

## Numerical Study of Site Effects on the Amplification of Earthquake Waves in the Fooladi Area of Sarpol-e-Zahab City

Hasan Sharafi<sup>1\*</sup>, Niloofar Raeisi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering of Razi University, Kermanshah, Iran

2- M.Sc. in Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering of Razi University, Kermanshah, Iran

### ABSTRACT

The amplification pattern of earthquake waves and extensive damages due to that in alluvial valleys are influenced by two phenomena such as alluvial characteristics and topographic features of the site. Therefore, local effects assessment of the site is considered as one of the effective parameters in designing reinforced structures to withstand seismically excitations. For the first time after the destructive and historic earthquake on November 12, 2017, in Sarpol-e-zahab, using geotechnical reports of drilled boreholes by housing foundation, this article has studied two dimensional modelings of the subsurface structure of Fooladi zone. Sarpol-e-zahab's bedrock accelerogram was also used to perform nonlinear dynamic analysis using ABAQUS software. The response spectrum of different parts of soil surface was used in one and two-dimensional forms to investigate the impacts of topographic and stratigraphy factors. Determining the dominant dynamic period of the site and the maximum amplification values are the other findings of this study. The amplification graph over different times shows buildings with the periods from 0.7 to 1.1 seconds have been affected amplification and site factors more than any other period. In the end, considering the calculation of the average shear wave velocity up to 30m borehole, the investigated land showed the highest compatibility with level 3 of land type classification table of Standard Code No.2800 and response spectra obtained from this study were compared with design spectrum of Standard Code No.2800. Contrary to the fifth edition published report of the International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), the findings generally show the right and appropriate performance of the Standard as well as using tall structures with sufficient safety.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 06 November 2019

**Revise Date:** 25 February 2020

**Accept Date:** 07 March 2020

### Keywords:

Site effects;  
The amplification of  
earthquake waves;  
Regulations 2800;  
Abaqus;  
The area of Fooladi  
Sarpol\_e\_Zahab.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2020.207826.1997

\*Corresponding author: Hasan Sharafi

Email address: h\_sharafi@razi.ac.ir

## بررسی عددی اثرات ساختگاه بر بزرگ‌نمایی امواج زلزله‌ی منطقه فولادی شهرستان

### سرپل ذهاب

حسن شرفی<sup>۱\*</sup>، نیلوفر رئیسی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### چکیده

الگوی بزرگ‌نمایی امواج زلزله و خرابی‌های گسترده ناشی از آن در دره‌های آبرفتی، تحت تاثیر دو پدیده‌ی ویژگی‌های آبرفت و شکل عوارض توپوگرافی ساختگاه هستند. بنابراین بررسی اثرات محلی ساختگاه، از پارامترهای مؤثر در طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله به شمار می‌رود. در نوشتار حاضر برای نخستین بار پس از زلزله‌ی مخرب و تاریخی ۲۱ آبان ۱۳۹۶ سرپل ذهاب، با استفاده از گزارشات ژئوتکنیکی گمانه‌های حفاری شده توسط بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ایران، به مدل‌سازی دو بعدی ساختار زیرسطحی منطقه فولادی پرداخته شده است. همچنین شتاب‌نگاشت سنگ بستر زلزله سرپل ذهاب، به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی به کمک نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفت و طیف پاسخ نقاط مختلف سطح خاک، به صورت دو بعدی و یک بعدی با هدف بررسی تاثیرات عوامل توپوگرافی و چینه‌شناسی ارائه گردیده است. تعیین پریود غالب دینامیکی ساختگاه و حداکثر مقادیر بزرگ‌نمایی از یافته‌های دیگر این مطالعه است. همچنین نمودار بزرگ‌نمایی در دوره‌های زمانی متفاوت نشان می‌دهد که ساختمان‌هایی با دوره تناوب (۰/۷-۱/۱) ثانیه، بیش از سایر دوره‌ها تحت تاثیر شرایط ساختگاه و بزرگ‌نمایی قرار گرفته‌اند. در پایان نیز، زمین محل پروژه با محاسبه متوسط سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری گمانه‌ها با طبقه III آیین‌نامه ۲۸۰۰، بیشترین مطابقت را نشان داد و طیف‌های پاسخ به‌دست آمده از پژوهش حاضر با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شد. نتایج، بیانگر عملکرد صحیح و مناسب آیین‌نامه به طور کلی و همچنین برخورداری سازه‌های بلند از ایمنی کافی در این زلزله بود که ماحصل این بخش، برخلاف گزارش منتشر شده ویرایش پنجم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله است.

کلمات کلیدی: اثرات ساختگاه، بزرگ‌نمایی امواج زلزله، آیین‌نامه ۲۸۰۰، آباکوس، منطقه فولادی سرپل ذهاب.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2020.207826.1997	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.207826.1997	۱۴۰۰/۰۶/۳۰	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۱۷	۱۳۹۸/۱۲/۰۶	۱۳۹۸/۰۸/۱۵
				حسن شرفی		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:
				h_sharafi@razi.ac.ir		

## ۱- مقدمه

ساعت ۲۱ و ۴۸ دقیقه روز ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ هجری شمسی، زمین لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه، به وقوع پیوست که موجب خسارت اقتصادی و تلفات جانی قابل توجهی در این منطقه شد. مطالعات، در مورد پیشینه لرزه‌خیزی این شهرستان نشان می‌دهد که به جز زمین لرزه‌های مشاهده شده در حدود ۲۵ کیلومتری جنوب قصرشیرین، که مرتبط با وقوع فوج زمین لرزه‌های شهرستان قصرشیرین در آذرماه ۱۳۹۲ است، در طی صد سال اخیر، فعالیت لرزه‌ای قابل توجهی در منطقه مشاهده نشده است. غالب زلزله‌های دستگاهی ثبت شده در این ناحیه، دارای بزرگای گشتاوری کمتر از ۵ هستند و در بخش وسیعی از گستره اطراف کانون زلزله اخیر سرپل ذهاب، زمین لرزه‌ای با بزرگای بیشتر از ۶ مشاهده نمی‌گردد. یکی از مناطقی که فرضیه عدم وقوع زمین لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری بیشتر از ۷ را در بخش چین-خورد-رورانه زاگرس قوت می‌بخشید، این بخش از زون لرزه-زمین‌ساختی زاگرس بوده است. اما به لحاظ لرزه‌خیزی تاریخی، دو زمین لرزه‌ای که در سال‌های ۹۵۸ و ۱۱۵۰ میلادی با بزرگای تخمینی به ترتیب ۶/۴ و ۵/۹ در مجاورت شهر سرپل ذهاب گزارش شده‌اند، سابقه لرزه‌خیزی بالای این شهرستان را نشان می‌دهند [۱].

الگوی خرابی شمار بسیاری از زلزله‌ها در سال‌های اخیر، نقش قابل ملاحظه اثرات ساختگاه را در اثر عواملی نظیر چینه‌شناسی و توپوگرافی آشکار می‌سازد؛ بنابراین مطالعات گسترده‌ای در این زمینه توسط پژوهشگران مختلف با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی انجام شده است که از جمله آن می‌توان به بررسی اثرات پارامترهای ساختگاه توسط سید<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۷۶) اشاره کرد که نتایج آن نشان داد لایه‌های خاک نرم و عمیق حرکاتی با زمان تناوب بلندتر ایجاد می‌کنند [۲]. در مطالعه دیگری گلاگوتی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، به مدل سازی دو بعدی و تحلیل دینامیکی غیرخطی دره اوهابا ژاپن پرداختند. نتایج، بیانگر بزرگنمایی یک بعدی خاک در بخش‌های مرکزی و اثرات قابل توجه رفتارهای دو بعدی درکناره‌های دره، تحت تحریک‌های لرزه‌ای با فرکانس‌های بالا بود [۳]. پلکیس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷) نیز پاسخ لرزه‌ای یک شیب را تحت تاثیر عوامل ساختگاه مورد ارزیابی قرار دادند. شیب مورد نظر به صورت دو بعدی و روش تحلیل آن خطی معادل در نظر گرفته شد. نتایج، نشانگر تشدید تحریک لرزه‌ای افقی در قسمت قله شیب در حدود چهل درصد بیشتر از پنجه شیب بود. آن‌ها در پژوهش خود دریافتند که در این نوع از شیب پاسخ تحلیل دو بعدی با شرایط همگن (احتساب توپوگرافی و نادیده گرفتن اثرات چینه‌شناسی) از تحلیل یک بعدی بیشتر است. همچنین در دوره تناوب ۰/۳۵-۰/۲۵، پاسخ آنالیز دو بعدی برای شرایط همگن تشدید ضعیف تری در مقایسه با تحلیل دو بعدی ناهمگن (در نظرگیری تمامی شرایط توپوگرافی و چینه‌شناسی) ایجاد می‌کند [۴].

