



Araştırma Makalesi / Research Article

TBDY 2018'e Göre Sıvılaşma Potansiyeli Analizi için Bir Geoteknik Web Uygulamasının Geliştirilmesi

Development of a Geotechnical Web Application for Liquefaction Potential Analysis According to TEC 2018

Muhammet Dingil^{1*}, Betül Keseroğlu², Yakup Türedi³, Murat Örnek⁴

¹ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
muhammetdingil.mf19@iste.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8681-478X>

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
betulkeseroglu.lee21@iste.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9121-0510>

³ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
yakup.turedi@iste.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9197-5214>

⁴ İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, 31200, Türkiye
murat.ornek@iste.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-2531>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Mart 2025
Revizyon 11 Nisan 2025
Kabul 29 Nisan 2025
Online 30 Haziran 2025

Anahtar Kelimeler:

Zemin Sıvılaşması, Sıvılaşma
Analizi, Geoteknik Yazılım, İnternet
Tabanlı Uygulama

ÖZ

Zeminin sıvılaşması, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'de yer alan önemli geoteknik inceleme konularından biridir. TBDY 2018 Bölüm 16.6 ve Ek 16B'de, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin analizi için basitleştirilmiş bir çözüm yöntemi yer almaktadır. Bu çalışmada, TBDY 2018'de yer alan yöntem esasına dayanarak sıvılaşma potansiyeli çözümlemesi yapabilen bir geoteknik web uygulaması geliştirilmiştir. Oluşturulan yazılım, girdi olarak gerekli geoteknik tasarım parametrelerini, tek tabakalı ya da katmanlı zemin durumu için TBDY 2018'e göre analiz edebilmektedir. Yazılımda, toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, depremde oluşan kayma gerilmesi, sıvılaşma direnci, güvenlik sayısı gibi hesaplanan değerler, çıktı olarak bir dizele halinde sunulmaktadır. Çözümleme yapılan zemin örneğine ait sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili de bir grafik olarak paylaşılmaktadır. Bu geoteknik yazılım, internet tabanlı olarak bir web sunucusu üzerinden ya da ağ bağlantısız herhangi bir işletim sisteminde derlenebilen, açık kaynak ve çapraz platform bir web uygulamasıdır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 March 2025
Received in revised form 11 April 2025
Accepted 29 April 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Soil Liquefaction, Liquefaction
Analysis, Geotechnical Software,
Web-Based Application

ABSTRACT

Soil liquefaction is an important topic of geotechnical investigation in the Turkish Earthquake Code (TEC) 2018. Section 16.6 and Annex 16B of TEC 2018 include a simplified solution method for the analysis of liquefaction potential of soils. This study developed a geotechnical web application that can analyze liquefaction potential based on the principle in TEC 2018. The software can analyze the required geotechnical design parameters as input according to TEC 2018 for single-layer or layered soil conditions. In this software, the outputs include calculated values such as total and effective vertical stress, corrected SPT number, shear stress, liquefaction resistance, and safety factor, presented in a table. The drilling depth-safety factor profile of the analyzed soil sample can also be shared as a chart. This geotechnical software is an open-source and cross-platform web application that can be compiled on an internet-based web server or on any network-free operating system.

DOI: 10.24012/dumf.1653529

* Sorumlu Yazar

Giriş

Sıvılaşma ani tekrarlı yükler altında, özellikle suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde, drenajsız koşullarda boşluk suyu basıncının giderek artmasıyla zeminin kayma dayanımında ve rijitliğinde ciddi azalma meydana gelmesiyle zeminin geçici olarak kayma direncini yitirmesi olayıdır. Zeminlerin sıvılaşması neticesinde; yüzeysel temele oturan yapılarda zemine batma veya yan dönme; iletim hatları ve benzeri gömülü yer altı yapılarında yüzeye çıkma, bölgesel deformasyon, kum kaynaması, şev duraylılık kayıpları, akma göçmesi, yanal yayılma, dayanma yapısı yenilmesi gibi çok çeşitli hasarlar görülebilmektedir [1]-[7].

Türkiye’de son olarak 6 Şubat 2023’te, Pazarcık ve Elbistan’da (Kahramanmaraş) sırasıyla 7.7 ve 7.6 moment büyüklüğünde iki büyük deprem; bölgede artçı şok aktivitesi sürerken 20 Şubat 2023’te ise Yayladağı’nda (Hatay) 6.4 moment büyüklüğünde bir tetiklenmiş deprem yaşanmıştır [8]. Bu depremlerin neticesinde de birçok yerde, sıvılaşma olaylarının açık bir biçimde gerçekleştiği görülmüş; sıvılaşma sonucunda çökme, kum kaynaması, taşıma gücü yenilmeleri, yanal kaymalar ve aşırı oturmalar gibi hasarlar gözlemlenmiştir [9].

Sıvılaşma olayı, geoteknik ve deprem mühendisliğinin öne çıkan inceleme alanlarından biri iken sıvılaşma potansiyeline sahip zemin katmanlarının belirlenmesi de büyük bir gerekliliktir [10]-[13]. Bu nedenle, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin çözülmesi için zemin özelliklerine ve depremsel koşullara bağlı çeşitli analiz ve değerlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Zemin sıvılaşma analizi; depremden kaynaklı ek kayma gerilmelerinin hesaplanarak, zeminin direncini geçip geçemeyeceğinin saptanması esasına dayanmaktadır [14]. Seed ve Idriss [15] tarafından ortaya koyulan basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli metodu ile bu yöntemi temel alarak Youd ve diğerleri [16] tarafından önerilen bağıntılar; sıvılaşma potansiyelinin çözülmesinde, en yaygın kullanılan formüller olarak öne çıkmaktadır [17]-[18]. Geoteknik mühendisliğinde, yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucu, birçok farklı sıvılaşma potansiyeli belirleme yöntemleri de yer almaktadır [19]-[30].

