

## Evaluation of Wavelet Energy for the Vibration of a Single Pile Embedded in Sand under the Effect of Near-Field and Far-Field Earthquakes

Navid Hasanpouri Notash

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Rouzbeh Dabiri \*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Masoud Hajjalilue Bonab

Professor, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Larissa Khodadadi

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Fariba Behrouz Sarand

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

rouzbeh\_dabiri@iaut.ac.ir

### Keywords:

Pile,

Far-field and near-field earthquakes,  
Wavelet transform,  
Abaqus,

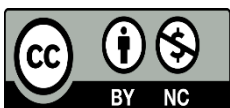
MATLAB

### Abstract

Evaluating pile performance against seismic loading is one of the most important issues in geotechnical engineering. Various approaches are used in the evaluation of this performance, which can be referred to as continuous and discrete approaches. In the continuous approach, two-dimensional and three-dimensional analyzes can be used. One of the very important disadvantages that can be pointed out in the three-dimensional analyzes of piles is the increase in computational costs. Therefore, improving the accuracy of two-dimensional analyzes in order to reduce computational costs is inevitable. The present study has used Abaqus finite element software to evaluate the response of a single pile embedded in single— and double-layer sand under two earthquake records (far-field and near-field). The subsequent stage involved employing the wavelet transformation technique to analyze the signal derived from the pile cross-section. The present study utilized the acceleration time histories of the pile head as the input signal for wavelet transformation. The result showed that the wavelet energy for the pile head signal was higher in the near-field record than in the far-field record. The analysis indicated an 11% and 41% increase in wavelet energy for single-layer and double-layer profiles, respectively. This increase in wavelet energy is due to the significant increase in horizontal displacement of the pile under near-field records compared to far-field records. Therefore, by implementing signal processing analysis employing continuous wavelet transformation on the horizontal acceleration of the pile section, relevant information regarding the type of earthquake records that occurred at the site can be extracted.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



# ارزیابی انرژی موجک برای ارتعاش شمع منفرد مدفون در ماسه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک

نوید حسن پوری نوتاش

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

روزبه دبیری\*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مسعود حاجعلیلو بناب

استاد، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

لاریسا خدادادی

استادیار، گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

فریبا بهروز سرند

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

rouzbeh\_dabiri@iaut.ac.ir

تاریخ پذیرش: 18 خرداد 1403

تاریخ دریافت: 20 فروردین 1403

## چکیده

ارزیابی عملکرد شمع در برابر بارگذاری های لرزه‌ای یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. رویکردهای مختلفی در ارزیابی این عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به رویکردهای پیوسته و گسسته اشاره نمود. در رویکرد پیوسته می‌توان از تحلیل‌های دوبعدی و سه بعدی استفاده نمود. یکی از معایب بسیار مهمی که در تحلیل‌های سه بعدی شمع می‌توان به آن اشاره نمود، افزایش هزینه‌های محاسباتی است. بنابراین، بهبود دقت تحلیل‌های دوبعدی به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی امری اجتناب‌ناپذیر است. در مطالعه حاضر، رفتار شمع منفرد مدفون در خاک ماسه تک‌لایه و دولایه تحت دو رکورد زلزله (حوزه دور و نزدیک) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود Abaqus مورد ارزیابی قرار گرفت. در گام بعد، پردازش سیگنال داده‌های شتاب-زمان مقطع شمع با استفاده از تبدیل موجک انجام گرفت. براساس نتایج، انرژی موجک برای سیگنال سرشمع تحت رکورد حوزه نزدیک بیشتر از رکورد حوزه دور به دست آمد. به طوری که برای خاک تک‌لایه و دولایه به ترتیب در حدود 11٪ و 41٪ افزایش در انرژی موجک محاسبه شد. این افزایش در انرژی موجک ناشی از افزایش قابل ملاحظه جابه‌جایی افقی شمع تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل در مقایسه با رکوردهای حوزه دور است. بنابراین، با انجام تحلیل سیگنال مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته بر روی شتاب افقی مقطع شمع می‌توان اطلاعات مناسبی از نوع رکورد زلزله به لحاظ نزدیکی و دوری از گسل تعیین نمود.

کلید واژگان: شمع، زلزله‌های حوزه دور و نزدیک، تبدیل موجک، Abaqus، MATLAB

$$c(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(a,b)dt \quad (1)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب  $c$  از حاصل ضرب سیگنال در نسخه‌های انتقال یافته (b) و تغییر مقیاس یافته (a) از تابع  $\psi$  و جمع این حاصل ضرب‌ها در همه زمان‌ها به دست می‌آید. در موجک‌ها هر چه مقیاس کوچکتر باشد، موجک فشرده‌تر خواهد شد. مقیاس بزرگ‌تر نیز به معنای کشیده‌تر بودن موجک است. پس نتیجه گرفته می‌شود که در تحلیل موجک بین مقیاس‌های موجک و فرکانس وابستگی وجود دارد. در مقیاس کوچک، موجک فشرده‌تر بوده و بنابراین تغییرات سریع سیگنال که متناظر با تغییرات فرکانس بالا می‌باشد، تحلیل می‌گردد. در مقیاس بالا، موجک کشیده‌تر بوده و تغییرات آرام سیگنال که متناظر با تغییرات فرکانس پایین است، تحلیل می‌شود. علاوه بر تبدیل موجک پیوسته (CWT) می‌توان از تبدیل موجک گسسته<sup>5</sup> (DWT) نیز در پردازش سیگنال استفاده نمود. تفاوت این دو تبدیل در مقیاس‌هایی است که در تحلیل استفاده می‌شود. درست برخلاف DWT، CWT در هر مقیاسی انجام می‌شود. محاسبه ضرایب موجک در هر مقیاس دلخواه، علاوه بر این که کاری طولانی و زمان‌بر است، موجب تولید حجم بسیار زیادی از داده‌ها می‌شود. بنابراین، می‌توان به جای CWT از DWT استفاده نمود. در این شرایط، انتخاب یک مقیاس مناسب در DWT حائز اهمیت است. در تبدیل گسسته موجک سیگنال اصلی به دو سیگنال تقریب و جزئیات تجزیه می‌گردد. سیگنال تقریب مولفه‌های فرکانس پایین (مقیاس بالا)<sup>6</sup> و سیگنال جزئیات مولفه‌های فرکانس بالای (مقیاس پایین) سیگنال<sup>7</sup> هستند. سیگنال تقریب به دست آمده خود می‌تواند به دو سیگنال تقریب و جزئیات جدید تجزیه شود. این تجزیه می‌تواند به منظور افزایش دقت فرکانسی تا ترازهای بالاتر نیز ادامه یابد. برای این که یک سیگنال در تراز  $i$  قابلیت تجزیه داشته باشد، باید سیگنال اصلی حداقل طولی برابر با  $2^i$  داشته باشد.