در ادامه خان‌بابازاده<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، به مدل سازی یک ساختگاه فرضی با شرایط هندسی مشخص و شش نوع خاک شامل رس (نرم، متوسط، سخت) و شن (شل، متوسط، متراکم) پرداختند. نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی، حداقل مقادیر تشدید را در حوضه شن متراکم (به علت میرایی زیاد مصالح) و حداکثر آن را در خاک رس نرم نشان داد. همچنین قسمت‌های مختلف حوضه به سطوح متفاوتی از دوره تناوب، حساسیت نشان دادند؛ به این ترتیب که حداکثر تشدید با دوره تناوب کوتاه‌تر در نقاط نزدیک به رخنمون و با دور شدن از رخنمون و رسیدن به قسمت‌های مرکزی، دوره تشدید افزایش پیدا می‌کند. این تاثیر در همه حوضه‌ها مشاهده گردید؛ به طوری که تشدید حوضه‌های رسی در دوره‌های تناوب بلندتری نسبت به حوضه‌های ماسه‌ای ایجاد می‌شد [۵]. وانگ<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) نیز، پاسخ لرزه‌ای منطقه‌ای واقع در چین را تحت تاثیر تغییرات ضخامت و شیب مورد بررسی قرار داد. مدل سازی به صورت دو بعدی و شرایط کرنش مسطح با مدل رفتاری دراکرپراگر انجام گرفت. وی نشان داد که با افزایش شیب یک تا دو درجه، شتاب طیفی به مقدار ۱/۱ تا ۲/۲ برابر و پیروید غالب ۱/۱ تا ۱/۶ برابر تشدید می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت به مقدار ۵۰ تا ۱۱۰ متر، فاکتورهای شتاب از ۱/۵۲ تا ۲/۳۴ تشدید می‌شوند. بر اساس موارد ذکر شده می‌توان به این نتیجه دست یافت که پیروید غالب و شتاب با افزایش شیب و ضخامت لایه آبرفتی افزایش می‌یابد [۶].

پگلیارولی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، پاسخ لرزه‌ای پنج ساختگاه با شرایط چینه‌شناسی و توپوگرافی متفاوت و با هدف ریزپهنه‌بندی منطقه‌ای واقع در ایتالیا را مورد مطالعه قرار دادند. مدل سازی به صورت دو بعدی و تحلیل به روش خطی معادل بر روی دره‌ها، خط‌الراس‌ها و

<sup>1</sup> Seed<sup>2</sup> Gelagoti<sup>3</sup> Pelekis<sup>4</sup> Khanbabazadeh<sup>5</sup> wang<sup>1</sup> Pagliaroli

شیب‌ها انجام شد. تحقیقات بعمل آمده بر روی نواحی شیب‌دار، بیانگر قابل اعتماد بودن تحلیل یک بعدی برای برآورد مقادیر تشدید به استثنای لبه شیب بود. همچنین برای پوشش‌دهی اثرات دوبعدی ناشی از توپوگرافی، اعمال ضرایب آیین‌نامه ایتالیا پیشنهاد شده است. بررسی ساختگاه دره‌ای شکل نیز نشان داد در قسمت‌های مرکزی، آنالیز یک بعدی و در کناره‌های دره، تحلیل دوبعدی رفتار دقیق‌تری از ساختگاه را نمایان می‌سازد. همچنین اثرات رفتار یک بعدی در لبه دره در مقایسه با اثرات دوبعدی ناچیز به نظر می‌رسید. در خط‌الراس‌ها نیز با تندتر شدن شیب، اثرات دوبعدی نسبت به یک بعدی محافظه‌کارانه عمل می‌نمود. به همین علت برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در این نوع از ساختگاه، بایستی علاوه بر رعایت مفاد آیین‌نامه این کشور از نتایج تحلیل‌های دوبعدی و افزایش شتاب طرح نیز بهره برد [۱۷]. به‌طور کلی، مروری بر ادبیات فنی در این زمینه نشان می‌دهد که رسوبات سست و نرم بیشتر از سنگ‌های سخت، دامنه ارتعاشات را افزایش می‌دهد و هندسه یا اثرات توپوگرافی ساختگاه، عامل مهمی در بزرگنمایی و یا کوچک‌نمایی ارتعاشات ناشی از زلزله است. بنابراین اثرات ساختگاهی تاثیر بسزایی بر کلیه مشخصات مهم حرکت نیرومند زمین از جمله دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان مؤثر زلزله دارد و به عنوان یکی از مهمترین مراحل که باید در مطالعات ریزپهنه‌بندی و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله انجام گیرد شناخته می‌شود.

نخست آنکه در باب موضوعاتی همچون اثرات ساختگاه بر نتایج بزرگ‌نمایی امواج زلزله در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم) توصیه‌ای صورت نگرفته است [۱۸]. همچنین در ویرایش چهارم آیین‌نامه نیز، تنها به تاثیر عامل توپوگرافی در قالب اعمال ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (S<sub>T</sub>) برای شیب‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۰ متر و با زاویه میانگین بیش از ۱۵ درجه پرداخته شده است که حداکثر مقدار آن ۱/۴ است [۱۹]. البته با توجه به تخصص و تجربه اعضای کمیته بازنگری استاندارد ۲۸۰۰ و به دلایل ملاحظات طراحی، اجرایی، اقتصادی و فنی از به کار بردن سایر جزئیات نظیر نوع شکل هندسی، ارتفاع شیب، طول شیب، نوع مصالح و تعداد عوارض توپوگرافی به عنوان متغیرهای این ضریب اجتناب شده است. اعمال موارد پیشنهاد شده در قالب یک استاندارد، هزینه‌های شناسایی، مطالعه و طراحی در ساختگاه‌های مختلف را به شدت افزایش خواهد داد؛ زیرا مطالعات ریزپهنه‌بندی در اغلب شهرها در دسترس نیست و یا دقت قابل قبولی ندارد. مسئله دوم اینکه در استانداردهای کشورهای مختلف، حداکثر شتاب طرح و طیف مربوط به آن، مطابق زلزله سطح بهره‌برداری می‌باشد و نه تنها، بر مبنای بزرگترین زلزله‌ای که دوره بازگشت آن بیش از ۱۰۰۰ سال است و پارامترهای ثبت شده آن بسیار تقریبی و غیرقابل اعتماد هستند. با تکیه بر این مسائل و توضیحات ذکر شده در خصوص پیشینه لرزه‌خیزی شهرستان سرپل‌ذهاب که احتمال وقوع زلزله‌هایی نظیر زلزله رخ داده اخیر را ضمن داشتن دوره بازگشت طولانی، امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد؛ ضرورت انجام تحقیقات بیشتر در زمینه اثرات ساختگاه علاوه بر رعایت مفاد استاندارد ۲۸۰۰ با هدف بهبود کیفیت طراحی سازه‌ها، قابل توجیه به نظر می‌رسد.

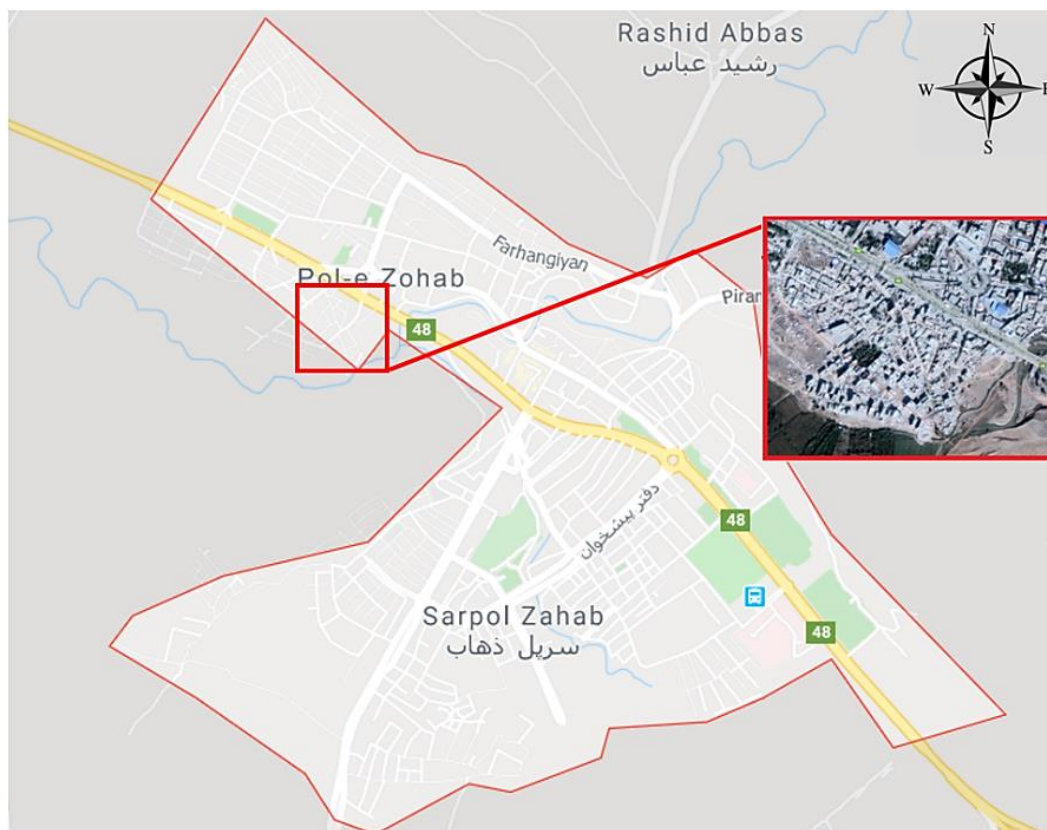
در پژوهش حاضر، با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های حفاری شده به روش مغزه‌گیری ممتد تا عمق تقریبی ۴۰ متر، جنس لایه‌های خاک تعیین شد و ساختار زیرسطحی این منطقه با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، در دو مقطع N-S و E-W (به علت تشابه دو مسیر، تنها یکی از آن‌ها انتخاب شد) مدل‌سازی شده است. سپس، با اعمال رکورد سنگ بستر زلزله سرپل‌ذهاب نتایج در قالب ضریب بزرگ‌نمایی، طیف پاسخ شتاب نقاط مهم و پر بود غالب دینامیکی ساختگاه ارائه شده است. همچنین طیف‌های پاسخ به دست آمده از تحقیق حاضر با طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه و مورد بحث قرار گرفت که نتایج به دست آمده از آن می‌تواند کمک شایانی در طراحی دقیق‌تر سازه‌های این منطقه داشته باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه فولادی، واقع در استان کرمانشاه و در شهرستان سرپل‌ذهاب دربرگیرنده بخش غربی این شهرستان است شکل ۱. به استناد نقشه‌های پهنه‌بندی خطر لرزه‌خیزی در ایران و مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰، محل پروژه در منطقه‌ای با خطر نسبی زیاد قرار گرفته است. حوزه مورد مطالعه در این پژوهش، ۵۹۳۴۰ مترمربع از کل مساحت شهرستان سرپل‌ذهاب را به خود اختصاص می‌دهد. گزارشات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک بخش غربی این شهرستان، در محدوده گمانه‌های BH-۱ تا BH-۵ به همت بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ایران تهیه گردید [۱۰] جداول ۱ و ۲. همچنین مسیرهای عبوری بر مبنای این گزارشات و با استفاده از قضاوت مهندسی در شکل ۲ نشان داده شده است. بر

اساس مشابهت دو راستای انتخابی، تنها مقطع عبوری از گمانه‌های ۴-۱-۲، با هدف تحلیل لرزه‌ای این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. مسیر ذکر شده در راستای شرقی-غربی و به طول کلی ۲۳۰ متر و عمق تقریبی ۵۰ متر می‌باشد. نمودار گمانه‌های حفاری شده و پروفیل طولی نماینده‌ی لایه‌بندی خاک به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.



