilmektedir [29]. Bu geoteknik yazılım; model geometrisi, eleman ve ağ oluşumu, malzeme ataması, sınır şartları, başlangıç koşulları, ayarlar, çözüm ve çıktı biçiminde sıralı ve yalın bir iş akışına sahiptir (bkz. Ek 1-3).

ADONIS programında, iki boyutlu modelleme için gerekli geometrik şekilleri içeren bir çizim araç kutusu yer almaktadır ve iki boyutlu model çözümlemeleri 'düzlem gerinimi' biçiminde yürütülmektedir. Sonlu elemanlar çözümlemesi esaslı geoteknik yazılımlarda, modelleme ortamı içerisinde, eksenel simetrik ve düzlem gerinimi şeklinde iki farklı geometrik idealizasyon yaklaşımı yer alabilmektedir [30-32].

Mühendisliğin birçok alanında ve geoteknik mühendisliğinde, zemin birimlerinin ve yapısal elemanların gerçek geometrisi ve davranışı üç boyutlu olmasına karşın bu elemanların yer aldığı bazı problemlerin çözümlemesi; belirli kabullere dayanarak yapılan geometrik idealizasyon sonucu iki boyutlu modelleme yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Düzlem gerinimi, bilinmeyenleri olan gerilme-şekil değiştirme bileşenlerinin, model sisteme ait eksen takımındaki bir eksene bağlı olmadığı (çoğunlukla kalınlık doğrultusunda alınan z ekseni) bir düzlem elastisite problemleri yaklaşımıdır [33]. Düzlem gerinimi; söz konusu geoteknik modellemede bir boyutunun diğer boyutuna göre görece büyük olduğu durumlarda; eksenel simetri ise rotasyonel simetriye sahip geoteknik problemlerde uygulanabilen birtakım kabullere dayalı geometrik idealizasyonlardır [34].

Bu programda sonlu eleman ağlarının kurulması için 'üçgen' ve 'dörtgen' sonlu eleman oluşturma yöntemleri kullanılmaktadır. Yazılımda bir proje için çizilen geometride, sonlu elemanların oluşturulması; sırasıyla 'ayrıklaştırma' ve 'ağ oluşturma' adımlarıyla gerçekleştirilir. İki boyutlu modelleme ortamında yer alan geometrik sınırlar

‘ayrıklaştırma’ yoluyla bölümlenmesinin ardından, kullanıcı tercihinine bağlı olarak 3 düğüm noktalı üçgen T3 eleman ya da 4 düğüm noktalı Q4 dörtgen eleman biçiminde sonlu eleman ağ yapısı oluşturulabilmektedir. Ayrıca üç düğüm noktalı üçgen T3 elemanlarda uygulanabilecek, Detournay ve Dzik [35] tarafından önerilen ‘Düğüm Karışık Ayrıklaştırma’ (NDM) metodolojisi de bu yazılım içerisinde tercihen kullanılmak üzere sunulmuştur.

ADONIS içerisinde ağ tipi, kenar boyutları ve eleman boyutları da özel olarak belirlenebilmektedir. Seçilen model ayarlarına uygun olarak hızlı biçimde otomatik sonlu eleman ağları oluşturulur. Sonlu elemanlar yönteminde, laboratuvar ortamındaki zemin numunelerinin kararsızlıkları ya da arazi ortamındaki zemin temaslı geoteknik yapılar; klasik süreklilik mekaniği esaslı zemin bünye modelleri kullanılarak sayısal olarak benzetilir [36]. Geoteknik mühendisliğinde yaygın kullanım hedefiyle sunulan bu yazılımda, farklı amaçlar doğrultusunda, zeminlerin modellenmesi için kullanılabilecek çeşitli zemin bünye modellerini içermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. ADONIS’de yer alan zemin bünye modelleri

Zemin Bünye Modeli	Tasarım Özelliği
İzoelastik	Doğrusal ve sürekli elastik ve izotropik malzeme modeli
Mohr-Coulomb	Gerilme düzeyi kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı ile sınırlanan elasto-tam plastik model
Hoek-Brown	Kaya kütleleri için en yaygın kullanılan aynı adlı yenilme kriteri esas alınarak oluşturulan doğrusal olmayan model
Gerinim Yumuşaması	Plastik kayma gerinimlerinin sürekli gelişimiyle kayma direncinin azaldığı davranış modeli
Cam Kili	Normal konsolide ve hafif aşırı konsolide zeminlere uygun klasik elastoplastik zemin modeli
Şişme	Akma ve potansiyel fonksiyonları ile gerilim düzeltmeleri Mohr-Coulomb kriterine dayanır ve şişme gerilmeleri, küresel gerilme bileşenlerine, artırımlı adımlarla ilave olarak eklenen model
Plastik Pekleşen	Gerilme düzeyi kalibre edilmesi çok değişkenli olan ileri seviye karmaşık kesme ve hacimsel pekleşme modeli
Ubiquitous-Joint	Kaya kütlelerindeki eklemlenmeyi de hesaba katan bünye modeli

ADONIS geoteknik yazılımının sahip olduğu en önemli özelliklerinden biri de “kazı” ve “dolgu” biçiminde hızlandırılmış malzeme etki komutlarının yer almasıdır. “kazı” ve “dolgu” malzeme etki komutlarıyla, program içerisinde tanımlanan malzeme geometrisindeki herhangi bir alan, tek bir komutla doğrudan kazı ya da dolgu bölgesi olarak atanabilmektedir. Bu programda, Tablo 1’te yer alan zemin model bünyeleri haricinde tutkal durumu ve Coulomb kayma gerilmesi olarak iki farklı etkileşim modeli yer almaktadır. Tutkal durumu etkileşimi, kayma veya açılmanın mümkün olmadığı fakat elastik yer değiştirmenin görülebildiği malzeme etkileşim modelidir. Coulomb kayma gerilmesi etkileşimi ise kesme kuvvetinin sınırlandırıldığı malzeme etkileşim tipidir ve etkin temas uzunluğu (L) ile ara

yüzey kohezyon (c) ve sürtünme açısı (φ) değişkenlerine bağlıdır (Denklem 1).

$$F_{smax} = c * L + \tan\varphi * F_n \quad (1)$$

ADONIS yazılımında talep edilmesi durumunda, kullanıcılar tarafından zemin bünye modeli tanımlanarak program içerisine dinamik bağlantı kitaplığı (.dll) dosyası biçiminde entegre edilebilmektedir [29]. Bu yazılım içerisinde, çeşitli zemin bünye modelleriyle birlikte yararlanılabilecek farklı tip yapısal elemanlar da bulunmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. ADONIS’de yer alan yapısal elemanlar