استفاده از تحلیل سیگنال پاسخ سازه این امکان را به مهندسان می‌دهد که اطلاعات نهفته در پاسخ سازه را شناسایی نموده و از آن داده‌ها در پیش‌بینی نقص احتمالی و درک بهتر رفتار سازه استفاده نمایند. بنابراین، از تحلیل سیگنال می‌توان در حوزه پایش سلامت سازه‌ها استفاده نمود. پایش سلامت سازه نقش بسیار مهمی در ایمنی و پایداری زیرساخت‌های شهری و صنعتی دارد که می‌تواند خسارت ناشی از حوادث به وقوع پیوسته در سازه‌های عمرانی را کاهش دهد. همچنین، با تحلیل سیگنال پاسخ سازه می‌توان ویژگی‌های زلزله را به لحاظ دوری و نزدیکی از گسل تعیین نمود. به‌طور کلی، شناخت نوع زلزله به ما کمک می‌کند که درک مناسبی از خطرات زلزله داشته باشیم تا بتوانیم اقدامات پیشگیرانه متناسب با آن را در پروژه پیاده‌سازی کنیم. در این راستا، پردازش سیگنال‌های سازه‌ای را می‌توان با استفاده از توابع تبدیل همچون تبدیل فوریه، تبدیل موجک<sup>1</sup>، تبدیل S و تبدیل هیلبرت- هوانگ انجام داد. تبدیل موجک به‌طور گسترده در تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها کاربرد دارد [10-1]. نوع حسگر مورد استفاده در تحلیل سیگنال بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، استفاده از حسگر شتاب‌سنج می‌تواند توجیه اقتصادی داشته باشد. در مطالعه حاضر پاسخ شتاب شمع منفرد مدفون در ماسه خشک تحت رکورد‌های زلزله حوزه دور و نزدیک با استفاده از تبدیل موجک پیوسته مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## 2- تبدیل موجک و انرژی آن

تحلیل موجک یک نمایش زمان-مقیاس<sup>2</sup> از سیگنال ارائه می‌کند. در تبدیل موجک پیوسته<sup>3</sup> (CWT)، همانند تحلیل فوریه، سیگنال به سطوح مختلف تجزیه می‌شود. مطابق رابطه (1)، نتیجه به دست آمده از تبدیل موجک، ضریبی خواهد بود که با  $C$  نشان داده می‌شود و تابعی از نسخه‌های انتقال یافته و تغییر مقیاس یافته از تابع  $\psi$  (موجک مادر)<sup>4</sup> است.

<sup>1</sup> Wavelet transform

<sup>2</sup> Time-scale view

<sup>3</sup> Continuous Wavelet Transform

<sup>4</sup> Mother wavelet

<sup>5</sup> Discrete Wavelet Transform

<sup>6</sup> Low-frequency (high-scale) components

<sup>7</sup> High-frequency (low-scale) components



از انرژی موجک می‌توان به‌عنوان یک معیار برای محاسبه شدت سیگنال استفاده نمود. انرژی موجک را می‌توان از روابط (2) و (3) تعیین نمود.

$$E_{a_i} = \sum_j |c_{(a,b_j)}|^2 \quad (2)$$

$$E_r = \sum_i E_{a_i} \quad (3)$$

که در آن  $E_{a_i}$  انرژی موجک است که معمولاً از مجموع مربع ضرایب موجک در تعداد  $z$  انتقال<sup>8</sup> برای یک مقدار معین از مقیاس  $a_i$  به‌دست می‌آید. انرژی کل ( $E_r$ ) نیز از مجموع انرژی موجک در ترازهای<sup>9</sup> (سطوح) مختلف  $i$  تعیین می‌گردد. در این زمینه، انتخاب تراز مناسب به‌منظور محاسبه انرژی کلی موجک حائز اهمیت است. در حالت کلی، انتخاب سطح مناسب به نرخ نمونه‌برداری<sup>10</sup> حسگر و محتوای فرکانسی مورد بررسی در تحلیل بستگی دارد.

### 3- مشخصات مدل المان محدود

پاسخ لرزه‌ای شمع فولادی مدفون در یک لایه ماسه نوادای خشک ( $D_r = 40\%$ ) به ضخامت 12m توسط Gohl (1991) [11] مورد مطالعه قرار گرفته است (آزمون سانتریفیوژ شماره 12). در مطالعه حاضر، در حالت تک‌لایه از مشخصات مورد استفاده در آزمون سانتریفیوژ Gohl (1991) استفاده شد. قطر بیرونی شمع فولادی در این آزمون 57cm و ضخامت جداره آن 15mm بود. شکل 1 مدل المان محدود این آزمون را در حالت دولایه نشان می‌دهد. مطابق این شکل، المان خاک در Abaqus/Standard [12] از نوع CPE4R و المان بی‌نهایت از نوع CINPE4 انتخاب شد. المان B21 نیز برای شمع استفاده شد. اگرچه در مطالعه حاضر از قید ناحیه مدفون<sup>11</sup> به‌منظور کوپل المان تیر با المان خاک استفاده شده است، اما به‌منظور فراهم کردن جابه‌جایی نسبی بین شمع و خاک اطراف آن و به‌تبع آن مدل‌سازی مناسب اندرکنش بین خاک-شمع از المان فصل مشترک

نازک استفاده شد. بیشینه زوایای اصطکاک برای المان لایه نازک (6) براساس Subba Rao و همکاران (1998) برای لایه بالایی و پایینی به‌ترتیب در حدود  $12^\circ$  و  $14^\circ$  تعیین شدند [13]. چگالی و نسبت پواسون برای المان لایه نازک مشابه خاک مجاور فرض شد. همچنین، زاویه اتساع برای المان لایه نازک در نظر گرفته نشد. در حالت کلی، پارامترهای مقاومتی و سفتی خاک برای المان لایه نازک را می‌توان براساس مشخصات خاک مجاور به‌دست آورد [14، 15]. سفتی المان لایه نازک از رابطه معروف  $R^2 \times G_{soil}$  محاسبه شد که در آن  $R$  ضریب کاهش مقاومت فصل مشترک و  $G_{soil}$  مدول برشی خاک مجاور است. ضریب  $R$  را می‌توان برحسب زوایای اصطکاک خاک و فصل مشترک از رابطه  $\tan(\delta)/\tan(\phi_{soil})$  تعیین نمود. ضخامت المان فصل مشترک لایه نازک به میزان 100 میلی‌متر در نظر گرفته شد [16-18].