شکل ۱: موقعیت پروژه مورد مطالعه در شهرستان سرپل ذهاب.

جدول ۱: مشخصات گمانه‌های حفاری شده در منطقه فولادی [۱۰].

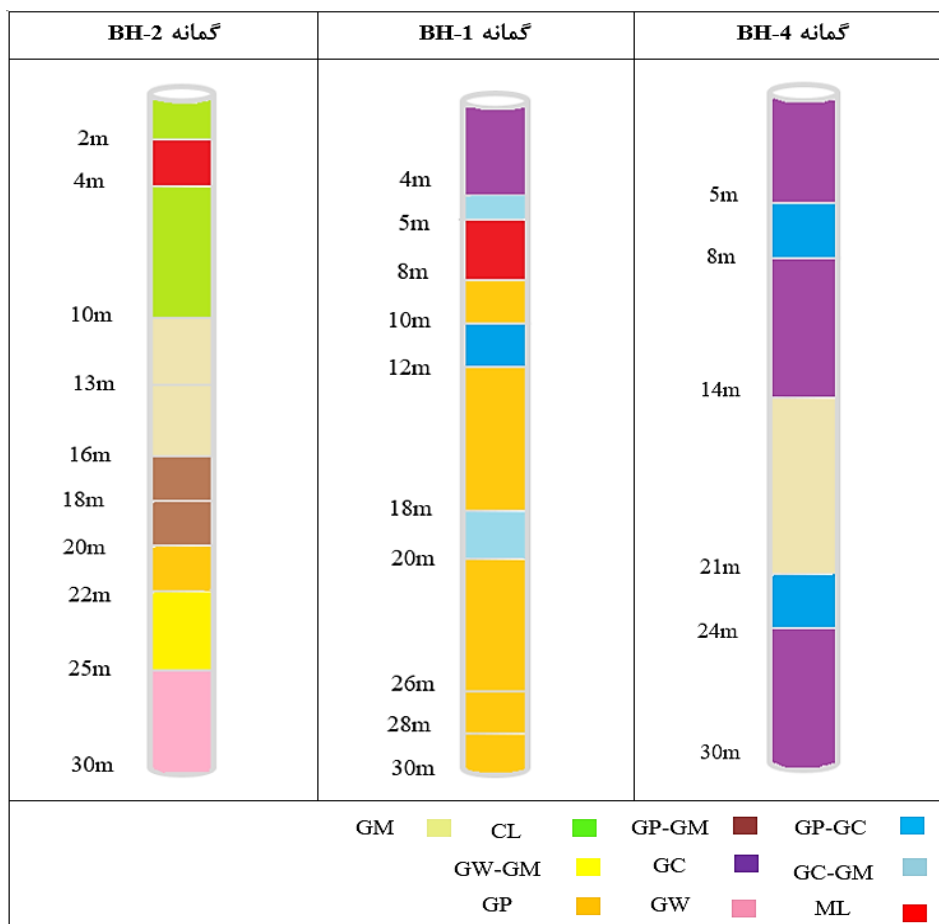
عمق گمانه (متر)	مختصات گمانه		شماره گمانه
	Y	X	
۳۰	۳۸۱۳۷۹۴	۵۷۸۲۹۰	BH-1
۳۰	۳۸۱۳۹۴۱	۵۷۸۳۲۸	BH-2
۳۵	۳۸۱۳۸۵۹	۵۷۸۱۷۰	BH-3
۳۰	۳۸۱۳۷۱۸	۵۷۸۳۰۵	BH-4
۳۰	۳۸۱۳۷۷۶	۵۷۸۴۱۷	BH-5

جدول ۲: مشخصات لایه‌های خاک در مقطع ۴-۱-۲ [۱۰].

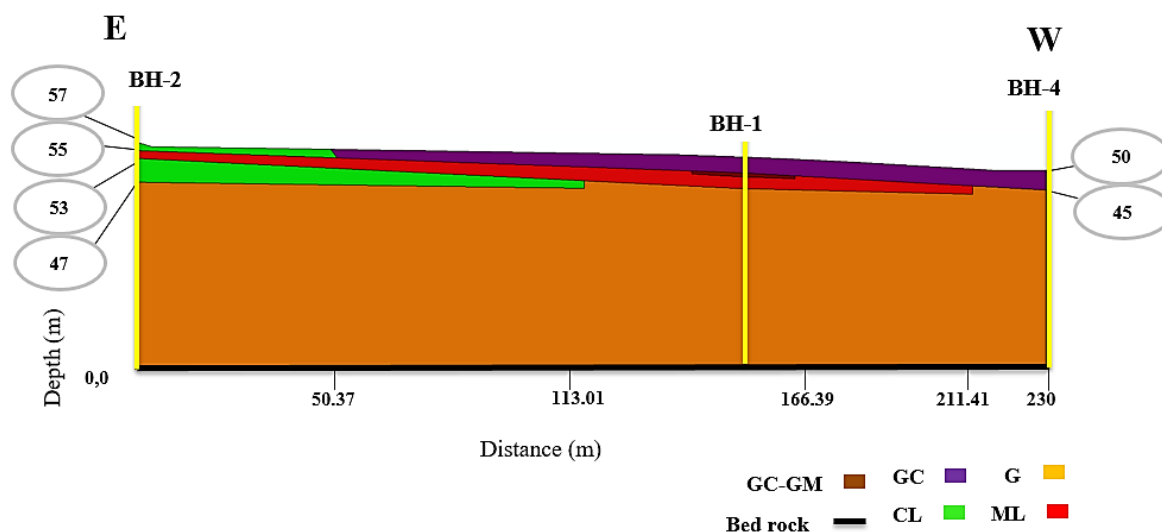
نوع خاک رنگ	نسبت پواسون	مدول یانگ (کیلوگرم/سانتیمترمربع)	وزن مخصوص (گرم/سانتیمترمکعب)	شماره لایه
GC (بنفش)	۰/۲۵	۳۰۰-۳۵۰	۱/۸۹	اول
CL (سبز)	۰/۳	۱۶۷	۱/۶۹	دوم
ML (قرمز)	۰/۳	۱۶۷	۱/۷۵	سوم
G (نارنجی)	۰/۲۵	۳۰۰-۳۵۰	۱/۹۱	چهارم
GC-GM (قهوه‌ای)	۰/۲۵	۳۰۰-۳۵۰	۱/۸۸	پنجم
Bed rock				ششم



شکل ۲: موقعیت گمانه‌های حفاری شده و مسیرهای عبوری در منطقه فولادی.



شکل ۳: گمانه‌های حفاری شده در راستای شرقی - غربی [۱۰].



شکل ۴: پروفیل طولی زیرسطحی مسیر ۴-۱-۲ در منطقه فولادی.

## ۲-۲- روش شبیه‌سازی عددی

کاربرد روش‌های عددی، یکی از روش‌های متداول به منظور تبدیل حرکت سنگ بستر به جنبش در سطح زمین است. در این روش‌ها ابتدا با استفاده از داده‌های مختلف زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوتکنیک وضعیت لایه‌های زمین در نقاط مورد نظر تعیین می‌شود؛ سپس با کاربرد تاریخچه‌های زمانی شتاب متناسب و با استفاده از روش‌های عددی متداول، مقادیر شتاب در سطح زمین محاسبه می‌شود. زمین مورد مطالعه براساس آزمایش‌های لرزه‌نگاری بعمل آمده در گمانه‌ها و محاسبه متوسط سرعت موج برشی با استفاده از رابطه (۲-۵) آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، در رده □ طبقه‌بندی می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های ژئوتکنیکی ۵ گمانه شناسایی، به مدل‌سازی پروفیل منطقه به کمک نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و تحلیل آن به صورت دینامیکی غیرخطی پرداخته شد و به منظور اعمال میرایی به سیستم از ضرایب میرایی رایلی استفاده شده است [۱۱]. نسبت میرایی نیز در این تحقیق برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. با این فرض، ضرایب میرایی رایلی  $\alpha = 0/45$  و  $\beta = 0/051$  بر اساس مدهای اول و سوم حاصل از آنالیز مودال و جای‌گذاری در روابط (۱ و ۲) به دست آمده‌اند؛ بنابراین به منظور تحلیل مسئله، ابتدا مدل تحت آنالیز مودال قرار گرفته و ضرایب میرایی رایلی به دست آمده و سپس به تحلیل مسئله تحت بار لرزه‌ای پرداخته شده است.