Yapısal Eleman Türü	Öne Çıkan Özelliği
Kiriş	Uç düğüm noktalarında, üç serbestlik derecesine (x-öteleme, y-öteleme ve dönme) sahip iki boyutlu eleman
Kablo	Sonlu eleman ağı deforme oldukça, eleman uzunluğu boyunca kuvvetler gelişiren tek boyutlu eksenel eleman
Ankraj	Harçla doldurulmuş ankraj desteğinin davranışını temsil eden ankraj elemanı
Şerit	Güçlendirilmiş zemin istinat duvarlarının modellenmesinde kullanılmak üzere tasarlanan ince takviye şerit elemanı

ADONIS yazılımında; tamamı statik durum için geçerli olmak üzere limit denge, elastik, güvenlik sayısı, gevşeme şeklinde farklı çözüm seçenekleri yer almaktadır. Limit denge çözümünde denge durumuna veya sınır adım sayısına ulaşana dek hesaplamalar sürdürülür. Elastik çözüm, malzemelerin doğrusal olmayan davranışının göz ardı edildiği hızlı sonuç veren bir yöntemdir. Gevşeme çözümü, büyük bir çekme gerilimi dalgasını önlemek amacıyla bir kazının içindeki kuvvetleri yavaşça azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Güvenlik sayısı çözümünde ise mukavemet azaltma yöntemi temel alınmaktadır. Mukavemet azaltma yöntemi, geomekanik alanında giderek popüler hale gelen bir sayısal tekniktir ve zeminin kayma dayanımının (τ_f) kademeli olarak azaltılması ilkesine dayanmaktadır [37]. τ_f değeri, kohezyon değeri (c') ve içsel sürtünme açısı (φ'), kayma yüzeyine etki eden etkin normal gerilme (σ') ve güvenlik sayısına bağlı bir denklemle ifade edilir ve güvenlik sayısı (GS), kabul edilemeyecek kadar büyük şekil değiştirmeler veya hesaplamadaki sapmalarla tanımlanan başarısızlığa kadar artırılır (Denklem 2).

$$\frac{\tau_f}{GS} = \frac{c' + \sigma' * \tan\varphi'}{GS} \quad (2)$$

ADONIS içerisinde kullanıcının yazılım yeteneklerini genişletmek veya kullanıcı tanımlı özellikler eklemek için kullanılabılır yeni değişkenler ve işlevler tanımlamasını sağlayan bir gömülü kodlama dili yer almaktadır. ADONIS geomekanik yazılım paketi içerisinde yer alan bu gömülü kodlama dili, programın komut ve betik yazım kurallarını ifade etmektedir [38]. Birçok geoteknik mühendisliği yazılımında kullanımı yaygınlaşan gömülü kodlama dilleri; kullanıcı arayüzünden bağımsızlık, hızlı modelleme ve

parametrik çalışma kolaylıklarını sağlayabilen programlara özel sözdizimleridir.

3 Modelleme

Bu bölümde, ADONIS geoteknik yazılımının doğrulama başarımını ortaya koymak için, birtakım bilimsel yayınlardan derlenen şev duraylılığı problemleri, iki boyutlu düzlem gerinim yaklaşımıyla modellenmiştir. Tablo 3'te ayrıntıları paylaşılan, bazı bilimsel yayınlardan derlenen farklı geometrik ve geoteknik tasarıma sahip şev yapıları, ADONIS programındaki gömülü kodlama dili kullanılarak sırasıyla iki boyutlu modellenmiştir.

Tablo 3. Doğrulama için seçilen şev duraylılığı problemleri

Analiz No	Şev Duraylılığı Problemi	Kaynak
1	Homojen zemin	Giam ve Donald [39]
2	Heterojen zemin	Giam ve Donald [39]
3	Çok katmanlı zemin	Christian vd. [40]
4	Zayıf tabakalı zemin	Arai ve Tagyo [41]
5	Düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin	Prandtl [42]
6	Doygun kil zemine oturan dolgu	Duncan vd. [43]
7	Yer altı suyu bulunan zayıf katmanlı zemin	Giam ve Donald [39]
8	Zemin çivisiyle desteklenmiş kazı	Sheahan [44]

Tablo 3'te ayrıntıları açıklanan ve kaynakları paylaşılan şev duraylılığı problemlerine ait hem kıyaslama yapılan ilgili referans kaynaklarda hem de bu çalışmada gerçekleştirilen çözümlemelerde kullanılan problem esaslı model parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Analizlerde kullanılan model parametreleri

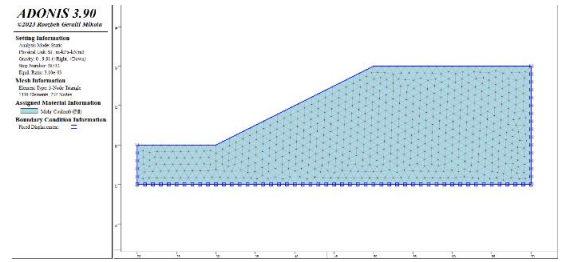
Analiz No	Zemin Modeli	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
1	Mohr-Coulomb	2.04	3	19.6
2	Mohr-Coulomb	1.99, 1.99, 1.99	0, 5.3, 7.2	38, 23, 20
3	Mohr-Coulomb	2.04, 2.04, 1.92, 2.07	0, 41, 34.5, 31.2	30, 0, 0, 0
4	Mohr-Coulomb	1.92, 1.92, 1.92	29.4, 9.8, 294	12, 5, 40
5	Mohr-Coulomb	1.02E-7	49	0
6	Mohr-Coulomb	0.64, 2.24	0, 119.7	40, 0
7	Mohr-Coulomb	1.92, 1.92	28.5, 0	20, 10
8	Mohr-Coulomb	1.93	25	0

Tablo 4 içerisinde verilen birim hacim ağırlık (γ), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon katsayısı (c) değerleri; her problemde yer alan tabaka sayısı ve sırası kadar paylaşılmıştır. Tablo 3'te yer alan referans kaynaklarla kıyaslayabilmek için bu çalışma içerisinde gerçekleştirilen ADONIS programındaki çözümlemelere ait ağ oluşturma bilgileri ise Tablo 5'de sunulmuştur.

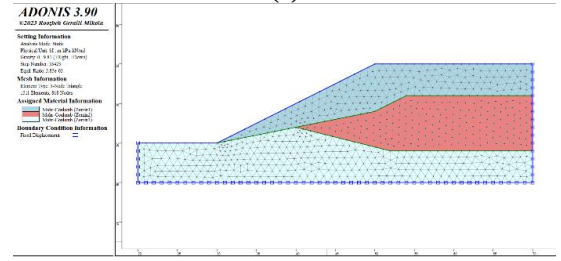
Tablo 5. Bu çalışmada kullanılan ağ oluşturma verileri

No	Güvenlik Sayısı	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
1	1.002	1339	732
2	1.361	1497	811
3	1.210	18167	9411
4	0.389	5921	3083
5	1.014	1594	854
6	1.020	1638	898
7	1.240	3976	2070
8	0.833	266	160

Homojen ve heterojen zeminlerin şev duraylılığı modellemeleri Şekil 1'de, çok katmanlı ve zayıf tabakalı zeminlerin modellemeleri ise Şekil 2'de paylaşılmıştır.