Türkiye’de deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, 2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) kapsamında ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir [31]. TBDY 2018’de sıvılaşma potansiyeli, Bölüm 16.6’da detaylarıyla irdelenmiştir ve analiz yöntemi olarak Ek 16B’de basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi paylaşılmıştır. TBDY 2018’e göre sıvılaşma potansiyeli analizi; birtakım geoteknik laboratuvar ve arazi deneyi parametreleri ile deprem tasarım verilerinin, koşullu denklemlere göre çözülmesiyle belirlenmektedir. Bu koşullu denklemlerde, geoteknik deney ve tasarım şartlarına bağlı olarak birçok katsayı hesaplanmaktadır.

Sıvılaşma potansiyeli analizi de dâhil olmak üzere, geoteknik mühendisliğinin birçok çalışma alanında, bu tür koşullu ve karmaşık hesaplamalar için bilgisayar programları tercih edilebilmektedir. Geoteknik laboratuvar ve arazi deneylerinin yer aldığı veri çözümlemelerinde, bilgisayar programı olarak, özel

amaçlı ticari yazılımlardan ve elektronik çizelge yazılımlarından yararlanıldığı görülmektedir [32]. Sıvılaşma analizini çeşitli yönetmelik, standart ya da formülasyon esasına göre gerçekleştiren bazı program ve yazılımlar, bilimsel çalışmalarda yer almaktadır [33]-[41].

Bu çalışmada, TBDY 2018’de yer alan basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyelini çözümleyebilen, internet tabanlı veya ağ bağlantısız olarak kullanılabilen çapraz platform bir geoteknik yazılım tasarlanmıştır. Bu geoteknik web uygulamasında, TBDY 2018 esasına göre gerçekleştirilecek bir sıvılaşma analizi için gereken geoteknik deprem parametreleri, kullanıcı etkileşimli olarak belirlenebilmektedir ve sıvılaşma potansiyeli irdelenen tek tabakalı veya katmanlı zemin örneğine ait derinlik-güvenlik sayısı profili, çözümleme sonucunda doğrudan bir görsel grafik olarak yazılımda sunulmaktadır.

Teori

TBDY 2018’e göre zemin sıvılaşması kavramı, Bölüm 16.6 “*Deprem Etkisi Altında Zeminin Sıvılaşma Riskinin Değerlendirmesi*” başlığı altında ele alınmıştır. Sıvılaşma potansiyelinin analizinde kullanılabilecek bir yöntem olarak, basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesi, TBDY 2018 Ek 16B’de sunulmuştur. TBDY 2018 Bölüm 16.6.4’te, yer altı su seviyesinin altındaki çakıllı kum, kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları; potansiyel sıvılaşabilir zeminler olarak kabul edilmiştir. TBDY 2018 Bölüm 16.6.8’de ise zemin sıvılaşma değerlendirmesi; Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT) veya Kayma Dalgası Hızı Testine (VS) göre belirlenebileceği ifade edilmiştir. CPT ve VS deneylerine göre sıvılaşma potansiyelinin saptanabilmesi için genel kabul gören yöntemlerin kullanılması gerektiği paylaşılmıştır.

Zemin sıvılaşma değerlendirmesinin, SPT deney sonuçları esas alınarak gerçekleştirilmek istenmesi durumunda ise TBDY 2018 Ek 16B’de bir basitleştirilmiş yöntem sunulmuştur. Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu, TBDY 2018 Bölüm 16.6.9’a göre, τ_R (sıvılaşma direnci) ile τ_{deprem} (zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesi) oranının 1,10 değerinden büyük olması şeklinde tanımlanmıştır. TBDY 2018’de, SPT deney sonuçlarını kullanarak zemin sıvılaşma direncinin (τ_R) hesaplanması için Ek 16B.3’te; deprem esnasında gelişen kayma gerilmelerinin hesaplanması (τ_{deprem}) için ise Ek 16B.4’te birtakım denklemler verilmiştir. TBDY 2018 Ek 16B’de verilen basitleştirilmiş zemin sıvılaşması yöntemi analiz adımlarının özeti Şekil 1’de sunulmuştur.

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirileceği zemin profilinde uygulanan SPT arazi deneyinden elde edilmiş ham SPT verileri (N); Çizelge 1’de verilen düzeltme katsayılarıyla çarpılarak, düzeltilmiş $N_{1,60}$ değerine dönüştürülmesi gerekmektedir (Denklem 1).

$$N_{1,60} = N * C_R * C_S * C_B * C_E * C_N \quad (1)$$

Çizelge 1’de gösterilen C_N katsayısının hesabı için kullanılan denklemde, etkin düşey gerilme σ'_{vo} (kN/m^2); SPT deneyinin gerçekleştirildiği arazi koşullarına göre hesaplanması gerekmektedir. SPT deneyi ardından ek dolgu, temel gerilmesi, zemin kazısı ve benzeri

- **SPT verilerinin düzeltilmesi** ($N_{1,60}$ ve $N_{1,60f}$)
 - Ham SPT verilerinin düzeltilmesi ($N_{1,60}$)
 - SPT verilerinin ince dane içeriğine göre düzeltilmesi ($N_{1,60f}$)
- **Sıvılaşma direncinin hesaplanması** (τ_R)
- **Depremde oluşan kayma gerilmesinin hesaplanması** (τ_{deprem})

Şekil 1. TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş zemin sıvılaşması analizi adımları

Çizelge 1. TBDY 2018'e göre ham SPT verisini düzeltme katsayıları

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C_R Tij boyu düzeltme katsayısı	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_S Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E Enerji oranı düzeltme katsayısı	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60
C_N Derinlik düzeltme katsayısı	$C_N = 9.78 * \sqrt{\frac{1}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.70$	

gereçeklerle oluşan etkin gerilme değişikliklerinin dikkate alınmayacağı TBDY 2018'de vurgulanmıştır. Arazi deneyinden alınan ham SPT verilerinin (N), SPT düzeltme katsayıları kullanılarak $N_{1,60}$ değerine dönüştürülmesinin ardından, $N_{1,60}$ değerinde, ince dane içeriğine (IDI) göre yeniden bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır. İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı $N_{1,60f}$ Denklem (2)'ye göre hesaplanmaktadır.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta * N_{1,60} \quad (2)$$

$N_{1,60f}$ hesabında kullanılan α ve β katsayıları, Çizelge 2'de gösterildiği üzere ince dane içeriğine bağlı olarak koşullu belirlenmektedir.