مدول یانگ ماسه نوادا برحسب تنش همه‌جانبه  $p'$  در تراکم نسبی 40% و 80% به‌ترتیب از روابط (4) و (5) تعیین شدند.

$$E_s = 21612(p')^{0.5} \quad (4)$$

$$E_s = 27449(p')^{0.5} \quad (5)$$

که در آن  $E_s$  و  $p'$  هر دو برحسب kPa هستند. به‌منظور در نظرگیری تغییرات سفتی با عمق، پروفیل خاک در Abaqus به زیرلایه‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و سفتی متناسب با تنش همه‌جانبه مورد انتظار در وسط هر زیرلایه برای خاک اختصاص یافت. در این زمینه، از رویکرد Hashash و همکاران (2020) [19] استفاده شد. براساس این پژوهشگران تقسیم‌بندی زیرلایه‌ها به‌گونه‌ای انجام می‌گیرد که فرکانس بیشینه همه آن‌ها یکسان بوده و بزرگتر از 30 هرتز باشند.

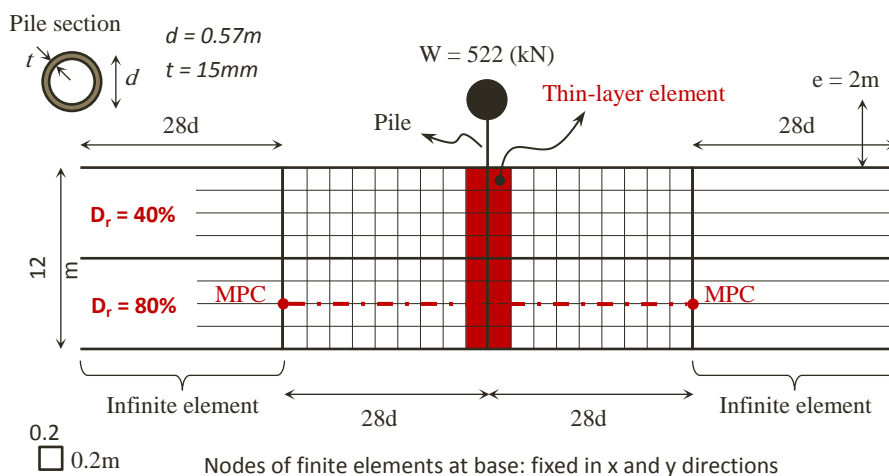
تحلیل‌های انجام‌گرفته در مطالعه حاضر را می‌توان در سه گام دسته‌بندی نمود: تحلیل فرکانسی به‌منظور تعیین ضرایب میرایی رایلی، تحلیل استاتیک و تحلیل دینامیک. ضرایب میرایی رایلی مورد

<sup>8</sup> Translation

<sup>9</sup> Level

<sup>10</sup> Sampling rate

<sup>11</sup> Embedded region



\* لازم به ذکر است که در حالت تک لایه، تنها یک لایه ماسه نوادا با تراکم 40% با ضخامت 12m شبیه سازی شده است.

شکل 1- مدل المان محدود شمع- خاک- روسازه

حاضر از مدل رفتاری دراگر- پراگر (DP) برای خاک در Abaqus/Standard استفاده شد. این مدل رفتاری در صورت تطبیق

مناسب پارامترهای مقاومتی، قابلیت شبیه سازی رفتار ماسه را دارد [22-28]. پارامترهای مقاومتی مدل دراگر- پراگر (یعنی؛ زاویه اصطکاک، چسبندگی و زاویه اتساع) در شرایطهای کرنش مسطح و سه محوری را می توان براساس پارامترهای مقاومتی مدل مور- کولمب تعیین نمود [24، 29-31].

جدول (1) و

جدول (2) به ترتیب مشخصات مصالح خاک و شمع را نشان می دهند. لازم به ذکر است، در جدول (1) مدولهای یانگ مربوط به گام استاتیک هستند. در گام دینامیک پس از انجام تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه از سفتی معادل 65% کرنش برشی اوج (یعنی؛  $\gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max}$ ) برای هر زیرلایه استفاده شده است. در این راستا، تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه در DEEPSOIL در حوزه زمان و با استفاده از مدل هایپربولیک درجه دوم تعمیم یافته (GQ/H) با فرمول بندی بارگذاری و باربرداری هیستریک غیر میسینگ انجام گرفت. مطابق

نیاز در تحلیل دینامیک را می توان برای دو مود با بیشترین مشارکت جرمی از روابط (6) و (7) تعیین نمود:

$$\alpha = 2\zeta \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (6)$$

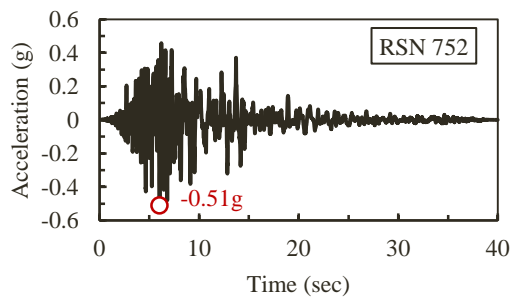
$$\beta = 2\zeta \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (7)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب ضرایب میرایی متناسب با جرم و سفتی هستند. همچنین،  $\zeta$  نسبت میرایی کرنش کوچک خاک است که در مطالعه حاضر میانگین مقادیر به دست آمده از Darendeli (2001) و Menq (2003) برای ماسه نوادا در نظر گرفته شد [20، 21].