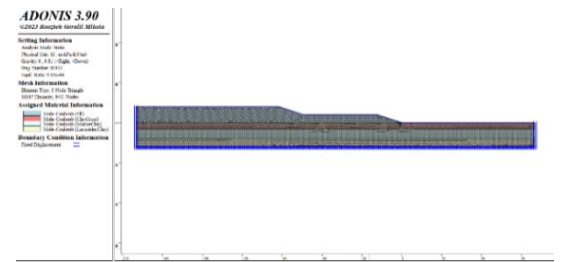


(a)

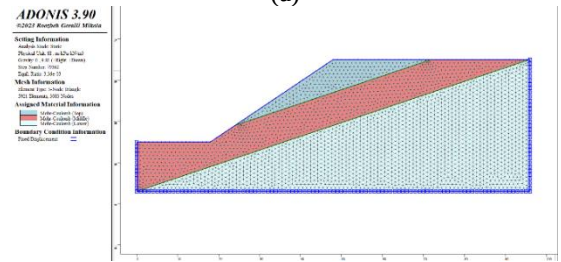


(b)

Şekil 1. Şev duraylılık modelleri: a) homojen zemin; b) heterojen zemin



(a)



(b)

Şekil 2. Şev duraylılık modelleri: a) çok katmanlı zemin; b) zayıf tabakalı zemin

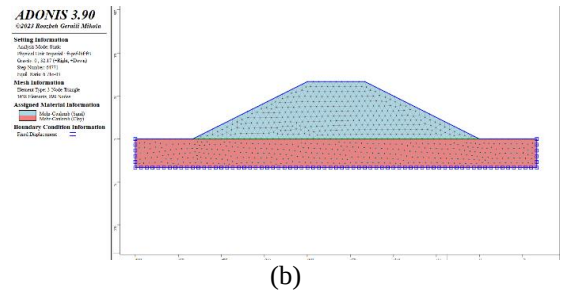
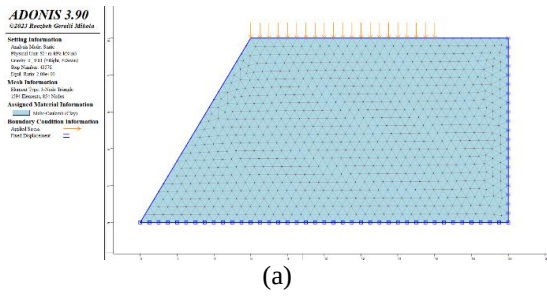
Şekil 3'te düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan bir dolgu için şev duraylılığı modelleri, Şekil 4'te ise yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı için şev duraylılığı modelleri sunulmuştur.

4 Analiz

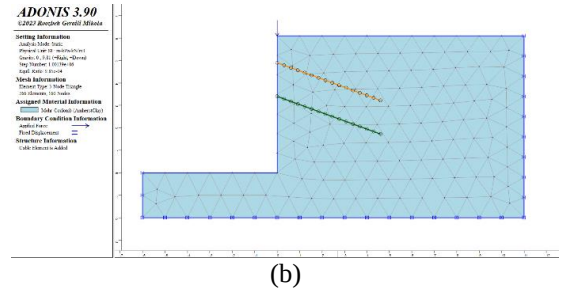
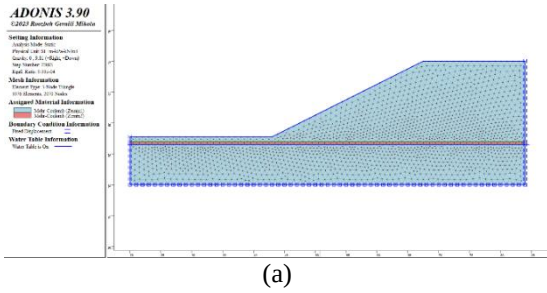
Bu bölümde, ADONIS geoteknik yazılımında modellenen iki boyutlu şev duraylılık problemlerinin çözümleme sonuçları ile ADONIS programından elde edilen duraylılık güvenlik sayılarının farklı ticari programlarla veya teorik çözümlerle kıyaslanması sunulmuştur.

Bu çalışmada, ADONIS yazılımından elde edilen çıktılar; geoteknik mühendisliğinde kullanılan DEEPEX [45], RS2 [46], SLIDE2 [47], GEOSTUDIO [48], UTEXAS4 [49], SVSLOPE [50] gibi ticari/paket yazılımlarda hesaplanmış güvenlik sayılarıyla mukayese edilmiştir.

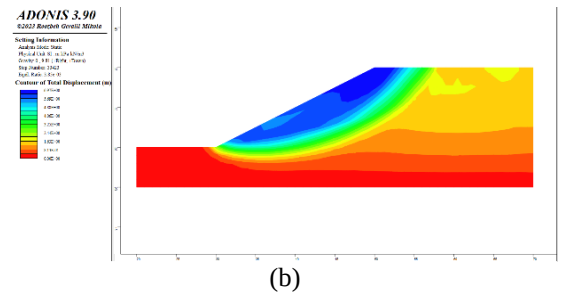
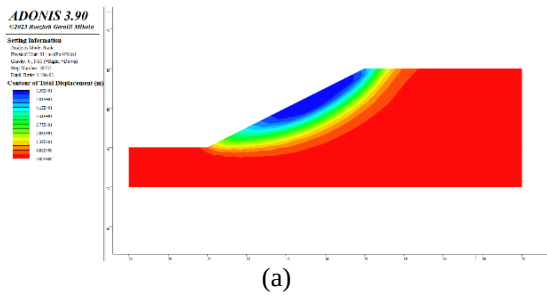
Homojen ve heterojen zeminlerin şev duraylılık çözümleri ile güvenlik sayıları kıyaslaması Şekil 5 ve Tablo 6'da, çok katmanlı ve zayıf tabakalı zeminlerin şev duraylılık çözümleri ile güvenlik sayıları karşılaştırması ise Şekil 6 ve Tablo 7'de paylaşılmıştır.