Çizelge 2. TBDY 2018'e göre ince dane içeriğine bağlı α ve β katsayıları

$\alpha = 0$	$\beta = 1.0$	$IDI \leq \%5$
$\alpha = e^{(1.76 - \frac{190}{IDI^2})}$	$\beta = 0.99 + IDI^{1.5}/1000$	$\%5 < IDI < \%35$
$\alpha = 5.0$	$\beta = 1.2$	$IDI \geq \%35$

$N_{1,60f}$ değerinin hesaplanmasıyla, TBDY 2018'e göre ham SPT sayısı (N) üzerinde yapılacak tüm düzeltmeler tamamlanmış olmaktadır. Sıvılaşma direncinin (τ_R) bulunabilmesi için gerekli olan çevrimsel dayanım oranının (CRR) hesabında ise Denklem (2)'deki $N_{1,60f}$ değeri kullanılmaktadır.

Bir zeminin sıvılaşma potansiyelinin karakterize edilmesi ve sıvılaşmaya karşı gösterdiği direncin ifade edilmesi, çevrimsel dayanım oranı (tekrarlı direnç oranı) kavramıyla sağlanmaktadır [42]. TBDY 2018'de zeminlerin sıvılaşmaya karşı direnç kapasitesini belirlemek için Youd ve diğerleri [16] tarafından önerilen

CRR denklemi kullanılmaktadır. Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranı ($CRR_{M7.5}$), Denklem (3)'te yer alan bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$CRR_{M7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(10 * N_{1,60f} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3)$$

Tasarım depremi moment büyüklüğünün 7.5 değerinden farklı olması durumunda, $CRR_{M7.5}$ değerinin, deprem büyüklüğü düzeltme katsayısıyla (C_M) düzeltilmesi gerekmektedir. Tasarım depremi moment büyüklüğü 7.5 ise C_M değeri 1 olarak alınmaktadır. C_M değeri, tasarım depremi büyüklüğüne (M_w) bağlı olarak Denklem (4)'teki denkleme göre hesap edilmektedir.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (4)$$

TBDY 2018'de, tasarım depremi büyüklüğünün (M_w) saptanması hususunda, özel bir açıklama bulunmamaktadır. Bu nedenle M_w değerinin seçiminde, FEMA P-750 [43] ve ASCE/SEI 7-10 [44] gibi uluslararası belgelerden yararlanıldığı görülmektedir [45]. TBDY 2018'e göre sıvılaşma direnci (τ_R), $CRR_{M7.5}$ ve C_M değerleri ile etkin düşey gerilmenin (σ'_{vo}) çarpılması sonucu, Denklem (5)'te gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{vo} \quad (5)$$

Bir zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (GS), TBDY 2018'e göre, sıvılaşma direncinin (τ_R), depreme oluşan kayma gerilmesine (τ_{deprem}) oranıyla temsil edilir. τ_{deprem} hesabında; ilgili derinlikteki toplam düşey gerilme (σ_{vo}), gerilme azaltma katsayısı (r_d) ve kısa periyot tasarım

spektral ivme katsayısı (S_{DS}) kullanılır. r_d , incelenen derinliğe (z) bağlı olarak Denklem (6)'ya göre hesaplanır.

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765 * z & z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 * z & 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \\ r_d &= 0.744 - 0.008 * z & 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \\ r_d &= 0.50 & z > 30 \text{ m} \end{aligned} \quad (6)$$

TBDY 2018 yürürlüğe girmesiyle birlikte deprem bölgesi kavramı ortadan kalkmıştır ve yatay-düşey deprem taleplerinin hesaplanmasında, kısa ve uzun periyot spektral ivme değerleri ile belirli büyütme katsayılarından yararlanılmaktadır [46]. Harita spektral ivme katsayıları (S_S ve S_I), interaktif TDTH 2018 [47] üzerinden elde edilmektedir ve proje sahasının zemin durumu için özel katsayılarla (F_S ve F_I) çarpılarak, tasarım spektral ivme katsayıları (S_{DS} ve S_{DI}) bulunmaktadır [48].

Sıvılaşma potansiyeli incelenen zemin sahasına ait konum bilgileri kullanılarak, TDTH 2018'de kısa periyot spektral ivme katsayısı (S_S) belirlenir. S_S değerinden yararlanılarak TBDY 2018 yerel zemin sınıfına (YZS) bağlı, kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı (F_S), Çizelge 3'e göre seçilir ve S_{DS} değeri, bu katsayılar kullanılarak Denklem (7)'deki gibi hesaplanır.

$$S_{DS} = S_S * F_S \quad (7)$$

τ_{deprem} gerilmesi; σ_{vo} , r_d ve S_{DS} değerleri kullanılarak Denklem (8)'de yer alan bağıntıya göre hesaplanır ve bir zemin için TBDY 2018'e göre sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı Denklem (9)'daki gibi belirlenir.

$$\tau_{deprem} = 0.65 * \sigma_{vo} * (0.4 * S_{DS}) * r_d \quad (8)$$

$$GS = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} = \frac{CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{vo}}{0.65 * \sigma_{vo} * (0.4 * S_{DS}) * r_d} \geq 1,10 \quad (9)$$

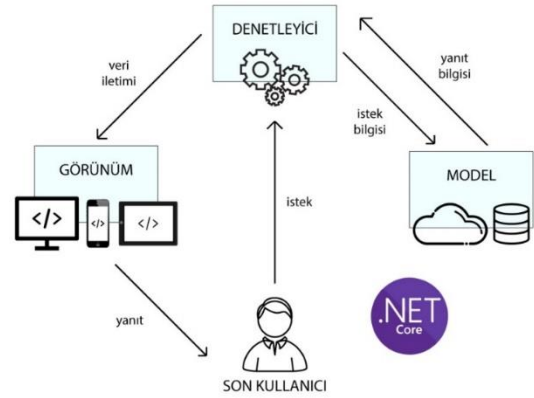
TBDY 2018'e göre (Denklem 1-9), basitleştirilmiş zemin sıvılaşma analizi; Şekil 2'de özetlenmiştir.