شبیه سازی مناسب رفتار خاک در مواجهه با بارگذاری های وارده حائز اهمیت است. یکی از پارامترهای مهم در انتخاب مدل رفتاری مناسب قابلیت انجام تحلیل در زمان کم و با دقت قابل قبول است. در مطالعه

جدول 2- مشخصات شمع لوله‌ای فولادی

پارامتر	واحد	مقدار
قطر بیرونی (d)	m	0/57
ضخامت جداره شمع	m	0/015
چگالی (ρ)	kg/m <sup>3</sup>	8000
مدول یانگ (E)	MPa	1/71 × 10 <sup>5</sup>
نسبت پواسون (ν)	-	0/3
تنش تسلیم (f <sub>y</sub> )	MPa	280
تنش نهایی (f <sub>u</sub> )	MPa	580
تنش نظیر کرنش پلاستیک برابر %0/01	MPa	182/5



(الف)

این جدول، به منظور تضمین پایداری عددی مقدار کمی چسبندگی برای ماسه در نظر گرفته شد. شکل 2) زلزله‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. این رکوردها براساس ATC (FEMA P695 [32]) مربوط به زلزله‌های حوزه دور (R<sub>1</sub>) و حوزه نزدیک (R<sub>2</sub>) هستند. لازم به ذکر است، این رکوردها از پایگاه داده‌های لرزه‌ای<sup>12</sup> PEER NGA استخراج شده‌اند و رکوردهای ثبت شده در سطح زمین هستند. همچنین، شماره اختصاص یافته به این رکوردها براساس نام‌گذاری پایگاه PEER، موسوم به RSN<sup>13</sup>، در شکل ارائه شده‌اند. فرکانس نمونه‌برداری شتاب‌سنج برای این رکوردها برابر با 200Hz است. به منظور تبدیل این رکوردها بر روی نیم‌فضای صلب (جهت اعمال در کف مدل Abaqus) از تحلیل معکوس استفاده شد. تحلیل‌های معکوس با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL انجام گرفتند.

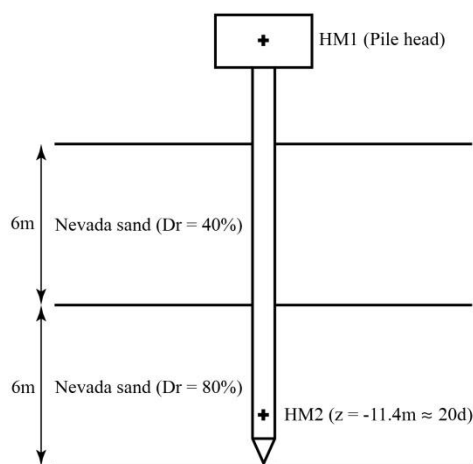
جدول 1- مشخصات ماسه نوادا در مدل کرنش مسطح (مدل رفتای دراکر-پراگر)

پارامتر	واحد	تراکم نسبی %40	تراکم نسبی %80
چگالی خشک (ρ)	kg/m <sup>3</sup>	1523	1648/8
مدول یانگ (E)	kPa	رابطه (4)	رابطه (5)
نسبت پواسون (ν)	-	0/33	0/33
زاویه اصطکاک (β)	deg (°)	42/7	46/3
زاویه اتساع <sup>†</sup> (ψ)	deg (°)	14/9	29/4
چسبندگی (d)	kPa	1	1
نسبت تنش جریان (K)	-	1	1

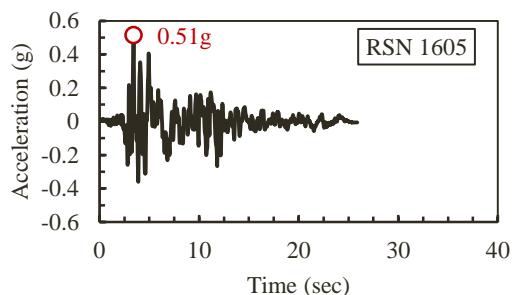
<sup>†</sup> زاویه اتساع برای پروفیل تک‌لایه (یعنی؛ تنها یک لایه با تراکم نسبی %40) و برای پروفیل دولایه 13/5° و برای پروفیل دولایه 14/9° در نظر گرفته شده است.

<sup>12</sup> PEER Ground Motion Database

<sup>13</sup> Record Sequence Number



شکل 3- نقاط برداشت داده‌های شتاب- زمان



(ب)

شکل 2- رکوردهای زلزله ثبت شده در سطح زمین (الف) حوزه دور ( $R_1$ ) و (ب) حوزه نزدیک ( $R_2$ )

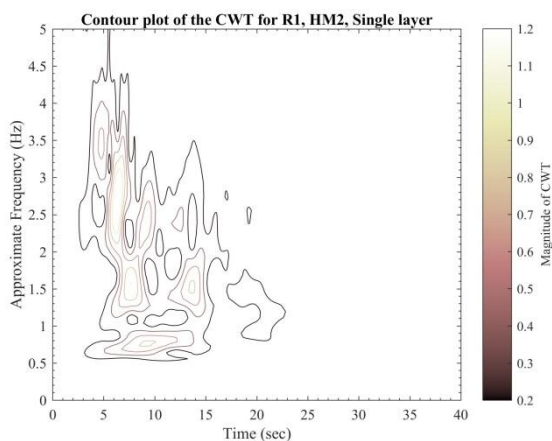
#### 4- نتایج و بحث

فرکانس پروفیل خاک برای خاک تک لایه و دولایه در حدود 4Hz و 4/5Hz می باشد. فرکانس طبیعی شمع نیز در حدود 1Hz توسط Gohl (1991) گزارش شده است. بر این اساس، اثر اندرکنش جنبشی و اینرسی در مقطع شمع را می توان مورد مطالعه قرار داد. با توجه به این که شمع مورد استفاده در مطالعه حاضر از نوع بلند (انعطاف پذیر) است، انتظار می رود که در اعماق پایین تر از سطح زمین به تدریج اثر اندرکنش جنبشی بر پاسخ شمع غالب باشد. این موضوع به خوبی از شکل 4 و شکل 5 قابل استنباط است. مطابق این شکل ها، حرکات شمع در نقطه HM2 (در نزدیکی نوک شمع) دارای محتوای فرکانسی نزدیک به ساختگاه است. این در حالی است که در نقطه HM1 (سرشمع) با توجه به حضور جرم سازه ای بر روی شمع، دوره تناوب غالب پاسخ سرشمع طولانی تر از پاسخ ساختگاه بوده و به عبارتی می توان گفت، شمع مولفه های فرکانسی زیاد حرکت زمین را فیلتر نموده است.