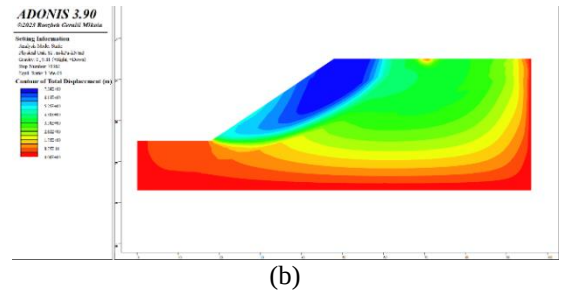
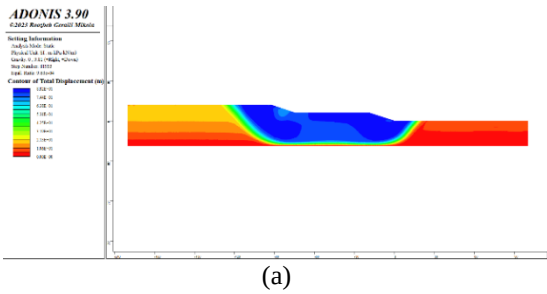
Şekil 3. Şev duraylılık modelleri: a) düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin; b) doygun kil zemine oturan bir dolgu



Şekil 4. Şev duraylılık modelleri: a) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin; b) zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı



Şekil 5. Şev duraylılık modelleri: a) homojen zemin; b) heterojen zemin



Şekil 6. Şev duraylılık çözümleri: a) çok katmanlı zemin; b) zayıf tabakalı zemin

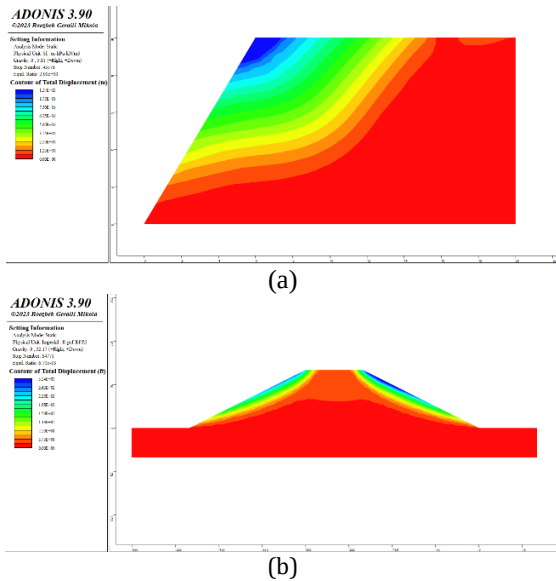
Tablo 6. Homojen ve heterojen zeminler için şev duraylılığı çözümlemesi

Kıyaslanan Değerler	Homojen Zemin Güvenlik Sayısı	Heterojen Zemin Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.002	1.361
DEEPEX (Bishop)	0.994	1.384
RS2 (SSR)	0.980	1.340
SLIDE2 (Spencer)	0.986	1.375
GHOSTUDIO (MP)	0.993	1.382
Giam ve Donald [39]	1.000	1.390

Tablo 7. Çok katmanlı zemin ile zayıf tabakalı zemin için şev duraylılığı çözümlemesi

Çok Katmanlı Zemin		Zayıf Tabakalı Zemin	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.21	ADONIS	0.389
RS2 (SSR)	1.19	RS2 (SSR)	0.410
SLIDE2 (Spencer)	1.16	SLIDE2 (Spencer)	0.413
UTEXAS4 (NSR)	1.16	Kim vd. [52]	0.390
Duncan ve Wright [51]	1.17	Greco [53]	0.388
Duncan vd. [43]	1.17	Malkawai vd. [54]	0.401

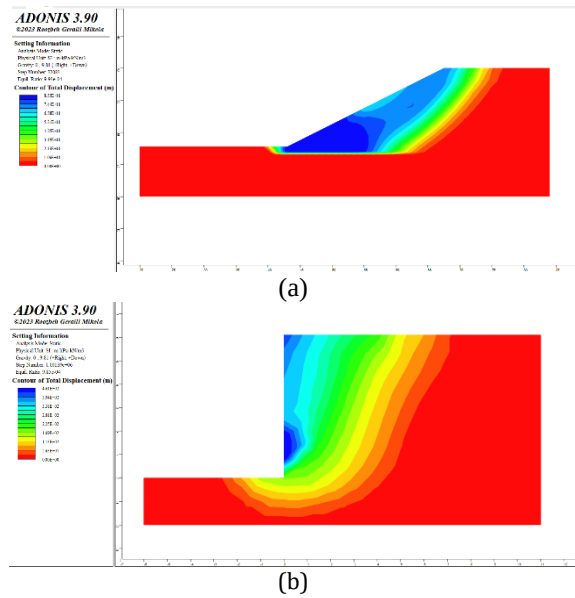
Düşey yüklemeyle maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan dolgu için şev duraylılık çözümlmeleri ile güvenlik sayıları kıyaslaması Şekil 7 ve Tablo 8’de; yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş kazı için şev duraylılık çözümlmeleri ile güvenlik sayıları karşılaştırması ise Şekil 8 ve Tablo 9’da verilmiştir.



Şekil 7. Şev duraylılık çözümlmeleri: a) düşey yüklemeyle maruz kohezyonlu zemin; b) doygun kil zemine oturan dolgu

Tablo 8. Düşey yüklemeyle maruz kohezyonlu zemin ile doygun kil zemine oturan dolgu için şev duraylılığı çözümlmesi

Düşey Yüklemeyle Maruz Kohezyonlu Zemin		Doygun Kohezyonlu Zemine Oturan Dolgu	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.014	ADONIS	1.02
RS2 (SSR)	1.010	RS2 (SSR)	1.19
SLIDE2 (Spencer)	1.051	SLIDE2 (Spencer)	1.20
GHOSTUDIO (MP)	1.017	GHOSTUDIO (Janbu)	1.07
Chen ve Shao [55]	1.050	UTEXAS4 (Bishop)	1.22
Prandtl [42]	1.000	Duncan vd. [43]	1.08



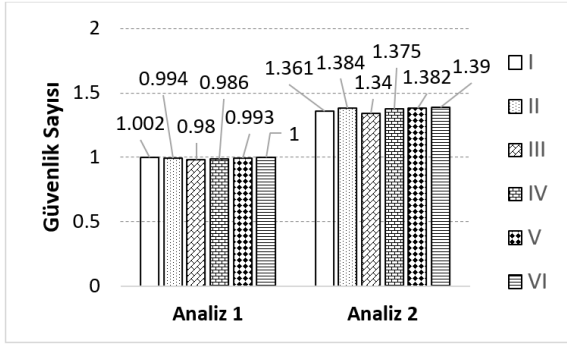
Şekil 8. Şev duraylılık çözümlmeleri: a) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin; b) zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı

Tablo 9. Yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ile zemin çivisiyle desteklenmiş kazı için şev duraylılığı çözümlmesi