$$\begin{aligned} N_{1,60} &= N * C_B * C_E * C_N * C_S * C_R \\ &\downarrow \\ N_{1,60f} &= \alpha + \beta * N_{1,60} \\ &\downarrow \\ CRR_{M7.5} &= \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(10 * N_{1,60f} + 45)^2} - \frac{1}{200} \\ &\downarrow \\ C_M &= 10^{2,24} / M_w^{2,56} \\ &\downarrow \\ GS &= \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} = \frac{CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{vo}}{0,65 * \sigma_{vo} * (0,4 * S_{DS}) * r_d} \geq 1,10 \\ &\uparrow \\ S_{DS} &= S_S * F_S \end{aligned}$$

Şekil 2. TBDY 2018'e göre sıvılaşma analizi hesap akış yolu

Tasarım

Bu bölümde, açık kaynak bir uygulama geliştirme çerçevesi olan ASP.NET Core ortamında bir geoteknik yazılım tasarlanmıştır. ASP.NET Core [49], Microsoft firması tarafından ilk kez 2016 yılında, .NET teknolojisi altında çapraz platformlara yönelik bir web çerçevesi olarak duyurulmuştur [50]-[51]. Kullanıcı arayüzlerine sahip web uygulamalarını tasarlamak için yaygınca kullanılan bir kalıp olan ve verinin yönetimi ile yönlendirmesini görünümünden ayırmayı amaçlayan tasarım deseni, MVC (Model-View-Controller) olarak tanımlanmaktadır [52]. ASP.NET Core, tasarımı kolaylaştıran ve işlemleri düzen içerisinde gerçekleştiren bir MVC mimari desen yapısına sahiptir (Şekil 3).



Şekil 3. ASP.NET Core MVC mimari yapısının çalışma döngüsü [53]

ASP.NET Core çerçevesi, tasarımlar esnasında Visual Studio Code [54] tümleşik geliştirme ortamında yüklenip kullanılmıştır. İnternet tabanlı uygulamada, görsel dinamik arayüzler HTML ve JavaScript işaretleme dilleriyle, mantıksal ve yöntemler ise C# nesne yönelimli yazılım diliyle kodlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Uygulama tasarımında kullanılan yazılım çerçevesi ve programlama dilleri

ASP.NET Core MVC'deki tüm kodlamanın tamamlanmasının ardından, TBDY 2018'e göre zemin sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştiren *SoLiqSolver* isimli bir geoteknik web yazılımı geliştirilmiştir. Bu uygulamanın tasarımında destekleyici birtakım açık kaynak yazılım geliştirme bileşenlerinden de yararlanılmıştır. Şekil 2'de özetlenen sıvılaşma analizi için gerekli bazı matematiksel işlemlerde sayısal hesaplama kütüphanesi Math.NET [55] kullanılmıştır. Web uygulamasının görsel düzeninin sağlanmasında, basamaklı biçim şablonu olarak W3.CSS [56] tercih

Çizelge 3. TBDY 2018’de kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa Periyot Bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8

edilmiştir. Sondaj derinliği-güvenlik sayısı profilini dinamik bir grafik olarak sunabilmek için ise Chart.js [57] tasarım kütüphanesinden yararlanılmıştır. Geoteknik web yazılımının derlendikten sonra görülen tasarım nitelikleri Çizelge 4’te sunulmuştur.

Çizelge 4. Geliştirilen web uygulamasının tasarım nitelikleri

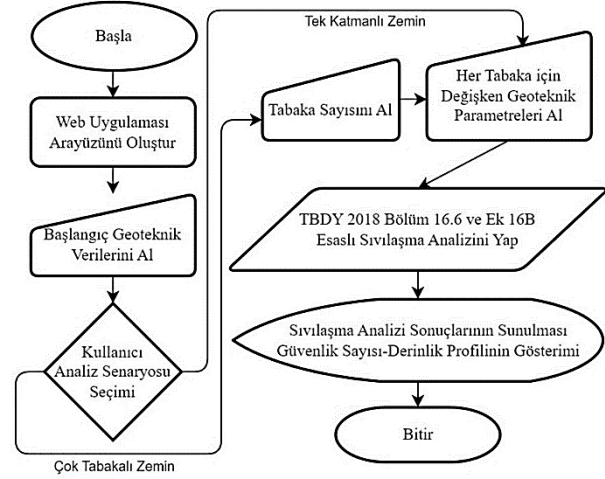
Web Geliştirme Çerçevesi	:	ASP.NET Core MVC
Yazılım Geliştirme Kiti	:	.NET Core 3.1
Üretilmiş Veri Döndüren Fonksiyon Sayısı	:	15
Kullanılan Bileşenler ve Kütüphaneler	:	Math.NET, Chart.js, W3.CSS
Yayın Versiyonu Boyutu	:	6.35 MB
Kod Satır Sayısı	:	1181 470 Front-End 711 Back-End

Bu web uygulamasında, TBDY 2018’e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyelini analiz edebilmek için kullanıcı tarafından iki farklı şekilde veri girişi yapılması gerekmektedir. Açıklamaları Bölüm 2’de paylaşılan YZS , S_s , M_w , C_B , C_E , C_S ile $YASS$ (yer altı su seviyesi) ve N_{tabaka} (tabaka sayısı) gibi başlangıç geoteknik verileri; bir sıvılaşma analizi senaryosu için gereken tabaka sayısından bağımsız değerlerdir. Z , N_{SPT} , Y_N (zemin birim hacim ağırlık) ve IDI gibi değişken geoteknik parametreler ise irdelenen zeminin tabaka sayısı kadar giriş yapılması beklenen tekrarlı verilerdir. TBDY 2018 esaslı bir sıvılaşma analizi için gereken tüm girdi değerleri Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Geoteknik web yazılımının kullanıcı esaslı girdi değerleri

Tabaka Sayısı Kadar Alınan Değişken Geoteknik Parametreleri	Z (m)	N_{SPT}	Y_N (kN/m ³)	IDI (%)
	$YASS$ (m)	YZS	S_s	M_w
Sıvılaşma Analizi için Alınan Başlangıç Geoteknik Verileri	C_B	C_E	C_S	N_{tabaka}