شکل 6- انرژی موجک سیگنال شتاب سرشمع در تراز برابر با هفت برای (الف) خاک تک لایه و (ب) خاک دولایه

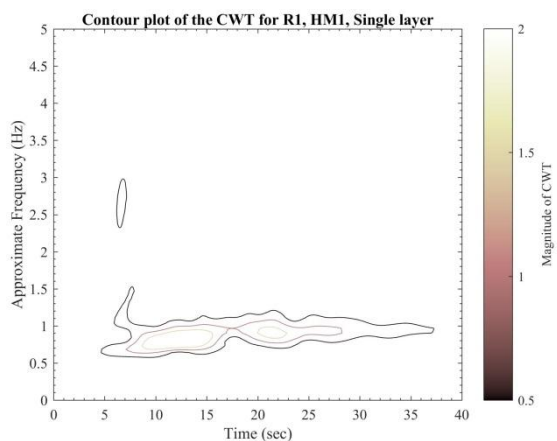
نقاط برداشت داده های شتاب- زمان مقطع شمع در شکل 3 ارائه شده است. شکل 4 و شکل 5 کانتورهای دوبعدی تبدیل موجک پیوسته بر روی شتاب افقی شمع را تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک در دو نقطه HM1 (سرشمع) و HM2 (نوک شمع) به ترتیب برای خاک تک لایه و دولایه نشان می دهند. همان طور که ملاحظه می شود، تحت رکورد حوزه نزدیک گسل یک محتوای فرکانسی کم (در حدود 0/2Hz) در ابتدای سیگنال تبدیل موجک پیوسته شتاب افقی شمع مشاهده می شود که این محتوای فرکانسی در ابتدای سیگنال مربوط به رکورد حوزه دور وجود ندارد. این الگو می تواند ناشی از ماهیت رکورد زلزله در پاسخ شمع ایجاد شده باشد. اما، نکته ای که باید به آن اشاره نمود، این است که اثر این محتوای فرکانسی به تدریج در پاسخ شمع کاهش یافته است. رنگ های روشن تر در شکل 4 و شکل 5 بیشترین ضرایب تبدیل موجک را دارند و در نتیجه افزایش در شدت سیگنال (انرژی موجک) را نشان می دهند.

تک لایه می‌باشد. مطابق این شکل، انرژی موجک برای سیگنال سرشمع تحت رکورد حوزه نزدیک در حدود 11٪ (برای خاک تک-لایه) و 41٪ (برای خاک دولایه) بیشتر از رکورد حوزه دور به دست آمد. شکل 7 و شکل 8) بیشینه جابه‌جایی‌های افقی شمع را به ترتیب برای خاک تک‌لایه و دولایه تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک در لحظه وقوع بیشینه جابه‌جایی نسبی نشان می‌دهد. جابه‌جایی نسبی مقطع، اختلاف جابه‌جایی‌های به دست آمده بین سرشمع با نوک شمع در نظر گرفته شد. مطابق این شکل‌ها، افزایش در مقادیر انرژی موجک برای زلزله حوزه نزدیک ناشی از جابه‌جایی نسبی افقی بیشتر شمع در مقایسه با زلزله حوزه دور است. زلزله‌های حوزه نزدیک با توجه به این‌که در فاصله کمتری از سازه به وقوع می‌پیوندند، تلفات انرژی کمتری داشته و بنابراین می‌توانند که انرژی زیادتری را در مقایسه با زلزله‌های حوزه دور به سازه اعمال نمایند.



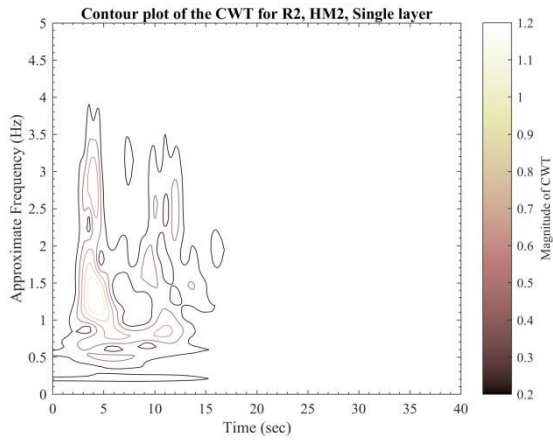
HM2 (ب)

انرژی موجک سیگنال را در قسمت سرشمع (HM1) تحت رکوردهای مختلف نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر، انرژی کل موجک با نرم‌افزار MATLAB v2016b در تراز برابر با هفت ( $i = 7$ ) و با استفاده از موجک Bior 6.8 محاسبه شد. انتخاب تراز (سطح) مناسب به نرخ نمونه‌برداری حسگر و محتوای فرکانسی مورد مطالعه در مسئله بستگی دارد. در حالت کلی، با افزایش تراز، انرژی موجک افزایش یافته و حجم محاسبات نیز بیشتر می‌گردد. انتخاب تراز مناسب بیشتر در مباحث پایش سلامت، در موقعیت‌یابی نقص حائز اهمیت است که مطالعات نهایی آن توسط نویسندگان مقاله حاضر در حال انجام است و در اینجا به اشاره مختصری از آن اکتفا می‌گردد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، انرژی موجک محاسبه‌شده تحت رکوردهای حوزه نزدیک (یعنی؛  $R_2$ ) بیشتر از حوزه دور (یعنی؛  $R_1$ ) به دست آمده است. همچنین، انرژی موجک سیگنال برای پروفیل دولایه بیشتر از پروفیل

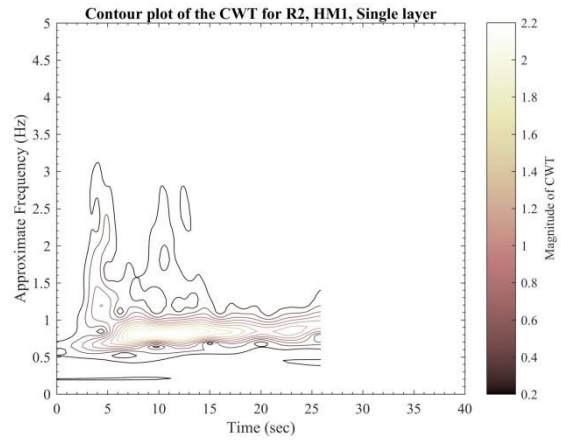


HM1 (الف)