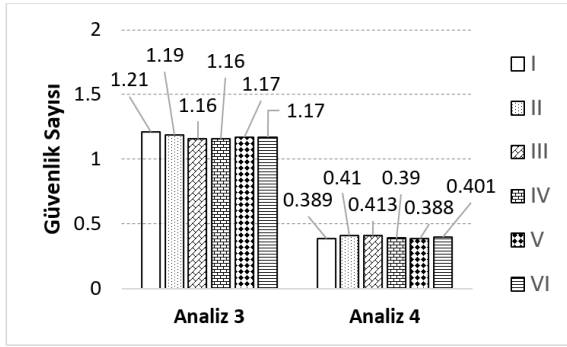
Yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin		Zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı	
Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı	Kıyaslanan Değer	Güvenlik Sayısı
ADONIS	1.240	ADONIS	0.833
RS2 (SSR)	1.240	SVSLOPE (LE)	0.890
SLIDE2 (Spencer)	1.257	SLIDE2 (Janbu)	0.890
GHOSTUDIO (Janbu)	1.229	GHOSTUDIO (MP)	0.869
Giam ve Donald [39]	1.24-1.27	Sheahan ve Ho [56]	0.887

5 Bulgular

Bu bölümde, öncelikle Tablo 6-9 arasında paylaşılan her bir analiz türü için elde edilen sonuçlar, bu tablolarda belirtilen program numaraları esas alınarak Şekil 9 ve Şekil 10 içerisinde sunulmuştur.

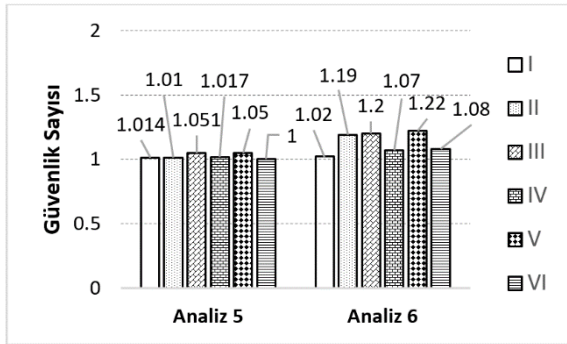


(a)

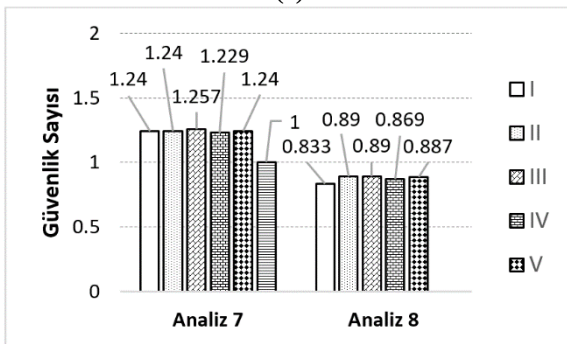


(b)

Şekil 9. Güvenlik sayıları sonuçları: a) homojen zemin ve heterojen zemin; b) çok katmanlı zemin ve zayıf tabakalı zemin



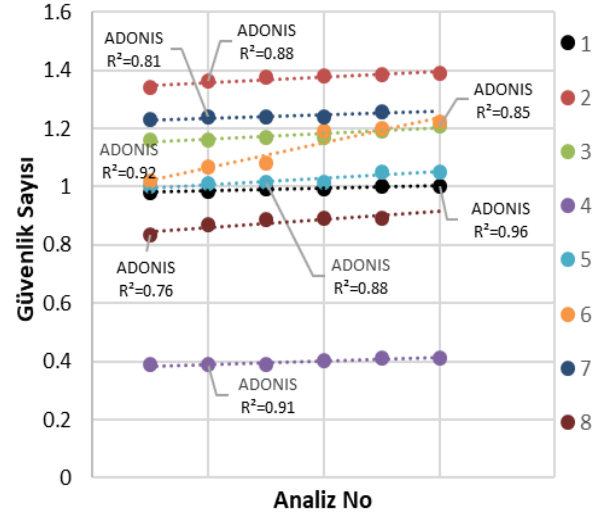
(a)



(b)

Şekil 10. Güvenlik sayıları sonuçları: a) düşey yüklemeye maruz kohezyonlu zemin ve doymuş kil zemine oturan dolgu; b) yer altı suyu olan zayıf katmanlı zemin ve zemin çivisiyle desteklenmiş bir kazı

ADONIS programından elde edilen çözümleme sonuçları ile Tablo 6-9 içerisindeki diğer geoteknik yazılımlardan ve Tablo 3'te verilen referans kaynaklardan alınan güvenlik sayıları; istatistiksel olarak Şekil 11'de mukayese edilmiştir.



Şekil 11. ADONIS yazılımındaki çözümlemeler ile diğer kaynaklardan alınan sonuçların kıyaslanması

Şekil 11 incelendiğinde, yapılan basit doğrusal bağlanım analizlerine göre ADONIS yazılımının başarımı, literatürde kullanılan diğer geoteknik programlara ve problemlerin alındığı referans kaynaklara kıyasla oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu programda çözümlenen güvenlik sayılarının, sekiz farklı geoteknik mühendisliği problemi için literatürdeki diğer çözümleme sonuçlarıyla kıyaslandığında, ADONIS yazılımının diğer referanslarla olan nicel uyumunu ifade eden doğrusal esaslı belirleme katsayılarının (R^2) tüm analizler 0.76-0.96 aralığında kaldığı tespit edilmiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, geoteknik mühendisliği problemleri için kullanılan iki boyutlu sonlu elemanlar çözümleme yazılımı ADONIS incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve görüşler, aşağıda ifade edilmiştir:

- ADONIS, geoteknik mühendisliği problemleri için düzlem gerinimi geometrik idealizasyonuna göre iki boyutlu modelleme ortamı sağlayan bir sonlu elemanlar çözümleme programıdır. ADONIS geoteknik yazılımı kapsamında, izoelastik ve doğrusal olmayan zemin bünye modelleri ile giriş, kablo, ankraj ve şerit türü yapısal elemanlar yer almaktadır. ADONIS içerisinde statik koşullar altında gerçekleştirilebilen limit denge, elastik, güvenlik sayısı, gevşeme gibi çözüm seçenekleri bulunmaktadır. Kolay değiştirilebilir bir tasarım sunmak ve modellerde parametrik analizleri yürütebilmek için kendisine ait bir gömülü kodlama dili bulunan ADONIS yazılımı, geoteknik mühendislerine yönelik yaygın kullanım amacıyla serbest kullanım lisansı ile paylaşılmıştır.