Çizelge 5’te gösterilen başlangıç durumu verilerine ve tabaka sayısına bağlı geoteknik parametrelere dayanarak sıvılaşma potansiyelini çözümleyebilen geoteknik web yazılımının akış yolu diyagramı Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sıvılaşma potansiyelini çözümleyen geoteknik web uygulamasının akış yolu diyagramı

Bu geoteknik web uygulaması, çapraz-platform olarak istenilen her türlü aygıtta internet üzerinden veya bir işletim sisteminde yerel olarak internetten bağımsız bir biçimde çalıştırılabilmektedir. ASP.NET Core çerçevesinin sahip olduğu çapraz platform kavramı; çoklu dağıtım seçeneklerine olanak tanıyan ve farklı işletim sistemlerinde farklı CPU mimari desteklerine sahip olarak dağıtılabilmek anlamına gelmektedir. Tasarlanan geoteknik yazılım, IIS Express (Internet Information Services) web sunucusu üzerinden “localhost url” yoluyla Windows işletim sisteminde örnek olarak çalıştırılmıştır (Şekil 6).

Bu çalışma kapsamında tasarlanan geoteknik web uygulamasının son kullanıcıya yönelik arayüz kullanım talimatları aşağıda özetlenmiştir:

- Bir sıvılaşma analizi senaryosunda önce başlangıç geoteknik verileri, listeden seçim ve veri girişi yoluyla belirlenir
- Kullanıcıdan girişi talep edilen başlangıç verilerinden biri olan enerji oranı düzeltme katsayısı (C_E) için yazılımda tanımlanan TBDY 2018 esaslı değerlere ek olarak ‘Kullanıcı Tanımlı’ biçiminde de C_E değeri giriş imkânı sunulmaktadır. Böylelikle, SPT deneyi esnasında kullanılan tokmak tipine veya yöntemine göre farklı bir katsayı girişi de mümkündür.
- Sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilecek zemin profiline ait tabaka sayısı girilir
- Oluştur komutuyla tabaka sayısına bağlı değişken geoteknik parametreler için bir veri alma dizelgesi oluşturulur

Yerel Zemin Sınıfı: ZC

C_g: Çap 65mm~115mm arasında

C_e: Otomatik darbeli tokmak - 0.90~1.60 1.2

C_s: Standart numune alıcı (iç tüpü olan) - 1.00 1

M_w: 7.5 S_s: 1 YASS (m): 0

N_{tabaka}: 1

OLUŞTUR
ÇÖZÜMLE

Z (m)	N _{SPT}	Y _N (kN/m ³)	IDI (%)
1.5	20	15	5

(a)

Yerel Zemin Sınıfı: ZC

C_g: Çap 150mm

C_e: Otomatik darbeli tokmak - 0.90~1.60 1

C_s: Otomatik darbeli tokmak - 0.90~1.60 1

Güvenli tokmak - 0.60~1.17

Halkalı tokmak - 0.45~1.00

Kullanıcı Tanımlı

M_w: 7.5 S_s: 1 YASS (m): 0

OLUŞTUR
ÇÖZÜMLE

Z (m)	N _{SPT}	Y _N (kN/m ³)	IDI (%)
1.5	20	15	5

(b)

Şekil 6. Oluşturulan geoteknik yazılımın başlangıç arayüzü: a) Karşılama ekranı; b) Veri girişi

- Veri alma dizelgesindeki her bir zemin katmanı için derinlik, ham SPT sayısı, birim hacim ağırlık ve ince dane içeriği bilgileri girilir
- Herhangi bir zemin katmanındaki SPT deneyi, refü değerine sahip ise ham SPT verisi olarak uygulamada 'R' ifadesi girilmelidir
- Refü değerine sahip bir zemin katmanı için sadece toplam ve etkin düşey gerilme hesabı yapılırken geriye kalan çıktı değerleri için herhangi bir analiz gerçekleştirilmez
- Çözümle komutuyla TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilerek, toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, sıvılaşma direnci, depremde oluşan kayma gerilmesi ve güvenlik sayısı; bir sonuç dizelgesi üzerinde sunulur
- Her sıvılaşma potansiyeli çözümlemesi için, güvenlik sayısının sondaj derinliğine göre değişimini gösteren bir grafik sunulur ve ek olarak TBDY 2018 güvenlik koşulu değeri olan 1,1 sayısı için kırmızı renkli bir doğrusal hat belirtilir
- Yazılımda sunulan güvenlik sayısı-derinlik profili grafiğinde, kullanıcı tarafından girilen yer altı su seviyesi, mavi renkte yatay kesikli çizgi olarak gösterilmektedir. Benzer şekilde, kullanıcı tarafından refü olarak belirlenen bir derinlik olması durumunda, grafikte refü derinliği turuncu renkte yatay kesikli çizgi olarak temsil edilmektedir.

Test

Bu bölümde, tasarlanan geoteknik web uygulamasında, örnek bir zemin profili için sıvılaşma potansiyeli analizi gerçekleştirilmiş ve yazılım performansı test edilmiştir. Seçilen örnek zemin profili beş katmanlı olarak ele alınmıştır. Her bir zemin katmanında farklı sondaj derinliği, ham SPT sayısı, birim hacim ağırlık ve ince dane içeriği girilmiştir. Uygulamanın değerlendirme çeşitliliğini tam olarak ifade etmek adına, örnek zemin profilinin bir katmanındaki SPT sayısı refü olarak seçilmiştir. Toplam ve etkin düşey gerilme hesap etkisini ortaya çıkarmak için yer altı su seviyesi zemin profilinin ikinci tabakasından itibaren etki ettiği bir senaryo varsayılmıştır. Test amacıyla seçilen örnek zemin profilinin, belirtilen tüm geoteknik girdi parametreleri uygulama üzerinde Şekil 7'de sunulmuştur. Geoteknik

yazılımda, Şekil 7'de verildiği üzere bilgi girişi yapılan, çok katmanlı zemin profilinin, sıvılaşma potansiyeli çözümleme sonucu ile sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili Şekil 8'de uygulamadan alınan bir görüntüyle paylaşılmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada, TBDY 2018'e göre basitleştirilmiş sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştiren kullanıcı etkileşimli bir geoteknik web yazılımı geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda yapılan değerlendirmeler ve ortaya koyulan sonuçlar aşağıda ifade edilmiştir:

- TBDY 2018 Bölüm 16.6'da bahsedilen ve detayları TBDY 2018 Ek 16B'de verilen, basitleştirilmiş zemin sıvılaşma değerlendirmesini referans alarak çözümleyen bir geoteknik web uygulaması tasarlanmıştır. Bölüm 2'de ayrıntıları paylaşılan basitleştirilmiş sıvılaşma analizi, sahip olduğu değişken sayısı ve koşulları itibarıyla çok fazla parametreyi barındıran bir yöntemdir. Bu çalışma neticesinde kodlanan yazılımda, bu yöntem, basit seçimlerle ve belirli veri alma yapılarıyla daha yalın bir hale getirilmiştir.
- Geliştirilen web uygulamasında, her bir sıvılaşma analizi için başlangıç verileri ile tabaka sayısı kadar değişken parametreler, kullanıcıdan girdi değerleri olarak beklenmektedir. Bir zemin profilinin sıvılaşma analizinde; yer altı su seviyesi, yerel zemin sınıfı, kısa periyot spektral ivme katsayısı, deprem büyüklüğü ile numune alıcı tipi, sondaj delgi çapı, enerji oranı gibi SPT deneyi düzeltme katsayıları başlangıç verileri olarak varsayılmıştır. Kullanıcıdan, irdelenen zeminin tabaka sayısına bağlı olarak, her bir ya da tek tabaka için derinlik, ham SPT sayısı, birim

Yerel Zemin Sınıfı:

C_B:

C_E:

C_S:

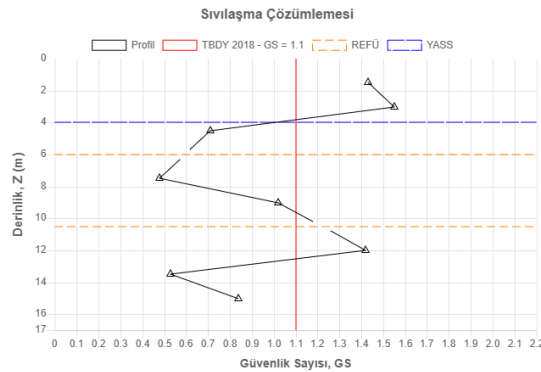
M_W: S_S: YASS (m):

N_{tabaka}:

Z (m)	N _{SPT}	Y _N (kN/m ³)	IDI (%)
1.5	19	15	4
3	20	15.2	0
4.5	16	16.4	1
6	R	15.8	8
7.5	10	17.1	22
9	24	15.5	6
10.5	R	16.3	19
12	22	16.5	25
13.5	19	15.9	7
15	20	17.2	26

Şekil 7. Geoteknik web uygulamasında çok katmanlı bir zemin profili için veri giriş örneği

S_S: 0.89 S_{Ds}: 1.14 Y_{Nort}: 16.09 kN/m³ C_B: 1 C_E: 1.2 C_S: 1 M_W: 7.5 YASS: 4 m N_{tabaka}: 10												
Z (m)	N _{SPT}	Y _N (kN/m ³)	IDI (%)	N _{160f}	σ _{vo} (kN/m ²)	σ' _{vo} (kN/m ²)	CRR _{M7.5}	T _R (kN/m ²)	R _D	T _{deprem} (kN/m ²)	GS	Sonuç
1.5	19	15	4	29.07	22.5	22.5	0.419	9.419	0.989	6.592	1.43	SIVILAŞMAZ
3	20	15.2	0	29.64	45.3	45.3	0.45	20.363	0.977	13.119	1.55	SIVILAŞMAZ
4.5	16	16.4	1	19.8	69.9	64.99	0.218	14.163	0.966	20.005	0.71	SIVILAŞIR
6	R	15.8	8	R	93.6	73.98	NaN	NaN	NaN	NaN	-	REFÜ
7.5	10	17.1	22	17.15	119.25	84.92	0.187	15.92	0.943	33.318	0.48	SIVILAŞIR
9	24	15.5	6	29.3	142.5	93.45	0.43	40.222	0.931	39.329	1.02	SIVILAŞIR
10.5	R	16.3	19	R	166.95	103.18	NaN	NaN	NaN	NaN	-	REFÜ
12	22	16.5	25	31.34	191.7	113.22	0.609	68.964	0.854	48.501	1.42	SIVILAŞMAZ
13.5	19	15.9	7	20.45	215.55	122.35	0.226	27.663	0.814	51.977	0.53	SIVILAŞIR
15	20	17.2	26	27.2	241.35	133.44	0.349	46.568	0.773	55.333	0.84	SIVILAŞIR



Şekil 8. Geoteknik web yazılımından elde edilen örnek sıvılaşma potansiyeli analizi sonucu

hacim ağırlık ve ince dane içeriği değişken parametreleri beklenmektedir.

- ✓ Tek veya çok katmanlı bir zemin profilinin sıvılaşma potansiyeli analizi, yazılımda çözümlendiğinde, çıktı değerleri bir sonuç dizelgesi ve grafik şeklinde paylaşılmaktadır. TBDY 2018 Ek 16.B'de yer alan işleyiş esas alınarak, çözümlenen değerlerle birlikte toplam ve etkin düşey gerilme, düzeltilmiş SPT sayısı, sıvılaşma direnci, depremden kaynaklanan kayma gerilmesi ve güvenlik sayısı bir dizelge halinde

gösterilir. Ayrıca her bir derinlik için hesaplanan güvenlik sayısı; bir grafik üzerinde, sondaj derinliği-güvenlik sayısı profili olarak sunulur.

- ✓ Oluşturulan geoteknik yazılım, internet yoluyla bir web sunucusu üzerinden ya da internetten bağımsız herhangi bir işletim sisteminde derlenebilen açık kaynak ve çapraz platform bir uygulamadır. Bu sayede yazılım, farklı işletim sistemlerinde herhangi bir ağ bağlantısı gerektirmeden yerel bir uygulama olarak ya da internet aracılığıyla sunucu üzerinden bir web

sayfası olarak rahatlıkla son kullanıcılara ulaşabilir durumdadır.