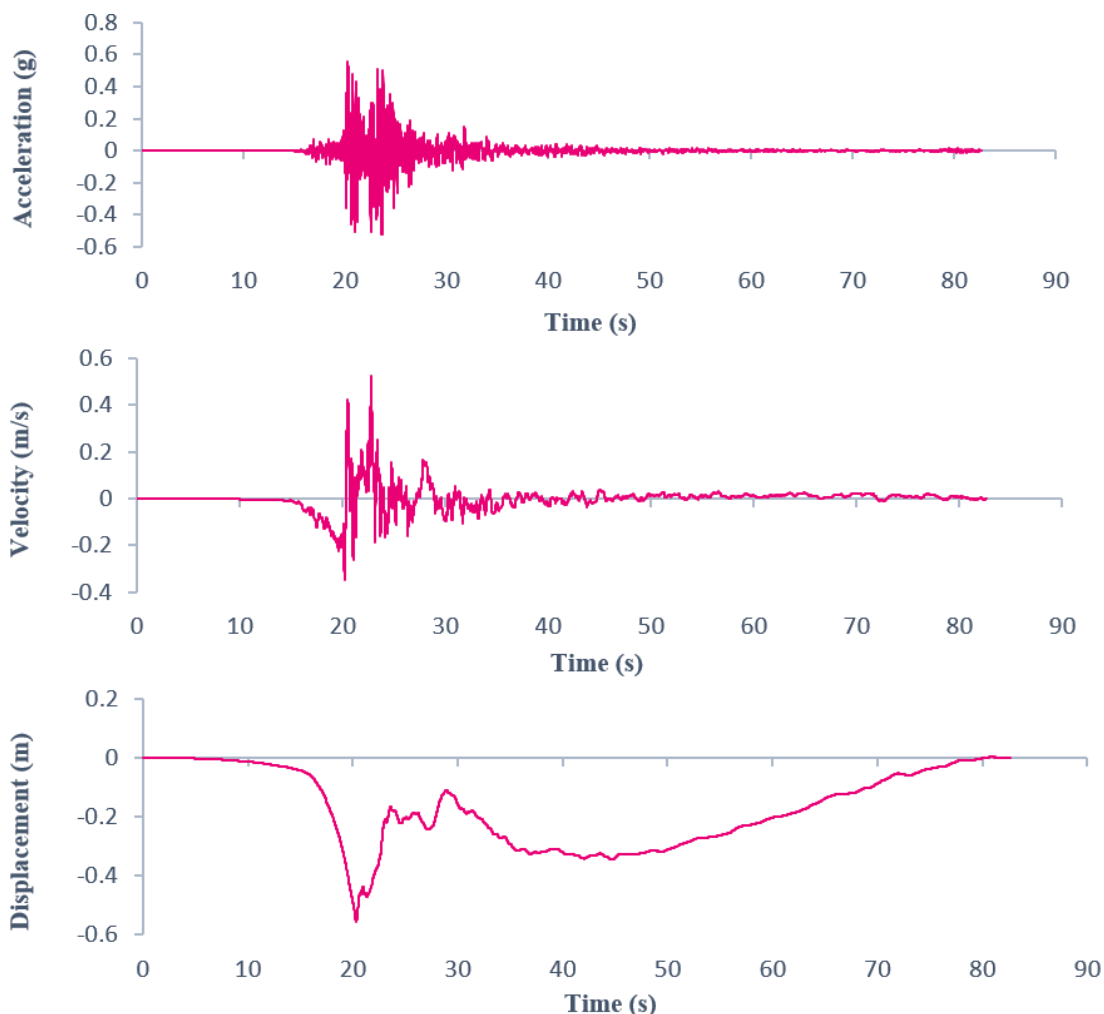
$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j\zeta}{\omega_i + \omega_j} \quad (1)$$

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

در روابط یاد شده،  $\omega_i$  و  $\omega_j$  فرکانس مدهای اول و سوم و  $\zeta$  نسبت میرایی است.

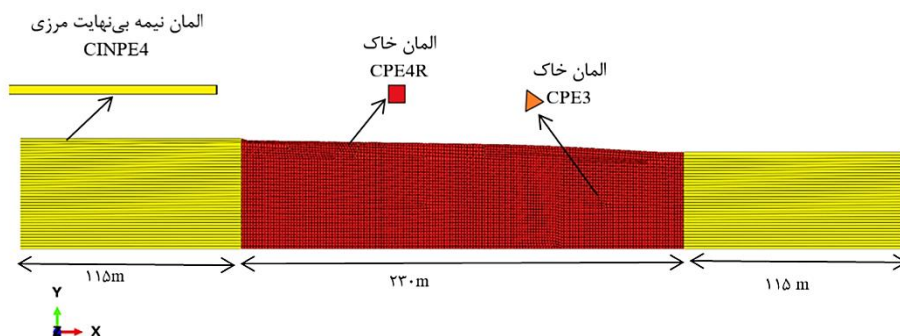
### ۲-۲-۱- بارگذاری و شرایط مرزی

با توجه به فرضیات مسئله که محل اعمال شتاب‌نگاشت روی سنگ بستر فرض شده است؛ نگاشت زلزله سرپل‌دهاب ثبت شده روی سنگ سخت، جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب می‌شود شکل ۵.



شکل ۵: تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابجایی زلزله‌ی سریل‌ذهاب در جهت X.

به منظور جلوگیری از بازگشت امواج لرزه‌ای از مرزهای جانبی مدل محیط خاک به درون محیط خاک، همچنین در نظرگیری فضای نیمه‌بی‌نهایت خاک در مرزهای دور، مرزهای جانبی با استفاده از المان‌های نامحدود مدل‌سازی شده تا امواج لرزه‌ای موجود در مرزها را جذب کرده و از بازگشت موج نیز جلوگیری نماید. نمونه المان‌های محدود محیط خاک و المان‌های نامحدود، محدوده اختصاص یافته این المان‌ها به همراه مش‌بندی کل این سیستم در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است شکل ۶. لازم به ذکر است که مرز زیرین مدل به عنوان سطح سنگ بستر فرض شده است و در هنگام اعمال رکورد به مدل، مرزهای تحتانی پروفیل در جهت افقی باز و در جهت قائم مقید هستند.

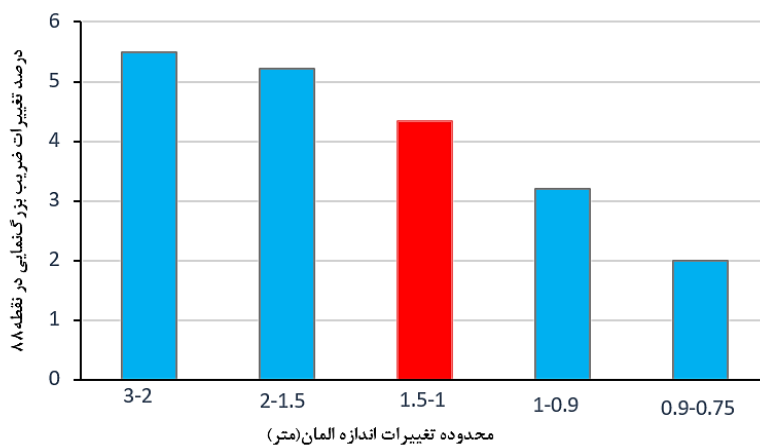


شکل ۶: مش‌بندی و معرفی المان‌های پروفیل خاک منطقه فولادی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس.