- ADONIS programının bu makale bölümleri içerisinde model çözümleme seçenekleri, grafiksel kullanıcı arayüzü ve gömülü programlama dili gibi sunulan ve tartışılan özellikleriyle serbest kullanım lisansına sahip olması ve herhangi bir kısıtlama olmadan mühendisler ve araştırmacılar tarafından kullanılabilir olması önemli farklılıklarından biridir. Buna ek olarak, özellikle gömülü programlama diliyle entegre bir yapıya sahip olan ADONIS yazılımına ait sözdizimi kullanılarak belirli değişkene bağlı döngüsel çözümlemelerin ve problemlerde parametrik çalışmaların yapılması, programdaki öne çıkan özgün katkılardan biri olarak görülmektedir.
- ADONIS geoteknik programının kullanılabilirliğini örnek olarak ortaya koymak adına yazılımdaki gömülü kodlama dili kullanılarak, farklı geometrik ve geoteknik tasarım şartlarındaki şev duraylılığı problemleri, mukavemet azaltma yöntemine göre çözümlenmiştir. ADONIS içerisinde modellenen her bir şev duraylılığı problemi için hesap edilen güvenlik sayıları; geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan diğer ticari programlardan alınan sonuçlarla ve teorik yaklaşımlara göre yapılan sayısal çözümlerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, basitten karmaşığa doğru ele alınan şev duraylılığı problemlerinin ADONIS çözümleme sonuçlarının, diğer paket programların ve teorik çözümlerin sonuçlarıyla son derece yakın sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak, ADONIS geoteknik yazılımının şev duraylılığı, iksa uygulaması, derin kazılar, zemin dayanma yapısı, tünel yapılar gibi çeşitli geoteknik mühendisliği tasarım amaçları için kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada yer alan ikinci yazar, TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Programı ve YÖK 100/2000 Doktora Projesi kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik Oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

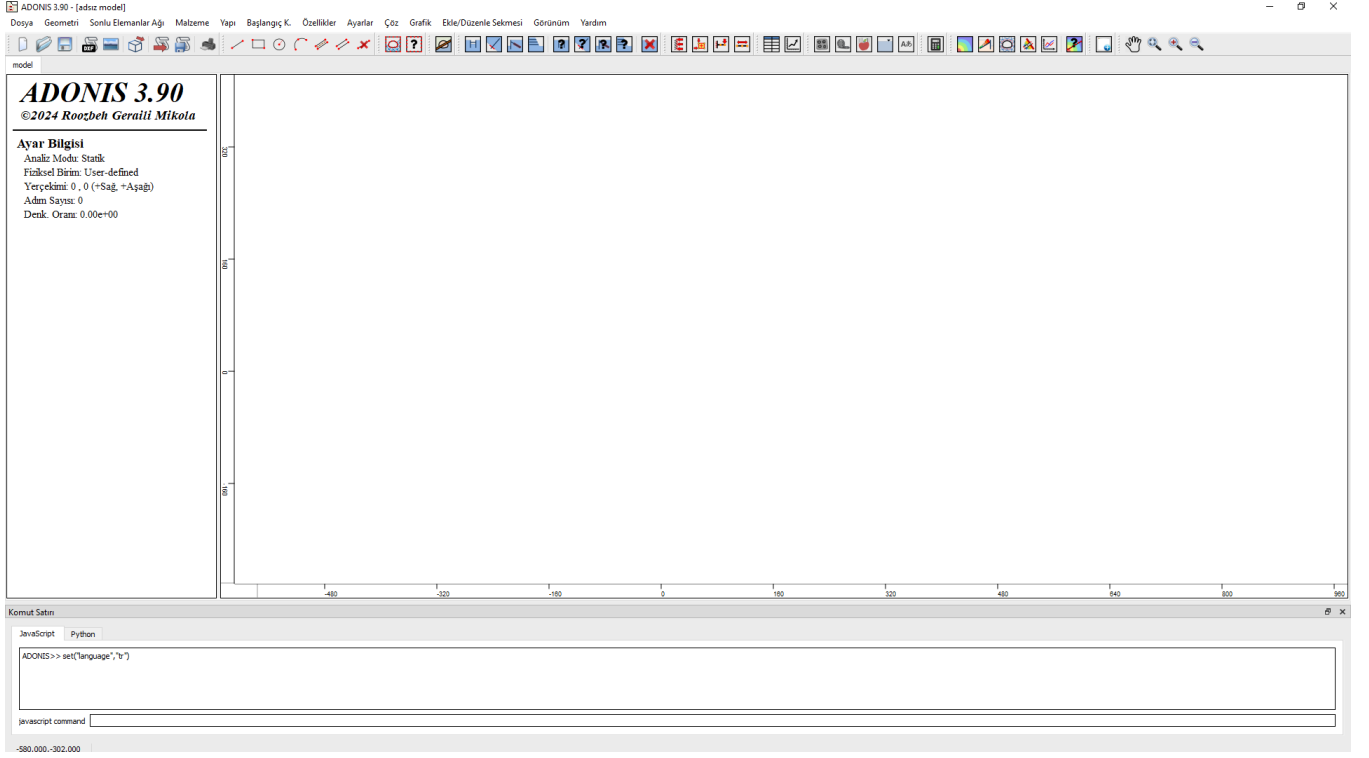
- [1] L. Sabat and C. K. Kundu, History of finite element method: A review, in Recent Dev. Sustain. Infrastruct. Sel. Proc. ICRDSI, 75, 395-404, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_32.
- [2] M. Kaçmaz, Geoteknik problemlerin farklı sonlu elemanlar programları ile çözümlenmesi: örnek bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2022.
- [3] M. Güler and S. Şen, Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler, Ordu Üni. Bilim ve Teknol. Derg., 5(1), 56-66, 2015.
- [4] A. Hrennikoff, Solution of problems of elasticity by the framework method, J. Appl. Mech., 8(4), 169-175, 1941. <https://doi.org/10.1115/1.4009129>.
- [5] G. R. Liu and S. S. Quek, The Finite Element Method: A Practical Course: Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00779-X>.
- [6] W. K. Liu, S. Li, and H. S. Park, Eighty years of the finite element method: Birth, evolution, and future, Arch. Comput. Methods Eng., 29(6), 4431-4453, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>.
- [7] R. G. Mikola, Analysis of SEM Tunnel with Quasi-Static Explicit Finite Element, in ARMA US Rock Mech. Symp., 1367, 2020.
- [8] D. M. Potts, L. Zdravković, T. I. Addenbrooke, K. G. Higgins, and N. Kovačević, Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Volume Two - Application, Thomas Telford London, 2001. <https://doi.org/10.1680/feaigea.27831.fm>.
- [9] N. Ural and A. Gergin, Foundation design on problematic soils with high underground water level, Rev. la Construcción, 19(3), 233-245, 2020.
- [10] M. Dingil, Zemin mekaniğinde endeks deneyleri için internet tabanlı bir uygulamanın geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye 2020.
- [11] H. Yıldırım, Geoteknik yazılımların zamana bağlı gelişimi ve kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [12] R. G. Mikola, ADONIS: A free finite element analysis software with an interactive graphical user interface for geoengeers, in GeoOttawa2017 Conf., 2017.
- [13] T. Tsvetkova and N. Kerenchev, Review of open source software for modelling and analysis of structures, in IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng., 12003, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/951/1/012003>.
- [14] M. Dingil, Y. Türedi, and M. Örnek, Geoteknik Mühendisliğinde Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirme Araçlarının Kullanımı: Hidrometre Deneyi Örneği, Dicle Üni. Müh. Fak. Müh. Derg., 11(3), 1431-1442, 2020. <https://doi.org/10.24012/dumf.754582>.
- [15] J. R. Shewchuk, Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator, in Workshop on Applied Computational Geometry, 203-222, 1996. <https://doi.org/10.1007/BFb0014497>.
- [16] E. Eichhammer, QCustomPlot Qt C++: Widget for plotting and data visualization, 2020.
- [17] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities, Int. J. Numer. Methods Eng., 79(11), 1309-1331, 2009. <https://doi.org/10.1002/nme.2579>.
- [18] K. Brzeziński, T. Rybicki, and K. Józefiak, Analysis of stability of railway embankment including horizontal forces in light of Eurocode, in MATEC Web of Conferences, 196, 03016, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819603016>.
- [19] N. Cristelo, C. Félix, and J. Figueiras, Experimental behaviour of concrete box culverts—comparison with