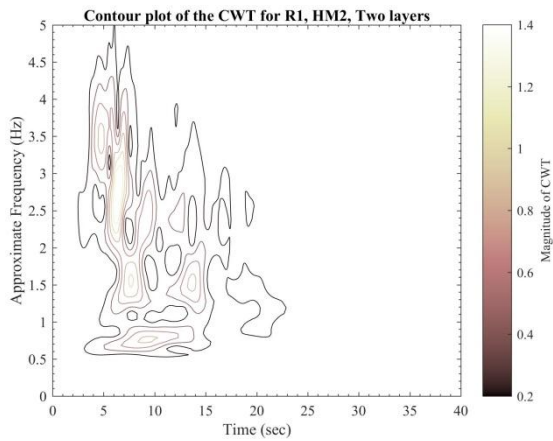


HM2 (ت)

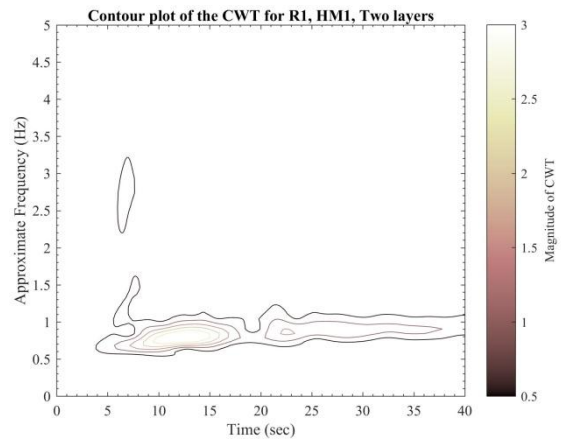


HM1 (پ)

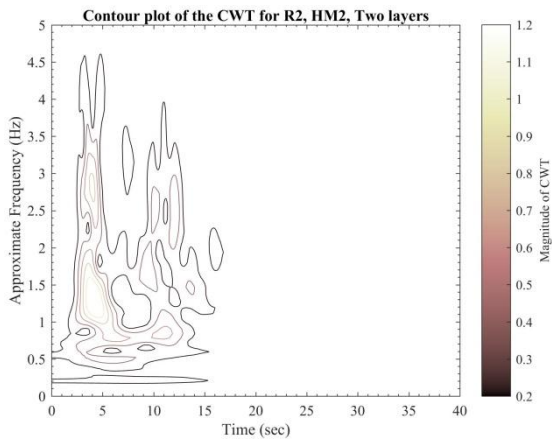
شکل 4- تبدیل موجک پیوسته بر روی شتاب افقی شمع در دو نقطه HM2 و HM1 برای خاک تک لایه تحت رکوردهای زلزله (الف و ب) حوزه دور و (پ و ت) حوزه نزدیک



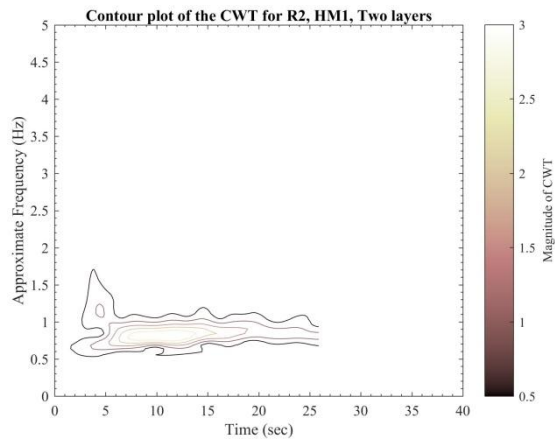
HM2 (ب)



HM1 (الف)

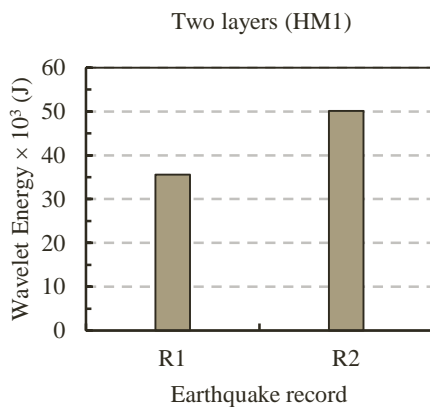


HM2 (ت)

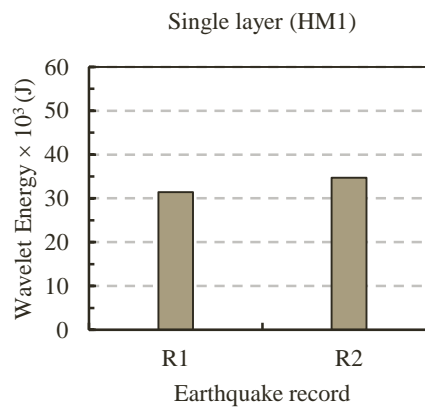


HM1 (پ)

شکل 5- تبدیل موجک پیوسته بر روی شتاب افقی شمع در دو نقطه HM2 و HM1 برای خاک دولایه تحت رکوردهای زلزله (الف و ب) حوزه دور و (پ و ت) حوزه نزدیک



(ب)

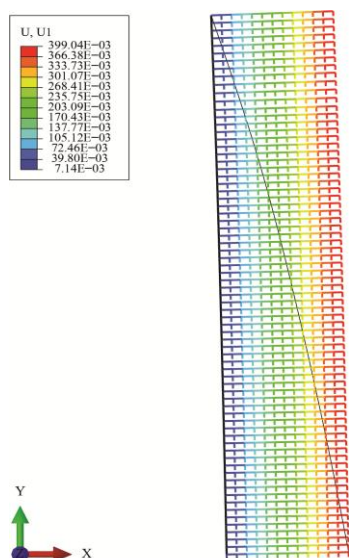


(الف)

شکل 6- انرژی موجک سیگنال شتاب سرشمع در تراز برابر با هفت برای (الف) خاک تک لایه و (ب) خاک دولایه