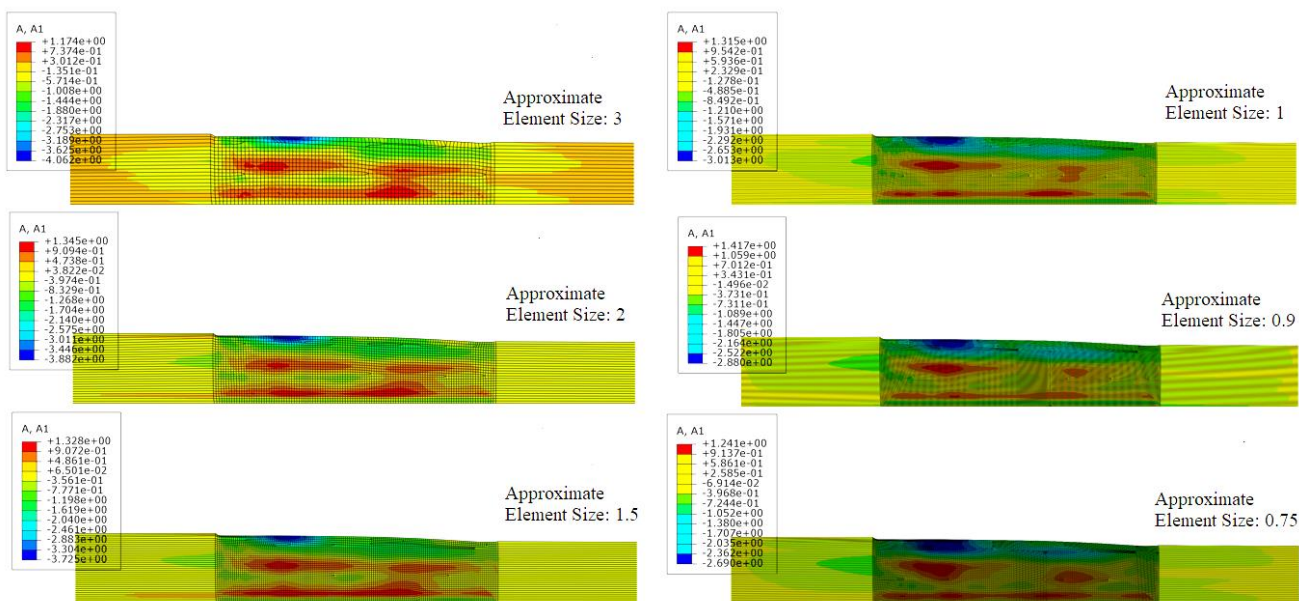


## آنالیز حساسیت مش بندی مدل

در رابطه با نحوه انتخاب نوع المان، می توان با استناد به مراجع و مقالات معتبر بین المللی [۳، ۴، ۷، ۱۲، ۱۳] که تمامی آن ها در شرایط مدل سازی دوبعدی و تحلیل دینامیکی ساختگاه مورد نظر، از المان های چهار گرهی (CPE4R) استفاده نموده اند؛ این موضوع را توجیه نمود. همچنین المان های سه گرهی (CPE3)، به منظور حفظ نظم مش بندی مدل انتخاب شده است. المان های نیمه بی نهایت نیز در نرم افزار آباکوس و شرایط دو بعدی، بایستی (CINPE4) در نظر گرفته شوند. برای دستیابی به تعداد مش های بهینه مورد استفاده در مدل و کاهش درصد خطای حاصل از مش بندی با اندازه بزرگ و جلوگیری از صرف زمان بسیار زیاد تحلیل حاصل از مش بندی بسیار ریز، آنالیز همگرایی مش بندی انجام گرفته است. ابعاد مش بندی در این تحلیل، با شش اندازه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت شکل ۸. شاخص همگرایی نیز درصد تغییرات بزرگنمایی در نقطه ۸۸ پروفیل انتخاب شد. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه مش بندی از مقدار ۱/۵، درصد اختلاف بزرگنمایی در نقطه ۸۸ در بازه های بعدی روند کاهشی یکنواختی را به خود اختصاص داده است و اختلاف ها از مقدار ذکر شده و در بازه های بعد از آن به زیر ۵ درصد می رسد که بسیار جزئی و قابل چشم پوشی است؛ بنابراین اندازه مش انتخابی در این مدل ۱/۵ در نظر گرفته می شود شکل ۷.



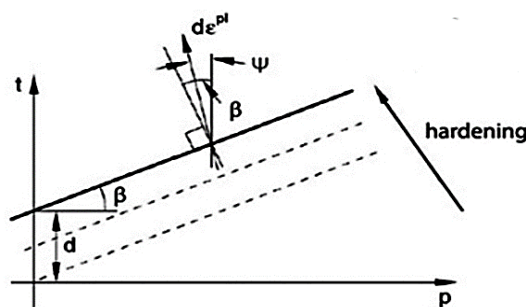
شکل ۷: نمودار آنالیز حساسیت مش بندی.



شکل ۸: تحلیل های انجام شده به منظور تعیین اندازه مناسب مش در نرم افزار آباکوس.

## ۲-۲-۲- مدل خاک

ضخامت قابل توجهی از ساختار زیرسطحی منطقه را خاک دانه‌ای و اصطکاکی تشکیل می‌دهد؛ بنابراین در این پژوهش برای پیش‌بینی رفتار خاک، از مدل دراکرپراگر با توجه به شکل ۹ و شبیه‌سازی با فرض شرایط کرنش مسطح انجام گردید. همچنین دو پارامتر مهم ورودی نرم‌افزار آباکوس یعنی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک از طریق روابط (۳ و ۴) محاسبه شده‌اند.



شکل ۹: صفحه گسیختگی در مدل دراکرپراگر در صفحه p-t.

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}} \quad (3)$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

در روابط یادشده،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک و  $c$ ، چسبندگی خاک است.

## ۳- اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و دقت‌سنجی مدل

برای کالیبره کردن مدل عددی، رفتار مصالح و همچنین شرایط مرزی در تحلیل‌های پاسخ زمین، صحت‌سنجی مدل عددی موردنیاز است. بدین منظور، نتایج تحلیل دینامیکی دره‌ی نرم اوهابا واقع در ژاپن توسط گلاگوتی و همکارانش (۲۰۱۰) مورد استفاده قرار گرفت. شبیه‌سازی تحت اثر امواج SV، بر روی دره‌ای دوزنقه‌ای با عرض ۵۲۰ متر و عمق ۲۴ متر با زاویه شیب ۱۶/۷ درجه نسبت به افق به صورت دوبعدی و با فرض شرایط کرنش مسطح انجام شد. موج ورودی قائم از نوع موج ریکر با فرکانس مرکزی ۳ هرتز و مدل رفتاری خاک به صورت غیرخطی سخت‌شونده کینماتیک در نظر گرفته شده است. مصالح تشکیل دهنده در دره آبرفتی شامل لایه اول، رس سیلتی نرم با سرعت موج برشی  $\frac{771}{s}$  و مقاومت برشی زهکشی‌نشده آن ۵۰ KPa می‌باشد. همچنین مصالح لایه تحتانی از رس ماسه‌ای سخت، با سرعت موج برشی  $\frac{771}{s}$  و مقاومت برشی زهکشی‌نشده معادل ۳۰ KPa تشکیل شده است. مطابق شکل ۱۰، ضریب بزرگ‌نمایی با توجه به مدل یک بعدی سطح زمین آزاد تعریف شده و با پارامتر AG بیان می‌شود که به صورت نسبت حداکثر مولفه افقی شتاب، با در نظر گرفتن تاثیرات هندسه دوبعدی به حداکثر شتاب سطح زمین آزاد محاسبه شده و بر حسب فاصله نقاط، از مرکز دره (X) موردنظر ترسیم شده است [۳].

## ۳-۱- مدل رفتاری خاک در مدل صحت‌سنجی و محاسبه پارامترهای آن جهت معرفی به نرم‌افزار

مدل رفتاری که در مدل‌سازی عددی دره نرم اوهابا استفاده شده است، بر اساس مدل سخت‌شوندگی کینماتیک<sup>۱</sup> با ضابطه گسیختگی وون‌مایسز<sup>۲</sup> بوده که در نرم‌افزار آباکوس در دسترس است. این مدل رفتاری که تحت شرایط زهکشی‌نشده قرار دارد، مستقل از

<sup>۱</sup>Kinematic Hardening Constitutive Model

فشار همه‌جانبه است. البته در این مدل پدیده افزایش فشار آب حفره‌ای به علت وجود شرایط زهکشی نشده نمی‌تواند در نظر گرفته شود، هر چند در این مدل رفتاری اعمال بارگذاری لرزه‌ای سریع رخ می‌دهد تا فرصت زهکشی به مدل ندهد. با توجه به اینکه مدل مربوطه در برنامه آباکوس، یک مدل اصلاح‌شده است و می‌تواند به خوبی برای مصالح ماسه‌ای استفاده شود؛ اما بر اساس توصیه آرمسترانگ<sup>۳</sup> و فردریک<sup>۴</sup> [۱۴]

مدل اصلی و پایه لیمایتری<sup>۱</sup> و شبوش<sup>۲</sup> [۱۵] برای مصالح رسی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. در این مدل، فشار همه‌جانبه با ضابطه شکست وون مایسز که با سخت‌شوندگی غیرخطی کینماتیک ترکیب شده و با قانون جریان پلاستیک<sup>۳</sup> همراه است.

در این مدل رابطه تنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha \quad (5)$$

در این رابطه  $\sigma_0$ ، معادل با تنش در کرنش پلاستیک صفر است و ضریب پس‌تنش  $\alpha$ ، تعیین‌کننده رفتار کینماتیک سطح تسلیم در فضای تنش است و به صورت تابعی از سطح تسلیم ( $F$ ) تعریف می‌شود:

$$F = f(\sigma - \alpha)\sigma_0 \quad (7)$$

در این رابطه  $f(\sigma - \alpha)$  تنش معادل مایسز با توجه به مقدار پس‌تنش و همچنین جریان پلاستیک مرتبط با آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^{pl} \frac{\delta F}{\delta \sigma} \quad (8)$$

که در آن  $\varepsilon^{pl}$ ، معادل نرخ کرنش پلاستیک معادل است.

به طور کلی سطح تسلیم در این مدل از دو مولفه زیر تشکیل شده‌است:

۱- مولفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک که تغییر در تنش معادل را با تعریف اندازه سطح تسلیم به عنوان یک تابع تغییر شکل پلاستیک توصیف می‌کند.