- ✓ Geoteknik web uygulaması; anlaşılır tasarım düzeni, sade bir arayüzü ve hesaplamalarla sınırlı veri alma yapısı sayesinde sıvılaşma potansiyeli analizini kolaylaştıran bir araç olduğu görülmektedir. Sıvılaşma potansiyeli analizini gerçekleştirmek için kullanılabilecek farklı elektronik çizelgeleme programlarına kıyasla makro ayarı, sürüm uyumu ve lisans mecburiyeti gibi gereksinimler olmamasından ötürü bu yazılımın erişim kolaylığı öne çıkmaktadır. Web yazılımı arayüzünün, sıralı seçim ya da doğrudan giriş yoluyla belirli bir veri alma yapısına sahip olması sayesinde yapılan tüm işlemlerde kullanıcı kaynaklı hata payı en düşük düzeyde tutulabilmektedir.
- ✓ Çok katmanlı zemin profili örnekleri için sıvılaşma potansiyeli analizinin çözümlenebilir ve hesap edilen tüm değerler bir dizelge halinde sunulabilir olmasından dolayı yazılım, herhangi bir geoteknik değişkenin güvenlik sayısına olan etkisini incelemek için oldukça uygundur. Bu yönüyle, geoteknik web uygulamasının gelecekteki farklı çalışmalara da konu olabileceği düşünülmektedir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

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

Kaynaklar

- [1] M. Selçuk, İ. Özaydın, M. Berilgen, "Sıvılaşabilen Tabakalar Üzerinde İnşa Edilen Dalgakıranların Depremler Sırasındaki Davranışı," *Sigma J. Eng. Nat. Sci. – Sigma Müh. ve Fen Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 2, 2012.
- [2] A. Ateş, "Gölyaka (Düzce) İmara Esas Yerleşim Alanındaki Zeminlerin SPT ve Sismik Hız Verileriyle Sıvılaşma Riskinin Araştırılması," *J. Polytech.*, vol. 20, no. 4, 2017.
- [3] U. Dağdeviren, "Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Zeminlerin Sıvılaşma Analizi ve Sıvılaşmaya Karşı İyileştirilmesi," *Doğal Afetler ve Çevre Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 153–165, 2019.
- [4] M. Mollamahmutoğlu, F. Babuçcu, *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*. Akademisyen Kitabevi, 2021.
- [5] C. C. Tsai, W. C. Lin, M. C. Chu, C. C. Chi, "Experimental study on the mechanism of sand boils and associated settlements due to soil liquefaction in loose sand," *Eng. Geol.*, vol. 306, p. 106708, 2022.
- [6] S. Karafagka, S. Fotopoulou, D. Pitilakis, "The effect of soil liquefaction and lateral spreading to the seismic vulnerability of RC frame buildings considering SSI," *J. Earthq. Eng.*, vol. 27, no. 16, pp. 4786–4808, 2023.
- [7] P. Shende, V. Barai, Y. Jaiswal, A. Lohakar, S. K. Shaw, H. A. Khan, "The study of newly established approaches to control soil liquefaction: An overview," *Mater. Today Proc.*, 2023.
- [8] AFAD, "06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 Depremleri Raporu," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2023.
- [9] S. Gücek, K. B. Afacan, İ. Zorluer, "6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Zemin Büyütmesi ve Sıvılaşma Gerçeği: Antakya, Gölbaşı, Türkoğlu Örnekleri," *Afyon Kocatepe Üni. Fen ve Müh. Bilim. Derg.*, vol. 23, no. 3, pp. 740–752, 2023.
- [10] S. Demir, P. Özener, "Sıvılaşmanın UBC3D-PLM Model ile Tahmin Edilmesi: Santrifüj Deneyi Örneği," *Tek. Dergi*, vol. 30, no. 5, pp. 9421–9442, 2019.
- [11] A. Ateş, *Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Arazi Ve Laboratuvar Deneyleri İle Araştırılması*. İKSAD Publishing House, 2020.
- [12] K. O. Cetin, H. T. Bilge, "Recent advances in seismic soil liquefaction engineering," in *Evolution of Geotech - 25 Years Innovation.*, pp. 18–42, 2022.
- [13] S. Davran, A. Özocak, S. Sert, E. Bol, "Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sayısal Analiz ile Belirlenmesi ve Zemin İyileştirmesinin Analize Etkileri," *Politek. Derg.*, vol. 27, no. 3, pp. 1029–1041, 2024.
- [14] E. Bayrakçı, E. Balaban, M. İ. Onur, H. B. Özmen, E. Pekkan, "Geoteknik Mühendisliğinde 2016-2021 Yılları Arası Sıvılaşma Çalışmaları," *Disaster Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–19, 2021.
- [15] H. B. Seed, I. M. Idriss, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 97, no. 9, pp. 1249–1273, 1971.
- [16] T. L. Youd vd., "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 127, no. 10, pp. 817–833, 2001.
- [17] S. Durukan, E. Akbuğa, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (2018) Göre Sıvılaşma Potansiyeli Analizi ve Sığacık (Seferihisar/İzmir) Örneği," *Doğal Afetler ve Çevre Derg.*, vol. 6, no. 2, pp. 304–318, 2020.
- [18] G. Şahin, O. Toygar, M. R. Kahyaoğlu, "A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation," *Türk Deprem Arastırma Derg.*, vol. 4, no. 2, pp. 210–229, 2022.