انرژی به شمع هستند. با توجه به این که در خاک تک‌لایه فقط یک لایه ماسه شل وجود دارد، در مواجهه با زلزله حوزه نزدیک، خاک به-راحتی تحت تاثیر ارتعاشات زلزله قرار گرفته و انرژی زیادی به شمع در اعماق پایین‌تر از سطح زمین به مقطع وارد نموده است. همان‌طور که از شکل (7) (ب) برای خاک تک‌لایه ملاحظه می‌شود، جابه‌جایی افقی شمع در اعماق پایین‌تر از سطح زمین بیشتر از جابه‌جایی سرشمع به‌دست آمده است (در لحظه وقوع بیشینه جابه‌جایی نسبی). این به-علت غالب بودن اثر اندرکنش جنبشی در ماسه شل می‌باشد (یعنی؛ اثر ساختگاه). این حالت برای خاک دولایه که دارای سرعت موج برشی بیشتر از خاک تک‌لایه است، مشاهده نمی‌شود و جابه‌جایی افقی سرشمع در خاک دولایه بیشتر از نوک شمع به‌دست آمده است.

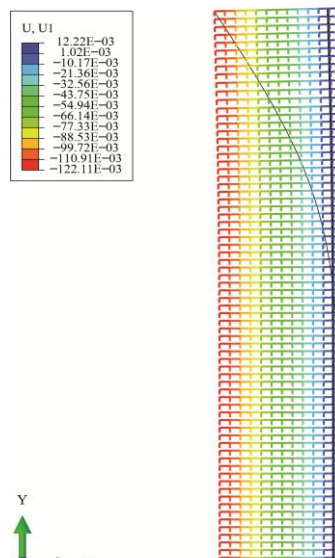
مطابق موارد مزبور نتیجه گرفته شد که جابه‌جایی نسبی افقی شمع تحت رکورد حوزه نزدیک بیشتر از حوزه دور است. در ادامه مقایسه‌ای از جابه‌جایی افقی شمع در خاک تک‌لایه و دولایه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق شکل (7) و شکل (8)، بیشینه جابه‌جایی نسبی افقی شمع (اختلاف جابه‌جایی سرشمع با نوک شمع) تحت زلزله حوزه دور برای خاک دولایه بیشتر از خاک تک‌لایه به‌دست آمده است. این در حالی است که تحت زلزله حوزه نزدیک این جابه‌جایی نسبی برای خاک تک‌لایه بیشتر از خاک دولایه به‌دست آمده است. به‌عبارتی دیگر، ارزیابی میزان جابه‌جایی نسبی شمع در دو پروفیل متفاوت بستگی به نوع زلزله و تراکم خاک دارد. نتایجی که از مطالعه حاضر به‌دست آمد به این صورت قابل تفسیر است که پروفیل‌هایی با سرعت موج برشی کم، در مواجهه با زلزله حوزه نزدیک مستعد انتقال بیشتر



Step: dynamic  
Increment: 1367; Step Time = 6.835  
Primary Var: U, U1  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.00e+00

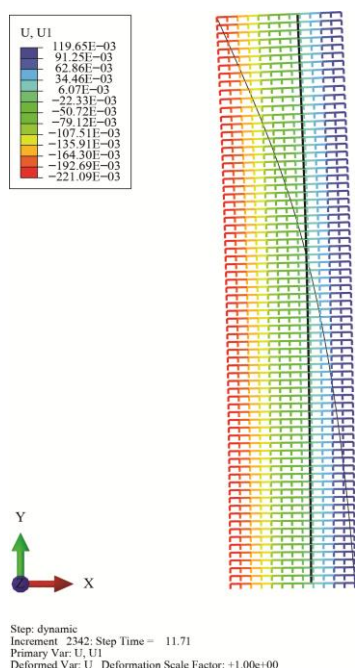
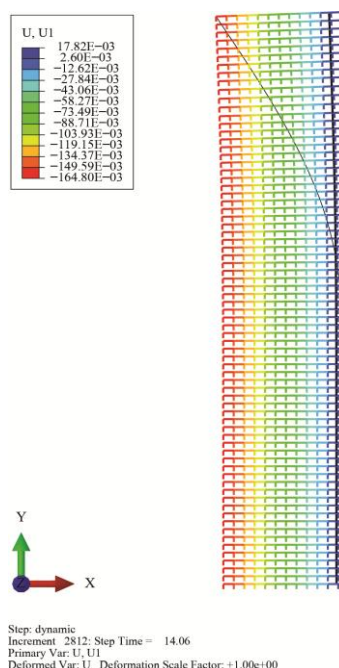
R<sub>2</sub> (ب)

شکل 7- بیشینه جابه‌جایی مولفه افقی مقطع شمع برای خاک تک‌لایه تحت رکوردهای (الف) حوزه دور و (ب) حوزه نزدیک (واحدها بر حسب متر هستند



Step: dynamic  
Increment: 2806; Step Time = 14.03  
Primary Var: U, U1  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.00e+00

R<sub>1</sub> (الف)

R<sub>2</sub> (ب)R<sub>1</sub> (الف)

شکل 8- بیشینه جابه‌جایی مولفه افقی مقطع شمع برای خاک دولایه تحت رکوردهای (الف) حوزه دور و (ب) حوزه نزدیک (واحدها بر حسب متر هستند)

## 5- جمع بندی و نتیجه‌گیری

فرکانسی نزدیک به ساختگاه بود. این موضوع یکی از مشخصه‌های شمع‌های انعطاف‌پذیر (بلند) است. در حالی که در تبدیل موجک سیگنال سرشمع با توجه به حضور جرم سازه‌ای، دوره تناوب غالب ارتعاش سرشمع طولانی‌تر از پاسخ ساختگاه به‌دست آمد و مشاهده شد که شمع مولفه‌های فرکانسی زیاد حرکت زمین را فیلتر می‌نماید. به عبارت دیگر، بیشینه ضرایب موجک در سیگنال به‌دست آمده از سرشمع در فرکانس‌های کمتر از فرکانس طبیعی ساختگاه قرار داشتند. بنابراین، با استفاده از پردازش سیگنال (مانند: تبدیل موجک) می‌توان اطلاعات سودمندی در ارتباط با عملکرد شمع به‌دست آورد.