۲- مولفه سخت‌شوندگی کینماتیک که انتقال سطح تسلیم در فضای تنش را توصیف می‌کند، از یک بخش کینماتیک و یک جز انتقال (پس‌تنش<sup>۴</sup>) تشکیل شده‌است. در تعریف مولفه سخت‌شوندگی ایزوتروپیک، جهت بررسی اندازه سطح تسلیم به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک معادل  $\varepsilon^{pl}$  داریم:

$$\sigma_0 = \sigma_0 + Q_{\infty}(1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (9)$$

و در آن  $Q_{\infty}$  و  $b$  پارامترهای مدل هستند که به ترتیب حداکثر تغییر اندازه سطح تسلیم و نرخ تغییر  $\varepsilon^{pl}$  هستند. سطح تسلیم برای  $Q_{\infty} = 0$  اندازه ثابت باقی می‌ماند و مدل به یک مدل سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی تغییر می‌یابد و در این مقاله با ثابت نگه‌داشتن سطح تسلیم، مدل به رفتار سخت‌شوندگی کینماتیک غیرخطی مبدل شده‌است. در بررسی مولفه کینماتیک، سطح تسلیم به صورت زیر بیان می‌شود:

<sup>2</sup> Von-Mises

<sup>3</sup> Armstrong

<sup>4</sup> Frederick

<sup>1</sup> Lemaitre

<sup>2</sup> Chaboche

<sup>3</sup> Associate Flow Rule

<sup>4</sup> Back Stress

$$\alpha = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \varepsilon^{pi} - \gamma \alpha \varepsilon^{pi} \quad (10)$$

که  $C$ ، معادل مدول سخت‌شوندگی کینماتیک اولیه بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \sigma_y = E = 2(1 + \nu) G_0 \quad (11)$$

و  $\gamma$ ، پارامتر تعیین‌کننده نرخ کاهش سخت‌شوندگی کینماتیک با افزایش تغییر شکل پلاستیک است. در مصالح رسی، مقاومت زهکشی نشده ( $S_u$ ) وابسته به فشار همه‌جانبه نیست؛ از این روی حداکثر تنش تسلیم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sqrt{3} S_u \quad (12)$$

از آن جا که  $\sigma_y = \frac{C}{\gamma} + \sigma_0$  است، پارامتر  $\gamma$  بنا به توصیه جرولیموس<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3} S_u - \sigma_0} \quad (13)$$

پارامتر  $\sigma_0$ ، که تنش اولیه نمودار غیرخطی را بیان می‌کند، عموماً در محدوده‌ای  $\lambda$  بین ۰/۱ تا ۰/۳ برابر  $\sigma_y$  در نظر گرفته می‌شود. مطالعات انجام‌شده، نشان می‌دهد که کاهش  $\lambda$  منجر به بهبود دقت مدل عددی می‌شود؛ لذا در این پژوهش مقدار  $\lambda = ۰/۱$  یا  $\sigma_0 = ۰/۱ \sigma_y$  در نظر گرفته شده است. مشخصات لایه‌های خاک مطابق توضیحات ذکر شده [۱۷] و اطلاعات مقاله گلاگوتی و همکاران محاسبه و در جدول‌های ۳ و ۴ مشخص شده است.

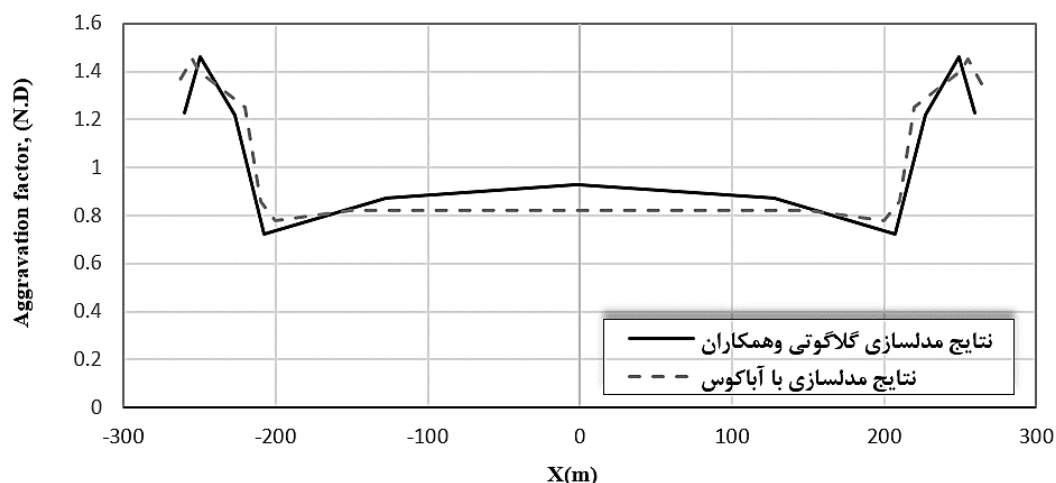
جدول ۳: مشخصات لایه اول در مدل گلاگوتی و همکاران [۳].

مصالح لایه اول (رس سیلتی نرم)					
$E_s$	$G_0$	$s_{Uj}$	$v_s$	$\nu$	$\rho$
(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	(کیلو پاسکال)	(متر/ثانیه)		(کیلوگرم/مترمکعب)
۳۹/۷	۱۵/۳	۵۰	۱۰۰	۰/۳	۱۵۳۰
	$Y$	$c$	$\sigma_0$	$\sigma_y$	پارامتر
		(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	
	۵۱۰/۴	۳۹۷۸۰	۸/۶۶	۸۶/۶	۱

جدول ۴: مشخصات لایه بستر در مدل گلاگوتی و همکاران [۳].

مصالح بستر (رس ماسه‌ای سخت)					
$E_s$	$G_0$	$s_{Uj}$	$v_s$	$\nu$	$\rho$
(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	(کیلو پاسکال)	(متر/ثانیه)		(کیلوگرم/مترمکعب)
۸۵۱/۲	۳۲۰	۳۰	۴۰۰	۰/۳۳	۲۰۰۰
	$Y$	$c$	$\sigma_0$	$\sigma_y$	پارامتر
		(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	(کیلو پاسکال)	
	۱۸۲۰/۲	۸۵۱۲۰۰	۵۱/۹۶	۵۱۹/۶	۱

<sup>۱</sup> Gerolymos



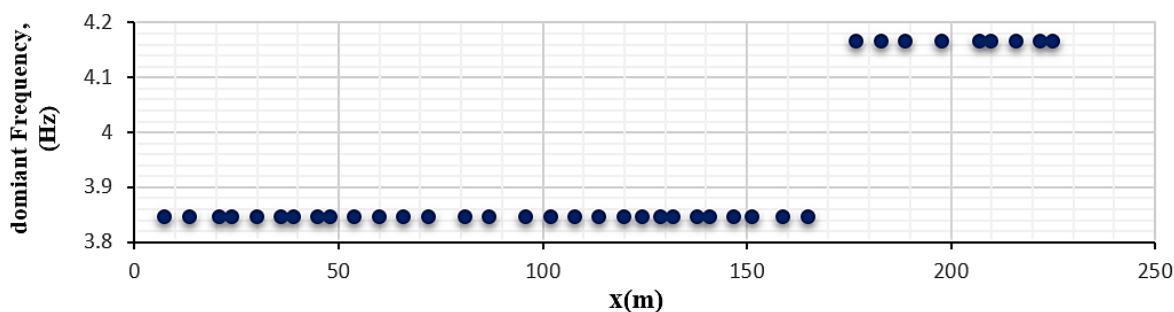
شکل ۱۰: مقایسه رفتار غیرخطی دره آبرفتی دوزنقه‌ای شکل با مطالعات گلاگوتی و همکاران.

در شکل ۱۰، نمودار بدست آمده از مدل شبیه‌سازی شده با نتایج حاصل از مقاله گلاگوتی و همکاران مقایسه شده است؛ همخوانی مناسب بین نتایج، صحت انجام مدل‌سازی را تایید می‌کند.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تعیین پریود غالب دینامیکی

پریود غالب<sup>۱</sup> یکی از پارامترهای مهم لرزه‌ای است که به نوعی نشان‌دهنده محتوای فرکانسی تقریبی موج زلزله است و در صورت نزدیک بودن مقدار آن به دوره زمانی مدهای ارتعاشی اصلی سازه، احتمال رخ دادن پدیده تشدید را افزایش می‌دهد؛ به همین دلیل یکی از نتایج این پژوهش، محاسبه پریود غالب دینامیکی ساختگاه تحت اعمال رکورد زلزله سرپل‌ذهاب است. پارامتر مذکور با در نظر گرفتن ۳۹ نقطه بر روی پروفیل طولی ساختگاه، برابر با مقدار عددی (۰/۲۴-۰/۲۶) ثانیه تعیین شد شکل ۱۱؛ با توجه به این امر ساختمان‌های واقع در این منطقه که دوره تناوب آن‌ها در محدوده زمانی یاد شده قرار گیرد، در معرض خطر پدیده تشدید هستند. همچنین نمودار حاصل از این بخش، کاهش فرکانس غالب ساختگاه تا فاصله ۱۵۰ متری را به وضوح نشان می‌دهد که علت آن به چینه‌شناسی منطقه و حضور لایه‌های آبرفتی تا فاصله ذکر شده باز می‌گردد؛ زیرا رسوبات نرم در مقایسه با سنگ‌های سخت فرکانس غالب کمتری از خود نشان می‌دهند و این مسئله با نتایج محققین گذشته از جمله وانگ و خان‌بابازاده و همکارانش (۲۰۱۸) مطابقت دارد [۵-۶].

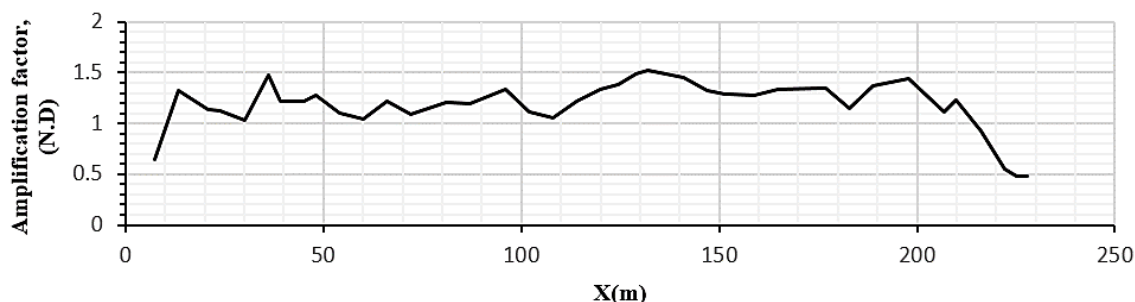


شکل ۱۱: نمودار فرکانس غالب ساختگاه بر حسب طول پروفیل.