- [19] R. Dobry, K. H. Stokoe, R. S. Ladd, T. L. Youd, "Liquefaction susceptibility from S-wave velocity," in *Proc. In-Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE National Convention*, 1981.
- [20] T. Iwasaki, T. Arakawa, K. I. Tokida, "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes," *Int. J. Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 49–58, 1984.
- [21] K. Kayabali, "Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity," *Eng. Geol.*, vol. 44, no. 1–4, pp. 121–127, 1996.
- [22] H. Sonmez, "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)," *Environ. Geol.*, vol. 44, pp. 862–871, 2003.
- [23] K. O. Cetin vd., "Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 130, no. 12, pp. 1314–1340, 2004.
- [24] J. H. Hwang, C. W. Yang, D. S. Juang, "A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 24, no. 9–10, pp. 761–770, 2004.
- [25] R. E. Moss, R. B. Seed, R. E. Kayen, J. P. Stewart, A. Der Kiureghian, K. O. Cetin, "CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 132, no. 8, pp. 1032–1051, 2006.
- [26] O. Uyanık, A. Taktak, "Kayma dalga hızı ve etkin titreşim periyodundan sıvılaşma çözümlemesi için yeni bir yöntem," *Süleyman Demirel Üni. Fen Bilim. Enst. Derg.*, vol. 13, no. 1, pp. 74–81, 2009.
- [27] C. H. Juang, J. Ching, Z. Luo, C. S. Ku, "New models for probability of liquefaction using standard penetration tests based on an updated database of case histories," *Eng. Geol.*, vol. 133, pp. 85–93, 2012.
- [28] R. W. Boulanger, I. M. Idriss, "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures," *Rep. No. UCD/CGM-14*, vol. 1, p. 134, 2014.
- [29] K. O. Cetin vd., "The use of the SPT-based seismic soil liquefaction triggering evaluation methodology in engineering hazard assessments," *MethodsX*, vol. 5, pp. 1556–1575, 2018.
- [30] J. Zhang, Y. Wang, "An ensemble method to improve prediction of earthquake-induced soil liquefaction: a multi-dataset study," *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 5, pp. 1533–1546, 2021.
- [31] TBDY, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018," Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2018.
- [32] M. Dingil, Y. Türedi, M. Örnek, "Geoteknik Mühendisliğinde Açık Kaynaklı Yazılım Geliştirme Araçlarının Kullanımı: Hidrometre Deneyi Örneği," *Dicle Üni. Müh. Fak. Müh. Derg.*, DUJE, vol. 11, no. 3, pp. 1431–1442, 2020.
- [33] C. Aydın, "Sıvılaşma Analizi ile İlgili Bir İnceleme," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [34] İBB, "İstanbul Mikrobölgeleme Projesi Anadolu Yakası Cilt II," T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul, TR, 2009.
- [35] F. Ozcep, "SoilEngineering: A Microsoft Excel Spreadsheet program for geotechnical and geophysical analysis of soils," *Comput. Geosci.*, vol. 36, no. 10, pp. 1355–1361, 2010.
- [36] D. Alkaya, B. Yeşil, "Sıvılaşma Analizlerinin VBA Kullanılarak Yapılması," *Akad. Bilişim*, 2012.
- [37] K. W. Franke, A. D. Wright, C. K. Hatch, "PBLiquefY: A new analysis tool for the performance-based evaluation of liquefaction triggering," in *Proceedings, 10th National Conference on Earthquake Engineering*, 2014.
- [38] S. Chen, B. Tang, X. Li, "The Development of Software for Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction," in *Seventh China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, pp. 265–271, 2016.
- [39] E. Bekin, F. Ozcep, "A comparative soil liquefaction analysis with a MATLAB based algorithm: soiLique," *Earth Sci. Res. J.*, vol. 25, no. 3, pp. 323–340, 2021.
- [40] JMO, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 ile Uyumlu Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi ve Sıvılaşma Sonrası Oturma, Yanal Deformasyon, Kayma Dayanımı Kaybı ve Kapak Tabakası Etkisi Hesap Cetveli Kullanım Kılavuzu," TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, TR, 2021.
- [41] M. Özcan, "Visual Basic Yazılımı Kullanılarak 2018 Deprem Yönetmeliğine Dayalı Zemin Sıvılaşma Analizi Yazılımı Geliştirilmesi," İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2022.
- [42] Y. Jafarian, R. Vakili, A. S. Abdollahi, "Prediction of cyclic resistance ratio for silty sands and its applications in the simplified liquefaction analysis," *Comput. Geotech.*, vol. 52, pp. 54–62, 2013.
- [43] FEMA P-750, "NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. Research Paper 12 - Evaluation of Geologic Hazards and Determination of Seismic Lateral Earth Pressures," Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences, Washington, USA, 2009.

- [44] ASCE/SEI 7-10, “Minimum design loads for buildings and other structures”, Structural Engineering Institute, American Society of Civil Engineering, Virginia, USA, 2010.
- [45] O. Alver, A. Sezen, E. E. Eseller-Bayat, “TBDY 2018’e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri,” *Tek. Dergi*, vol. 32, no. 5, pp. 11197–11226, 2021.
- [46] V. H. Akansel, F. Soysal, K. Kadaş, P. Gülkan, “Spektrum Şiddeti Perspektifinden 2018 Türkiye Deprem Tehlike Haritası Değerlendirmesi,” *Türk Deprem Arastırma Derg.*, vol. 2, no. 2, pp. 115–137, 2020.
- [47] TDTH, “Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (TDTH) İnteraktif Web Uygulaması,” Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, TR, 2018.
- [48] H. Sucuoğlu, “2019 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde Başlıca Yenilikler,” *Türk Deprem Arastırma Derg.*, vol. 1, no. 1, pp. 63–75, 2019.
- [49] ASP.NET Core, “Open-source Web Framework for .NET,” *Microsoft Corp.*, GitHub: dotnet/aspnetcore, 2025.
- [50] A. Giretti, *Introducing ASP.NET Core 6. In: Beginning gRPC with ASP.NET Core 6*. Apress, Berkeley, CA, 2022.
- [51] R. A. Mezei, *Introduction to the Development of Web Applications Using ASP. Net (Core) MVC*. Springer Nature, 2023.
- [52] A. Lock, *ASP.NET Core in Action*, Third Edition. Manning Publications, 2023.
- [53] M. Dingil, “Zemin Mekaniğinde Endeks Deneyleri için İnternet Tabanlı Bir Uygulamanın Geliştirilmesi,” İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [54] Visual Studio Code, “Code Editor Redefined with AI,” *Microsoft Corp.*, GitHub: microsoft/vscode, 2025.
- [55] Math.NET, “Open-source Numerical Library for .NET and Mono,” *Math.NET Numerics*, GitHub: mathnet/mathnet-numerics, 2025.
- [56] W3.CSS, “Modern, responsive, mobile first CSS framework,” 2025.
- [57] Chart.js, “Open-source HTML5 Charts,” *Chart.js Community*, GitHub: chartjs/Chart.js, 2025.