در مطالعه حاضر پاسخ مولفه افقی شتاب برای شمع منفرد انعطاف‌پذیر مدفون در ماسه خشک تحت رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج، انرژی موجک محاسبه‌شده از داده‌های شتاب- زمان مقطع در قسمت سرشمع برای زلزله حوزه نزدیک بیشتر از حوزه دور به‌دست آمد. این افزایش در انرژی موجک ناشی از بیشتر بودن جابه‌جایی نسبی شمع تحت زلزله حوزه نزدیک است. همچنین، پروفیل‌هایی با سرعت موج برشی کم، در مواجهه با زلزله حوزه نزدیک مستعد انتقال انرژی زیاد به شمع هستند. مطابق با نتایج، تبدیل موجک سیگنال در نزدیکی نوک شمع دارای محتوای

- Infrastructure Engineering. 2014 Jan;10(1):106–127. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2012.704051>
- [9] Ni SH, Yang YZ, Tsai PH, Chou WH. Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis. *NDT and E International*. 2017 Apr 1;87:50–59.
- [10] Li DQ, Chen G, Li KQ, Liu Y. Wavelet and fourier transforms in health monitoring of embedded structures. In: 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP13, Seoul, South Korea, May 26-30, 2019.
- [11] Gohl WB. Response of pile foundations to simulated earthquake loading: experimental and analytical results volume II. Ph.D. Dissertation, Dep Civ Eng Univ Br Columbia, Vancouver. 1991 Jul; Available from: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0050510>
- [12] Dassault Systèmes. Abaqus Version 6.14, 2014.
- [13] Subba Rao KS, Allam MM, Robinson RG. Interfacial friction between sands and solid surfaces. *Proc Inst Civ Eng Geotech Eng*. 1998 Jun 5;131(2):75–82. Available from: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/igeng.1998.30112>
- [14] PLAXIS. PLAXIS 2D Reference Manual. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2012.
- [15] Damians IP, Yu Y, Lloret A, Bathurst RJ, Josa A. Equivalent interface properties to model soil-facing interactions with zero-thickness and continuum element methodologies. *From Fundamentals to Applications in Geotechnics*. 2015 November;1065–1072. Available from: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/978-1-61499-603-3-1065>
- [16] Pradhan SK, Desai CS. DSC Model for Soil and Interface Including Liquefaction and Prediction of Centrifuge Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006 Feb 1;132(2):214–222. Available from:
- [1] Rucka M, Wilde K. Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration*. 2006 Nov 6;297(3–5):536–550.
- [2] Wang J, Qiao P. On irregularity-based damage detection method for cracked beams. *International Journal of Solids and Structures*. 2008 Jan 15;45(2):688–704.
- [3] Ni SH, Lo KF, Lehmann L, Huang YH. Time-frequency analyses of pile-integrity testing using wavelet transform. *Computers and Geotechnics*. 2008 Jul 1;35(4):600–607.
- [4] Zhong S, Oyadiji SO. Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data. *Structural Control and Health Monitoring*. 2011 Mar 1;18(2):169–190. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.366>
- [5] Xiang J, Liang M. Wavelet-Based Detection of Beam Cracks Using Modal Shape and Frequency Measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012 Jul 1;27(6):439–454. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1467-8667.2012.00760.x>
- [6] Jiang X, Ma ZJ, Ren WX. Crack Detection from the Slope of the Mode Shape Using Complex Continuous Wavelet Transform. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012 Mar 1;27(3):187–201. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1467-8667.2011.00734.x>
- [7] Vafaei M, Adnan A bin, Abd.Rahman AB. A neuro-wavelet technique for seismic damage identification of cantilever structures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014 Dec 25;10(12):1666–1684. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2013.849746>
- [8] Vafaei M, Adnan A bin. Seismic damage detection of tall airport traffic control towers using wavelet analysis. *Structure and*

- [25] ABAQUS INC. Analysis of Geotechnical Problems with ABAQUS. ABAQUS, Inc.; 2003.
- [26] Wrana B, Kalisz W, Wawrzonek M. Nonlinear Analysis of Pile Displacement Using the Finite Element Method. Technical Transactions. 2013;2-B:137-147.
- [27] Kamal ZA, Arab MG, Dif A. Analysis of The arching phenomenon of bored piles in sand. Alexandria Eng J. 2016 Sep 1;55(3):2639-2645.
- [28] Hasanpouri Notash N, Dabiri R, Hajjalilue Bonab M, Khodadadi L, Behrouz Sarand F. A finite element modeling of drained triaxial test on loose sand using different constitutive models. AUT J Civ Eng. 2022 Sep 1;6(3):339-58.  
Available from:  
[https://ajce.aut.ac.ir/article\\_5138.html](https://ajce.aut.ac.ir/article_5138.html)
- [29] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/Explicit User's Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc; 2000.
- [30] Helwany S. Applied Soil Mechanics: With ABAQUS Applications. Applied Soil Mechanics: With ABAQUS Applications. John Wiley & Sons; 2007. 1-385 p.
- [31] Alizadeh Sabet S. Application of a Cosserat Continuum Model to Non-associated Plasticity. Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, 2020.
- [32] Applied Technology Council (ATC). Quantification of building seismic performance factors. FEMA P695, 2009.
- [17] Desai CS. Constitutive modeling and computer methods in geotechnical engineering. Acta Geotechnica Slovenica. 2010;7(1):5-29.
- [18] Hussein AF, El Naggar MH. Seismic behaviour of piles in non-liquefiable and liquefiable soil. Bulletin of Earthquake Engineering. 2022 Jan 1;20(1):77-111. Available from:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01244-4>
- [19] Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Ilhan O, Xing G, Numanoglu O, et al. DEEPSOIL 7. Urbana, IL: Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign; 2020.
- [20] Darendeli MB. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.D. Dissertation, Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin, 2001.
- [21] Menq FY. Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils. Ph.D. Dissertation, Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin, 2003.
- [22] Brown DA, Shie CF. Three dimensional finite element model of laterally loaded piles. Computers and Geotechnics. 1990 Jan 1;10(1):59-79.
- [23] Trochanis AM, Bielak J, Christiano P. Three-dimensional nonlinear study of piles. J Geotech Eng. 1991 Mar 1;117(3):429-47. Available from:  
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281991%29117%3A3%28429%29>
- [24] Susila E, Hryciw RD. Large displacement FEM modelling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand. Int J Numer Anal Methods Geomech [Internet]. 2003 Jun 1;27(7):585-602. Available from:  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/nag.287>