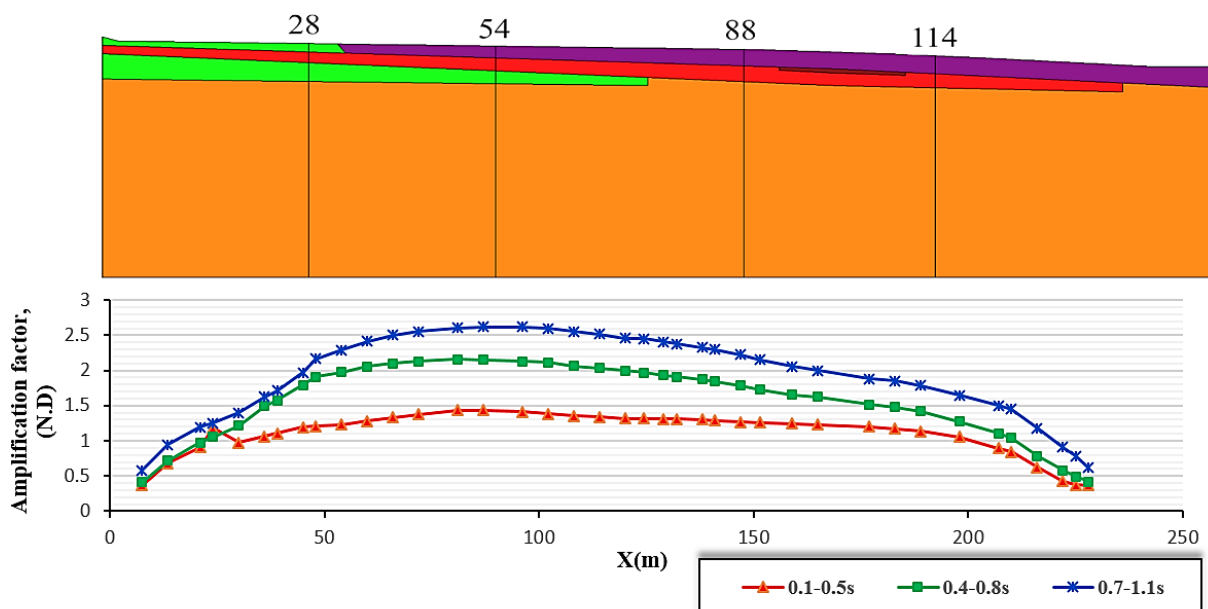
<sup>1</sup> Predominant Period

## ۴-۲- تعیین ضریب بزرگ‌نمایی منطقه فولادی

با توجه به اینکه ضریب بزرگ‌نمایی به نوعی بیانگر میزان تقویت امواج لرزه‌ای، حین عبور از سنگ بستر تا سطح خاک در اثر وجود لایه‌های آبرفتی سست و نامنظمی‌های هندسی منطقه است و این مسئله، باعث افزایش خرابی و خسارت در یک منطقه نسبت به نواحی دیگر (دو منطقه با شدت زلزله یکسان؛ اما ساختگاه متفاوت) می‌شود؛ بنابراین یکی از نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، نمودار بزرگ‌نمایی بر حسب فاصله در کل پروفیل زیرسطحی منطقه فولادی است شکل ۱۲. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر بزرگ‌نمایی برابر با ۱/۵۱۸ در نقطه ۸۸ واقع در ۱۳۲ متری، از سمت چپ پروفیل روی داده است. وقوع حداکثر بزرگ‌نمایی در این نقطه به دو دلیل قابل توجیه است ۱- قرارگیری این نقطه در لبه دره و شیب بیشتر نسبت به سایر نقاط (به شکل ۲ رجوع شود) ۲- اعمال رکورد حوزه نزدیک باعث ایجاد حداکثر بزرگ‌نمایی در نواحی آبرفتی با ضخامت کمتر می‌شود. یکی دیگر از خروجی‌های به‌دست آمده از این تحلیل، نمودار بزرگ‌نمایی بر حسب فاصله اما در سه دوره زمانی متفاوت ۰/۱-۰/۵، ۰/۴-۰/۸، ۰/۷-۱/۱، ثانیه است. نمودار حاصل ضمن معرفی نواحی پرخطر از نظر تاثیرات ساختگاه بر ساخت‌وساز گویای ایجاد حداکثر بزرگ‌نمایی در دوره زمانی ۰/۷-۱/۱ ثانیه با مقدار ۲/۶۲ در فاصله ۸۷ متری می‌باشد. همچنین می‌توان با در اختیار داشتن دوره تناوب ساختمان‌هایی که در این منطقه قرار دارند؛ ضریب بزرگ‌نمایی مؤثر و اثر ساختگاه را در میزان خرابی آن‌ها محاسبه نمود شکل ۱۳.



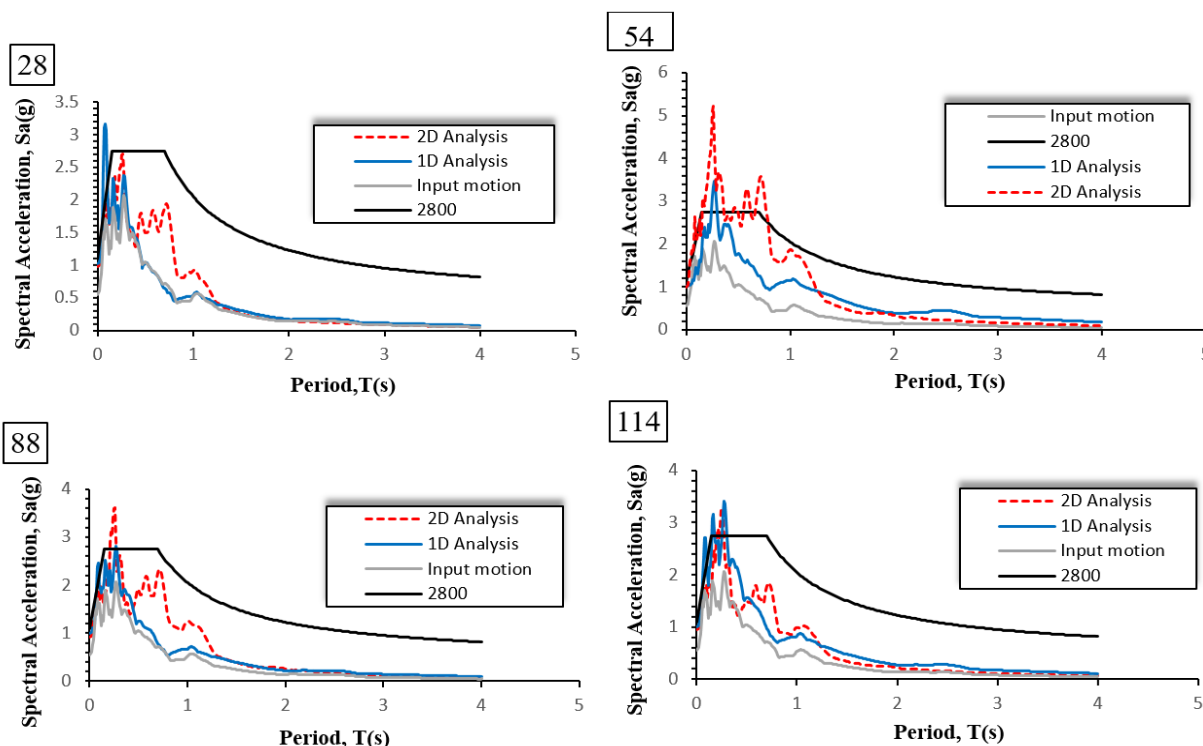
شکل ۱۲: نمودار ضریب بزرگ‌نمایی منطقه بر حسب طول پروفیل.



شکل ۱۳: نمودار ضریب بزرگ‌نمایی منطقه بر حسب طول پروفیل در سه دوره زمانی مختلف.

در این پژوهش، طیف پاسخ شتاب چهار نقطه به صورت دوبعدی و یک بعدی که در موقعیت حساسی قرار گرفته بودند با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ (زمین نوع سوم با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد) مقایسه شد تا جایگاه طیف‌های حاصل نسبت به طیف طرح آیین‌نامه