- current codes of practice, *Can. Geotech. J.*, 56(7), 970-982, 2019. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0506>.
- [20] L. Guerriero et al., Kinematics and geologic control of the deep-seated landslide affecting the historic center of Buonalbergo, southern Italy, *Geomorphology*, 394, 107961, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107961>.
- [21] G. Sreelakshmi and M. N. Asha, Numerical Investigation of Soil-Structure Interaction Behaviour of Landslide Prevention Piles. In: Adhikari, Geohazard Mitigation. Lecture Notes in Civ. Eng., 192, 293-304, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6140-2_24.
- [22] B. Van den Bout, L. Lombardo, M. Chiyang, C. van Westen, and V. Jetten, Physically-based catchment-scale prediction of slope failure volume and geometry, *Eng. Geol.*, 284, 105942, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105942>.
- [23] H. V. Gajjar, A. Srivastava, and V. D. Ujeniya, Application of multi linear regression (MLR) analysis for predicting settlement reduction ratio (S_r) of stone columns reinforced soft ground, *Mater. Today Proc.*, 72, 459-464, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.350>.
- [24] S. Syaiful, F. M. L. Taqwa, and R. Mukhtadir, Evaluation of failure and design of structural reinforcement for gabion-type retaining walls, *Ibn Khaldun Int. J. Appl. Sci. Sustain.*, 1(1), 69-88, 2023.
- [25] B. J. Yian and Z. A. Talib, Simulation of 2D ground movement due to tunnel excavation using Finite Element Method (FEM), in *IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci.*, 12067, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1205/1/012067>.
- [26] J. K. Y. Chiu, and Sari, M., Determining REV for jointed rock masses using finite numerical analysis, in *New Challenges in Rock Mech. and Rock Eng.*, 244-249, CRC Press, 2024.
- [27] R. Basirat, Analysis of tunnel lining internal forces under the influence of S and P-waves: An analytical solution and quasi-static numerical method, *Rock Mech. Bull.*, 4(1), 100168, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2024.100168>.
- [28] ADONIS, ADONIS: Free Finite Element Method Program, version 3.90.0, Main Developer: Roozbeh Geraili Mikola, PhD, P.E, 2025.
- [29] GeoWizard, GeoWizard - Free Programs for Geoenvironmental Engineers, URL: <http://www.geowizard.org>, 2025.
- [30] E. Turan, Statik ve dinamik düşey yükler altındaki kazıklı temellerin davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [31] M. Berilgen, Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Yöntemler ve Program Kullanımı, Geoteknik Mesleki Eğitim Kursu, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 2016.
- [32] H. Kılıç, Geoteknik Mühendisliğinde Sayısal Analizler Notları, Geoteknik Mesleki Eğitim Kursu, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 2017.
- [33] H. Gazi and N. K. Öztörün, Düzlem Elastisite Problemlerinin Analizi Kapsamında Sonlu Elemanlar Metoduyla Çalışan Bir Yazılımın Geliştirilmesi, *Yapı Dünyası*, 179, 11-17, 2011.
- [34] E. Tekin, Köprü ve Geoteknik Mühendisliğinde Kullanılan Yeni Nesil Teknikler, Sonlu Elemanlar Yöntemi Semineri Kurs Eğitim Notları, İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 2017.
- [35] C. Detournay and E. Dzik, Nodal mixed discretization for tetrahedral elements, in *4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, 2006.
- [36] J. Liu, L. Wu, K. Yin, C. Song, X. Bian, and S. Li, Methods for solving finite element mesh-dependency problems in geotechnical engineering—A review, *Sustainability*, 14(5), 2982, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14052982>.
- [37] E. Soranzo, C. Guardiani, Y. Chen, Y. Wang, and W. Wu, Convolutional neural networks prediction of the factor of safety of random layered slopes by the strength reduction method, *Acta Geotech.*, 18(6), 3391-3402, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01783-3>.
- [38] Y. W. Bekele, GeoSim. AI: AI assistants for numerical simulations in geomechanics, arXiv preprint arXiv:2501.14186, 2025.
- [39] P. S. K. Giam and I. B. Donald, Example Problems for Testing Soil Slope Stability Programs, Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University, Melbourne, Aust. 1989.
- [40] J. T. Christian, C. C. Ladd, and G. B. Baecher, Reliability applied to slope stability analysis, *J. Geotech. Eng.*, 120(12), 2180-2207, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1994\)120:12\(2180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1994)120:12(2180)).
- [41] K. Arai and K. Tagyo, Determination of noncircular slip surface giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, *Soils Found.*, 25(1), 43-51, 1985. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.25.43>.
- [42] L. Prandtl, Bemerkungen über die Entstehung der Turbulenz, *ZAMM-J. App. Math. Mech.*, 1(6), 431-436, 1921. <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010602>.
- [43] J. M. Duncan, S. G. Wright, and T. L. Brandon, Soil Strength and Slope Stability: 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc, 2014.
- [44] T. C. Sheahan, A Field Study of Soil Nails in Clay at the University of Massachusetts Amherst National Geotechnical Experimentation Site, Geotechnical Special Publication, 93, 250-263, ASCE, 2000.
- [45] DEEPEX, DeepEx Software Program User's Manual, Deep Excavation, 2020.
- [46] RS2, 2D Finite Element Program for Slope and Excavation Stability Analyses, Slope Stability Verification Manual – Pt 4, Rocscience Inc., 2021.
- [47] SLIDE2, Slope Stability Verification Manual, Rocscience Inc., 2022.
- [48] GEOSTUDIO, Slope Stability Verification Manual, Seequent Limited, 2024.