مشخص شود شکل ۱۴. نتایج نشان داد که حداکثر شتاب طیفی دوبعدی در نقاط ۲۸، ۵۴، ۸۸، ۱۱۴ به ترتیب برابر با مقادیر عددی ۲/۷، ۵/۱، ۳/۶، ۳/۲ می‌باشد. ایجاد حداقل مقدار شتاب طیفی در نقطه ۲۸ در مقایسه با سایر نقاط با توجه به توپوگرافی منطقه و عدم وجود شیب و نامنظمی هندسی بدیهی به نظر می‌رسد. سپس با حرکت به سمت راست پروفیل طولی تغییرات شیب به وضوح دیده می‌شود؛ با توجه به این نکته، مقادیر حداکثر شتاب طیفی دوبعدی نیز در حال افزایش است. قرارگیری نقطه ۵۴ در لبه قسمت شیب‌دار پروفیل، میزان شتاب طیفی دوبعدی مربوط به آن را حداکثر و این امر موجب بالاتر قرار گرفتن طیف پاسخ شتاب این نقطه نسبت به طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ می‌گردد. در نقاط بعدی نیز به دلیل کم شدن شیب منطقه، کاهش مقادیر شتاب طیفی دوبعدی مورد انتظار است که با توجه به نمودارها نتیجه مدنظر به دست آمده است. همچنین مقایسه طیف‌های پاسخ یک بعدی و دوبعدی در این نقاط، تسلط رفتار یک بعدی را نسبت به تحلیل دوبعدی در نقطه ۲۸ نشان می‌دهد که این موضوع، نقش مؤثر لایه‌های آبرفتی بر میزان بزرگنمایی در مقایسه با عامل توپوگرافی را به روشنی نمایان می‌سازد. همچنین با حرکت به سمت راست پروفیل، طیف پاسخ دوبعدی نسبت به طیف پاسخ یک بعدی افزایش چشمگیری دارد که نشان‌دهنده افزایش شیب و تقویت عامل توپوگرافی است و با رسیدن به نقاط انتهایی مدل از جمله نقطه ۱۱۴ باز هم به علت کم شدن اثر شیب، مقادیر طیف پاسخ دوبعدی کاهش و عامل چینه‌شناسی بر نتایج دوبعدی غالب می‌گردد. با مقایسه طیف‌های پاسخ به دست آمده از این تحلیل با طیف طرح آیین‌نامه، می‌توان به این نتیجه دست یافت که طیف پاسخ کلیه نقاط، به جز بخش‌های محدودی و در دوره‌های تناوب کوتاه و زیر یک ثانیه، پایین‌تر از طیف طرح ۲۸۰۰ قرار گرفته‌اند؛ بر همین اساس می‌توان عملکرد آیین‌نامه را در منطقه فولادی، تا حدود زیادی محافظه‌کارانه گزارش نمود. مقایسه نتایج این بخش با گزارش منتشر شده ویرایش پنجم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله نشان می‌دهد که پژوهشگاه، زمین منطقه را نوع II و طیف پاسخ زلزله سرپل‌ذهاب را بالاتر از طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ ترسیم نموده است و سازه‌های بلند را در معرض آسیب شدید اعلام می‌کند؛ در صورتی که مطابق اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های حفاری شده در منطقه و محاسبه متوسط سرعت موج برشی بنابر رابطه (۲-۵) آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، نوع زمین در رده III، طبقه‌بندی می‌گردد. همچنین طیف پاسخ شتاب این زلزله بزرگ در بخش قابل توجهی زیر طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ قرار گرفته است و عملکرد آیین‌نامه را به جز بخش‌های محدودی و به‌طور کلی محافظه‌کارانه و قرارگیری سازه‌های بلند در ایمنی کافی را، گزارش می‌دهد.



شکل ۱۴: مقایسه طیف پاسخ نقاط ۲۸، ۵۴، ۸۸، ۱۱۴ در سه حالت یک بعدی، دوبعدی و بستر و همچنین مقایسه با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰.

## ۵- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش، به صورت خلاصه ارائه می گردند:

- ۱- پریود غالب دینامیکی منطقه فولادی (۲۶-۰/۲۴ ثانیه) محاسبه شد؛ بنابراین سازه‌هایی که دوره تناوب آن‌ها در این محدوده زمانی قرار گیرد، در معرض خطر پدیده تشدید هستند.
  - ۲- حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی در نقطه ۸۸ برابر با مقدار عددی ۱/۵۱۸، بدست آمده است. وقوع حداکثر بزرگ‌نمایی در این نقطه به دو دلیل قابل توجیه است ۱- قرارگیری این نقطه در لبه دره و شیب بیشتر نسبت به سایر نقاط ۲- اعمال رکورد حوزه نزدیک باعث ایجاد حداکثر بزرگ‌نمایی در نواحی آبرفتی با ضخامت کمتر می‌شود.
  - ۳- طیف بزرگ‌نمایی در سه دوره زمانی متفاوت نشان می‌دهد که در این زلزله ساختمان‌های با دوره تناوب (۱/۱-۰/۷) ثانیه، بیشتر از سایر دوره‌ها، تحت تاثیر اثرات ساختگاه و بزرگ‌نمایی قرار گرفته‌اند.
  - ۴- مقایسه نتایج بدست‌آمده از طیف پاسخ شتاب چهار نقطه روی سطح خاک که در موقعیت حساسی قرار گرفته بودند با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، نشان داد که آیین‌نامه ۲۸۰۰ در وقوع این زلزله به‌طور کلی محافظه‌کارانه عمل نموده است. همچنین ساختمان‌های با دوره تناوب بلند از ایمنی لازم در این زلزله برخوردار بوده‌اند. براساس اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های حفاری شده در منطقه و محاسبه متوسط سرعت موج برشی مطابق رابطه (۲-۵) آیین‌نامه مذکور، زمین منطقه نوع سوم در نظر گرفته می‌شود که تمامی نتایج این بخش برخلاف گزارش منتشر شده ویرایش پنجم پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله است.
  - ۵- در میان عوامل مؤثر بر اثر ساختگاه از جمله چینه‌شناسی و توپوگرافی، با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در این منطقه، می‌توان عامل توپوگرافی (شیب) را به عنوان مؤثرترین عامل بر ضریب بزرگ‌نمایی در حوالی نقاط ۵۴ و ۸۸ معرفی نمود. بنابراین لزوم انجام مدل‌سازی دوبعدی و توجه به امر بهبود کیفیت ساخت‌وساز در نواحی معرفی شده نسبت به سایر بخش‌ها ضرورت می‌یابد. همچنین محققان زیادی از گذشته تاکنون بر نقش پررنگ عامل شیب یا توپوگرافی در افزایش بزرگ‌نمایی تأکید دارند. در این پژوهش نیز با افزایش شیب، محدوده تغییرات بزرگ‌نمایی در لبه دره پروفیل منطقه، بین مقادیر ۱/۱ تا ۱/۵۱۸ محاسبه شده است.
- در انتها باید خاطر نشان کرد که در دره‌های رسوبی آبرفتی به دلیل ایجاد میدان‌های پیچیده امواج، وجود لایه‌های متعدد و مختلف آبرفتی با اختلاف سختی‌های متفاوت و همچنین شکل هندسی پیچیده، نمی‌توان به نتایج تحلیل‌های یک بعدی ساختگاه اکتفا نمود. لذا توصیه می‌شود در کنار بزرگ‌نمایی حاصل از مدل‌سازی یک بعدی، از تحلیل‌های دوبعدی و در صورت لزوم سه بعدی نیز در این گونه ساختگاه‌ها استفاده شود. همچنین برای بهبود کیفیت طراحی سازه‌ها و کاهش خسارت‌های آتی در برابر وقوع زلزله‌های مخرب و با دوره بازگشت طولانی نظیر زلزله‌ی سرپل‌ذهاب علاوه بر رعایت مفاد استاندارد ۲۸۰۰، بهره‌مندی از مطالعاتی در خصوص اثرات ساختگاه و نتایج این پژوهش نیز پیشنهاد می‌گردد.

## مراجع

- [1] International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. (2017). Earthquake Report of Aban 21st year 1396 in Sarpol -e-Zahab, Kermanshah Province. Fifth Edition, Volume One - Chapter One - Earthquake Seismic, Seismic and Modeling Strong Earth Motion, (pp. 16-17).
- [2] Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J., and Idriss, I. M. (1976). Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(4), 1323-1342.



- [3] Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., Tazoh, T. and Gazetas, G. (2010). Seismic wave propagation in a very soft alluvial valley: sensitivity to ground-motion details and soil nonlinearity, and generation of a parasitic vertical component. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 3035-3054.
- [4] Pelekis, P., Batilas, A., Pefani, E., Vlachakis, V., and Athanasopoulos, G. (2017). Surface topography and site stratigraphy effects on the seismic response of a slope in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Mw6.4 earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 538-554.
- [5] Khanbabazadeh, H., Iyisan, R., Ansal, A., and Zulfikar, C. (2018). Nonlinear dynamic behavior of the basins with 2D bedrock. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 108-115.
- [6] Wang, L., Wu, Z., Xia, K., Liu, K., Wang, P., Pu, X., and Li, L. (2018). Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- [7] Pagliaroli, A., Pergalani, F., Ciancimino, A., Chiaradonna, A., Compagnoni, M., de Silva, F., ... and Luzi, L. (2019). Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case-histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-37.
- [8] Regulations for designing buildings against earthquakes (Standard 2800)., (2005). Third Edition. Iran: Research Center for Roads, Housing and Urban Development , (pp. 11).
- [9] Regulations for designing buildings against earthquakes(Standard2800)., (2013). Fourth Edition. Iran: Research Center for Roads, Housing and Urban Development , (pp. 84).
- [10] Islamic Republic of Iran Housing Foundation. (2018). Performance Report and Soil Mechanics Studies in Earthquake-hit Areas of Sarpol-e-zahab Country .Tehran.
- [11] Ryan, K. L., and Polanco, J. (2008). Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings. *Journal of structural engineering*, 134(11), 1780-1784.
- [12] Sun, C. G., and Chung, C. K. (2008). Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(12), 1028-1044.
- [13] Riga, E., Makra, K., and Pitilakis, K. (2018). Investigation of the effects of sediments inhomogeneity and nonlinearity on aggravation factors for sedimentary basins. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 110, 284-299.
- [14] Armstrong, P. J., and Frederick, C. O. (1966). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect (Vol. 731). Berkeley: Central Electricity Generating Board and Berkeley Nuclear Laboratories, Research & Development Department.
- [15] Chaboche, J. L., and Lemaitre, J. (1990). *Mechanics of solid materials* (p. 556). Cambridge: Cambridge University Press.
- [16] Gerolymos, N., Gazetas, G., and Tazoh, T.(2005). Static and dynamic response of yielding pile in nonlinear soil. In *Proceedings of 1st Greece– Japan Workshop: Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations* (pp. 25-35).
- [17] Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., and Gazetas, G.(2011). Simplified constitutive model for simulation of cyclic response of shallow foundations: validation against laboratory tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1154-1168.