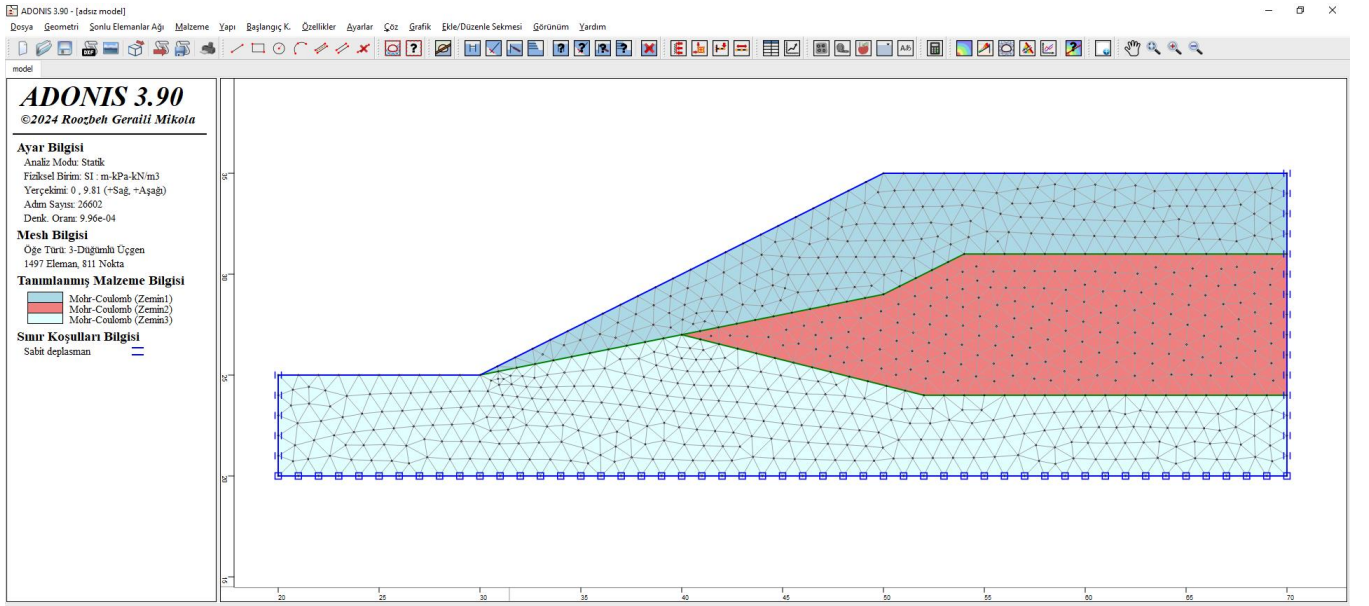
- [49] S. G. Wright, UTEXAS4—A Computer Program for Slope Stability Calculations, Shinoak Software, Austin, Texas, 1999.
- [50] SVSLOPE, Slope Stability Analysis Software, Bentley Systems, 2019.
- [51] J. M. Duncan, and S. G. Wright, Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [52] J. Kim, R. Salgado, J. Lee, Stability analysis of complex soil slopes using limit analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(7), 546-557, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2002\)128:7\(546\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2002)128:7(546)).
- [53] V. R. Greco, Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface, J. Geotech. Eng., 122(7), 517-525, 1996. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(517\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(517)).
- [54] A. I. H. Malkawi, W. F. Hassan, and S. K. Sarma, Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(8), 688-698, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2001\)127:8\(688\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2001)127:8(688)).
- [55] Z. Chen, and C. Shao, Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis, Canadian Geotech. J., 25, 735-748, 1988. <https://doi.org/10.1139/t88-084>.
- [56] T. C. Sheahan and C. L. Ho, Simplified trial wedge method for soil nailed wall analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 129(2), 117-124, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2003\)129:2\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2003)129:2(117)).



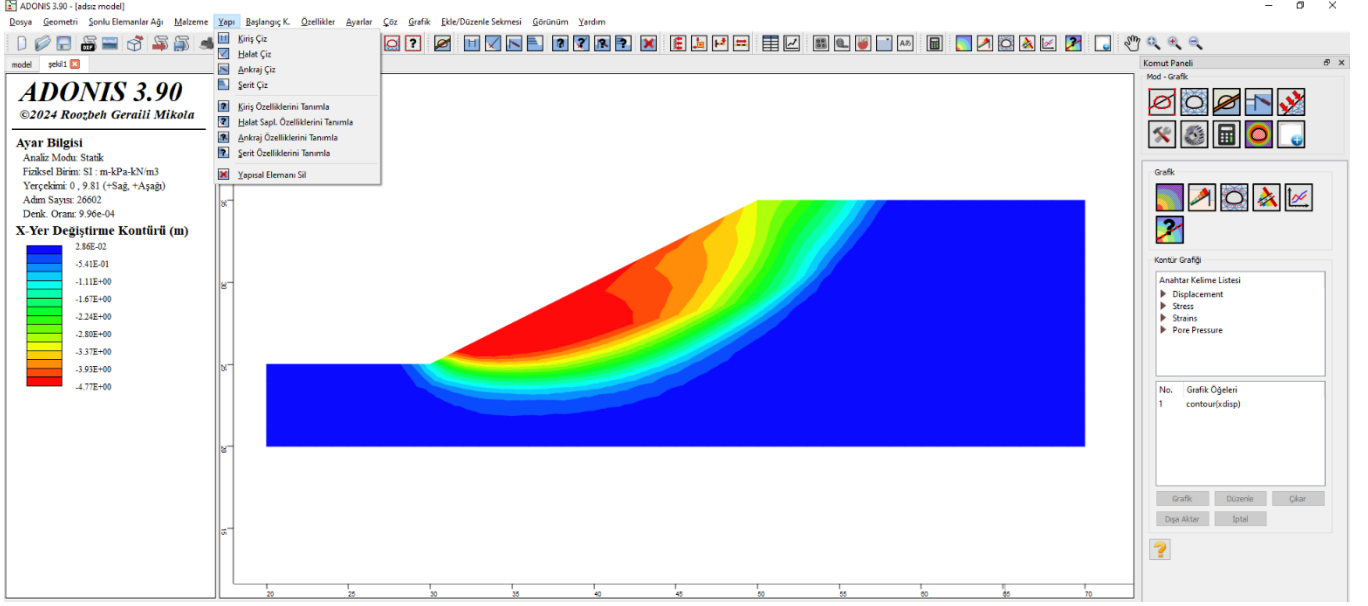
Ekler



Ek 1. ADONIS programı Türkçe başlangıç kullanıcı arayüzü



Ek 2. Analiz 2 için oluşturulan örnek geoteknik model tasarımı



Ek 3. Analiz 2 çözümlemesine ait yazılım sonuçları